

CURSO DE HISTÓRIA DAS IDEIAS EM FÍSICA

João Luís Andrade e Silva

Versão não revista pelo autor, elaborada a partir dos apontamentos disponibilizados a Ana Simões na década de noventa

1.

Há quase cinco mil milhões de anos que a Terra roda em torno do Sol, o qual é apenas uma estrela banalíssima entre os milhares de milhões de outras que existem numa galáxia não menos banal. Os telescópios já permitiram identificar muitos milhões de galáxias, de modo que a ciência ensina-nos a ser modestos: a escala cosmológica, no espaço e no tempo, a aventura humana não tem nenhuma importância.

Sabemos cada vez melhor que a vida surgiu cedo na Terra graças a um conjunto de circunstâncias fortuitas: as condições físicas e químicas então reinantes neste planeta propiciaram a formação de moléculas orgânicas de complexidade crescente, e das cadeias moleculares de proteínas e de ácidos nucleicos a longa paciência de tempo fez o resto. Contudo, só recentemente nos apercebemos de quão escandalosa se afigura, em termos físicos, a mera existência de organismos vivos. Uma das leis fundamentais da Física, o segundo princípio da Termodinâmica exprime a tendência natural para a desordem medida pelo crescimento da entropia e, assim, parece surpreendente que se tenham podido formar e perpetuar seres tão prodigiosamente estruturados, comportando-se como se fossem dotados de um "projecto" de sobrevivência. A realização dessa finalidade ilusória só se tornou possível graças à capacidade essencial dos seres vivos de absorver do meio ambiente não sóente energia mas "orden" - quer dizer, entropia negativa, neguentropia - as quais, afinal, provêm sempre da radiação solar. Foi o Sol que permitiu a eclosão da vida na Terra, de onde ela desapareceria inexoravelmente com o envelhecimento da estrela que nos aquece.

Partindo de organismos ainda mais simples do que uma simples célula, a vida alcançou na Terra durante os tempos geológicos uma magnífica diversidade que só resultou, como disse Jacques Monod retomando as palavras de Demócrito, "do acaso e da necessidade". A lei cega do acaso foi determinante as mutações que o meio exterior provocava no património genético de alguns seres, enquanto a dura lei da necessidade ia aceitando quais dessas mutações favoreciam a sobrevivência e, seleccionando os mais bem adaptados, criava paulatinamente espécies cada vez mais diversificadas. A escala de uma vida humana, essa diversificação processou-se com um ritmo extremamente lento: decorreram mais de trezentos milhões de anos desde que surgiram os vertebrados, há uns sessenta que existem mamíferos, os antropóides contam uns quinze milhões de anos, e os homínidos já apareceram há uns quatro ou cinco. Nesta escala, os tempos verdadeiros avô só nasceram realmente ontem, pois há cinquenta mil anos o "homo sapiens sapiens" ainda não existia.

Na cadeia de transformações diversas sofridas pelos antropóides torna-se muito arbitrário fixar momentos de ruptura, o que levou a afirmar que "ao contrário dos homens, o Homem não tem data de nascimento". Achados arqueológicos importantes e investigações cuidadas da psicologia e da sociologia dos primatas e outros fizeram progredir muito, nas últimas décadas, a compreensão da passagem do antropóide ao homem e, assim, embora subsistam ainda lacunas e incertezas importantes, já dispomos de um esboço credível do processo de hominização. Tudo teria começado há uns milhões de anos, quando a pressão demográfica resultante de modificações climáticas que faziam necessar a floresta obrigou alguns bandos de antropóides a tentar sobreviver na savana herbácea. Foi provavelmente na região dos grandes lagos africanos que eles abandonaram as árvores, das quais obtinham alimento e abrigo,

vida: $4,6 \times 10^9$ anos
vida: 4×10^9 anos
organismos multicelulares: 3×10^9 anos
organismos sexuais: 2×10^9 anos
- "Ginn" pg 43-46

ácidos nucleicos e proteínas ácidos nucleicos

2. Princípio Termodinâmica

neguentropia

milhões de anos
mamíferos
antropóides
145 milhões
homínidos
50000 anos
homo sapiens

hominização

para se adaptarem a uma existência de caçadores em terreno descoberto onde se passavam a explorar ataquas dos grandes carnívoros. Mal aparelhados de meios ofensivos e defensivos, esses "caçadores-cacalôs" viram-se então forçados a aproveitar plenamente os poucos truques de que dispunham: uma mão hábil, desenvolvida pela vida arborícola, e um cérebro já poderoso.

Nesse tal contexto, entende-se que a seleção natural (tanto mais eficaz quanto as formas eram pequenas) fizesse virar espécie com uma posição cada vez mais erecta, favorável à comida, com uma mão cada vez mais apta para trabalhos de precisão, com um cérebro cada vez maior. Afinal de contas, acréscimos da força muscular ou da robustez das mandíbulas de pouco teriam servido porque, nessa via, o antropóide não tinha capacidade competitiva. Uma descoberta notável feita no Quênia por Leakey em 1972 demonstrou que há quase três milhões de anos já existia um ser, o género "Man 1470", que se mantinha direito, fabricava instrumentos e possuía uma capacidade craniana da ordem de 850 cm³, quase dupla da dos chimpanzés actuais.

Key
72
1470
3
20 cm³
chimpanzé

Há um milhão de anos, todo o velho Mundo era habitado por homínidos muito menos frustes, os pithecantróides, cujo crânio já atingia o 1150 cm³, dominavam o fogo, desenvolveram indústrias liticas de bifaces e lascas, e talvez possuissem uma verdadeira linguagem. Deles provieram, muito mais tarde, os primeiros "homo sapiens", os neandertalenses, com um crânio das dimensões do novo e que, no culto do morto, manifestavam atitudes tipicamente religiosas. Mas foi só há poucas centenas de séculos que as antiquíssimas sociedades de caçadores atingiram o apogeu com os homens antepassados directos, os "sapiens sapiens", e as magníficas pinturas rupestres de Altamira ou de Lascaux testemunham o nível cultural por eles alcançado.

Emmanuel

Anatoli,
"Mais origines
de l'art et
de l'industrie
de l'esprit
humain"

2.

Embora reconhecendo que o processo de hominização foi acompanhado por um enriquecimento notável do património cultural, costuma-se considerar que a passagem do antropóide ao homem foi essencialmente uma transformação biológica marcada pelo aparecimento sucessivo de espécies cujo cérebro tinha um volume e uma complexidade crescente. Ora a verdade é que se pode assim falsear a perspectiva: a complexificação cerebral foi de certo indispensável ao advento de novas estruturas socio-culturais mas, sem elas, não teria sido viável a sobrevivência de criaturas cada vez mais diferentes do antropóide inicial. Para tomar só um exemplo, sabe-se que o acréscimo de volume da caixa craniana exigia todo um conjunto de modificações anatómicas, nomeadamente o aligeiramento da mandíbula do antropóide. Quer isto dizer que o aumento das capacidades intelectuais teve custos significativos na luta pela sobrevivência, pois uma mandíbula mais frágil implicava menor capacidade de combate e, com a continuação do processo, até acabava por dificultar a mastigação e a assimilação da carne crua das presas. Mas essas novas espécies puderam efectivamente virar preda, entretanto, tinham aprendido cada vez melhor a fabricar armas, a combater em grupo, a utilizar o fogo para se defenderem ou para preparar o alimento. Sem o enriquecimento cultural paralelo, a evolução biológica para a hominização teria desembocado num beco sem saída.

Capacidade
intelectual
unha
ai defesas
hádicas
do indivíduo

De facto, foram as aquisições culturais que transformaram paulatinamente a história natural nessa grande aventura à qual chamamos a história humana. As potencialidades específicas de um animal tão profundamente singular haviam sobredito de se traduzir em termos culturalizantes, e o acréscimo do legado entre as gerações sucessivas não correspondeu a pelagens mais espessas contra o frio ou dentes mais afiados para a luta, mas

II. Começo assim: 2

sim a melhores técnicas de fabrico de vestuário ou de armas. A cultura foi, desde o começo, uma componente essencial da história humana, e como essa cultura não podia deixar de ter uma faceta de índole científica, podemos concluir que a ciência é tão velha como a própria humanidade.

A ideia de que o pitecantropo, esse espécie de homem-macaco possuía conhecimentos científicos ou, se se quiser aboçar as palavras, conhecimentos proto-científicos, pode afigurar-se ridículo. Diz-se-a que ele nem sequer elaborara o conceito de lei natural e só dispunha de informações muito vagas e confusas sobre o mundo exterior. Mas tudo depende, afinal, da definição de ciência que adoptarmos, e ninguém pretende sugerir que ele possuía um saber comparável ao nosso - do qual estamos tão orgulhosos mas que não fará grande figura daqui a uns milhares de anos. De qualquer modo, será assim tão evidente que os homens primitivos não utilizavam implicitamente algo de semelhante ao conceito de lei natural? Teriam eles podido sequer sobreviver se assim não fosse? Quanto à debilidade dos seus conhecimentos, teremos tão-só de imaginar o que aconteceria, e porque, se um grupo de "civilizados" fosse posto numa situação análoga àquelas que esses "selvagens" affrontaram com tanto êxito.

A tese polémica defendida aqui de que as origens da ciência se diluem nas origens do próprio homem não pode ser rejeitada duplamente. Não houve, como é óbvio, desde o início uma ciência estruturada semelhante à que existe agora - e perde quanto? - mas nem por isso deixam de haver um conhecimento real e objectivo da natureza incluindo até formas rudimentares de pensamento abstracto. Ainda estamos muito mal informados sobre essa história, sobretudo quanto às etapas fascinantes do começo, mas vale a pena assinalar o papel que nela seguramente assumiram quer a palavra quer as técnicas.

Se se continua a discutir quanto é que os homens adquiriram uma linguagem digna desse nome, ninguém duvida da importância crucial da palavra na formação da cultura e do saber. Sem a palavra tornar-se-ia quase impossível transmitir, comparar e analisar as experiências individuais, que assim deixariam de poder ser assimiladas pela comunidade e, porventura, integradas no seu património. Ven daí, aliás, que os avanços culturais, científicos ou técnicos originem a aparição de palavras novas, tradução social dessas inovações; a história das palavras, a data do seu nascimento, o significado que se lhes atribuem, a frequência da sua utilização, são instrumentos privilegiados da arqueologia das culturas. Nunca as sociedades humanas teriam podido ultrapassar estação muito primitiva sem essa maravilhosa invenção de uma linguagem rica e plástica.

Ora, tanto ou mais ainda do que da palavra, a civilização e a ciência foram filhas das técnicas, da prática, sobretudo dessa prática produtiva que assegurava a sobrevivência quotidiana. O homem ao qual chamamos "sapiens" só se foi tornando merecedor dessa honra porque nunca deixou de ser, antes de mais, um homem "faber". Se o cérebro comanda a mão, foram as formidáveis capacidades da mão que estimularam o desenvolvimento das potencialidades do cérebro, e o processo de hominização não foi somente a história de um animal cada vez mais inteligente, foi também a história de um animal cada vez mais hábil. E numa perspectiva mais restrita, como teremos aliás ocasião de referir, o nascimento das ciências, mesmo o daquelas que adquiriram as perspectivas mais desinteressadas, resultou em regra de encontrar soluções para problemas de índole eminentemente prática.

Ciência → consequência da resolução de problemas práticos

ciência é
muito a
humanidade

multi
nigunça
símbolo das
palavras
a...
conceito
comunicação
de
saberes

uma "sapiens"
porque
no "faber"

3.

volução
neolítica

O progresso gradualmente menos lento realizado pelos homens durante o Paleolítico Superior conduziu a uma fase de transformações rápidas, de mudanças qualitativas - a nova revolução. Há nove ou dez mil anos, comunidades de caçadores habitando na Ásia Ocidental inventaram a agricultura e a pecuária, desencadeando assim um processo irreversível que de agora em diante garantiria a civilização urbana. Durante milhares de séculos, o homem subsistia graças aos recursos que a natureza espontaneamente lhe oferecia, raízes ou frutos para colhar, peixes para caçar ou pescar; doravante, com as inúmeras possibilidades oferecidas pela cultura da terra e a domesticação dos animais, a quantidade de alimentos disponível passou a depender quase só do seu próprio esforço. A substituição de uma economia de recolha por uma economia produtiva assegurou as condições para o advento de uma era realmente nova na história humana.

A revolução neolítica propagou-se como uma vaga que acabou por alcançar, três ou quatro milénios mais tarde, as planícies da China e da Europa, mas já então toda a área entre as margens do Índico e as margens do Cáspio estava povoada de aldeias de camponeses. Cre-se que todas essas comunidades aldeãs só praticavam uma certa divisão sexual do trabalho, os homens ocupando-se da pastoreia sem por isso desdenharem a actividade tradicional de caçadores, enquanto as mulheres se encarregavam do artesanato e da agricultura, na qual o seu papel só diminuiu com a invenção do arado. Constituído grande famílias patriarcais integradas em clãs totémicos, esses camponeses neolíticos tinham adquirido uma segurança e um conforto materiais inimagináveis na fase precedente, e a sua vida quotidiana tornara-se efectivamente muitíssimo melhor.

Para tentar exprimir a importância do progresso técnico-científico responsável por uma tão grande melhoria da condição humana o grande pre-historiador que foi Gordon Childe inventou onze descobertas fundamentais realizadas durante este período, número que se lhe afigura tanto mais significativo quanto, a seu ver, só quatro invenções de importância comparável datam da revolução urbana, e quatro outras se podem atribuir aos vinte séculos seguintes, o da Idade do Bronze, que precedem o começo da civilização helénica. Se os progressos realizados até então nomeadamente no Paleolítico Superior, tinham sido consideráveis, esse honroso balanço não pode ser comparado aqui ao que o Neolítico se mostrou capaz de realizar.

Antes de tudo o mais, há que referir a agricultura cuja viabilidade não pressupõe somente a ideia considerável de investir agora sementes e trabalho na expectativa de um benefício a colher muito mais tarde. De facto, a secundariedade de tais práticas ^{exigiu} conhecimentos das espécies a cultivar, esforços persistentes para melhorar essas espécies por selecção, informações sobre as épocas propícias às diversas sementeiras e, evidentemente, técnicas de fabrico de enxadas, foices e demais instrumentos necessários para o labor da terra. As principais culturas neolíticas do Velho Mundo foram o cereais, a cevada e sobretudo o trigo; o arroz, originariamente uma gramínea de montanha, só muito mais tarde se tornaria importante no Oriente, após a descoberta indiana de que a sua cultura em meio aquoso provocava um enorme acréscimo de rendimento. Quanto ao milho, como aliás a batata, o tomate ou o feijão,

América

Flechas o
da de uso
de pesca
indiana

6
Flechas e
arcos,
agulhas de
coser,
redes de
pesca,
alvarcos,
indústria
elétrica

"máquinas simples", isto para não falar do aperfeiçoamento nas indústrias técnicas as quais permaneciam no pensamento. Mas este honroso balanço é eclipsado por aquilo que o Medievo realizou.

Antes de mais, há que referir a agricultura, cuja viabilidade se presunha somente a ideia corrente de investir hoje trabalho e semente, na expectativa de benefício a colher meses mais tarde. A fecundidade de tais práticas exigia bons conhecimentos das espécies a cultivar, esforços continuados para melhorar essas espécies por seleção das estirpes, informações quanto às épocas propícias às diversas sementeiras e, evidentemente, técnicas de fabrico de enxadas, foice e demais instrumentos requeridos para o labor da terra. As principais culturas neolíticas no Velho Mundo foram o cereais, a cevada e sobretudo o trigo. O arroz, originariamente uma gramínea de montanha, só muito mais tarde se uniu a troncos fundamentais no Oriente, após a descoberta indígena de que a sua cultura em meio aquoso provoca um enorme aumento de rendimento. Quanto ao milho, espinaçola e batata, o tomate e o feijão, foram produtos da revolução neolítica ocorrida no continente americano, e só chegaram à Europa após as grandes viagens marítimas do Renascimento. Mas as culturas do neolítico incluíam igualmente fava, azeitona, cenoura ou ameixa, sem esquecer o linho, e pode-se afirmar também que a descoberta da fermentação permitiu obter a primeira das bebidas alcoólicas, uma espécie de cerveja cujo sucesso foi imediato.

Parece inútil insistir nas dificuldades da domesticação de animais selvagens em que muitos esforços (por exemplo, as tentativas egípcias de utilização de gazelas) se soldaram por fracasso. Neste processo, foi a criação permanente dos animais nem ao menos como reprodutores que permitiu finalmente obter espécies dóceis, mas numa primeira fase só se dispunha de cabras, ovelhas, porcos e bois; já então o cão era voltar companheiro dos homens, enquanto o cavalo, o camelo e as aves de capoeira só mais tarde se juntaram à lista. A força muscular dos animais de bom porte foi, aliás, das primeiras fontes de energia ao dispor dos homens; com a invenção do arado foi utilizada na lavoura, arte decida permitiu uma grande expansão das superfícies cultivadas, mas também contribuiu para a invenção do carrão, o qual coesão provavelmente por ser uma espécie de trend ao qual se atrelavam cães, mas evoluiu de presa para o carrão de rodas puxado por bois ou cavalo. Talvez fosse até neste contexto que surgiu a roda, só por si uma invenção importantíssima.

Outro progresso de grande interesse foi a invenção do barco à vela, e os homens pré-históricos não eram fracos marítimos; foi por via marítima que a economia neolítica se difundiu no Mediterrâneo, avansando de ilha em ilha ou ao longo das costas até a Península Ibérica. E entre as grandes descobertas temporâneas contam-se ainda a imigração, a tecelagem, o fabrico de tijolo e vidro, e uma metalurgia do cobre ainda rudimentar.

Com a sua conclusão natural, as sociedades urbanas, a revolução neolítica contribuiu um dos mais formidáveis acontecimentos de toda a história humana, na qual se desentia uma outra transformação de importância comparável, a revolução científica industrial iniciada há dois séculos e que ainda prossegue. Entre estes dois grandes marcos, muita coisa aconteceu mas a vida quotidiana dos homens não era significativamente diferente no âmbito da civilização ou, por exemplo, na Europa do século XVIII: a alimentação era de

mesmo tipo, as habitações, não diferiam muito, viajava-se de barco à vela ou de carro de cavalo, havia a mesma impotência ante a dor e a doença, um fausto análogo rodeava os poderosos enquanto a mesma fome ameaçava os humildes. Hoje, pelo menos para uma fração da humanidade, tudo isso já é muito diferente, e anteriormente nunca se conhecera algo de comparável.

Seria pois bastante ridículo desprezar o cabedal de saberes e as capacidades de acção de dispor dos homens no tempo da revolução neolítico-urbana. Todavia, com os padrões actuais, os conhecimentos científicos de então afiguram-se tão exiguos que afetece perguntar se já havia ciência. George Barton, o mestre americano da historiografia científica respondeu a essa pergunta afirmando que "embora uma leguoa com duas polegadas de altura não seja muito espectacular, nem por isso deixa de ser uma leguoa". Lembrou ele, assim, que quer sejam árvores magníficas que atingem 150 metros de altura começam sempre por ser minúsculas, sem que a sua natureza tenha nada a ver com as dimensões. De forma análoga à leguoa gigante, a ciência teve de começar por ter só duas polegadas de altura...

De informações indirectas e de inferências antropológicas obtemos uma falida ideia do saber de natureza científica do homem neolítico, em particular no domínio da matemática e da astronomia. Assim, temos a certeza de que ele sabia contar e, pelo menos para os primeiros dígitos, apreendera claramente a ideia de número "puro" - o que há de comum entre três flechas, três pedras ou três alvos. Um tal número "três" foi concebido como "dois mais um", e decerto também se chegou à ideia de "dois" como "três menos um", o que significa terem sido aprendidas as concepções de adição e subacção. Quanto aos conceitos de multiplicação e divisão, acham-se sem dúvida numa fase mais rudimentar embora, em todo o caso, com o estímulo das necessidades da prática, já se conhecem algumas fracções muito simples como $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$.

Acreditamos que já então se tinham concebido as ideias implícitas no sistema de numeração porque, de outro modo a própria linguagem tornava-se de uma dificuldade extrema, cada número exigindo a memorização de uma palavra diferente. Os deuses, que foram chamados a primeira máquina de calcular, desempenharam naturalmente um papel importante na escolha das bases numéricas adoptadas pelos diversos povos, e daí resultou afinal a adopção da base 10 pela nossa civilização. Contudo, se essa escolha ~~foi~~^{parece} ter sido, desde o início, a mais frequente, nem por isso foi universal, e grandes culturas, como a dos celtas na Europa ou a dos maias na América, utilizaram a base 20; também foram comuns os sistemas de numeração com base duplas (5 e 10, 5 e 20 etc) práticas que os mesopotâmicos não perpetuaram entre nós; ainda hoje atribuímos 60 minutos à hora e 360 graus ao círculo.

Nada sabemos da criatividade geométrica dos homens primitivos, brilhantemente ilustrada pela ornamentação das cerâmicas, mas é indispensável fazer uma breve referência ao problema fundamental do estabelecimento do calendário. Embora signifique incertezas de avaliar os seus conhecimentos dos movimentos dos astros, sabemos todavia que desde épocas remotas utilizaram a Lua para medir o tempo; a explicação desse facto reside decerto na facilidade de observação do ciclo lunar, em contraste com a do ciclo solar, isto embora a periodicidade anual não lhes pudesse ter escapado, mas devia ser apenas apreendida através dos ritmos biológicos das plantas e animais.

Este pobre balanço dos saberes de ciência distorcido pelas enormes carencias da nossa informação já revela todavia imensas potencialidades. Mas não é de estranhar que as preocupações humanas estivessem então centradas no "saber fazer", muito mais do que no vero "saber", que a ciência ~~desaparece~~^{havia} surgiu como uma espécie

de sub-produto modesto da actividade pratica ou disfrutar de grande valor próprio. Era necessário crescer por ^{caracter} ~~desenvolvimento~~ das humanas segurança e lazeres para que pudessem vir os tempos em que o conhecimento mais ou menos desinteressado pudesse adquirir outras ambições. Nos fins da Pré-história havia ainda muitas outras tarefas mais ingentes, a que seitas mais.

4.

No quinto milénio antes da nossa era, algumas comunidades neolíticas começaram a evoluir para outro estágio ao qual convençionalmente chamamos a civilização. Na planície aluvial entre o Tigre e o Eufrates, que os antigos denominavam Sumer e, quase ao mesmo tempo, ao longo do vale do Nilo, surgiram em poucos séculos estados centralizados onde havia autênticas cidades e classes sociais hierarquizadas. Estas sociedades, que depresso inventaram a escrita e aprenderam a utilizar convenientemente os metais, limitaram-se de algum modo a aproveitar, em condições naturais muito favoráveis, todas as virtualidades das estruturas neolíticas, mas mesclaram-nas tão diferentes das comunidades aldeias precedentes, o seu aparecimento corresponde a mudanças tão espectaculares, que os conhecendo como a marca da origem da História civilizada.

O que havia em comum entre Sumer e o vale do Nilo era uma enorme fertilidade permanente dos campos: enquanto os camponeses da Europa medieval recolhiam três ou quatro grãos de trigo por cada semente lançada à terra e as técnicas mais avançadas nos fins do século XVIII asseguravam benefício da ordem de dez para um, os agricultores sumérios e egípcios obtinham realmente frutos da ordem de cinquenta ou de cem. Assim, tornou-se possível a multiplicação das aldeias, a densidade populacional atingindo valores inimagináveis até então, como também se pôde ultrapassar o problema crónico neolítico do esgotamento dos solos, as cheias do rio garantindo a manutenção indefinida da produtividade. Os povoados implantaram-se a título permanente, e os excelentes aldeões libertaram das faixas agrárias uma fracção da população; puderam surgir verdadeiros centros urbanos, protegidos por muralhas e ornados com edifícios majestuosos, habitados por gentes de variados ofícios.

No início, esses povoados agrícolas não ofereciam apenas vantagens. As margens do rio eram também uma labrega e perigosa que foi necessário drenar, e como as abundantes cheias traziam quantidades de água muito variáveis de ano para ano, gerações e gerações tiveram de emprender um esforço disciplinado para construir diques, canais e reservatórios. Essas tarefas excediam largamente as possibilidades e os interesses de cada aldeia, de modo que a luta contra os rios incentivou a centralização política, e se as corporações de sacerdotes, dos templos aceleraram esse processo, ele estava inscrito na dinâmica histórica tal como o estava a diferenciação das classes sociais.

As planícies aluviais de Sumer e do Egipto sofriam de graves carencias de matérias primas, não dispoem das rochas utilizadas nas indústrias liticas tradicionais, nem dos minérios para a metalurgia do tempo novo, nem sequer de abundância de madeira. Essas faltas provocaram o desenvolvimento de um comércio a longa distância, com o qual surgiu naturalmente uma classe de mercadores; mas a protecção das caravanas e frota durante viagens tão demoradas também deve ter contribuído para a formação de um corpo de guerreiros profissionais, cujos chefes se acharam logo bem colocados para reivindicar privilégios. Quanto à classe dos artesãos, parece ter-se unido

As pequenas quantidades de bronze então disponíveis quase só eram utilizadas para fins militares, sobretudo para fabricar as espadas com as quais guerreiros profissionais treinados para combater sobre carros de cavalo decediam a sorte dos batalhões. Embora as novas espadas de ferro fossem mais baratas e mais sólidas, era casta após-se a sua adoção, que ameaçava os seus privilégios; outros povos, cobisosos das riquezas das grandes tesourarias e que estes tinham aliado evitando a combater utilizando-os como mercenários, não eram tratados por essas razões. Tais circunstâncias contribuíam para explicar que, um milhar de anos antes de Cristo, todo o Próximo Oriente tivesse sido varrido por um vaga de invasões e, mergulhando numa idade de trevas, permitisse o arranque de um outro ciclo histórico.

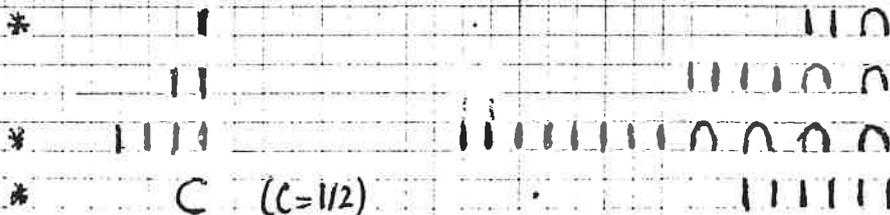
5.

As tábuas cuneiformes e os papirus egípcios chegado até nós só contêm informações de índole científica relativas aos domínios da matemática, da astronomia e da medicina. Curiosamente, não encontramos quaisquer referências nem à física nem à química, o que se afigura tanto mais singular quanto verificamos já se utilizarem ^{pode} tecnologias complicadas com fundamentos directos nessas ciências. Mas ^{era} a ~~explicação~~ ^{explicar} desse facto parece fácil de encontrar se ~~se~~ ^{considerarmos} ~~apreciarmos~~ os valores e preconceitos culturais da época. Com efeito, se os conhecimentos continuavam a ser valorizados numa perspectiva meramente utilitária, nem todas as disciplinas podiam ter, socialmente, o mesmo estatuto: a medicina era decerto olhada como um saber nobre, digno de registo, pois dela dependiam a vida e a morte dos homens poderosos; as matemáticas tinham privilégios como instrumento de administração da riqueza e do êxito no negócio; a astronomia, nas mãos de sacerdotes e com múltiplas conotações religiosas, não corria risco de desapreço. Estariam a física e a química em condições de merecer um tratamento análogo?

Parece-nos seguro que estas matérias ainda não tinham beneficiado de qualquer esforço sério de sistematização, e isso estava decerto relacionado com o facto das práticas ligadas a esses saberes, estarem entregues a simples ~~operações~~ ^{operações} artificiais cujos horizontes culturais seriam ser bastante limitados; de resto, as competências de gente tão modesta não fariam ser encaradas com consideração. Porque iníam os escribas perder tempo a registar tais saberes? Ora o silêncio das fontes documentais obriga-nos a tentar inferir das realizações técnicas desses tempos os conhecimentos que lhes estavam subjacentes, tarefa ingrata e aleatória a qual só dedicaremos ^{por} ^{isso} pouco d'outra de linhas.

Havia, com certeza, bom conhecimento de estática. As gigantescas construções empreendidas pelas monarquias de bronze comportavam enormes dificuldades de realização, e as únicas máquinas simples conhecidas eram a alavanca e a roldana, de modo que ainda hoje se discutem, por exemplo, as técnicas que permitiram erguer as grandes pirâmides. No século passado, quando certos estados europeus se apoderaram de obeliscos egípcios (e não das bases) para os erguerem nas suas próprias capitais, constatou-se a que ponto continuava a ser difícil por de pé esses monólitos com milhares de toneladas; para realizar tais proezas técnicas, não bastava ao país dispor de muitos milhares de homens, era igualmente indispensável uma certa informação científica. Condição

se obter o dividendo exato. Eis como se efectuava uma divisão simples, $66:12 = 5,5$



La-se multiplicando o divisor pelas potências sucessivas de 2, esperando que a soma dos números assim obtida na segunda coluna permitisse reconstituir o dividendo; caso, em regra, isto não ocorria, era-se forçado a introduzir cocientes do divisor por números inteiros (as mais das vezes números fraccionários) até que se obtivesse o dividendo, e o resultado era, naturalmente, a soma dos números correspondentes, figurando na primeira coluna, aqui CIIIIII.

Impulsionados pelas exigências de problemas concretos, os matemáticos egípcios chegaram longe, aperfeiçoando a soma progressão aritmética e geométrica e abordando a álgebra com a resolução de equações de primeiro grau. Calculavam as áreas de figuras geométricas simples, e para determinar a área S de um círculo de diâmetro d utilizavam a fórmula $S = (d - d/19)^2$, o que equivale a atribuir a π o melhor valor conhecido nesse tempo, $\pi = 3,16$. Também não puderam ignorar a determinação dos volumes dos sólidos mais correntes e, nesse domínio, até obtiveram um resultado notável, o cálculo do volume da pirâmide truncada de base quadrangular. É todavia muito importante ressaltar que, nessa época, ninguém conseguiu apreender o conceito de demonstração: os textos limitam-se sempre a enunciar a técnica operacional adequada para obter o resultado, sem pretenderem sequer justificar a validade do método proposto.

Os grandes matemáticos da idade do bronze foram todos os sumérios, cuja posição geográfica lhes valeu uma influência assistida mas também, porventura, uma menor estagnação cultural. Já nas primeiras tabolets cuneiformes que tratam de matemática, datadas do final do terceiro milênio, se verifica que eles tinham inventado um sistema funcional de numeração, embora um tanto confuso. Mesmo nos textos de índole científica, nos quais a base sexagesimal acabou por excluir a decimal, as ambigüidades nunca desapareceram, como se pode notar em alguns exemplos. Assim $\nabla \llcorner$ representava 21, porque ∇ significando 1 e \llcorner significando 10, o conjunto dos três símbolos era entendido como $1 \times 60^1 + 11 \times 60^0 = 60 + 11$, mas podia igualmente querer dizer $1 \times 60^2 + 11 \times 60 = 4260$ ou ainda $1 \times 60^0 + 11 \times 60^{-1} = 1 + \frac{11}{60}$, isto é, devia ter uma ideia prévia da ordem de grandeza do número a representar. Parece aliás evidente que também se tiveram utilizado aquela notação para simbolizar $1 \times 60^2 + 11 \times 60^0 = 3661$, por exemplo, mas neste caso introduziu-se paulatinamente o hábito de introduzir um espaço em branco escrevendo assim $\nabla \llcorner$. Bastante mais tarde, nos tempos da Grécia clássica, os mesopotâmios preencheram esse espaço com um sinal especial significando "nada", mas as inutilidades desse símbolo revolucionário se foram parcialmente a dissipar; em particular, nunca osaram colocar um tal "zero" no final de um número.

Toda esta inovação parece estar relacionada com as exigências de surpreendente desenvolvimento das matemáticas babilônicas. Nos tempos gloriosos de Hamurabi (-1950), a aritmética era manipulada em desenvoltura e sabia-se resolver problemas complicados de álgebra, exigindo o recurso a sistemas de equações por vezes de segundo ou ~~terceiro~~ grau ou mesmo bi-quadrados (traças a tabelas de valores numéricos cuidadosamente elaboradas), obtinham-se resultados de uma precisão notável que até forneciam excelentes aproximações para as raízes quadradas; assim, tomava-se $\sqrt{2} = 1+5/12$, com um erro inferior a 2%.

-2100

7.

No domínio da astronomia, a tonança eclíptica foi progressivamente enriquecida pelas sociedades urbanas, por as exigências práticas de definições do tempo para a agricultura tinham vindo logo juntar-se a necessidade de porer a data aproximada das grandes cheias do rio, as quais necessitavam uma série de precauções. Tornava-se assim indispensável saber determinar com exatidão a duração do ano como, de facto, aconteceu.

No Egipto, foram-lhe atribuídos 365 dias, com 12 meses de 30 dias mais 5 dias "além do ano", e ignora-se se, no início, era já uma definição de ciclo astronómico ou se esse valor resultou do cálculo do número médio de dias entre o início de duas cheias consecutivas do Nilo. De qualquer modo, após um século o ano civil já tinha quase um mês de avanço sobre o ano astronómico, e se após 1456 anos (o período hit "Sothiac", de Sothis, o nome grego da estrela Sírius) tornaria a haver coincidência. Mas os sacerdotes-astrologos confidaram que a cheia vinha sempre na altura em que Sothis, após ter permanecido muitos dias abaixo do horizonte, tornava a ser visível antes do nascer do Sol; assim, embora o ano civil, "o primeiro dia do primeiro mês antes da inundação", recomeçasse inevitavelmente após 365 dias e na "época de seca" os camponeses podiam estar alagados, a observação do nascimento helíaco de Sírius permitia os faraós anunciar por inspiração divina o advento da cheia.

A cheia vem a ser o início de Setembro
↓
A cheia vem a ser o início de Setembro

Enquanto nas margens do Nilo se o calendário litúrgico permanecia lunar, na Mesopotâmia o ciclo da lua continuou a definir o mês civil. Com 12 meses lunares de uns 29 dias e meio, o ano não ia além de 354 dias e, sem correções, haveria um avanço de quase 3 meses ao cabo de apenas 8 anos. Mas as observações-tempos tinham relação o começo do ano real com o nascimento helíaco de certas estrelas, de modo que o mês decretava frequentemente a introdução de um mês suplementar, por vezes até de dois; sob essa forma muito mais grosseira era o que hoje se faz em os anos bissextos. A brilhante astronomia mesopotâmica permaneceu activa até à época da conquista romana, acumulando observações suficientes para ser capaz, por extrapolações, de prever eclipses da lua e mesmo alguns eclipses do Sol. Essa grande tradição astronómica contribuiu notavelmente para o desenvolvimento da astronomia antiga, nomeadamente com o labor obtido pela observação do céu durante dois ou três milénios, mas também originou, como veremos, essas lastimáveis práticas astro-lógicas das quais ainda nos estamos libertos.

Verificam-se analogias significativas entre as concepções cosmológicas entre si, nas diversas civilizações: a Terra seria plana, em certos acidentes de relevo locais, e sobre ela situar-se-ia uma espécie de cúpula sólida (à qual ainda hoje dia chamamos o "firmamento") onde se encaixavam os astros. Nesse esquema ingenuo que quase se aplica a universo as nos próprio planeta, atribua-se à Terra uma grande extensão não determinada e, em geral, tentava-se a concebê-la como um disco, embora os egípcios a vissem como um rectângulo alongado à beira do vale do Nilo; era corrente a ideia de que os continentes estavam rodeados pelos oceanos, e os chineses pretendiam que o seu país se situava no centro das terras habitadas, razão por que lhe chamavam o "Império do Meio". Um tal modelo cosmológico levantava aliás vários problemas técnicos. Se se perguntava a razão por que a água da Terra exterior não se escoava, podia dizer-se que a cúpula do céu a retinha, mas já a questão de saber onde estava a Terra plana resolvia-se muito mais entorpecida: afirmava-se que ela se apoiava sobre quatro imensas pilares, mas então onde se apoiavam esses pilares? Uma tradição indiana arcaica sustentava que os pilares eram suportados por quatro grandes elefantes mortais e os gigantes tartarugas submersos na água inferior... Talvez fosse afinal mais simples admitir que o disco terrestre flutuava na água e que era assim porque tal seja a verdade dos céus. Não eram devesis essas especulações que impediam o homem de dormir tranquilamente.

1.

Durante o terceiro milénio houve no Peloponeso uma civilização do bronze influenciada pela brilhante cultura minoica de Creta e na qual se foram integrando povos de língua grega vindos do interior, primeiro os jónios, depois os aqueus e os eólios. Mas quando as invasões do século XII trouxeram enfim para o lado do litoral, estes adaptaram-se bem a condições que os seus irmãos de língua, e com o ruir das muralhas de Micenas e de Pilos, com a queda do "anax", o rei-deus dessa teocracia, sumiu-se um universo cultural e outra história com eles.

Durante muito tempo nada de original pareceu singularizar essas comunidades gregas da idade do ferro, onde camponeses e artesãos modestos eram governados por aristocracias de proprietários agrícolas, e só no século VIII, quando a realidade desapareceu quase em todas elas, se vislumbra uma grande novidade, a escolha por deixarem aqueles a quem eram confiados certos poderes. Foi todavia com a grande crise do século seguinte que se desenvolveram as inovações, funda-mentos da sociedade grega clássica, e todos os matizes dessa funda-mudança parecem relacionar-se com o ruir económico provocado pelo desenvolvimento do comércio.

Apto para culturas valiosas como as da oliveira e da vinha, o solo montanhoso da Grécia nunca se prestou à produção de cereais e, por isso, os acréscimos populacionais tiveram de ser regularmente absorvidos pela emigração. Desde o segundo milénio, a costa da Ásia Menor achava-se controlada de cidades gregas, e havia tanto Helenos na Sicília e no sul de Itália que lhes chamavam a grande Grécia; mesmo assim, as metrópoles não deixavam de estar forçadas a manter um tráfico constante que as abastecesse de cereais e matérias-primas. Ora, no século VIII, quando a intensão da moeda cambiava veio incrementar fortemente o comércio, a expansão militar da Grécia criou uma situação difícil às grandes cidades mercantis da Fenícia, enquanto os gregos já tinham aprendido a construir e governar boas embarcações, dispunham de "colónias" que lhes serviam de entrepostos, criavam com artífices hábeis no fabrico de tecidos e cerâmicas, armas ou jóias. O azeite, o vinho e as outras riquezas da Hélade espalharam-se então pelas margens do Mediterrâneo, e as comunidades gregas urbanizaram-se e prosperaram.

Este sucesso não podia deixar de provocar grandes alterações sócio-políticas no mundo helénico: com o desenvolvimento do comércio formaram-se nichos ricos em mercadorias, interações e honras ao mar, que seclamaram uma parcela do poder e com a qual a aristocracia teve de ceder temporizadamente; simultaneamente, a nova economia arruinou o pequeno camponato, seu fundo para recuperar as culturas cerealiíferas tradicionais em olivicultura ou viticultura, e que se viu então condenado à proletarianização ou até à escravatura. Um tal aviltamento da situação foi mais pobre provocou condições sociais que redundaram em novo equilíbrio político em regra bem injusto, aqui na sequência de uma guerra civil, ali graças à exigência de uma legislação comum por acordo

entre as facções, a colá for decisão de um tirano, aventureiro bem sucedido ou um ditador zeloso de poder pessoal. Basta lembrar o exemplo clássico de Atenas e de Esparta para apreciar a liberdade dos estatutos que os múltiplos ^{comunitários} acabaram por adotar mas, apesar de tudo, firmou-se uma denominação comum suficientemente ampla para que seja legítimo falar de uma estrutura nova típica do mundo grego, a "polis".

Logo que os contactos frequentes lhes permitiram conhecer o modo de vida dos povos vizinhos, os gregos não hesitaram em proclamar orgulhosamente a superioridade da sua própria civilização. Esse julgamento, partilhado por nós com tanto fervor que até temos tendência a esquecer as grandes virtudes da sociedade helénica, levanta porém um problema sério. Como foi possível a aparição de um mundo tão diferente que muitos não temem falar de um "vilage grego"?

Apri o longo período civilizado da idade do bronze, e com as chegadas trazidas ulteriormente pela difusão dos instrumentos de ferro, pela invenção da moeda ou pela utilização do alfabeto, um outro tipo de sociedade ter-se-ia tornado viável. Essas sociedades viradas para o comércio, afri das num campesinato mais bem afetichado, capazes de fabricar em larga escala artigos de luxo ou objectos de consumo corrente, liberas de teocracias dispentorias e conservadoras, cujas classes não continham fortes e ~~ativas~~ ^{ativas} ~~delas~~, pouco ou nada tinham a ver com os estados monárquicos tradicionais. Tiram de estar implantadas junto do mar, pois os transportes por terra só deixaram de ser onerosíssimos apri a Revolução Industrial, e esse localismo restringia a área em que podiam surgir centros desse tipo novo, mas se as cidades da Fenícia, da Síria ou do delta núbico também disputavam dessa vantagem, não só a sua situação geográfica lhes tornava muito mais difícil assegurar a indispensável independência política como talvez o peso das tradições culturais herdadas da idade do bronze tivesse bastado para impedir a evolução de estruturas radicalmente diferentes. Só as comunidades gregas parecem ter dispostos de instrumentos materiais e intelectuais suficientes sem que as marças do passado fossem todavia demasiado profundas para comprometer a mudança.

geogr e po
geogr e política

Assim teria surgido a "polis" grega que foi, acima de tudo, um universo mental diferente. Nela não se reconheciam deuses vivos mas tão-só uma família mitológica de divindades a qual se consagravam templos e sacrifícios mas sem se atribuir excessiva influência na vida quotidiana. O poder político deixava de ser prerrogativa de alguém por direito de nascimento para ser encarado como uma jurisdição que se disputa, uma delegação da vontade geral nas mãos dos deuses. As próprias cidades deixaram de se agrupar em torno de um palácio fortificado para se orientarem significativamente à volta de uma praça central onde era discutidas as questões de interesse comum. E uma invenção helénica da liberdade, não obstante as gravíssimas restrições que comportava, foi uma tentativa de se escapar e viver no mundo hierático de então.

Foi no século II que se viu o breve e brilhante apogeu da civilização grega clássica. Avesagador por um incerto e arisco império persa, os helénos foram capazes de esquecer por um momento as suas eternas divisões e de se unir para rechazar o invasor. Tirando proveito da

II: Chamaram-lhe o "milagre grego" - 2

uma contribuição decisiva para a vitória comum, Atenas estabeleceu-se numa posição hegemónica dentro do mundo grego e essa fase culminou com os tempos gloriosos do governo de Péricles (442-429), o discípulo de Anaxágoras que era amigo de Heródoto, encarregou Fidias de reconstruir a Acrópole e aplaudiu as tragédias de Sófocles. Mas em 430 esse equilíbrio político injusto e frágil acendeu uma guerra civil interminável, que assegurou finalmente a Esparta o domínio de uma Grécia exsangue mas a tribuiu sobretudo para acelerar uma decomposição sem remédio nem grandeza. Um século mais tarde, em 336, a Hélade perderia a própria independência política nas mãos do rei da Macedónia, um estado semi-telenizado do norte.

Entretanto, os gregos tinham azealhado uma parte leonina do todo patrimonial cultural. Foi de "polis" que deriram a palavra "política", com o significado primitivo de "relativo à cidade", como foi de "lóios" (que queria dizer "fovo") que veio a "democracia" — o governo pelo fovo. As estátuas e os templos gregos definiram os cânones da beleza clássica, e o génio dos seus poetas e dos seus trágicos se brevíssimo maravilhosamente à usura do tempo. Mas, sobretudo, foi nessas pequenas comunidades que os homens começaram a reflectir em liberdade sobre o universo e sobre si próprios.

2.

Costuma-se designar por pré-socráticos os pensadores telénicos situados cronologicamente antes de Sócrates; ora a obra desses homens, fundamental na história da filosofia e da ciência (que viveram longamente conjuntamente), nada teve a ver com a de Sócrates, cuja reflexão foi de fendo humanista em quanto os seus antecessores se interessaram quase só pela natureza. Para prevenir malentendidos, afigura-se por aí muito mais correcto, como aliás já se começa a difundir, chamá-los os pensadores naturalistas ou, se se quiser, os "fisiólogos", os estacionários de "physis", da natureza.

O que há de mais significativo nos pensadores naturalistas é a total falta e nacionalista das tentativas de explicações do mundo por eles concebidas. Não que a racionalidade tivesse de todo ausente as doutrinas mais antigas ou que não houvesse componentes míticas (e até, por vezes, místicas) nas construções dos "fisiólogos". Mas tanto quanto sabemos, o que existira até então tinham sido ideologias mais ou menos oficiais, propagadas por corporações de sacerdotes como reuniões de revelações divinas, enquanto agora são homens comuns, simples mortais, que se interrogam sobre a natureza, propõem as respostas que lhes parecem mais satisfatórias, e só reivindicam para as justificar a capacidade de convencimento que nelas possa haver. Que tais explicações fossem ingénuas e confusas era inevitável e, afinal, secundário, porque o essencial estava na mudança de perspectiva, na afirmação de confiança na razão humana, na proclamação implícita do direito de procura livre, no novo critério de julgamento do valor das ideias. Foram os pensadores naturalistas que inventaram o tão justamente celebrado "racionalismo grego", e assim que se faz o balanço do resultado adquirido em pouco mais de um século constatam-se logo as potencialidades inoprimíveis dessa nova atitude mental.

Parece ter sido em Mileto, no começo do século VI, que a filosofia naturalista nasceu por obra e graça de Tales. Cidade considerável para a época, governada por uma oligarquia mercantil que lhe assegurava uma notória prosperidade, Mileto aproveitava as vantagens da sua situação nas costas da Ásia Menor para manter fructuosos contactos com os velhos estados vizinhos, e creu-se até que foi por aí que o alfabeto fenício penetrou no mundo grego. Ora se Mileto era um centro típico da nova economia, Tales parece ter sido um homem representativo da nova mentalidade: uma anedota recordada por Platão conta que, um dia, Tales passeava no campo tão absorvido na sua meditação que acabou por cair num poço, mas esta imagem de um pensador distraído não se coaduna com a figura esboçada em outras fontes que não só o dizem astrónomo, geômetra, engenheiro e grande viajante como até asseguram que de ter-se obtido uma sólida fortuna especulando sobre o azeite, preferiu demarcar-se concretamente para um puro metafísico. Assim, e na medida em que a pobreza da topografia não permite julgar, imaginamo-lo como um indivíduo de espírito pragmático, interessado por questões técnicas e, porventura, ligado à classe dos mercadores.

A cosmologia de Tales parece ter atribuído à água um papel fundamental, o que foi naturalmente relacionável com as mitologias ancestrais do Egipto e da Mesopotâmia; concebia a Terra como um disco flutuando na água, coberto por um firmamento líquido de onde vem a chuva e no qual navegam os inúmeros astros incandescentes. De qualquer modo, foi a água na essência do *gômon* e atribuiu-lhe um rebusco uma natureza material e é isso que lhe se afigura mais significativo. Por serem interessantes, é no prefácio da sua obra que encontramos as primeiras referências à "pedra límbria", a magnetite, bem como às estranhas propriedades atractivas que, por ficção, eram adquiridas por uma resina fóssil, o âmbar - a que os gregos chamavam "elektron". Devemos também recordar a tradição que atribui a Tales a predição de um eclipse solar, o que a ser verdade implicou de certo um conhecimento de uma série multi-secular de observações empíricas.

O grande discípulo de Tales foi Anaximandro, o qual pouco mais fôrem seria do que o mestre. Atribuiu-lhe a invenção do *gnômon*, haste vertical cuja sombra permite determinar a altura e a posição do sol, embora esse instrumento já fosse utilizado pelos babilônios e ele se deva ter limitado a introduzi-lo entre os gregos, e também a lição que de "foi o primeiro a traçar um contorno da terra e do mar", isto é, um mapa da região conhecida, empreendimento possível numa cidade tão ligada ao tráfico comercial. Além disso, a contribuição fundamental de Anaximandro foi igualmente de índole cosmológica: chamou à substância originária o indefinido ou o ilimitado, algo de diferente das crises anteriores cujas propriedades observáveis eram tão diferentes que lhe parecia impossível concebê-las transformando-se umas nas outras. Esse indefinido haveria originado inúmeras vezes sob a acção de dois princípios opostos que dele se se separaram, um análogo ao quente e cuja substância seria a chama, outro análogo ao frio e correspondente ao ar-bruma; condensando-se, a parte interior do ar teria formado a terra que, ao recuar, libertaria a quantidade humida para originar os mares, enquanto as chamas se ajustavam em torno do ar exterior "como a chama cresce em redor da árvore" e, ao reventar, a esfera de chamas se enfiava em um encolimento pela bruma dos quais só poderiam distinguir alguns pontos brilhantes, os astros.

Encontramos aqui a intuição de uma história cómica que até levou Anaximandro a imaginar que os animais terrestres proviriam de uma mera adaptação dos peixes a outras condições de vida, sobre o tema de uma hipótese transformista. A ideia de que o mundo habitado era a parte superior de uma coluna três vezes mais larga do que profunda correspondia a uma especulação notabilíssima de Anaximandro para solucionar o velho e insolúvel problema de saber onde se apoiava a Terra; surgiu assim a tese de que o nosso planeta não se apoiava em coisa alguma, está meramente em equilíbrio no centro do Cosmos, explicações que na sua essência subsistiram durante dois milénios.

As concepções do terceiro dos grandes filósofos milénios, Anaxímenes, falecido talvez no final do século VI, exprimem uma tentativa original de conciliação entre os dois sistemas precedentes. Retomou a hipótese de Tales de uma substância originária de natureza material que agora seria o ar, mas para responder à objecção de Anaximandro introduziu a existência de dois princípios finis opostos, a condensação e a rareficação, agindo sobre ela. Graças à condensação, o ar poderia transformar-se primeiro em água depois em terra, enquanto a rareficação fazia vir dele o fogo, todas as modificações observáveis provindo afinal das reacções do excesso e do excesso. Cosmologicamente, e embora apegado à concepção da Terra plana, Anaxímenes imaginou que todos os corpos celestes giram à volta da Terra "como um gomo em torno da nossa cabeça", a sorte sendo uma consequência da ocultação do sol pelas grandes montanhas.

3.

No último quartel do século VI surgiu na outra extremidade do mundo helénico uma escola distinta de pensadores naturalistas, os pitagóricos. Desde muito cedo Pitágoras foi transformado numa figura mítica, um filho de Apolo que teve a sua infernal vóltima de lá com uma coxa de rio, e pouco se sabe de seguro sobre a sua vida; cre-se que já homem maduro emigrou da ilha de Samos para a cidade de Crotona, na Sicília, onde exerceu importantes cargos políticos e fundou uma comunidade religiosa que ensinava a unidade dos seres vivos, a transmigração das almas e impunha ^{curiosas} regras de abstinência. Essa comunidade teria sido apenas mais uma das muitas religiões de mistério que então floresciam no mundo grego sem o seu profundo interesse pela ciência de lá proveniente dos ensinamentos do próprio matemático. Conta-se que Pitágoras descobriu empíricamente a existência de relações matemáticas muito simples, envolvendo apenas os quatro primeiros números inteiros, entre os comprimentos das cordas correspondentes aos principais intervalos musicais (2/1 no caso de uma oitava, 3/2 no caso de uma quinta, 4/3 no caso de uma quarta) e daí teria resultado não só o grande interesse dos pitagóricos pela música mas sobretudo uma autêntica mística dos números que passaram a ser considerados pela seita como a essência do real e a chave da compreensão de todos os fenómenos naturais.

Essa paixão pelas matemáticas tinha um autêntico carácter religioso. Por exemplo, o quatro primeiros números representados por pontos e dispostos de modo a desenharem um triângulo equilátero

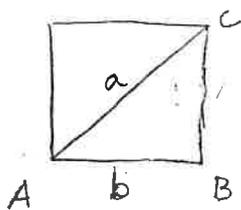
definiam a famosa e misteriosa Tetractis da Década (a dona dos quatro números e doz), a figura sagrada sobre a qual faziam os mais solenes juramentos, pois "é grande, perfeita e realiza todas as coisas e é o princípio e o guia da vida, quer divina e celeste quer humana." Mas essa componente mística não parece ter prejudicado a contribuição decisiva, a grande impulsão criadora dada pelo pitagórico no desenvolvimento das matemáticas.

Além, não é certo que tenha sido Pitágoras quem demonstrou o teorema associado ao seu nome pela tradição mas essa façanha deve-se seguramente à sua escola, façanha tanto mais notável quanto exemplifica uma das conquistas basilares do racionalismo grego: a criação do próprio conceito de demonstração matemática. De acordo com o famoso raciocínio da contradição do falso e do verdadeiro lembrado por Aristóteles foram igualmente os pitagóricos quem demonstraram a existência de grandezas (como a hipotenusa do triângulo retângulo isósceles de catetos unitários) que não se podem exprimir sob a forma do cociente de dois inteiros — o que são hoje os números irracionais. Sobrevalorizando a importância dos números, a Escola imaginou-nos aliás subjacentes quer as figuras geométricas quer as próprias cifras fixas, porque "as coisas reais são números." Com tais perspectivas definiriam "números triangulares" (1, 3, 6, 10, 15, ...), como a Tetractis da Década), "números quadrados" (1, 4, 9, 16, ..., o nome quadrado perfeito) "números retangulares" (2, 6, 12, 20, ...) etc., cada uma destas sucessões prolongando-se harmonicamente. Para que os pontos números pudessem constituir os núcleos materiais atribuírem-lhes por vezes uma extensão espacial, o que levou alguns eruditos modernos a falar, de modo muito literário, de um "atomismo numérico"; Aliás Zenão de Eleia encarregou-se de mostrar todas as dificuldades inerentes aos conceitos de ponto geométrico dotado de extensão.

A contribuição da escola Pitagórica ao progresso da astronomia e da cosmologia foram igualmente de grande valor. Antes de mais, dever-se-ia a afirmação da esfericidade da Terra, ideia que não parece ter sido resultado de um esforço de interpretação de observação, já na época corrente — o casco de um navio no mar como que é bruscamente tirado pelo horizonte — observação que, de resto, eram compatíveis com outros modelos como o de Empédocles, de que a Terra tinha a forma de um ovo; os pitagóricos sustentaram que a Terra é esférica por razões de índole filosófica, porque a esfera lhes surgiu como o sólido geométrico mais perfeito, mas a beleza e a simplicidade da hipótese justificando-se à sua capacidade explicativa levaram a serem adoptadas.

Quanto à estrutura do cosmos, sempre defenderam que os astros se movem de forma a emitirem notas musicais cuja harmonia só nos não é perceptível por estarmos tão perto acostumados a ela, ideia altamente especulativa mas que ainda viria a influenciar as investigações de Kepler. Muito mais importante e inovadora foi porém a teoria da Anti-Terra, geralmente atribuída a um pitagórico tardio, Filolau, nascido em Taranto no século V e que viveu e ensinou em Tebas, isto não só cubria a possibilidade de uma cosmologia original seja controversa.

Livro X de Euclides



$$\overline{AC} = a$$

$$\overline{AB} = b = 1$$

Hip: \overline{AC} é comensurável com \overline{AB}

Seja $\frac{a}{b}$ a sua razão mais simples.

Como $\overline{AC} > \overline{AB} \Rightarrow a > 1$.

Assim $\frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} = \frac{a}{b} \Rightarrow \frac{\overline{AC}^2}{\overline{AB}^2} = \frac{a^2}{b^2}$

Mas pelo T. de Pitágoras $\overline{AC}^2 = 2 \overline{AB}^2$

$$\frac{\overline{AC}^2}{\overline{AB}^2} = 2 \Rightarrow \frac{a^2}{b^2} = 2$$

$\Rightarrow a^2$ é par $\Rightarrow a$ é par $\left\{ \begin{array}{l} \text{A raiz quadrada de} \\ \text{de um n}^\circ \text{ par é} \\ \text{um n}^\circ \text{ par} \end{array} \right.$

Como $\frac{a}{b}$ é a razão mais simples

b é ímpar

Mas sendo a par $\Rightarrow a = 2c$

$$\Rightarrow 4c^2 = a^2 = 2b^2$$

$$\Rightarrow 2c^2 = b^2$$

b^2 é par

b é par

Segundo esse sistema, existia no centro do mundo um Fogo Central, a "marinha de Zeus" em torno do qual rodavam todos os astros: primeiro a Anti-Terra, depois sucessivamente a Terra, a Lua, Mercúrio, Vênus, o Sol, Marte, Júpiter, Saturno, e, por fim, as estrelas "fixas". O Fogo Central parece ter sido introduzido para dar ao Cosmos um centro físico e a Anti-Terra para que à volta dele houvesse dez corpos (dez, número místico privilegiado), o conjunto das estrelas contados por um só. Mas um teórico da maneira de Filolaus não podia deixar de explicar que ^{a Anti-Terra} tanto o Fogo Central fossem observáveis e o seu argumento era engenhoso: Terra e Anti-Terra, que de certo modo se equilibravam, estavam sempre em oposição relativamente ao Fogo Central e só o hemisfério terrestre donde esse Fogo não se pode ver é que seria habitado, o outro sendo tudo-o-de-nasido quente para esse epíteto; a cerimônia, uma tese solucionava a questão intrigante de como viverem nos antipodas, "de cabeça para baixo".



Tudo quanto esta cosmologia tem de fantástico não nos deve ocultar o seu valor. Pela primeira vez e em termos racionais, o Universo deixava de ser reduzido às vizinhanças do nosso planeta, ao qual era deus necessário qualquer privilégio. Mas intuições certas eram demasiado sublimares para poderem ser aceites, e a hipótese da Terra imóvel no centro do Cosmos foi erigida em dogma durante vinte séculos.

4.

O pensamento naturalista foi amadurecendo com o andar do tempo. No começo do século ^V surgia uma nova problemática já visível na obra de Heráclito, um jónico de Éfeso influenciado pela tradição mítica, o qual retomou a questão da substância primordial suposta agora ser o Fogo, e atribuiu a permanência da matéria a um certo equilíbrio entre o epíteto de duas tensões opostas. Só nos restam fragmentos muito escassos da sua obra e razões havia para que o epíteto de Heráclito lhe valesse os cognomes de "O Obscuro" ou "O Tenebroso": afigura-se-nos contudo que um tal privilégio atribuído ao Fogo trazia uma visibilidade nova e aguda ao movimento, à mudança, ao fluir inextinguível do tempo com a sua ação sobre os seres. No cerne do seu pensamento estaria a ideia neta de que tudo se encontra sempre em alteração, que nada permanece nem pode permanecer idêntico a si mesmo, ainda que esse fato capital escape tantas vezes à nossa observação. Não foi por acaso que este homem obcecado pela transformação incessante das coisas foi o primeiro que insistiu na fragorosa testemunha bruta dos nossos sentidos, que nos poderia induzir ao erro se não fôssem guiados pelo entendimento.

E ^{alguma} tanto significativo que, quase simultaneamente, outros dos grandes "fisiólogos" abordaram uma reflexão sobre o mesmo tema, com ~~tônicas analogias~~ ~~embora para~~ ~~depois~~ ~~final~~ ~~concluída~~ ~~havia~~ ~~netamente~~ ~~opostas~~: os antigos do homem são tão traçoelhos que até o leão a ser na existência do movimento, da mudança, da transformação — existência essa que é, sem verso absurdo lógico. Tal foi a tese esteimista de Parmênides e dos seus discípulos Zenão e Melisso, a "gente de alta".

Parmênides nasceu na Magna Grécia, em Eleia, onde eleinha e talvez tivesse até governado, momento certo já na segunda metade do século VI. Teria sido iniciado na filosofia por um pitagórico cuja influência se nota na segunda das suas obras "A via da aparência", onde cita o objecto do sentido e que quase só ^é uma cosmologia sem grande interesse nem repercussão. Mas o primeiro dos seus livros, "A via da verdade" revelar-se-ia de importância fundamental, influenciando todos os grandes sistemas que se seguiram e, através deles, marcando a história da cultura.

Em termos muito simplistas, toda a análise de Parmênides parte da afirmação incontroversa da existência de algo, aquilo a que mais tarde se chamara o ser, "o que é". Investigando os seus caracteres verifica que "o que é" não "foi" no passado nem "será" no futuro porque "é" sem origem nem história; "o que é" é eterno, pois só poderia ter surgido a partir de "o que não é" (o qual não se mostra sequer digno de ser dito nem pensado), é imutável permanecendo idêntico a si próprio, visto que só se poderia modificar pela intervenção de algo de exterior (e fora dele nada pode existir), é homogêneo, porque não "é" mais aqui e menos além, é indivisível pois que tudo (tudo quanto é) está cheio do que "é", é finito, visto que nada ^{de} ~~se~~ ^{precisa} ~~de~~ ^{de} nada sob pena de carecer de tudo. Para além destas frases verdadeiras lógicas e definitivas há também aparências enganadoras, ilusões do sentido, fruto da ignorância.

No século seguinte Aristóteles escreveu que "os eleatas tinham proclamado a unidade e a imutabilidade do ser, desprezando os factos e uniscando-se à noção pela loucura". Entende-se que as reacções à doutrina parmênidiana tiveram sido violentas, pois um homem armado ^{de} ~~de~~ ^{de} com o argumento da sua razão osuava negar frontalmente os pressupostos sobre o mundo exterior tidos por mais evidentes. Mas a própria excessão a que Parmênides era levado pela sua argumentação realçavam de um modo inaplacável as dificuldades inerentes à compreensão dos conceitos de mudança e de movimento, por exemplo o facto de que um corpo que se desloca nunca está, de certo modo, em sítio algum.

O pensamento de Parmênides foi talentosamente defendido pelo seu discípulo dilecto, Zenão, cuja obra polémica pretende mostrar que admitir o movimento conduzia a dificuldades lógicas insolúveis; os seus célebres paradoxos (Aquiles e a tartaruga, a seta voadora etc.) influenciaram de forma indelével não só a evolução das próprias matemáticas gregas. Um outro eleata, Melisso de Samos, homem de estado provavelmente contemporâneo de Zenão, merece ser lembrado porque, para responder às objecções que lhe faziam, foi levado a alterar algumas teses do mestre; admitiu que o Uno finito e cíclico de Parmênides seria realmente ser considerado infinito, pois se o não fosse teria começo e fim (e já não seria Uno) e, sobretudo, para excluir a ideia de que fora além do Uno poderia existir o vazio. Era, de alguma maneira, assimilar o vazio a "o que não é", uma das ideias mestras do atomismo clássico.

5. 

Zenão e Melisso polemizaram sobretudo com dois outros grandes pensadores da sua geração, Empédocles e Anaxágoras, os quais se insurgiam, cada um à sua maneira, contra o radicalismo da doutrina eleática, embora não deixassem de ser apegados à linha dos seus argumentos. Assim, Empédocles criou

denava "loucos os que imaginam que o que inicialmente não existiu pode nascer ou que uma coisa pode perecer e ser totalmente destruída", afirmaram que Parmênides não teria deixado de aprovar, mas como sustentava que os nossos sentidos merecem crédito se os utilizarmos adequadamente, via-se levado a negar o carácter ilusório da mudança e acabava por se colocar em oposição frontal ao eleatismo.

Para conciliar a transformação com a eternidade do Ser, Empédocles recorre a tese eleática da sua unidade e concebe-o como múltiplo: foi buscar ao mítico a ideia da existência de Quatro Elementos eternamente distintos (a Água, a Terra, o Fogo e o Ar), os quais estariam unidos por duas forças opostas, o Amor e o Ódio; embora a essência do Ser múltiplo permanecesse sempre a mesma, nada sendo criado ou destruído, a acção dos dois princípios divinos dava ao nascimento e desaparecimento das mais variadas combinações dos Quatro Elementos e explicaria assim as observações sazonais. Sob a forma mais elaborada que lhe deu Aristóteles, tais concepções serão aceites durante mais de dois mil anos.

Empédocles, que parece ter sido um médico ^{conceitudo} em Agrigento, a sua cidade natal, não deixou de aplicar ideias do verso ter no domínio da fisiologia, e também elaborou uma cosmogonia altamente especulativa, com ciclos cíclicos de supremacia do Amor e do Ódio. De algumas experiências simples que ele realizou com uma depressão pretendeu-se concluir que se lhe teve a descoberta de que o ar é uma substância material, mas será provavelmente mais exacto dizer que demonstrou esse facto, pois custa a crer que uma propriedade tão evidente ainda permanecesse desconhecida.

Faleceu o grande Anaxágoras, o primeiro dos pensadores naturalistas a vir instalar-se em Atenas, onde chegou muito novo (c. -480) e veio a ter como alunos Píndaro, Eurípides e talvez Sócrates, ^{de sua escola por ter de} mas acabando afinal por ter de fugir da cidade sob a acusação de impiedade. ^{mas se se sabe} Não se duvida de que ^{seguiu} de que a sua filosofia também correspondia a uma reacção constructiva às teses de Parmênides, tendo discutido muito quanto ao seu significado preciso. Como Empédocles, Anaxágoras aceitou a ideia da permanência essencial do Ser, substituindo contudo o monismo por um pluralismo levado ao extremo. Disse ele que "em todas as coisas há uma porção de todas as coisas excepto Espírito, e há algumas coisas nas quais também existe Espírito", e aqui surge uma distinção radical entre a matéria viva (em que o Espírito está presente) e a matéria inerte; mas esta afirmação implicaria sobretudo que qualquer porção de matéria é infinitamente divisível e contém uma infinidade de substâncias diferentes. Na sua perspectiva "como é que o cabelo poderia vir do que não é cabelo ou a carne do que não é carne?". No início "tudo estava junto" mas, mesmo agora, nada existe realmente puro: "há [os elementos que ingerimos] certas partes que produzem sangue, outras tendões, outras ossos, etc - partes essas que só a razão pode apreender". Tratava-se de uma reacção extremista que o atomismo corrigiu.

Tal como as filosofias de Empédocles e de Anaxágoras, a doutrina atomística surgiu da proble-

mática levantada pelo eleatismo, à qual ela trouxe contudo uma resposta tão interessante que é geralmente considerada como o porto mais alto do naturalismo teléxico. A sua importância na história, da cultura e da ciência veio a revelar-se afinal considerável, e se o atomismo científico do século XIX teve outra natureza e outros fundamentos nem por isso deixou de ser ^{sugerido} ~~inspirado~~ pelo atomismo antigo. De há muito são reconhecidas as suas marcas no pensamento de Newton, o qual influenciou a obra de Dalton e dos seus emulso.

Os criadores do atomismo clássico foram Leucipo de Mileto (ou talvez de Eleia) e, sobretudo, Demócrito de Abdera, dois homens sobre os quais não sabemos quase nada; cre-se que o período de auge de Leucipo ocorreu cerca de 440-435, e Demócrito seria um pouco mais novo, mas essas datas são conjecturais. Salvo alguns fragmentos pouco interessantes todas as obras originais se perderam, isto apesar de Demócrito ter sido um escritor prolífico, e nem sequer podemos identificar exactamente a contribuição de cada um dos fundadores. Apesar de tudo, e graças a diversos testemunhos, é possível reconstituir a doutrina com razoável nitidez.

Os atomistas também aceitaram a tese da eternidade do Ser, e, mais ainda, contrariamente a Empédocles e sobretudo a Anaxágoras, não tiveram sequer necessidade de admitir qualquer pluralismo na essência do "que é" para explicar a transformação das coisas atestada pelos sentidos. Introduzindo a ideia profundamente inovadora de atribuir realidade aquilo que "não é" e de o identificar com o vazio, considerado até aí inexistente, Leucipo e Demócrito enriqueceram a descrição do mundo material com o conceito de espaço físico. Neste contexto, puderam conceber o Ser como formado de pequeníssimas partículas substancialmente idênticas, os átomos, e explicar ter as mudanças observadas pelas diversas e sucessivas composições dessas partículas.

A bem dizer, se todos os átomos inenunciáveis eram constituídos pela mesma substância, sempre compacto, sólido e materialmente indivisíveis, podiam diferir entre si pela forma e pelo tamanho, e essa diversidade até seria infinita pois "não há razão para que um átomo tenha uma forma e não outra"; em linguagem moderna, teriam a mesma densidade mas, com linhasões diferentes, haveriam de ter pesos diferentes — o peso sendo então concebido como a tendência para se mover de cima para baixo. Quanto aos corpos macroscópicos, não só a sua rigidez seria muito variável consoante a natureza dos átomos que os constituem (por exemplo, um átomo cuja forma compreendesse uma espécie de gancho agarrar-se-ia fortemente a outro que fornecesse uma cavidade adequada) mas também poderiam ter maior ou menor densidade, tudo dependente do número e dimensões das cavidades inter-atômicas, sem peso porque vazias, existentes no seu interior.

Tendo concebido innumeraíveis átomos que, deste seque, se deslocavam veramente ao acaso, animados de um movimento indestrutível e colidindo entre si num vazio infinito e eterno, os fundadores da doutrina foram levados a imaginar ~~que~~ que o tempo permitia formar, modificar e porventura destruir incontáveis mundos. Sobre esta fruste física mecanicista apercebeu-se uma metafísica de índole materialista, que concebia a própria alma como constituída por átomos disseminados no corpo, e embora Demócrito tivesse sustentado princípios éticos nobres,

Péricles como legislador da cidade de Atenas e desempenhou-se da incumbência com a saíza de um humanista. Seja como for, o que conta foi que nesse período o raciocínio adquiriu mais audácia e uma agilidade maior.

Para realçar a grandezza de Sócrates não é, por conseguinte, necessário adoptar os preceitos platónicos e arvorá-lo no paladino do combate contra o dragão sofístico. Homem do povo, Sócrates passeava-se pelas ruas e praças de Atenas dialogando com todos, procurando explicar à gente comum ou aos personagens poderosos que muitas certezas são falsas certezas e que a primeira ignorância é a que se ignora a si própria. Conta-se, e o simbolismo da história é evidente, que ele só tomou consciência do seu papel quando a Pítia, a profetiza infalível, o designou como o homem mais sábio da Hélade, a de que tanto se afligia com a sua crassa ignorância; começou então a interrogar o outros para avaliar a ciência alheia, e ficou abnito ao verificar que talvez nada sabiam embora, como adivante, nem sequer se apercebersem disso. Afinal, a Pítia sempre tinha razão, e Sócrates considerou-se investido da missão de por a nu a ignorância geral, condição prévia à iniciação da tarefa urgente de uma procura comum da verdade.

Era uma missão arriscada porque, como se imagina, os demagogos (etimologicamente, os "condutores do povo") não viam com bons olhos a demonstração pública da fragilidade das suas afirmações categóricas. Sócrates foi condenado à morte em 399 pelo crime de corrupção da juventude, e recusou-se a fugir por não se achar no direito de violar assim leis que aceitava como homem livre. A sua nobre figura ingressou no nosso panteão cultural como o símbolo de quantos lutaram ou lutam pela verdade até às últimas consequências, sem fugar nem cumprir missão. Que o outro Sócrates, aquele que argumenta nos magníficos diálogos platónicos, é uma mera criação literária, o prova o az de uma filosofia que não era sua mas do maior dos seus discípulos.

7.

Falar de Platão e do platonismo de forma objectiva é um projecto grande de atenção porque o homem e a doutrina constituem um polo de divergências fundamental e fascinante. Se a importância e a influência desse pensador genial são unanimemente reconhecidas, se ninguém nega uma excepcional qualidade aos seus textos, já o significado do platonismo têm sido a divergências significativas. E tal querela ainda é envenenada pelo facto de Platão se ter comprometido tanto em termos políticos, na acção prática e não apenas na formulação teórica.

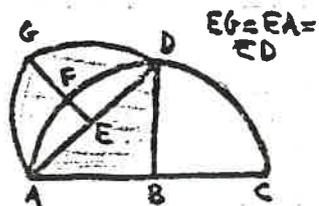
Ateniense, Platão nasceu em -428, quando já começara a guerra civil e se manifestava o declínio acelerado da civilização helénica. Aos vinte anos encontrou Sócrates, que o deslumbrou, mas nem por isso deixou de colaborar com o governo ditado pelos Trinta Tiranos, imposto a Atenas pelos espartanos vitoriosos: tinha ambições políticas (as quais nunca renunciou e que, mais tarde, lhe iriam custando caro), era de família rica e aristocrática, e entre os chefes da oligarquia figuravam alguns dos seus parentes próximos; desenganado, Platão afastou-se da

8.

Não tentaremos sequer apresentar aqui um balanço ou resultado alcançado pelos matemáticos gregos no século II e III, resultado esse que, em boa parte, só nos são acessíveis através de reconstituições feitas a partir de documentos alterados, nomeadamente do "Elemento" de Euclides, pois quase todos os textos originais daquela época se perderam. Contentar-nos-emos, portanto, com algumas indicações significativas que as próprias características do tema contribuem para tornar um tanto desconexas.

No início do século II as matemáticas ainda eram essencialmente pitagóricas, e assim se entende toda a importância então atribuída à teoria das "razões" ou das proporções. Considerava-se, por um lado, as proporções ditas aritméticas, definidas sob a forma $\frac{a-b}{b-c} = \frac{a}{b}$ que equivale a escrever $a-b = b-c$ ou, ainda, $b = \frac{a+c}{2}$; era pois importa a igualdade das diferenças entre os três termos sucessivos a , b e c , tal como ocorre na sucessão dos inteiros, e o cálculo do termo médio b fazia-se por meras operações aritméticas. Por outro lado, eram concebidas proporções ditas geométricas, de definição já mais complexa $\frac{a-b}{b-c} = \frac{a}{b}$, quer dizer $\frac{a}{b} = \frac{b}{c}$ ou $b^2 = ac$, problema equivalente à construção de um quadrado com a área de um certo retângulo, e a determinação do termo médio exigia então a extração de uma raiz quadrada. Enfim, também eram estudadas as chamadas proporções harmônicas ou musicais, de expressões canônicas $\frac{a-b}{a-c} = \frac{a}{e}$, ou $\frac{a}{a-b} = \frac{e}{a-c}$, ou também $\frac{2}{b} = \frac{1}{a} + \frac{1}{c}$, assim denominadas porque se a relação entre a e e correspondesse ao intervalo de uma oitava ($a = 2e$) então $\frac{a}{b} = \frac{2}{3}$ teria o intervalo de uma quinta e $\frac{b}{c} = \frac{3}{4}$ o intervalo de uma quarta.

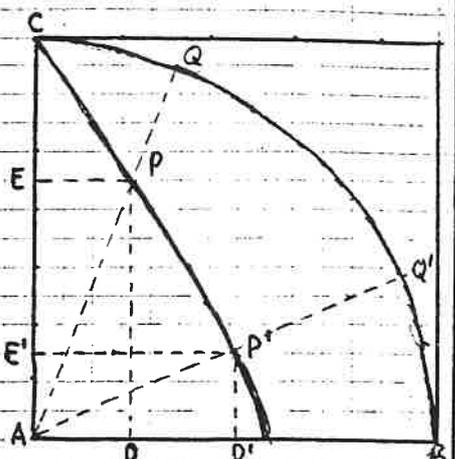
Nos meados do século, iniciou-se a análise de problemas como o da quadratura do círculo, o da duplicação do cubo ou o da triseção do ângulo que elevaram as matemáticas a outros níveis de abstracção. O maior matemático de então teria sido Hipócrates de Quion, um pouco anterior ao famoso médico Hipócrates de Cro, pois o seu apogeu data de 450-430, e que foi um dos primeiros a tentar arrumar a sua ciência nas "Elemento" — a etimologia da palavra significando até resolver as crises, ordená-las como as letras do alfabeto. Ao estudar a questão da quadratura do círculo, Hipócrates inventou três figuras limitadas por arcos de círculo cujas áreas se podiam facilmente calcular; o exemplo mais simples é o da figura junto, onde a "luneta" compreendida entre o arco $A\hat{F}D$ com centro em B e o arco $A\hat{B}D$ com centro em E tem a mesma área que o triângulo $A\hat{O}B$. Também demonstrou que a determinação do valor x da aresta de um cubo de volume duplo do do cubo de aresta a se reduz ao cálculo da dupla proporção geométrica $\frac{a}{x} = \frac{x}{y} = \frac{y}{2a}$, e levou-nos um raciocínio notável sobre a triseção do ângulo o qual, evidentemente, não solucionava a questão "com a régua e o compasso" mas sugeria importantes desenvolvimentos técnicos.



uma
épico

$\sqrt{2} = 1,414$

A propósito da trisseção do ângulo, é curioso assinalar que pela mesma altura o sofista Hípias, tão maltratado por Platão em dois dos seus diálogos, se revelou um matemático de talento, sendo-lhe atribuída a invenção de uma das primeiras curvas transcendentes conhecidas, a "quadratriz", que é definida pelas posições sucessivas de um ponto P cuja projecção E sobre AC se desloca com velocidade constante enquanto ele permanece sobre o raio vector AQ que roda com velocidade angular ^{constante}. De facto, a quadratriz não só permite realizar a trisseção de um ângulo mas até dividi-lo num número qualquer de partes pois, com efeito, teremos, por construção,



$\widehat{BAC} : \widehat{BAQ} = \widehat{AC} : \widehat{AE}$, isto é, $\widehat{BAC} : \widehat{AC} = \widehat{BAQ} : \widehat{AE}$ e, análogamente $\widehat{BAC} : \widehat{AC} = \widehat{BAQ'} : \widehat{AE'}$ o que implica $\widehat{BAQ} : \widehat{AE} = \widehat{BAQ'} : \widehat{AE'}$; portanto, para dividir o ângulo \widehat{BAQ} em n partes, basta determinar o ponto E' tal que $\widehat{AE'} = \widehat{AE} / n$.

As dificuldades provenientes ^{da identificação} do reconhecimento pelos pitagóricos ^{dos} da existência de números "irracionais", isto é, que não podem ser expressos ^{pelo} ~~como~~ cociente de dois inteiros já preocuparam os matemáticos do século VI. No diálogo platónico que tem o seu nome, o jovem Taeteto afirma que o seu mestre Teodoro de Cirene (nascido cerca de -470) demonstrara que as raízes quadradas de todos os inteiros até 17 — salvo, obviamente, os "quadrados perfeitos" — são irracionais. Taeteto, (c. 415-364), um ateniense que ainda foi discípulo de Sócrates e permaneceu ligado ao grupo platónico, continuou a ser recordado como o autor da demonstração, à qual Platão foi tão sensível, de que existem cinco e só cinco poliedros regulares; o ~~restar~~ cubo e o tetraedro eram conhecidos há muito, os pitagóricos teriam identificados o octaedro e o dodecaedro, e teria sido Taeteto quem provou que o icosaedro completava a lista; cre-se que Euclides se limitou a retomar o raciocínio original de Taeteto, e vai-se aliás firmando a convicção de ter sido ele o autor de boa parte da magnífica teoria dos irracionais exposta no IV livro do "Elementos" euclidianos. Apresentada em termos muito diferentes, esta concepção dos "irracionais" não diverge todavia essencialmente daquela que o alemão DeleKind viu a propor em 1872: a cada ponto da recta corresponde um número, afinal limitado pelo corte que origina entre todos os outros números ao descrevê-lo em duas classes, as que são maiores e as que são menores do que ele; assim, $\sqrt{2}$ é definido pela decomposição dos números entre aqueles cujos quadrados são respectivamente maiores ou menores que 2.

O pseudo-atomismo dos pitagóricos, esta ideia da recta constituída por pontos extensos, estava agora totalmente ultrapassada, suprimindo dois dos embaraços paradoxais de Zenão sobre o movimento. Em contrapartida, permanecia obscuro como é que Aquiles, comendo muito mais depressa, conseguia apertar a tartaruga, pois quando ele chegava ao ponto P_1 de que ele partira já a via mais à frente em P_2 , e assim sucessivamente de modo que Aquiles terá que percorrer um número infinito de distâncias finitas até alcançar a tartaruga; a dificuldade parecia de se considerar que qualquer soma infinita de termos positivos era necessariamente infinita, ideia falsa que foi corrigida graças sobretudo ^à Eudócio de Cnido (c. 408-355)

9.

Ao falarmos das matemáticas gregas não ~~podemos~~ ^{se pode} evitar uma referência ~~especial~~ especial a Eudócio, cuja obra foi tão importante que ~~George Santon~~ foi ao ponto de afirmar que, na perspectiva da história das ciências, a primeira metade do século IV não devia ser chamada a época de Platão mas a época de Eudócio. Nasceu na pobreza, só à custa de sacrifício se conseguiu formar e ~~até frequentar~~ ^{só pôde frequentar} a Academia durante uns meses, mas quando voltou a Atenas, na maturidade, era um astrónomo e matemático ~~ilustre~~ ^{a quem} o próprio Platão adon necessário ~~para~~ ^{oferecer} um banquetes ~~para~~ ^{para} os seus alunos.

Considera-se em geral que a teoria das proporções, a mais difícil e profunda de quantas Euclides tratou, foi essencialmente obra de Eudócio. Tem pouca informação a esse respeito, e a complexidade do assunto não se presta a exposições sumárias, de modo que dizem tão só que questões intrincadas como a da duplicação do cubo passaram a ser resolvidas por métodos puramente geométricos. Mas ainda mais importante foi a introdução do conceito de limite e a sua utilização rigorosa na demonstração matemática, primeiro anúncio do que viria a ser, dois mil anos mais tarde, o cálculo infinitesimal. Para ilustrar o método de raciocínio ~~de~~ ^{de} Eudócio, à falta de melhor, retomamos a demonstração feita por Euclides no "Elementos" de que a área de um círculo é proporcional ao quadrado do raio, resultado utilizado desde há muito mas que Eudócio foi o primeiro a demonstrar ~~porventura~~ ^{porventura} nestes mesmos termos.

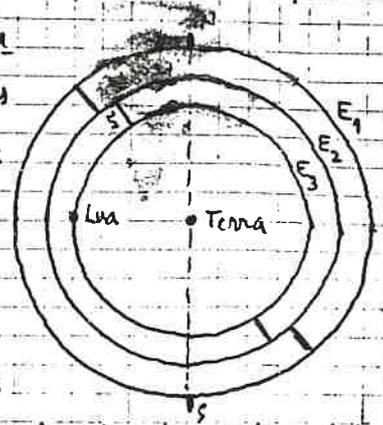
Dados dois círculos quaisquer de áreas A e B e de raios a e b , trata-se de provar que $A:B = a^2:b^2$. Sabia-se que o resultado era verdadeiro para as áreas ~~de~~ ^{de} polígonos semelhantes inscritos (ou circunscritos) em A e B , que dizem que $A':B' = a^2:b^2$, e a novidade residia no processo de passagem ao limite. Supõe-se então que a tese é falsa, que $a^2:b^2$ não é igual a $A:B$ mas a $A:C$, com $C < B$ ou $C > B$, e prova-se que ambas estas hipóteses são contraditórias e, portanto, que tem de ser $C = B$.

Admitamos, em efeito, que $C < B$. Então $B - C$ é um número positivo, finito, e por muito pequeno que ele seja podemos sempre considerar inscrito em B um polígono com um número de lados suficientemente grande para que a sua área B' seja tal que $B' > C$. Ora sabemos que $a^2:b^2 = A':B'$ e admitimos que $a^2:b^2 = A:C$, o que implica $A':B' = A:C$; como podemos sempre tomar $B' > C$, vem daí que $A' > A$, conclusão absurda porque, por definição, A' é a área de um polígono inscrito e, por consequência $A' < A$. A demonstração de que também não é aceitável a hipótese $C > B$ estrutura-se de forma análoga, recorrendo à consideração de polígonos circunscritos, e a beleza e o rigor destes raciocínios são indiscutíveis. Mas como se trata de demonstração por redução ao absurdo, há que ter conhecimento prévio do resultado a alcançar, o que limita seriamente o valor prático do método para a descoberta de novas relações.

A despeito da importância (e apesar da sua obra matemática, o nome de Eudócio sobreviveu sobretudo como o de um grande astrónomo, o autor da primeira descrição quantitativa dos movimentos aparentes dos corpos celestes. Adoptando sem reservas o quadro conceptual introduzido pelo platonismo, essa descrição ^{que} definiu os movimentos dos astros a partir de notações uniformes de esferas todas com o mesmo centro, o centro do mundo

onde estaria situada a Terra imóvel. Por essa razão foi chamada a teoria das "esferas homocêntricas".

Num tal esquema, as estrelas fixas não levantavam quaisquer dificuldades, pois bastava supô-las ligadas a uma única esfera que, em 24 horas, rodasse uniformemente de norte para ocidente em torno do eixo terrestre, promovido a "eixo do mundo", mas os movimentos "planetários" revelavam-se naturalmente mais intrincados, cada planeta exigindo a ação de várias esferas concêntricas que, de algum modo, se moviam de fora para dentro. Assim, para qualquer planeta, havia sempre uma esfera exterior análoga à das fixas para explicar o seu movimento diurno, à qual estava ligado o eixo mais ou menos inclinado de uma segunda esfera rodando com outro período, porventura no sentido oposto; esta segunda esfera influa no movimento, com outros parâmetros, de uma terceira esfera, e no caso do Sol e da Lua é que Eudóxio não introduzira ainda uma quarta esfera. O movimento aparente do astro correspondia sempre ao de um ponto equatorial da esfera interior.



As esferas homocêntricas da Lua
 $T_1 = 1 \text{ dia}$ $E \rightarrow 0$; $T_2 = 233 \text{ meses}$
lunares $E \rightarrow 0$; $T_3 = 27,5 \text{ dia}$
 $O-E$.

Com 1 esfera para as fixas, 3 para o Sol ou a Lua e 4 para cada um dos restantes planetas, o sistema de Eudóxio exigia a introdução de 27 esferas concêntricas. A descrição quantitativa dos movimentos era medior, salvo no caso da Lua onde se verificava uma razoável concordância com as observações e até se chegaram a prever eclipses. Para "salvar os factos", um astrónomo peripatético da geração seguinte chamado Calipo complicou o modelo elevando para 34 o número de esferas concêntricas, mas a sobrevivência do sistema deveu-se sobretudo ao facto de Aristóteles ter fundado nele a sua cosmologia. Numa perspectiva meramente astronómica a teoria alterin das excêntricas e dos epiciclos revelará capacidades previsionais muito maiores.

10.

Falaremos agora de Aristóteles, esse homem que as circunstâncias históricas e o seu génio transformaram num dos Vultos cimeiros da história da cultura e da ciência. Não foi por acaso que ^{a sua doutrina} se tornou numa espécie de quadro de referência, ^{onde} ~~o qual~~ ^{a evolução do pensamento} se foi refinando a ^{durante} história cultural do Ocidente ^{por três} milénios seguintes, tornando assim indispensável uma certa familiaridade com o aristotelismo para entender o nascimento do pensamento moderno. De certo, no final da Idade Média e no Renascimento a visão aristotélica do mundo foi combatida e até denegada com a mesma paixão com que fora precedentemente idolatrada, o novo nascendo sempre por cima do velho, mas a distância favorece a objectividade e, se hoje não olhamos o mestre com um olhar anacrónico, a sua estatura intelectual é reconhecida e admirada.

Aristóteles nasceu em -384, numa colónia grega na Trácia, Estágira (e daí que veio a ser chamado o "Estágirita"), filho de um médico do rei da Macedónia. Na adolescência, talvez tenha praticado com o pai, mas ao dezoito anos partiu para Atenas onde permaneceu quase duas décadas na Academia platónica cujo ensino não podia deixar de o marcar profundamente. Quando Platão morreu, em -348, sucedeu-lhe na liderança sem envigalura, como se se tratasse de uma vulgar herança de família, e isso pode ter contribuído para o afastamento de Aristóteles. Em todo o caso, começou então a ensinar e a investigar em livros

II. Chamaram-lhe o "milagre grego" - 10

ciades gregas e, nessa época, até foi perceptor de Alexandre da Macedônia, com quem sempre manteve excelentes relações. Mas, aos 58 anos, Aristóteles voltou a Atenas para aí fundar a sua escola, o Liceu, assim chamado por se situar perto do templo de Apolo Liceo. As suas lições versando sobre a totalidade do saber seriam complementadas por conversas durante longos passeios, e isso valeu ao aristotélico o cognome de peripatético (de "peripatein", passear). Apesar da concorrencia da Academia, o liceu teve sucesso, mas Aristóteles não o dirigiu nem um dúzia de anos, pois estava muito comprometido com o partido macedónico e quando Alexandre desapareceu, em 323, achou prudente fugir, tendo aliás falecido no ano seguinte.

^{Porém} ~~Existem~~ um grande número de obras atribuídas a Aristóteles, algumas delas total ou parcialmente apócrifas, e que são geralmente meras notas de trabalho facultadas ao aluno. ^{de} ~~de~~ ^{Revela-se} ~~incómodo~~ o facto dessas lições reflectirem fases diferentes da evolução do pensamento do autor, o que não deixa de acarretar contradições; os especialistas tentaram ordená-las cronologicamente em o critério de que as concepções de Aristóteles se teriam ido afastando das de Platão e, assim, os tratados de física seriam anteriores aos de zoologia. De qualquer modo, e em casos de consistência, agrupam-se os textos que restam em quatro grandes subgrupos: metafísica e lógica, política e ética, física, ciências naturais. Ignoraremos aqui os textos políticos ou éticos, quanto às ciências naturais, lembraremos apenas que só nos chegaram quatro obras de zoologia onde Aristóteles se revela um observador escrupuloso e um experimentalista hábil, capaz nomeadamente de utilizar com perícia técnicas de dissecação. O seu legado como naturalista bastaria para o imortalizar.

Sabe-se que a palavra "Metafísica" em 14 livros (uma delas apócrifa, outra alheia ao tema) resultou de um agrupamento ulterior de escritos independentes, e a palavra que veio a significar "o conhecimento do ser como ser" surgiu por acaso, porque na colecção clássica de Adriano a "Metafísica" foi colocada acidentalmente após a "Física" ("meta ta physica", após a física). Temo-lo de dizer algo da metafísica de Aristóteles mas, antes disso, referir-nos-emos aos seus dois tratados de lógica sobre o silogismo, a demonstração e a argumentação meramente provável.

O silogismo, instrumento básico da lógica aristotélica, permite deduzir de duas proposições supostas verdadeiras, as premissas, a verdade necessária da conclusão. Os tipos de silogismos considerados por Aristóteles agrupam-se em três figuras as quais os escolásticos putaram uma quarta, mas sobre-se hoje que todas se reduzem às primeiras e reconhece-se que Aristóteles formulou silogismos em um só lugar, onde a conclusão não é uma consequência inevitável das premissas. Também se lhe pode censurar ter veiculado a identificação do raciocínio dedutivo como silogismo (ao qual pouco se recorre em matemática, ciência dedutiva por excelência) e ter vulgarizado um excesso a de longas, técnica de aproveitamento de resultados adquiridos por operações intuitivas que lhe merecem muito menos atenção. Mas estas críticas feitas não afectam o invariável valor da obra de Aristóteles no campo da lógica. Com a formalização das estruturas dos sistemas axiomático-dedutivos, a ciência foi contemplada como um utensílio que em breve serviria a Euclides e a Arquimedes, muito antes dos "Princípios" de Newton rebouarem tais exemplares.

Aristóteles encadeia à física o estatuto de ciência que Platão lhe recusava e, para entender essa invasão temo-lo de analisar algumas das diferenças entre as duas doutrinas. No platonismo, a verdade e a realidade autênticas

situam-se no plano das ideias, mas ao contrário ^{do que ocorre no mundo} ~~substitui~~ das aparências tem vult originais pela percepção sensorial, também pode existir ciência no conhecimento geométrico dos objectos imutáveis. Aristóteles reconhece que a verdade científica provem da demonstração que só se refere ao universal — não há ciência do particular — embora afirme que o universal só resulta da indução feita a partir de verdades particulares alcançadas através dos sentidos. Enquanto Platão dizia que uma bola é uma bola porque participa na ideia de esfera, Aristóteles sustentará que é comparando muitas bolas e abstraindo o que elas têm de comum que chegamos ao conceito universal de esfera.

Nesta nova perspectiva, o universal via-se reabilitado, pois dele provinham afinal as possibilidades de conhecimento. Platão argumentara que só os princípios eternos são objecto de ciência e que nas coisas concretas aparecem somente acidentes corruptíveis e mutáveis, mas Aristóteles retorquiu-lhe-a que "nada é corruptível por acidente, pois o acidente é aquilo que pode não ser enquanto a corruptibilidade pertence necessariamente às coisas onde essa corruptibilidade existe". Há equívoco a dizer que a própria substância das coisas corruptíveis deve ser corruptível e que só aos seres incorruptíveis devem ser atribuídos princípios incorruptíveis; a substância das coisas materiais nunca poderão ser as ideias imutáveis e eternas, porque as causas e princípios da geração e da corrupção também devem nascer e morrer.

Assim foi assegurada a possibilidade de outra ciência, a física, cujo objecto seria o estado do que não é imutável, do que nasce e falece, se transforma ou se move. Num certo sentido, a física era entendida como a ciência do movimento, visto que Aristóteles atribuía a essa palavra um sentido muito lato, tomando-a como sinónimo de mudança, de transformação. Mas para abordar a teoria aristotélica do movimento é necessário recordar previamente a distinção fundamental na sua doutrina entre a categoria de "substância", que abrange substâncias, e as várias categorias de "acidentes".

Segundo Aristóteles, os acidentes podem não ser inerentes às coisas, por exemplo a sua posição, ou pertencerem-lhe a título próprio, como a forma ou as dimensões, e neste caso há-de pertencer a uma das grandes categorias da "qualidade" ou da "quantidade". Pode-se sempre obter uma quantidade por justaposição de quantidades menores da mesma espécie, e esta propriedade característica traduz que a quantidade é arbitrária e tem por terra a matemática. Quanto à qualidade, "é dessas palavras bonadas com muitos significados", mas a forma e outras propriedades sensíveis dos corpos (o quente e o frio, o claro e o escuro etc.) não recebem qualidades; também há "qualidades ocultas", não acessíveis directamente aos sentidos e que apesar de serem percebidas pelos seus efeitos, como gravidade e a ligeireza que aproximam ou afastam os corpos do centro do mundo, ou a virtude magnética do ímã. Há qualidades incompatíveis com as noções de mais e de menos, pois um círculo não pode ser mais ou menos circular, embora em geral assim não seja, um corpo encontrando-se mais ou menos quente. Contudo, e em oposição frontal aos acidentes da categoria da quantidade, os da categoria da qualidade nunca têm grandeza, porque não são arbitrários, e limitam-se a ter intensidades misterando muitas porções de água nunca jamais se obtém água a ferver. Afigura-se haver em tudo isto um inejável bom senso, e as dificuldades virão de a ciência e o bom senso manterem relações complexas.

Para passar agora à doutrina do movimento, distinguiremos nos acidentes que uma substância pode possuir aqueles que nela existem actualmente, que existem pois "em acto", los outros que nela são meramente possíveis e são portanto concebidos tão-só "em potência". Todavia, um acidente poderá ainda existir num terceiro estado, confusão imediata da potência e do acto, e dar-se-á então que a substância se encontra num estado de movimento,

1 litro + 1 litro = 2 litros
 1 litro + 1 litro = 2 litros
 1 litro + 1 litro = 2 litros

II Chamaram-me o milagre grego 11

de mudança. Citando o próprio Aristóteles, "O movimento é o acto do ser em potência enquanto se encontra em potência", e esta nova resposta ao velho desafio de Parmênides pode afigurar-se um tanto subtilina. Analisemos contudo o exemplo corriqueiro do processo de fusão de um pedasso de gelo: no gelo, a água está decerto "em potência", pois ele pode tornar-se água, mas se não limitarmos a consideração "em potência" ao mesmo gelo capaz de fundir e não em vias de fundir; ora, se concebemos a água "em acto", o gelo já estaria liquefeito, e teremos portanto de imaginar essa água "em potência" mas de modo que essa potência se esteja realizando "em acto". Uma tal interpretação vale para todas as categorias de transformações consideradas pelo aristotelismo, seja para os "movimentos locais" que são as comuns mudanças de posição, seja para as transformações físicas dos corpos como a vaporização ou a magnetização, seja até para transformações mais profundas, "movimentos" que afectam os acidentes dos corpos ou mesmo a sua substância, processos de "geração" e de "corrupção" traduzidos por reações químicas ou fenómenos biológicos.

11.

As teorias científicas de Aristóteles deveram muito às dos seus predecessores, e no tratado peripatético há frequentemente o cuidado de examinar as respostas já sugeridas para os problemas em discussão. Essa metodologia que hoje nos facultaria informações preciosas valeu a Aristóteles ser considerado por muitos o primeiro grande historiador das ciências. Mas sem por isso o aristotelismo deixou de se apresentar como uma doutrina altamente estruturada, onde as teorias científicas básicas estão tão enraizadas na filosofia subjacente que revelou difícil alterá-las sem apontar a coerência interna dessa fundida e construída. Aliás, a articulação forte de um edifício teórico de tais dimensões contribuiu provavelmente muito para o crédito de que veio a disfrutar.

A maneira de Platão, o aristotelismo considerava o universo um espaço finito e ordenado, um Cosmos, cujo centro era ocupado pela Terra imóvel. Os argumentos físicos invocados a favor da imobilidade terrestre eram suficientemente sólidos para sobreviverem durante longos séculos: assim, se a Terra estivesse em movimento, como se explicaria lançada ao ar na vertical caíxe no ponto de partida? Mas o mais significativo era a divisão do Cosmos em duas regiões essencialmente diferentes. De um lado haveria a Terra e as suas vicinhanças imediatas, esse reino de confusão e de desordem, da geração e da corrupção, dito o mundo "sub-lunar"; do outro lado os céus, o mundo "lunar", onde os astros perfeitos e inalteráveis reconheciam inelutavelmente os seus movimentos periódicos. Entre a Terra e o Céu nenhuma semelhança, nem na sua constituição nem nas leis que os governam.

A cosmologia de Aristóteles derivava explicitamente da teoria das esferas homocêntricas de Calipso a qual, tal como Eudóxio, se contentara todavia em desenvolver uma interpretação geométrica das observações astronómicas. Ora a natureza do sistema peripatético exigia uma explicação física global desses fenómenos, e por isso a teoria teve de se tornar muito mais complicada. No limite do Cosmos haveria a esfera das fixas, esfera dotada de um Primeiro Motor que a fazia rodar de leste para oeste em 24 horas e na qual estariam

Inerentadas todas as estrelas; graças a esta hipótese simples e intuitiva, cuja alternativa seria um movimento da Terra sobre si mesma muito difícil de aceitar, até se explicava que as posições relativas das estrelas permanecessem invariáveis. Mas logo que abordava o problema dos movimentos dos planetas, incluindo o Sol, tudo se apresentava com uma complexidade ainda bastante maior do que no sistema original de Calipso.

Tomemos o exemplo de Júpiter cujo movimento era interpretado por Calipso graças a 4 esferas consecutivas com orientações e períodos de rotações diferentes, o eixo de cada uma sendo anastado pelo movimento da esfera exterior contígua e o planeta situando-se no equador daquela de menor raio. Na maquinaria aristotélica, não só essas esferas adquiriam realidade física como também era necessário ligá-las mecanicamente; além disso, para que o sistema constituisse realmente um todo, a esfera exterior de Júpiter tinha de ser anastada pela esfera interior de Saturno e, em consequência, a construção original de Calipso era falsçada, tornando-se impossível atribuir à esfera exterior de qualquer planeta um movimento análogo ao das fixas.

Ciente da dificuldade, Aristóteles deu-lhe uma solução brutal introduzindo as chamadas "esferas compensadoras". Retomando o caso precedente, contentou-se em postular que no exterior das 4 esferas de Júpiter há 4 outras com movimentos opostos aos das primeiras, de modo a que o efeito total se compensasse permitindo, na prática, que fosse como se não houvesse interação entre os planetas. Os astrónomos periféricos, nomeadamente os macedônios, assinalariam que foi inadvertência o Mestre não aproveitara a possibilidade de simplificar um tanto o modelo, eliminando as esferas que asseguravam os movimentos diurnos dos planetas e as respectivas "esferas compensadoras", pois o mesmo resultado podia ser obtido só pela acção da esfera das fixas sobre todos os planetas. De facto, ele não o fez, e com mais de meia centena de esferas só conseguia previsões quantitativas muito imperfeitas. A astronomia de Aristóteles era tão pouco convincente que a sua sobrevivência só se deveu ao prestígio do seu autor, pois depressa seria suplantada pela teoria das órbitas e dos epiciclos que começa a tomar forma logo no século seguinte.

55 esferas (Kuhn)

Os privilégios concebidos nos céus aos movimentos circulares e uniformes, que eram de algum modo uma justificação da profecia dos astros, deixaram de ter qualquer razão de ser no mundo sub-lunar, na Terra que era o domínio da física. E na física aristotélica primava a ideia de que cada coisa tem um lugar que lhe é "natural", que convém a sua natureza: as coisas "graves", porque são graves, tendem a aproximar-se do centro do Cosmos que é o centro da Terra, enquanto as coisas "ligeiras", porque são ligeiras, tendem a afastar-se dele. Sendo a gravidade e a ligeireza meras qualidades, pois não formam uma grandeza numérica susceptível de ser adicionada, não deixam contudo de assumir diferentes intensidades e, assim, seria concebível imaginar todas as coisas nos seus lugares naturais, uma situação que tendia a perpetuar-se e, por isso, mereceria ser considerada um "estado". Mas o facto é que o movimento existe na Terra e, embora para cada corpo seja algo de transitório que se extingue por si mesmo, a desordem global resultante do conjunto dos movimentos persiste. É essa movimentação desordenada que a física deve procurar explicar.

Neste quadro conceptual, Aristóteles foi levado a classificar os movimentos em duas classes distintas: os movimentos "naturais" que levam o corpo para o seu devido lugar e cuja razão de ser é a própria natureza desse corpo, e os outros movimentos ditos "violentos", que só podem resultar da acção de uma causa exterior, de um "motor", que é necessariamente o movimento de outro corpo contíguo. Esta distinção só trazia afe-

II - Chamarum - de o milagre grego - 12

nal a diferença evidente que há ^{por exemplo,} entre o comportamento de uma pedra quando se desloca sobre o tampo de uma mesa ou quando cai dessa mesa; num caso é necessário empurrá-la, fazem intervir um "motor", e o movimento cessa se o motor deixar de actuar, no outro o corpo desloca-se na vertical espontaneamente, sem necessidade de qualquer intervenção exterior. E se a pedra se move de cima para baixo é porque se trata de um corpo grave, por já um balão cheio de ar tenderia a mover-se na vertical de baixo para cima, de acordo com a sua leveza.

Para Aristóteles, nem todos os graves caem igualmente depressa: no "Tratado do Céu" ele sustenta que o tempo necessário para cair de uma dada altura é inversamente proporcional ao peso do corpo. Algures na sua "Física" reconhece-se que ~~em~~ todos os movimentos não se processam com velocidade constante, Aristóteles afirmava que, se o peso a qualidade devido à qual um corpo tende para o seu lugar natural, à medida que o corpo se aproxima desse lugar essa qualidade aumenta de intensidade.

Quanto aos movimentos violentos, uma ideia essencial é que pela sua natureza eles têm de ter um carácter transitório e, portanto, uma duração finita. A exigência de uma acção permanente de um motor para assegurar a existência de um movimento violento — ideia que se afigura fruto do bom senso e da observação, por a carne para se o bumo deixa de puxar — levanta todavia o problema de explicar o movimento violento dos projecteis. O que faz mover uma pedra arremessada ao longe pela mão ou uma seta disparada por um arco? Devido à falta de melhores explicações, Aristóteles admite que é o próprio ar que serve de motor, porventura porque o próprio movimento do projectil provocaria o aparecimento de uma espécie de corrente de convecção em que o ar pressionado pelo móvel que avança rapidamente ocuparia o vazio que esse avanço deixaria atrás do móvel, o vazio sendo para Aristóteles algo de finalmente impossível. Esta explicação afigura-se tanto mais paradoxal quanto é o próprio Aristóteles quem insiste na resistência do meio físico no qual o movimento se processa. Ele afirma, por exemplo, que se o ar for duas vezes mais subtil do que a água, o mesmo móvel levará o dobro do tempo a percorrer um certo caminho na água que no ar.

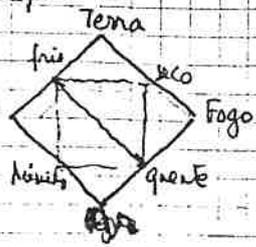
Enfim, não quereria deixar de assinalar que Aristóteles também contribuiu a questões da cinemática dos movimentos. Diz ele que "se um móvel se desloca animado de dois movimentos tais que os espaços nem mesmo tempo formam uma relação invariável, o móvel desloca-se à segunda a diagonal de um paralelogramo cuja lado tem comprimento com essa mesma relação". Em consequência, "uma trajetória curva surge quando o móvel está animado de dois movimentos cuja relação não permanece constante de um instante para outro."

12.

Resta-nos enfim examinar a doutrina de Aristóteles sobre a constituição íntima da matéria, um tema no qual não poderíamos deixar de reflectir a distinção radical por ele estabelecida entre o "mundo lunar", o céu, e o "mundo sub-lunar", a Terra e as suas vizinhanças imediatas. Assim, para Aristóteles, o carácter cor

naftivel das coisas existentes na Terra explica-se por elas serem formadas por combinações de vários elementos que seriam afinal os Quatro Elementos já propostos por Empédocles - A Terra, o Fogo, o Ar e a Água -

as quais Aristóteles junta dois pares de princípios opostos, o quente e o frio, o seco e o húmido. Quanto ao mundo lunar, os céus na sua forenidade, Aristóteles considera que eles não podem ser constituídos por mais de um Elemento, que seria o famoso Quinto Elemento, o Éter.



Assim a introdução do Quinto Elemento não foi motivada pelo desejo de encontrar um correspondente ao quinto sólido regular, porque se a teoria Platónica dos Quatro Elementos ainda preservava algo das ideias aristótelicas e, para tal, estabelecia essas correspondências geométricas, o aristotelismo que negava fortemente a mera possibilidade de existência do vazio contra o fronte com a doutrina atômica. Esta posição foi por vezes considerada como um retrocesso, com um retorno a uma concepção puramente qualitativa de matéria à qual deixavam de estar subjacentes noções quantitativas de índole geométrica. Mas há que reconhecer que essa crítica não infundada.

Nada impediu Aristóteles de guardar firmemente as relações estabelecidas por Platão entre os Quatro Elementos e os quatro sólidos regulares, considerando até que ao último desses sólidos, o dodecaedro, correspondia o Éter. Mas que teria ele ganho com isso? Há que reconhecer que isso seria puramente especulativo e que, de resto, tendo a atomismo filosófico antigo tanta capacidade explicativa dos fenómenos muito reduzida - de certo bem menor do que teria os Quatro Elementos. Afirmar que a Terra é seca e fria, a Água fria e húmida, o Ar húmido e quente, o Fogo quente e seco não parece demasiado. Parece compreensível, por exemplo, que aquecendo a Água, húmida e fria, ela se transforme em algo de húmido e quente, o Ar - vapor de água. Pode-se mesmo tentar, através das suas propriedades, inferir quais os Elementos predominantes em determinadas substâncias: se são facilmente combustíveis devem incluir uma elevada proporção do elemento Fogo, mas se a ação do Fogo as endurece estas devem predominar a Terra. Explicações deste tipo são evidentemente ingénuas mas nem a esse nível o atomismo se revelava competitivo.

Lloyd 130

Retornando então o problema de introduzir o Quinto Elemento, já admitimos que a necessidade de o considerar estava em larga medida implícita na separação radical entre os céus e a Terra que, nessa época, parecia ter fundamentos sólidos de natureza experimental. A natureza íntima do mundo lunar devia ser diferente e daí a necessidade de introduzir o Quinto Elemento; embora Aristóteles não deixe de aludir à velha crença na natureza lívida dos céus, os argumentos de ordem empírica eram indubitavelmente convincentes. De resto Aristóteles estava consciente das dificuldades implícitas na hipótese da existência do éter. Como se processava a interação entre o Quinto Elemento e os Quatro outros? Ou, para tomar algo de mais concreto, como entender que o sol, corpo celeste e, por isso, constituído de Éter, fosse indubitavelmente quente? Aristóteles não encontrou resposta a estas questões pertinentes mas, tanto quanto podemos julgar, a hipótese alternativa de não introduzir um Quinto Elemento ainda lhe parecia levantar problemas mais graves. Só muito recentemente é que se conseguiram encontrar respostas alternativas satisfatórias.

Lloyd 132

1.

A supensão por Alexandre da Macedónia, em -335, da débil independência de que ainda disfrutavam as cidades gregas foi somente o prelúdio de um empreendimento muito mais ambicioso, a conquista do império persa. A intenção de se projectar era apenas aparente, pois a eficácia das falanges macedónicas, produto de uma civilização mais avançada, mostrou-se capaz de libertar as centenas de milhares de escravos e de mercenários do exército do Grande Rei e, assim, em poucos anos, Alexandre apoderou-se de um território enorme que se estendia até à Índia e às cataratas do Nilo. A morte prematura do conquistador (-323) libertou as forças centrífugas geradas por um espaço tão desmesurado e, após um longo afriamento entre os seus generais pela partilha da herança, acabaram por se reconstituir no século III nas tantas e tantas ditos agora "helenísticas": os Lagidas no Egipto, os Selucidas instalaram-se na Ásia Menor, a Macedónia correu a dinastia dos Antigonidas, enquanto a Grécia recuperava uma independência um tanto fictícia e, na periferia asiática, surgiam várias monarquias parcialmente helenizadas. Se a tentativa de unificação política se revelou inviável, dela resultou todavia uma certa unificação cultural cujo efeito ainda se vai significar.

De facto, as classes dirigentes de todas essas cidades tinham passado a ser de cultura helenica. O próprio Alexandre empreendera vigorosamente a helenização do império, e mesmo durante as campanhas militares fundou em muitas cidades segundo o cânone grego uma das quais, Alexandria, no delta do Nilo, haveria de ter um góncio latino; fora também ele quem criou as primeiras escolas onde se ensinava grego, que se iria tornar a língua oficial das monarquias helenísticas, quem incentivara o casamento dos seus soldados com mulheres orientais, em suma, quem desencadeara uma estratégia de assimilação prosseguida pelos seus sucessores. E esse processo sistemático foi reforçado desde cedo pela chegada de muitos gregos, aventureiros sem escrúpulos, artifices sem trabalho ou mercadores, sem religião, atraídos por essas terras distantes onde a vida parecia fácil.

Afigura-se que, neste novo contexto, os problemas crónicos das "poleis" estavam, enfim, solucionados. Com a vaga migratória, o desemprego foi eliminado, as tensões sociais diminuíram, até se esbateram as rivalidades entre as cidades da Hélade; graças à difusão da sua língua e à abertura de rotas seguras, os negociantes gregos puderam ir vender lá longe, por bom peso, mercadorias sem mercado, recuperando assim uma prosperidade perdida. Mas foi só de pouca duração, porque as dificuldades de sempre reapareceram numa escala mais vasta.

Muitos soberanos helenísticos foram homens de cultura que se apossaram em profundeza das artes e das ciências, mas esses despotas esclarecidos continuaram a abusar, o que era inevitável, as velhas tradições teocráticas locais. Cidades com estruturas aparentadas às do mundo grego clássico foram muito raras nas monarquias helenísticas, cujas pesadas máquinas burocráticas tinham sobrevivido quase sem alterações. E as deficiências desse sistema ainda tinham sido agravadas pelo feroz contato entre os invasores ou assimilados e as grandes massas humanas cujas vidas pecárias lhes estavam submetidas. O esclavagismo adquiriu uma importância crescente e foi tornando cada vez mais difícil a sobrevivência dos trabalhadores livres, enquanto a riqueza se ia concentrando nas mãos de um pequeno grupo dirigente que pôde adoptar um estilo de vida requintado e faustoso. Agravação pelas

guerras, a crise económica tornou-se permanente, demonstrando a ineficácia das medidas por vezes ensaiadas para a debelar; por exemplo, quanto ao Egipto se tentou estabelecer uma economia rigidamente planificada, os camponeses aprenderam a fazerem que essa política só se destinava a explorá-los com maior eficácia e, xantando-se incapazes de resistir de frente, desorganizarão o sistema recorrendo à fuga.

Talvez de controlo, talvez sem solução, fachada esplêndida de um edifício profundamente degradado, o mundo Helenístico não tinha condições para perdurar. Em menos de três séculos, todos esses estados serão absorvidos por um imperialismo mais moderno vindo do Mediterrâneo ocidental e, no cume da era cristã, Roma já tinha conseguido unificar num gigantesco império uma multiplicidade de povos que habitavam a área civilizada desta região do mundo. Contudo, e foi surpreendente que possa parecer, o primeiro grande apogeu da ciência foi um fruto da cultura Helenística.

2.

Tal como a acção de Alexandre encerra uma época da história sócio-política da civilização mediterrânica, a obra de Aristóteles marca o fim de um período da sua história cultural. Embora Atenas não tivesse perdido a primazia adquirida no campo filosófico, as novas doutrinas que ali surgiram durante o século III forneciam características novas que se opõem claramente às da fase precedente: elas ^{abandonaram o} ~~renunciaram ao~~ afonso para entender a natureza e para orientar a acção do homem sobre o mundo, assumindo-se como éticas de renúncia a qualquer espécie de intervenção humana, como ensinamentos sobre as formas de proceder para fugir à infelicidade individual. Nessa tempo híficeis, já só se afigurava importante para a filosofia ajudar os homens a suportar da melhor maneira a sua triste condição.

O primeiro dos fundadores deste novo tipo foi Pitágoras (350-275), que tendo acompanhado Alexandre na sua expedição pudera entrar em contacto com o arcaísmo hindu; ao regresso a Atenas, começou a ensinar um **escepticismo** em preocupações éticas, sustentando que nas opiniões não havia verdade nem erro e, por conseguinte, que a única atitude sã era a **indiferença, o silêncio, a supressão das paixões**. Quanto a Epicuro (341-270), um ateniense bondoso que adoptara uma vida austera, considerava que todo o valor da existência **vivia no prazer**, mas como o prazer gerava em regra sofrimento nada haveria afinal de melhor que a calma sensação de não sofrer, a ausência de desejos ou temores, a **"ataraxia"**. Na doutrina do **estoicismo**, cujo fundador tinha sido Zenão de Citium (322-264) e vivia a ser adoptada pelo imperador Marco Aurélio, havia uma pequena tónica voluntarista: tratar-se-ia de viver de acordo com o próprio princípio, com a razão e com a natureza, respeitando as leis naturais e agindo com boa intenção, pois se nada nem ninguém podia inflectir o destino, o homem podia ao menos suportá-lo sem queixumes.

Destas doutrinas, o epicurismo viria a influenciar a história das ciências porque, com o propósito de libertar os humanos do terror da morte e do castigo dos deuses, Epicuro foi levado a adoptar uma física mecânica esta, capaz de eliminar qualquer ameaça à sobrevivência da alma. Ora esta física era apenas o atomismo de Demócrito com umas tantas inovações interessantes: atribuiu-se aos átomos, agora limitados a um número finito de espécies, um **peso essencial** cuja acção os deslocava de cima para baixo com trajetórias que não eram paralelas mas ligeiramente oblíquas, facilitando assim os seus encontros fortuitos geradores do aparecimento de inúmeras substâncias complexas. Foi graças aos epicuristas, cujas teses o romano Luécio (98-55) muito

III - Os frutos frágis da ciência helénica - 2

contribuiu para dialogar com um belo poema filosófico "De natura rerum", que o atomismo acabou por assegurar a sua sobrevivência.

A coexistência deste indubitável legado filosófico com uma criatividade científica evidente require, em dúvida, uma tentativa de explicação e, nessa perspectiva, deve-se considerar relevante o facto da ciência helénica já ter obtido um conjunto de resultados e uma metodologia cujas potencialidades ainda prometiam muito. Assim, os matemáticos desse tempo tinham definido vários problemas interessantes, e dispunham de ferramentas para os investigar; a tentativa de Eudóxio para resolver o problema astronómico esboçado por Platão usufruiu de alternativas que se afiguravam mais flexíveis e fecundas; os trabalhos de Aristóteles, no domínio da lógica forneciam virtualidades científicas ainda por explorar. Em suma, a ciência chegara suficientemente longe para possuir um dinamismo interno que, num contexto propício, teria assegurado-lhe a capacidade de prosseguir o seu avanço durante um certo tempo.

Ora aconteceu, justamente, que nos primeiros do período helénico os cientistas dispuseram de condições de trabalho-tão favoráveis que só numa época mais recente voltaram a ter a par com parágrafos. E certo que os investimentos actuais com essas tarefas pretendem finalmente propiciar inovações tecnológicas capazes de os tornar rentáveis, enquanto os seus sucessores de então esperavam, quanto muito, utilizar a ciência nas artes da guerra ou, às vezes, em justificações religiosas. Mas se a investigação era financiada como um produto de luxo, pelo prestígio que ela assegurava, nem por isso os honras de ciência luxavam de obter excelentes condições materiais de trabalho. Afastando-se significativamente da filosofia, o conhecimento científico atingiu assim um nível que só viria a ser claramente ultrapassado quase dois milénios mais tarde.

O paradigma das instituições científicas dessa época foi o Museu de Alexandria, que os estabelecimentos de métodos em Pérgamo, Samos, Rodas, etc. nunca conseguiram igualar. Conhecemos mal as regras do Museu alexandino, supondo-se todavia ter sido uma espécie de transposição em grande do liceu ateniense. Após a morte de Aristóteles, o ex-aluno do liceu foi o seu amigo Teofrasto, continuador da obra do mestre na botânica e na meteorologia, e quando faleceu muito velho, em 287, sucedeu-lhe Strabo ou Estrabão de Laodisaea, leguminoso "o fino" devido ao seu prestígio como estudioso da natureza; Strabo, que se interessou pela "pneumática", as propriedades dos gases, e analisou com pertinência o método experimental, foi escolhido por Ptolomeu Soter, o primeiro dos reis lagidas do Egipto, para preceptor de seu filho, o futuro Ptolomeu Filadelfo, e creu-se que ele teve assim uma grande influência na instauração do Museu de Alexandria, cidade onde já reinava aliás um grande actividade científica.

Sustentado pelo exército real, o Museu, o "templo das musas", equivalia a uma universidade moderna, com anfiteatro e laboratórios, salas de trabalho para os estudantes, e refeições comuns. Umas dezenas de professores - o seu número não era fixo - secretários tinham-se juntado a outros nos seus trabalhos dedicavam-se livremente à ensino e à investigação, tendo para isso ao seu dispor um observatório astronómico bem equipado, um jardim botânico onde se cultivavam plantas das mais diversas regiões, um jardim zoológico onde se acimatavam até animais exóticos, e várias bibliotecas, uma das quais chegou a dispor de mais de meio milhão de manuscritos sobre todos os

ramos do saber. Entende-se que instituições oferecendo tais facilidades tivessem ajudado mais a continuidade do progresso das ciências mesmo numa época em que o contexto cultural era de crise.

3.

Cronologicamente, o primeiro grande nome a referir é o de **Euclides**. Na sua vida, apenas se sabe ter trabalhado em Alexandria por volta de -300 e, quanto à obra, perdeu-se a maioria dos seus escritos. Mas para aquilo que o resto do cientista e a importância dos seus resultados, bastam-nos os **"Elementos"**, esse grande tratado matemático ao qual se chegou a dizer ter sido o livro mais considerado de toda a história das ciências. Na verdade, a influência desse texto está indiretamente comprovada pelo facto, sem paralelo de possuirmos mais de um **milhar de cópias manuscritas de uma obra tão extensa, a qual vinia a ser recitada inúmeras vezes após a invenção da imprensa.** Durante três milénios, os **"Elementos"** foram considerados insubstituíveis, e mesmo após a descoberta por Gauss, Lobatchevsky, Bolyai e outros, cerca de 1830, de geometrias mais gerais, o resto da teoria exposta pelo mestre alexandrino não diminuiria porque, sendo simples e intuitiva, permaneceu o instrumento privilegiado para a resolução dos problemas geométricos concretos: geometria continuava a significar implicitamente geometria euclidiana.

Já assim sabemos que uma **boa parte dos "Elementos" não apresentava resultados originais**, pois Euclides herdara-os de **grandes matemáticos helênicos do século IV**, como Taeteto ou Eudóxio. Mas ao serem fundidos num só molde essas teorias parcelares enriqueceram-se mutuamente, tanto mais que a formidável **síntese euclidiana foi profundamente criativa.** Aliás, e ao contrário do frequentemente se pensa, embora os **"Elementos"** estejam escritos de uma ponta à outra na perspectiva **geometrizante da corrente dominante das matemáticas gregas**, o seu conteúdo ultrapassa o quadro específico da geometria para tentar abarcar a totalidade dos conhecimentos matemáticos dessa época.

Dos **treze "livros"** que constituem os **"Elementos"**, os **quatro primeiros ocupam-se efetivamente da geometria plana**, estudando as relações das retas e dos ângulos, determinando as áreas de polígonos e do círculo ou deduzindo o velho teorema de Pitágoras, enquanto os **três últimos livros tratam da geometria no espaço**, derivando as expressões dos volumes do paralelepípedo, do prisma, da pirâmide e da esfera, ou demonstrando a existência desses cinco (e do cinco) sólidos regulares que tanto tinham interessado Platão e ainda fascinaram Kepler. Mas o resto da obra já pouco ou nada tem a ver com a geometria: os **livros V e VI são essencialmente dedicados à teoria geral das proporções**, ainda que não esqueçam a sua aplicação ao estudo da semelhança das figuras planas; os **livros VII, VIII e IX ocupam-se apenas dos números**, desde a questão da divisibilidade dos inteiros até à de soma de progressões geométricas, e também se encontra aí a primeira referência a um **problema de extremo, a seu modo traçado de que, entre todos os retângulos com um dado perímetro, é o quadrado aquele cuja área é maior**; quanto ao **livro X**, inventura o mais difícil de todos, desenvolve uma **teoria geométrica dos irracionais**, onde um número como \sqrt{A} era naturalmente concebido como o comprimento do lado do quadrado de área A mas sem que isso impedisse que o conceito subjacente fosse afinal semelhante ao que hoje adoptamos: o número $\sqrt{2}$, por exemplo, era afinal concebido como separando as duas classes de números cujos quadrados eram inferiores ou superiores a 2.

A riqueza dos **"Elementos"** ainda era valorizada por uma **apresentação formal inovadora**, pois todo o livro estava escrito em termos meramente **dedutivos**, as **proposições** que continham o resultado da teoria sendo demonstradas

a partir de um conjunto de definições e de axiomas assumidos como tais. Sabemos que já houvera tentativas anteriores nesse sentido, mas afigura-se ter sido esta a primeira realização acabada de um tal programa metodológico, de modo porque Euclides pôde beneficiar da estruturação da lógica que Aristóteles realizara. A influência benéfica da obra também se revelou muito importante deste ponto de vista, porque os matemáticos posteriores seguiram-lhe o exemplo e, dando um salto no tempo, a apresentação dos "Princípios de Newton" (ou da "Ética" de Espinosa) ainda foi inspirada pelo do célebre tratado euclideo.

Como o matemático Euclides também se interessou pelas propriedades da luz, ofereceu-nos assim uma oportunidade de dizer algo sobre as noções da Óptica no mundo antigo. Lembremos que os filósofos naturalistas imaginavam a luz como uma substância sutil de essência análoga à do Fogo, que Heráclito considerava o princípio das coisas e Empédocles um dos quatro Elementos primordiais. Aliás, nesta época, a luz era sobretudo aquilo que permitia ver, levando a confundir as questões de óptica física com o entendimento dos mecanismos da visão. Havia acerto em que a visão de um objecto implicava que algo de material transitava entre ele e o olho, e a esse "efluvío" quer os atomistas quer Platão atribuíam uma estrutura corpuscular, o atomismo sustentando até que as diferentes cores correspondiam átomos diferentes. Para a ~~metafísica~~ metafísica peripatética, que rejeitava os átomos e o vácuo, era indispensável uma outra concepção da luz e, assim, Aristóteles sustentou que a luz não era uma substância mas uma propriedade, uma alteração do meio onde a luz se propaga em consequência da impulsão que ele recebe "do Fogo ou de um elemento superior". Não deixa de ser curioso constatar que as duas teses sobre a natureza da luz que se não afrontam durante tanto século já se encontram esboçadas nas obras de Platão e de Aristóteles.

A nível meramente factual, ainda não se fóra longe. A propagação rectilínea da luz era demasiado evidente para não ter sido constatada de todo e parece que se conheciam as leis da reflexão. Encontram-se referências accidentais aos fenómenos de refacção e de difusão e, embora Aristóteles tivesse sustentado que a velocidade da luz era infinita, atribua-se-lhe em geral um valor muito grande mas finito. Quanto ao problema fisiológico da visão, ainda estava longe de se encontrar esclarecido, dando isso a explicações diversas frequentemente extravagantes.

Euclides, na sua "Óptica" — atribuiu-se-lhe também uma "Catóptrica", um opúsculo sobre a reflexão que é apócrifo e não tem grande interesse — permanece apegado à velha ideia que é o olho que emite "raios visuais" propagando-se em linha recta com grande velocidade e definindo uma espécie de cone descontínuo; assim pôde esboçar uma teoria do poder separador, em que o tamanho com que são vistos os objectos é função da distância a que eles se encontram, porque depende afinal do valor do ângulo entre os raios visuais que os enquadraram. Conviém aliás acrescentar que, nesta estranha teoria, os raios visuais só permitem aperceber um objecto se este for, por si mesmo, luminoso ou, pelo menos, iluminado por raios luminosos que também se propagam rectilíneamente, de modo a explicar as formas geométricas das sombras.

Vem a propósito assinalar que, após Euclides, a ciência da luz não fez progressos significativos no mundo helenístico. A única obra ulterior que vale realmente a pena mencionar é a "Óptica" de Ptolomeu, o grande

Óptica

Newton

atomismo
Aristóteles
propriedade

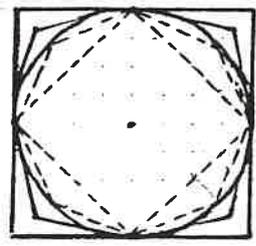
astrônomo do século II de nossa era de quem sabemos mais adiante. Tal como os tratados escritos entretanto por Hero e por Thon de Alexandria, encontram-se em Ptolomeu os memórias "rain visuais" e os memórias "rain lumi-
nosos de que fala Euclides; é certo que as duas leis da reflexão são corretamente enunciadas mesmo no caso de superfícies reflectoras curvas, mas as tentativas experimentais para encontrar as leis da refração salta-
por um fracasso. Com efeito, para a transmissão do ar para a água, do ar para o vidro ou da água para o vidro, tudo quanto Ptolomeu nos dá são tabelas de valores numéricos dos ângulos de refração correspondentes a ângulos de incidência variando de 10° em 10° entre 0° e 80°, e nem sequer esses valores numéricos são corretos.

4.

Se deixarmos de lado as figuras de segundo plano, ao grande Euclides seguiu-se o grande Arquimedes (c. 287-212), geralmente considerado um dos maiores gênios científicos de sempre. Filho de um astrônomo de Siracusa, a velha metrópole grega na Sicília, frequentou na juventude o Museu de Alexandria decaiu com muito proveito e, de regresso à pátria, consagrou toda a vida a ciência, sendo morto quando os romanos conseguiram finalmente conquistar a cidade. Dos seus numerosos escritos só nos restam nove textos de extensões muito desigual bem como uma carta dirigida ao seu amigo e discípulo Eratóstenes, o eminente geógrafo. Mas embora profundamente mutilada pelo tempo, a obra de Arquimedes merece especial atenção, pelo seu valor intrínseco e também pela influência que veio a ter no advento da ciência moderna.

No domínio das matemáticas, uma das características mais notáveis das investigações de Arquimedes foi o recurso constante e fecundo ao celebrado "método de exaustão", que já vinha de Euclides e mesmo mais tarde mas só agora atingiria a plenitude. Para o exemplificar, consideremos o problema da determinação do valor de π , definido pela relação invariável entre o perímetro e o diâmetro de um círculo qualquer; a dificuldade reside no facto de o perímetro não poder ser medido com uma régua. Contudo, se se inscrever no círculo um quadrado cujo perímetro conhecido é seguramente inferior ao do círculo, pode-se obter um valor de π aproximado por defeito, e essa aproximação melhorará cada vez mais se o polígono equilátero de 4 lados, o quadrado, for substituído por outro de 8 lados (o octógono), depois por outro de 16 lados, de 32 lados, e assim sucessivamente.

Paralelamente, Arquimedes podia obter outra sucessão de valores mais e mais próximos de π , mas neste caso por excesso, a partir dos perímetros dos polígonos circunscritos sempre com um número crescente de lados e, assim, o número π ficava localizado num intervalo tão pequeno quanto se pretendesse. Embora alguns manuscritos antigos assegurem que Arquimedes foi bastante mais longe, só estamos certos de que ele considerou polígo-



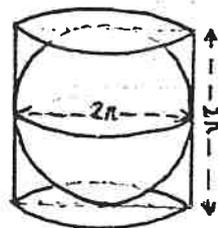
no e circunscrito com 96 lados, obtendo as relações $3\frac{1}{7} > \pi > 3\frac{10}{71}$ de cuja média aritmética se obtém $\pi = 3,14185$, com erro inferior a 10^{-4} . O que mais importa aqui é ainda a natureza do método utilizado, o recurso a uma técnica já eficaz de passagem no limite.

Arquimedes ainda aumentou essa eficácia explorando sempre que possível as analogias mecânicas do problema em estudo e, na carta a Eratóstenes já referida, ele própria escrevia que "muitas vezes tento descoberto através da mecânica temas de matemática que descobri posteriormente." Um exemplo desta natureza foi a dedução de que o volume da esfera é igual a 2/3 do do cilindro circunscrito, resultado a que atribuiu tanta importância

de 1000
1 mm

III - Os frutos frígidos da cultura helênica - 4

que até pretendia tê-lo gravado na campã e que é hoje fácil de verificar: se r é o raio da esfera, a área da base do cilindro será πr^2 e, portanto, o seu volume $2r \times \pi r^2 = 2\pi r^3$; a conclusão é que o volume da esfera vale $\frac{2}{3} \cdot 2\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi r^3$, fórmula hoje clássica. Mas Arquimedes só conseguia obter este resultado introduzindo no seu raciocínio as condições de equilíbrio da alavanca, problema mecânico que já então solucionara.



Mais geralmente, há na obra do mestre siracusano raras tentativas (como a deturpação de que a superfície S da esfera é o quádruplo do seu círculo máximo, $S = 4\pi r^2$, ou de que a área de um arco de parábola vale $3/2$ da do triângulo isósceles nela inscrito) as quais ele nunca poderia ter chegado se não tivesse desenvolvido o método de exaustão de forma a torná-lo utilizável no cálculo daquilo a agora chamamos os integrais definidos. Libertando-se das quimeras dos pitagóricos e dos eleatas que pretendiam reconstituir a recta por adição de pontos ou o plano por adição de rectas, Arquimedes passa a considerar rectas e planos como se tivessem uma certa "espessura", fonte directa da inspiração que, no começo do século XVIII, sugeriu a Cavalieri esses seus "indivisíveis" que iniciam esta na genese do cálculo integral. E no famoso tratado arquimédico "sobre as espirais" encontra-se, a propósito de determinação das tangentes, um primeiro esboço do que seria o cálculo "diferencial".



5.

Se nos contentamos com uma breve síntese daquilo que se sabe sobre a formidável obra matemática de Arquimedes, tomemos naturalmente de examinar mais de perto o que sobreviveu das suas investigações no domínio da mecânica. Sabemos que ele também se interessou pela física experimental pois, por exemplo, no seu opúsculo intitulado "o Anaximandro" encontra-se um excelente método para a determinação, por excesso e por defeito, do diâmetro aparente do Sol, indicio aliás de que se teria igualmente ocupado de astronomia, suscitando-se até que simpatizasse com o heliocentrismo heterodoxo de Aristarco. De qualquer modo é o Arquimedes teórico da mecânica quem ocupa um lugar de topo na história da física, e isto pela excelente razão de ter sido o primeiro a encontrar resposta a problemas físicos graças às matemáticas. É certo que esses seus trabalhos se referem exclusivamente a questões de equilíbrio, como se a argúcia do mestre lhe fizera pressentir todas as dificuldades inerentes ao problema do movimento, mas a invasão metodológica não deixou por isso de se revelar essencial. Se essa obra de física no quase não teve seguimento durante muitos séculos, ela acabará por adquirir uma importância enorme e, numa larga medida, o traço mais característico daquilo que será a física de Galileu ou de Newton, a construção de modelos matemáticos para descrever a natureza, foi uma herança recebida do velho Arquimedes.

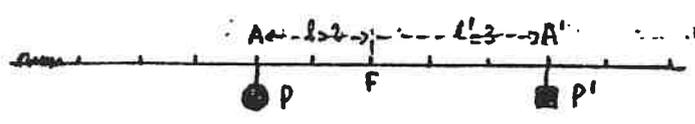
No "Tratado de equilíbrio dos planos ou do seu centro de gravidade", Arquimedes ocupa-se da determinação das condições de equilíbrio da alavanca, uma máquina simples utilizada desde a pré-história mas cujas propriedades nunca tinham sido explicadas, nem mesmo nas "Questões mecânicas" que a tradição atribui a Aristóteles mas foram provavelmente escritas por um dos seus discípulos. Apresentado em forma dedutiva, à maneira de Euclides, o tratamento arquimédico do problema torna-se difícil de seguir porque ele atribua uma extensão finita aos corpos sus-

Arquimedes
(Dreyer)
(p. 136)

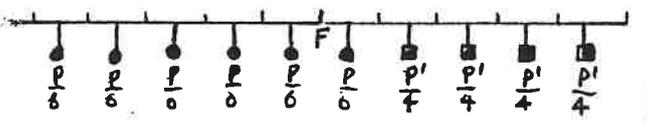
feioso e, assim, via-se forçado a enfrentar todas as complexidades suplementares resultantes da definição dos centros de gravidade — um tema que lhe era caro e ao qual dedicou muito trabalho futuro. Mas podemos aqui tentar reconstituir o fio do seu raciocínio sem introduzir esses refinamentos, o que aliás nos permite reduzir a três os rito "pedidos" em que se apoiara a demonstração original:

- 1º- Dois corpos igualmente graves suspensos de uma barra a distâncias iguais do fulcro estão em equilíbrio;
- 2º- Dois corpos desigualmente graves suspensos de uma barra a distâncias iguais do fulcro não estão em equilíbrio e aquele que é mais grave desce;
- 3º- A ação de um corpo de peso P suspenso de uma barra é equivalente à ação de dois corpos de peso P/2 colocados simetricamente em relação a P.

Seja, então, uma barra de fulcro F na qual estão suspensos dois pesos P e P', no ponto A e A' cujas distâncias a F são respectivamente l e l'; para definir o segmento de pesos, por exemplo, que $l/l' = 2/3$.

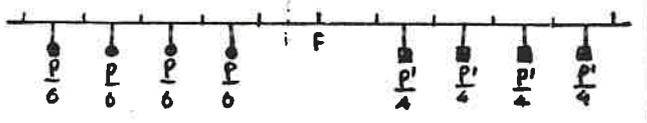


Definindo adequadamente a unidade de comprimento, poderemos sempre tomar, nesse caso, $l = 2$ e $l' = 3$, com 5 intervalos unitários entre A e A', nada se opondo a que marquemos sobre a barra 3 outros desses intervalos após A e 2 após B, tal como está representado na primeira figura. Ora uma utilização repetida do terceiro postulado de Arquimedes autoriza-nos a substituir exatamente a ação do peso P' em A' pela de 4 pesos de valor



mente a ação do peso P' em A' pela de 4 pesos de valor

$\frac{P'}{4}$ situados simetricamente em relação a A', no centro dos intervalos adjacentes. De forma análoga, é hábito introduzir, no lugar do peso P, 6 pesos de valor $\frac{P}{6}$ colocados no centro dos intervalos adjacentes a A, tal como se vê na segunda figura; pouco importa que num desses pesos se situe para além do fulcro, pois no postulado não há qualquer restrição a esse propósito. Observemos agora que,



segundo o primeiro postulado, os dois pesos de valor $\frac{P}{6}$ situados mais próximo do fulcro e em posições simétricas em relação a de equilibram-se, de forma que se os eliminarmos o equilíbrio do sistema não seria de certo afectado.

A situação inicial é, portanto, equivalente à que se denuncie na terceira figura e o tenemoz está praticamente demonstrado: temos, com efeito, 4 pesos de cada lado do fulcro F e em posições simétricas duas a duas, de maneira que o segundo postulado diz-nos que, para haver equilíbrio não pode ser $\frac{P'}{4} > \frac{P}{6}$ (porque então a barra desceria no lado direito), nem $\frac{P'}{4} < \frac{P}{6}$ (porque então a barra desceria do lado esquerdo), a única hipótese possível traduz-se pela relação $\frac{P'}{4} = \frac{P}{6}$ ou $3P' = 2P$.

É evidente que o raciocínio precedente permanece válido se, no lugar de $l = 2$ e $l' = 3$, considerarmos dois números quaisquer e, recorrendo ao método de exaustão, Arquimedes pode até generalizá-lo para o caso em que l e l' são "incomensuráveis", quer dizer, quando l/l' é um número irracional. Assim, a condição de equilíbrio de alavanca converte-se à $P l = P' l'$, e já esteve na moda depreciar o raciocínio original que conduziu a esta fórmula. Mas se algumas das suas críticas se justificam, não vale de certo a pena insistir no facto do resultado de Arquimedes já estar implícito nas suas primeiras rito que, em última análise, acontece o mesmo em qualquer demonstração.

III. Os fatos físicos da cultura helênica - 5

Passando agora a hidrostática, vamos agora recordar a história contada por Vitruvius na qual Arquimedes teria saído nu do banho, a gritar pelas ruas o célebre "eureka!". Este curioso episódio, geralmente referido à laia de anedota comparativa da distração dos sábios, está contado ligado a uma grande descoberta. Diz a história que, tendo o príncipe de Siracusa encarregado um artífice de lhe fabricar uma coroa de ouro puro, desconfiou que de lhe misturara prata. Incumbido de demarcar o primor logo sem destruir a bela obra, Arquimedes concebe bruscamente uma maneira de solucionar o problema quando, ao mergulhar numa banheira quase cheia, reparou que a água extravasava — e daí veio a sua natural excitação. Mas o fato realmente interessante e do qual pouco se fala era a ideia que lhe tinha ocorrido para encontrar a resposta que procurava: utilizando quantidades de ouro ou de prata com peso igual ao da coroa, medir as quantidades de água que cada uma delas fazia extravasar; depois, fez uma medição análoga mergulhando a própria coroa, a qual expulsava mais água do que a prata e menos do que o ouro. E Vitruvius acrescenta que, neste modo, "ficou a saber a quantidade de prata misturada com o ouro e pôde denunciar o ladrão".

Não temos, perentamente, a menor dificuldade em interpretar o raciocínio de Arquimedes: quanto ele determina o volume de prata v_a e de ouro v_o correspondentes ao peso P da coroa de volume v estava afinal a medir as densidades relativas das três substâncias pois, com uma simbologia moderna, poder-se-ia escrever

$$P = v d = v_a d_a + v_o d_o \quad \text{ou que ornata} \quad d_a = \frac{P}{v_a} d \quad d_o = \frac{P}{v_o} d ;$$

ora se, por hipótese o volume v da coroa for composto de um volume v' de prata e, por conseguinte, de um volume $v - v'$ de ouro, há-de ser válida a relação

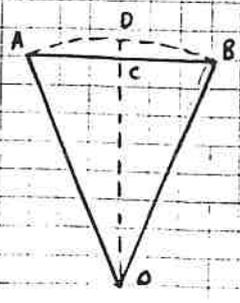
$$v d = (v - v') d_o + v' d_a \quad \text{ou, substituindo e simplificando,} \quad v' = \frac{v_a (v - v_o)}{v_a - v_o}$$

e v' fica expresso em função dos valores já determinados de v_a , v_o e v . Tudo isto é muito simples, só que presuppõe um quadro conceptual inexistente nessa época e Arquimedes só solucionou o problema porque inventou experimentalmente para isso o conceito de densidade ou peso específicos. Era aí que afirmava a originalidade de um grande cientista.

Por importante que fosse esta descoberta, o essencial dos resultados de Arquimedes em hidrostática figura no seu tratado sobre "Os corpos flutuantes", onde os teoremas se encaixam afirmando-se num único postulado: "A natureza de um fluido é tal que, estando as suas partes igualmente situadas e sendo contínuas entre si, aquela que é menos pressionada será expulsiva por outra que o seja mais; qualquer parte do fluido é pressionada pelo fluido que se encontra acima dela segundo a vertical, fazendo com que o fluido desça algumas ou seja empurrado de um lugar para outro". Deste longo e um tanto confuso enunciado, Arquimedes deduz toda uma série de teoremas dos quais nos limitaremos a referir dois ou três pontos mais importantes.

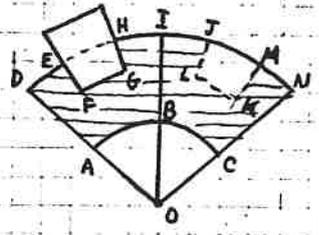
Assim a Proposição II afirma que "a superfície de qualquer fluido em repouso é esférica, e o centro dessa superfície esférica coincide com o centro da Terra", conclusão brilhante mas que já fora anteriormente obtida de uma forma tão simples que é esse raciocínio que preferimos lembrar. De facto, Aristóteles tinha-se em tratado com a hipótese intuitiva de que "a natureza da água leva-a a escoar-se para o lugar mais baixo" e, na física aristotélica, "mais baixo" significava indubitavelmente "mais próximo do centro da Terra";

então, sendo O o centro da Terra e A e B dois pontos à sua superfície, a água que nelas exista tenderá a escoar-se para o ponto C (no pé da perpendicular de O sobre AB) porque C está "mais baixo" do que A ou B , e esse escoamento só cessará quando a água aí atingir uma altura CD tal que $OD = OC + CD$ seja igual a OA ou a OB , quer dizer, a água só se encontrará num estado de equilíbrio quando a sua superfície for esférica.



O famoso "princípio de Arquimedes", que não é realmente um princípio mas um teorema, começa a abordar-se na Proposição III mas é na Proposição V que ele é de facto enunciado: "Se abandonarmos num fluido um corpo mais leve do que ele, esse corpo mergulhará até que um volume de líquido igual no da parte mergulhada tenha o mesmo peso que o corpo inteiro". A demonstração é simples e forte.

Visto que partes idênticas do fluido em posições análogas devem ser igualmente pesadas, as superfícies AB e BC tem de suportar pesos iguais; ora, além do peso do corpo, AB suporta o peso do fluido contido no volume $ADEFGHIB$, enquanto BC suporta o peso idêntico do fluido contido no volume equivalente $BIIKLMNG$ mais o peso do fluido contido em $JLKM$; por conseguinte, o peso do corpo há-de ser igual ao do fluido situado em $JLKM$ e como, por construção, $JLKM = EFGH$, o peso do corpo é igual ao do fluido que ocupará a sua parte imersa.



No final do seu tratado, Arquimedes utilizou este resultado para estudar as condições de equilíbrio de um corpo flutuante tendo a forma de um cilindro de secção parabólica. Poderemos vislumbrar aí um início do interesse que lhe mereciam questões de índole prática, visto que a atenção dispensada a um sólido tão particular só parece justificar-se pelas analogias dessa superfície com a do casco de um navio.

6.

Das três personagens tutelares das matemáticas helenísticas, resta-nos falar de Apolônio de Pérgamo a quem os antigos chamaram o "grande geometa". Deve ter nascido em meados do século III e estudou em Alexandria, tendo sido professor quer no Museu quer em Pérgamo e em Efeso. Sabemos que, tal como Arquimedes, investigou e criou muitos variados de temas de matemática pura e aplicada mas, tal como Euclides, o seu nome ficou ligado a um único livro, as "Cónicas", esse livro tratado em oito "livros" dos quais nos falta o último.

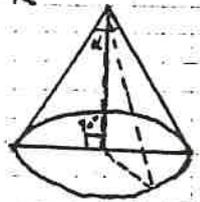
Não é fácil apresentar sumariamente o conteúdo das "Cónicas" em termos compreensíveis, porque se trata de uma obra já muito especializada e, para mais, a nossa formação de carácter geométrico tem-se degradado muito nestes últimos dois séculos. Limitemo-nos pois a referir alguns tópicos de índole bastante geral sobre esse famoso tratado referente às propriedades das três curvas fundamentais que são a elipse, a parábola e a hiperbola.

Devido à tendência geometrizar das matemáticas gregas, tais curvas já tinham sido utilizadas, pelo menos desde o século IV, para discutir problemas que hoje teríamos tendência a tratar em termos algébricos, e tanto Euclides como Arquimedes tinham-se ocupado das cónicas. Mas

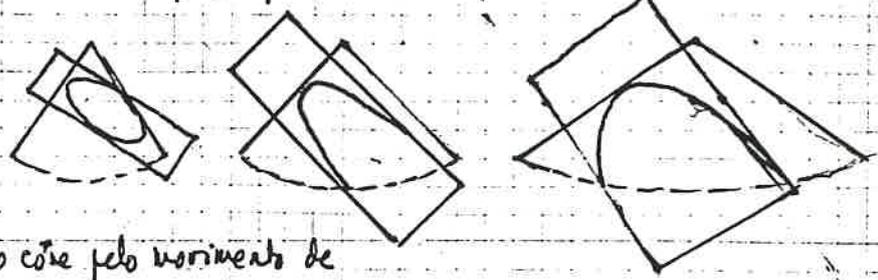
III. Os fundamentos da cultura helênica - 6

Apolônio não se limitou a estudar essas curvas de uma forma quase exaustiva porque, tendo-as definido em termos mais gerais, pôde apreender com muito mais clareza a sua unidade profunda.

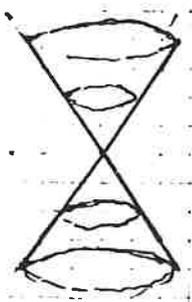
Para os gregos, as cônicas levam o seu nome ao facto de resultarem da intersecção de um cone, de uma superfície cônica por um plano. Ora um cone era definido como a figura resultante da rotação de um triângulo rectângulo em torno de um dos seus catetos c , segundo o valor do ângulo entre duas geratrizes opostas, assim o cone era dito agudo, rectângulo ou obtuso. As cônicas resultaram sempre da intersecção da superfície cônica por um plano sempre perpendicular a uma geratriz, e obtinha-se a elipse, a parábola ou a hipérbola consoante o cone era agudo, rectângulo ou obtuso.



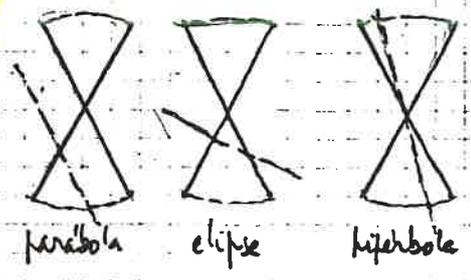
A teoria de Apolônio introduz desde logo uma inovação que se revelará



essencial: a definição do próprio cone pelo movimento de uma recta em torno de um dos seus pontos (o vértice), esse movimento sendo tal que todos os outros pontos da recta descrevem círculos; de maneira o cone passava a ser uma superfície com duas "folhas" e não com uma só. Para além disso, qualquer das cônicas passava a poder ser definida a partir de não importa que cone, fosse ele obtuso, rectângulo ou agudo, pois o que contava não era o ângulo que o plano fazia com a geratriz sobre a qual incidia mas com a geratriz diametralmente oposta a esta:



O paralelismo correspondia naturalmente à parábola, um ângulo superior ao ângulo do próprio cone correspondia à elipse, um ângulo inferior a este correspondia à hipérbola que, agora, passava a ser constituída por dois arcos de curva.



Após Apolônio, e no âmbito do rápido declínio da ciência helênica, só há notícia de tratadistas matemáticos sem convergência, compiladores ou divulgadores, isto com a notável exceção do célebre Diofanto, um helênista tardio do qual nada se sabe, supondo-se que teria vivido no meado do III século da nossa era. Resta-nos somente um fragmento do seu tratado "Sobre os números nos polígonais" e 6 dos 13 livros incluídos numa "Aritmética", mas a natureza singular da obra já seria reconhecível a partir do que diz Metrodoro sobre o epítáfio do homem:

"E assim o túmulo de Diofanto: oh, pedregão!, o próprio túmulo, graças à ciência, dá a medida da sua vida. Deus concedeu-lhe a juventude durante um sexto da sua existência, no duodécimo seguinte fez-lhe crescer uma barba negra; depois, passados mais um sétimo, chegou o dia do seu casamento e, no quinto ano desse casamento, nasceu-lhe um filho mas, infelizmente, a pobre criança sentiu o frio da morte depois de viver apenas metade do que viverá seu pai. Este, não encontrando lenitivo para o seu desgosto, passou quatro anos chegou com frequência ao cabo da sua vida. Quanto durou esta?"

84 anos

Assim, no quadro de uma tradição matemática claramente geometrizante, Diofanto afirma-se como um puro calculador, um notável algebrista. Procura-se explicar este facto intrigante admitindo que ele foi sobretudo influenciado pelos matemáticos babilónicos, o que torna difícil averiguar até que ponto a sua obra tem um carácter original. Utilizando um sistema de notação ainda muito imperfeito o qual só permitia simbolizar uma única incógnita (dita o "aritmia"). Diofanto ocupa-se do tratamento de problemas numéricos, por vezes determinados por uma equação algébrica, por vezes indeterminados — e, por isso, o seu nome ficou ligado às equações desse tipo — o autor contentando-se em geral com o cálculo de umas soluções particulares que é sempre expresso por um número positivo, inteiro ou fraccionário. Tais soluções são frequentemente obtidas por meio de artifícios que, embora correctos, nem sempre são cabalmente justificadas, o que aliás não impede Diofanto de abordar problemas difíceis. Eis um exemplo significativo do seu método.

Para decompor 16 em dois números quadrados, e representando (com uma notação moderna) o aritmia por x , Diofanto observa que $16 - x^2$ também deve ser um quadrado. Expõe este quadrado como o quadrado de uma grandeza igual ao produto do aritmia por um número qualquer menor a raiz quadrada de 16, por exemplo, $2x - 4$; vem-lhe então $16 - x^2 = (2x - 4)^2$ o que dá imediatamente $x = 16/5$. Um dos números pretendidos será, pois, $(16/5)^2$ e o outro há-de ter o valor $16 - (16/5)^2 = (12/5)^2$.

$$16 - x^2 = 4x + 16$$

$$- 16x$$

$$5x^2 = 16x$$

$$5x = 16$$

$$x = \frac{16}{5}$$

É evidente que este problema, sendo indeterminado, tem muitas outras soluções, mas Diofanto não se dá sequer ao trabalho de o assinalar. Basta-lhe contudo tomar $4x$ em vez de $2x$ para obter os valores $(32/17)^2$ e $(60/17)^2$ e, mais geralmente, o seu método permitiu-lhe decompor um número qualquer z^2 sob a forma $z^2 = x^2 + y^2$ com $x = 2zk/(k^2 + 1)$ e $y = z(k^2 - 1)/(k^2 + 1)$, em princípio a cada valor de k correspondendo um par de soluções. Era afinal o ^{um exemplo} famoso problema de Fermat

$$z^n = x^n + y^n$$

o qual se conjectura se ter soluções no caso tratado por Diofanto, para $n = 2$.

7.

O sistema das esferas homocêntricas em que se baseava a cosmologia aristotélica parecia de graves insuficiências. Sobretudo revelava-se incapaz de explicar dois fenómenos fáceis de observar, as variações periódicas do brilho dos planetas que, ao lado do Sol e da Lua, até se traduziam pela alteração dos seus diâmetros aparentes e o estranho comportamento de quase todos eles (o Sol e a Lua eram as únicas excepções) que, periodicamente, os levava a interromper os seus movimentos anuais de leste para oeste para, durante uns dias, se deslocarem no sentido contrário antes de retomarem a sua marcha habitual; Mercúrio, por exemplo, exibia essas "retrogradações" com intervalos de cerca de 116 dias, e num "ano" de Saturno, da ordem dos 29 anos terrestres, a inversão reproduzia-se umas 28 vezes. Para explicar estes e outros dados da observação dos céus, a astronomia helénica inventou uma descrição matemática dos movimentos dos astros, a teoria dita dos "excêntricos e dos epiciclos", cuja capacidade explicativa se revelava quase inesgotável.

Talavia, para respeitar a ordem cronológica, devemos começar por referir outras tentativas de invasão de índole mais conceptual. Heráclides do Ponto, um astrónomo da segunda metade do século IV que viveu em Atenas onde teria frequentado a Academia e o Liceu embora firmemente marcado pelo pitagorismo, aventou a hipótese da Terra rolar sobre si mesma em 24 horas, o que reduzia a meras aparências os movimentos lineares de todos os astros. E para explicar que Vénus ou Mercúrio se mantivessem sempre a pequenas distâncias angulares do Sol, isto quando os planetas "exteriores" até se podem situar em oposição a ele, teria sugerido que Vénus e Mercúrio seriam satélites do Sol, rodariam a sua volta.

Estas brilhantes ideias influenciaram Aristarco de Samos (310? - 230?), um discípulo de Strato que trabalhou em Alexandria e em Rodas mas de cuja vida não sabemos, de facto, quase nada. Segundo uma breve alusão de Arquimedes (confirmada aliás por Plutarco, que até refere ter sido Aristarco, por isso, acusado de impiedade), ele propôs um sistema no qual a Terra, além do movimento de rotação sobre si própria, teria como todos os outros planetas, salvo a Lua, um movimento de translação em torno do Sol imóvel. Fizera-se muitas conjecturas sobre o raciocínio que teriam levado o "Copérnico da antiguidade" - e seria bem mais razoável chamar a Copérnico o "novo Aristarco" - a uma tal concepção, mas interena sobretudo a saber que estas teses não tiveram nenhuma aceitação, ou porque foram consideradas como uma mera revivescência da velha cosmologia de Filolau, ou porque levantava demasiados problemas sem demonstrar suficiente capacidade explicativa. Só se encontra menção de um astrónomo defensor deste sistema, o habitáculo Seleuco, que no século seguinte afirmaria ser essa a expressão correcta da realidade física.

Em contrapartida, houve outra faceta da obra de Aristarco, a determinação das dimensões do Sol e da Lua e das distâncias a que se encontram da Terra, que foi na altura foi devidamente apreciada. Sabemos que houve tentativas anteriores nesse sentido, ainda que ignoremos qual a metodologia utilizada, e há razão para crer que Eudóxio deu um contributo técnico à resolução do problema, mas a glória de ter realizado a primeira

estimativa científica conhecida desses valores, cabe indiscutivelmente a Aristarco. Os raciocínios que ele utilizou são aliás tão simples e elegantes que merecem ser lembrados.

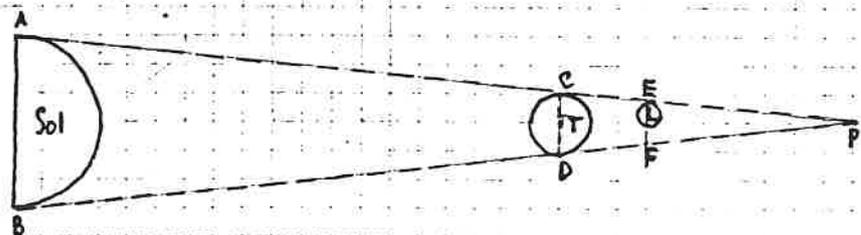
Com efeito, bastava considerar o facto evidente em termos geométricos de que nos momentos em que se observa da Terra exactamente metade do disco lunar iluminado, o ângulo $\angle T\hat{L}S$ há-de ser recto, para concluir que a medição experimental do ângulo $\alpha = \angle L\hat{T}S$ permitia então calcular \overline{TS}



em função de \overline{TL} . Tomando $\alpha = 87^\circ 30'$, Aristarco concluiu que o Sol estava 19 vezes mais distante da Terra do que a Lua, resultado muito grosseiro, pois se de tivesse tomado o valor mais exacto $\alpha = 89^\circ$ teria obtido uma razão da ordem de 400. Os fundamentos do método eram inatacáveis, mas o resultado dependia fortemente da precisão da medida e era difícil localizar com rigor o centro do Sol ou da Lua ou determinar o momento exacto em que se devia proceder à medição de α .

De qualquer modo, dado que da Terra os diâmetros aparentes do Sol e da Lua tem valores semelhantes, se \overline{TS} correspondia a 19 vezes \overline{TL} , tornava-se licito concluir que o diâmetro do Sol d_s havia de ser umas 19 vezes maior do que o diâmetro d_L da Lua. As distâncias e dimensões relativas dos três astros estavam pois determinadas, e o que Aristarco procurou obter em seguida foi a sua expressão em termos do diâmetro d_T da Terra.

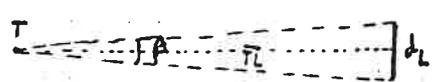
Para isso, considerou um eclipse total da Lua, observando que esta permanecia inteiramente na zona de sombra cerca de duas vezes mais tempo do que aquele que gastava para penetrar nela; outros termos, verificava que $\overline{EF} = 2d_L$ e, a partir daí, o resultado pretendido tornava-se quase evidente. Com efeito, os triângulos $\hat{E}PF$, $\hat{E}PD$ e $\hat{A}PB$ são semelhantes e proporcionais respectivamente a $2d_L$, a d_T e a $d_s = 19d_L$, mas também à grandeza desconhecida $x = \overline{EP}$, a $\overline{CP} = \overline{CE} + x$ e a $\overline{AP} = \overline{AE} + \overline{CE} + x = 20\overline{CE} + x$, o que leva a escrever



$$\frac{d_T}{20\overline{CE} + x} = \frac{19d_L}{20\overline{CE} + x} = \frac{2d_L}{x}$$

A segunda destas igualdades implica $x = \frac{40}{17}\overline{CE}$, e por substituição na primeira obtém-se imediatamente $d_L = 0,35d_s$; para o Sol, pois que $d_s \approx 19d_L$, vindo $d_s \approx 7d_L$.

Orá o conhecimento do ângulo β sob o qual é visto um objecto qualquer de dimensões conhecidas determina a distância à qual ele se encontra; neste caso teríamos, por exemplo $\frac{d_L}{2} = \overline{TL} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$, e embora Aristarco ainda não dispusesse da norma trigonometria agora em condições de efectuar este cálculo. Não sabemos porque razão ele atribuiu a β um valor tão exagerado (2° em vez de $0,5^\circ$), mas explica-se assim que tivesse obtido $\overline{TL} = 9,5d_T$, três vezes menor do que na realidade. Para obter a distância \overline{TS} , bastava-lhe então multiplicar $9,5d_T$ por 19 o que lhe dava $\overline{TS} \approx 180d_T$, resultado muito impreciso ($\overline{TS} \approx 1200d_T$) dado que provinha de um produto cujos factores pecavam ambos por defeito.



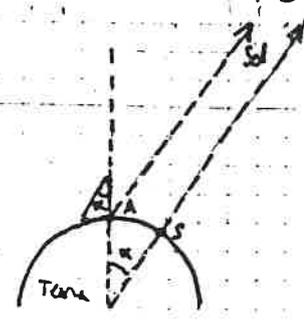
Como veremos, a utilização de melhores valores experimentais permitiria aos astrónomos helenísticos aperfeiçoar estas primeiras estimativas de Aristarco, mas o passo essencial estava dado. Contudo, para traduzir numericamente tais valores, ainda faltava conhecer o diâmetro terrestre.

8. O futuro fazes da ciência helenística - 8

8

Suspeita-se deste cedo que a Terra esférica era muito grande, e parece ter sido Aristóteles quem primeiro atribuía um valor à sua circunferência — 400.000 stádia — talvez a partir de conclusões de Eudóxio de que a altitude das estrelas no céu não era a mesma no Egito e na Grécia. Arquimedes reduzia esse número a 300,5 stádia, sem explicitar as suas razões. Na verdade, o mérito de primeira determinação dessa grandeza é, erentemente, atribuído a **Eratóstenes (276-194)**, o qual estudara e trabalhara em **Alexandria** adquirindo suficiente mérito para ser nomeado **diretor da grande biblioteca do Museu de Alexandria**; era um **polígrafo**, que tanto se ocupava de física como de matemática (o "crivo" dos números primos), de história como de astronomia, mas foi a **estimativa quase exacta das dimensões da Terra que o imortalizou.**

Mesmo se os princípios do método que utilizou já eram mais ou menos conhecidos, Eratóstenes soube aplicá-los com uma nova felicidade. Informado de que **no solstício de Verão o Sol ficava na vertical da cidade de Siena**, pois os raios solares chegavam entã até ao fundo de fundíssimos poços, ter-se-ia limitado a medir o comprimento da sombra que, nesse mesmo dia, projectava um gnomon vertical unitário colocado em **Alexandria**. Determinou assim que o valor do arco entre as duas cidades correspondia a $\frac{1}{50}$ do círculo, e como sabia que a distância entre elas era de **5000 stádia**, foi levado a atribuir **250.000 stádia ao perímetro terrestre**; com um **stadium de 157,5 m**, isso equivalia a **39.375 km**, resultado de uma precisão magnífica, pois o erro era inferior a **2%**.



Deve reconhecer-se que este número tão aproximado foi também a consequência de um conjunto de circunstâncias fortuitas, pois **Siena não estava exactamente no trópico nem no mesmo meridiano que Alexandria**, a **distância não era bem 5.000 stádia** e a **determinação angular era imperfeita**. Mas tudo isto se compensava quase completamente, e o mérito de Eratóstenes ressalta se se comparar a sua estimativa com a que **Ptolemeu** empreendeu em moldes análogos no século seguinte, tomando Alexandria e Rodas por pontos de referência: utilizou agora a observação da estrela Canopus, uma das mais brilhantes do céu, concluiu que a diferença de latitude entre as duas cidades era de $7^{\circ} 30'$ (quando, de facto, é de ordem de $5^{\circ} 15'$) e situou-as a uma distância excessiva de 5.000 stádia (em vez de uns 3.700); mas embora continuasse a verificar-se uma compensação das grandes imprecisões dos dois valores adoptados, o resultado final dava apenas $\frac{360}{75} \times 5000 = 240.000$ stádia \approx **32.800 km**, cujo erro era **três vezes maior que o de Eratóstenes**. Foi este aliás o número aceite durante muitos e muitos séculos, graças à autoridade de **Claudio Ptolemeu que o adoptou.**

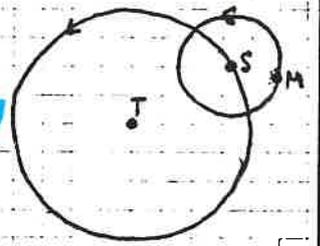
Paralelamente, as aviações ulteriores das dimensões e das distâncias do Sol e da Lua revelaram-se bastante mais próximas da realidade. Assim, o grande **Hiparco** já considerava o Sol a uma distância de ordem **1250 dt** (enquanto **Aristarco** propusera 180) e **Ptolemeu** aumentou este valor para **6.500 dt**, tomando $d_s = 39 dt$; é certo que Ptolemeu reduzia indevidamente estes números, mas o que os propri para a Lua ($TL = 29,5 dt$ e $d_L = 0,29 dt$) eram **quase exactos**. Forx como forx, para além da capacidade demonstrada pelos astrónomos

SI, 367

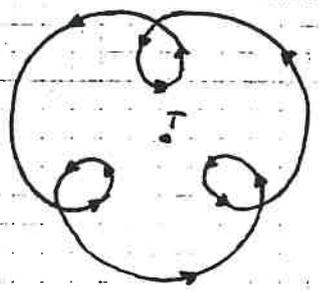
helenísticos de tratar cientificamente tais questões, foi a clara tomada de consciência das enormes dimensões do universo observável; mesmo para Ptolomeu, o Sol encontraria-se a milhões de quilômetros da Terra e, quando Peridônio, uma pequena bola luminosa no céu teria um volume 60.000 vezes maior que o da Terra. Que tais conclusões tão afastadas da evidência do senso comum pudessem ter sido aceites é um índice do grau de abstracção que a ciência clássica conseguia atingir.

4.

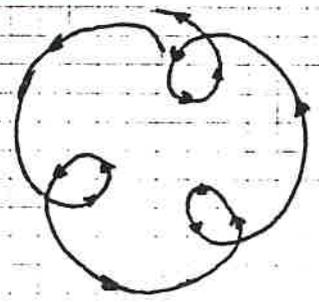
Se retomarmos por uns instantes a teoria de Heraclides, na qual por exemplo Mercúrio M é um satélite do Sol S que, por seu lado, roda em volta da Terra T verificamos facilmente que uma tal descrição da cinemática de Mercúrio conduz a resultados muito interessantes. Admitindo nomeadamente que o pequeno círculo tem um período de rotações três vezes menor que o do grande, a trajetória de Mercúrio não se deixará de ser circular mas apresentará durante um ano três "laços" M quais, visto da Terra, o planeta exibirá momentos de retrogradação.



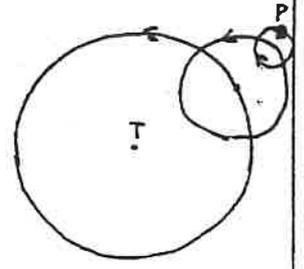
Devido, as hipóteses físicas de Heraclides foram rejeitadas e, aliás, elas referiam-se apenas a Venus e Mercúrio, isto quando Marte ou Júpiter fossem igualmente essas retrogradações. Mas nada impedia o astrónomo helenístico de utilizar descrições deste tipo para interpretar o comportamento de qualquer planeta desde que as considerassem numa perspectiva puramente matemática: todos os planetas se deslocariam sobre um pequeno círculo, o "epiciclo", cujo centro se movia simultaneamente sobre um grande círculo centrado na Terra, o "deferente"; combinando estes dois movimentos, que eram ambos circulares e uniformes de acordo com a metafísica platónica, era muito mais fácil obter resultados conformes aos dados da observação. Assim, o número de retrogradações anuais só dependia da relação postulada entre os períodos do epiciclo e do deferente, e para pueren a ocorrência das retrogradações de Mercúrio com intervalos de 110 dias bastava considerar o período do epiciclo ligeiramente menor do que no caso precedente, a curva teórica deixando então de ser fechada.



Não sabemos como a teoria dos epiciclos nasceu, mas é possível que fosse assim. De qualquer modo há boas razões para crer que desde os comços do período helenístico se foi adquirindo consciência de que este modo de tratar o problema se revelava extremamente mais ductil, tinha potencialidades explicativas muitíssimo maiores que o esquema rígido das esferas homocêntricas. E essa consciência só se foi reforçando à medida que o esquema deferente-epiciclo foi sendo complementado por outras invasões do mesmo génez.

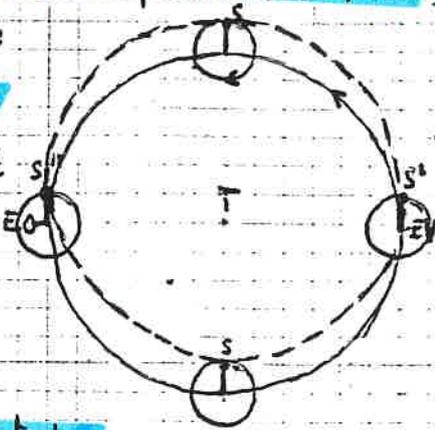


Assim, não havia qualquer razão para excluir que o movimento do planeta fosse definido por um segundo epiciclo rodando sobre o primeiro, tal como este rodava sobre o deferente, e utilizando três movimentos circulares e uniformes ainda

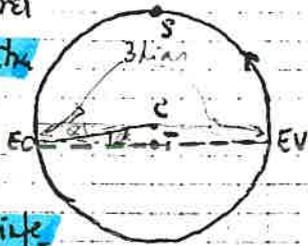


aumentava mais a possibilidade de definir movimentos planetários concordantes com as observações. Mas não se ficou por aí e, num caso como o do Sol, em que se impunha explicar o facto insolito de decorerem mais uns 6 dias entre o equinócio da primavera (o equinócio "vernal" EV) e o equinócio do outono EO, do que entre EO e EV, obtive-se uma explicação simples introduzindo um "epiciclo menor", assim chamado porque tinha um pequeno raio e não provocava retrogradações.

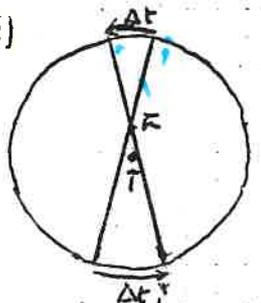
Suficiente, com efeito, que atribuímos ao Sol um epiciclo menor com um período de rotações idêntico ao do deferente (um ano) mas rodando no sentido contrário. Sendo assim, a compensação das duas rotações fará com que a recta definida pelo Sol e pelo centro do epiciclo mantenha uma orientação constante e, por conseguinte, não só o Sol deixa de descrever um círculo à volta da Terra (de qual estará mais afastado durante o semestre de verão) como levará metade do ano a transitar de posições S' à posição S"; portanto, o Sol demorará mais tempo para ir de EV a EO do que para voltar de EO a EV, e basta definir adequadamente o raio do epiciclo em relação ao do deferente para obter a diferença de 6 dias que se observa.



Esta astuciosa ideia da introdução dos epiciclos menores pôde efectivamente ser utilizada para explicar toda uma série de pequenas anomalias no comportamento dos planetas. Retornando, contudo, o exemplo do Sol que tratámos de forma mais explícita, constatou-se imediatamente que se pode obter o mesmo resultado sem introduzir o epiciclo, admitindo apenas que a Terra não se situa no centro do deferente mas numa posição ligeiramente excêntrica, que desloca a posição dos pontos equinociais e implica ainda que o semestre de verão seja mais longo do que o de inverno; um breve cálculo mostra ainda que a distância CT deve ser ligeiramente inferior a 3% de valor de R para se obterem os 6 dias observados. O deferente passa então a chamar-se uma excêntrica.



Para obter novas previsões, nada impede ainda que se permaneça nesta via, quer introduzindo excêntricas de excêntricas quer, mais modestamente, considerando que o centro da excêntrica se encontra num pequeno deferente que rodeia em torno da Terra. Mas as potencialidades conceptuais da excentricidade ainda facultam uma espécie de inversão: a Terra era colocada no centro do círculo (deferente) mas o movimento de rotações devia fazer-se com velocidade angular constante relativamente a outro ponto A dito o "equante" o que — como Copérnico sublinhará mais enclenizado — equivalia a abandonar o postulado platónico do movimento uniforme sobre o círculo.



Com toda a liberdade para introduzir deferentes, epiciclos maiores ou menores, excêntricas, excêntricas de excêntricas e equantes, os astrónomos estavam bem armados para descrever com precisão o comportamento do Sol, da Lua e dos outros planetas. Entende-se que este esquema formal se tivesse mostrado capaz de corresponder aos avanços da astronomia de observação durante dois mil anos.

$= n \tan \alpha$

$\frac{40}{65,5} \times \frac{6}{4} = 1,977$

$F < 3\%$ não ligeiramente menor



estas variáveis não são

Parece ter sido Apolônio, o eminente matemático, quem desenvolveu separadamente as teorias das excêntricas e dos epiciclos mas foi Hiparco quem realizou a síntese e empreendeu as primeiras aplicações concretas. Embora a obra de Hiparco não reste apenas um texto menor de índole polémica e que apenas sobrevivem de sua vida que trabalharam em Alexandria e em Rodas entre -161 e -126, é geralmente considerado o maior astrônomo da antiguidade. Autor do primeiro grande catálogo de posições das estrelas no céu (cerca de 800 estrelas classificadas em 6 classes, segundo a sua luminosidade, quando até aí, ninguém fixara sequer a posição de 200) e com uma precisão facilitada pela invenção de novos instrumentos, nomeadamente o astrolábio. Como teórico aplicou a teoria das excêntricas e dos epiciclos à descrição dos movimentos da Sol e da Lua, deixando aos seus sucessores a tarefa de generalizar este trabalho aos outros planetas. Mas a glória de Hiparco também repousa na descoberta da "precessão dos equinócios" esse lento deslocamento do ponto de intersecção do equador com a eclíptica, ou, se quiser, a rotação do plano da eclíptica em torno do eixo do mundo, movimento muito lento da ordem de $36''$ por ano. Um ciclo de precessão demora cerca de 26.000 anos.

O Helenismo: a arquitetura do céu

o qual, como que em contrapartida, obtive estimativas excelentes da distância Terra-Lua (29,5 diâmetros em vez de 30,2) e do diâmetro do nosso satélite (0,29 no lugar de 0,27 reais)

Hiparco, as excêntricas e os epiciclos

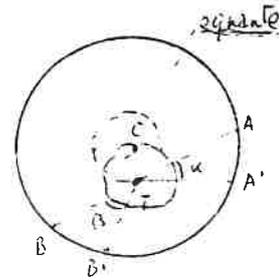
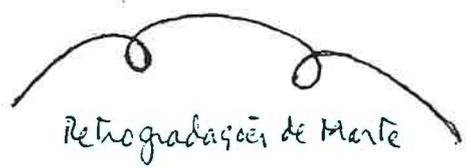
Da obra de Hiparco resta-nos apenas uma ^{obra póstuma secundária de índole tolemaica} ~~trabalho~~ ^{de importância secundária}, ou o "Comentário" ^{dos fenômenos de Anata e Eudoxo}, e da sua vida quase só se sabe que trabalhou em Alexandria e em Rodas entre -161 e -126. Geógrafo a quem se atribui a invenção das latitudes e das longitudes, autor de contribuições ^{notáveis} à astronomia experimental, observador do céu tão paciente e escrupuloso que ~~ele elaborou~~ ^{o seu} catálogo de estrelas ^{na época comparava-se com} ~~até hoje superior a~~ ^{hoje praticamente} quanto se tinham elaborado, e todavia à sua obra teórica que ele deve ser considerado ~~talmente~~ como o maior astrónomo do tempo antigo. Se o seu nome recorda a magnífica descoberta da precessão da equinócio, associamo-lo sobretudo a essas chaves tradicionais da compreensão dos movimentos planetários que foram as teorias das excêntricas e dos epiciclos.

As dificuldades que as teorias das excêntricas e dos epiciclos pretendiam ultrapassar exprimiam que os factos observados se revelavam incompatíveis com a hipótese de movimentos circulares e uniformes à volta da Terra: alteração anual do diâmetro aparente do Sol, variações de brilho e da velocidade angular dos planetas, possibilidade de estes exibirem movimentos de retrogradação. Sabe-se que ambas as teorias estavam esboçadas antes de Hiparco, mas foi ele quem as desenvolveu convenientemente e demonstrou as suas ligações íntimas.

Na sua forma mais simples, a teoria das excêntricas corresponde a admitir que o Sol e os planetas descrevem com velocidade uniforme uma trajetória circular centrada num ponto e que não coincide com a posição T da Terra imóvel. Tanto basta, evidentemente, para explicar que os planetas visto da Terra não mantenham o mesmo brilho e a mesma velocidade angular nem o Sol o mesmo diâmetro aparente.

Mas, só por si, a existência de retrogradação exigia que se complexificasse o esquema e, então, supunha-se que o ponto C que define o centro da trajetória não pode ele próprio ser imóvel, descrevendo com velocidade uniforme um círculo, o equante, ^{com centro na} ~~quasi-estacionária~~ Terra.

Quanto à teoria dos epiciclos, a ideia de base consistia em definir a posição de um astro pela de um ponto se um círculo em rotação uniforme, o "epiciclo", cujo centro é



AA' é percorrido no mesmo tempo que BB' embora as velocidades angulares vistas da Terra não sejam iguais pois $\beta > \alpha$.

para medir o tempo

Meia de 311

10 nascimentos e o começo das melzes

variação de geometria do céu pelas ondas com abalações e ondas de 30' em 30'

variação do declínio

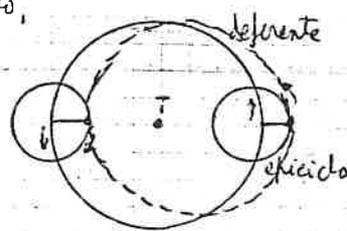
precessão da equinócio

o plano da eclíptica rodando durante a sua inclinação 6" por ano

hiparco ou chaldeus?

Para os planetas nel posi Sol

móvel, deslocando-se com velocidade uniforme sobre outro círculo, o "deferente" que, esse sim, se encontra centrado na Terra. É claro que da combinação destes dois movimentos circulares resulta uma trajetória do astro excêntrica relativamente à Terra, e, se tal se revelar necessário, pode complicar-se o sistema criando um segundo ~~epiciclo~~ epiciclo em torno do primeiro e assim sucessivamente. Em termos formais, o sacrosanto princípio dos movimentos circulares e uniformes é salvaguardado embora a teoria permita "salvar as aparências", quer dizer, dar conta dos factos observados.



epiciclo m's, percurso de Hiparco quanto às excêntricas e epiciclos
Hiparco deu um traço a quinzena em matemáticas e houve as 2 teorias

Hiparco ter-se-ia ocupado apenas da aplicação concreta das teorias dos excêntricos e dos epiciclos à **cinemática do Sol e da Lua**, sendo aliás os resultados obtidos para a previsão do movimento solar bem melhor do que os correspondentes aos movimentos lunares. Quanto aos outros planetas, contentou-se em criticar as teorias precedentes, efectuar observações numerosas e precisas das suas posições e afirmar a possibilidade de entender esses factos no quadro conceptual das teorias que de próprio desenhara. Mas a realização desse trabalho levou-a aos seus sucessores

Claudio Ptolomeu e o Almagesto

Quando Hiparco morreu, já a ciência helenística entrara numa fase de rápido declínio e a sua obra inacabada só veio a ter uma continuação condigna por puro acaso, porque no século II depois da nossa era surgiu um homem de ciência tão grande como os maiores dos tempos áureos. Claudio Ptolomeu trabalhou em Alexandria entre **127 e 151** e não se limitou a ser um notável **geógrafo** ^(históric e topográfico) e a realizar importantes investigações em física, nomeadamente no domínio da **óptica**, como — sinal de um claro declínio ideológico — foi um **astrologo de grande reputação**; a sua **"Síntaxe Tetrabíblia"** permaneceu como um dos clássicos da astrologia até ao Renascimento.

Pleinde 334 e seq

Mas o Ptolomeu astrónomo que nos interessa aqui. A sua obra fundamental dita a **"Síntaxe Matemática"** retomou os trabalhos de Hiparco, que pouco tinham avançado desde então, e combinando as teorias das excêntricas e dos epiciclos, deu-nos uma teoria dos **movimentos da Lua bastante satisfatória**. E servindo-se desse mesmo esquema teórico pôde igualmente descrever os **movimentos dos outros planetas**, questões que Hiparco deixara praticamente em aberto.

Acústica "As harmonias"

Para a história da ciência a **"Síntaxe Matemática"** de Ptolomeu é um livro particularmente importante. Traduzido pelos árabes sob o nome de **Almagesto** — com o significado de "grande livro" — chegou por essa via à Europa renascentista onde foi considerado como a bíblia da astronomia antiga. É contra o Almagesto ptolomeico que lutaram Copérnico e Kepler.

A "Óptica" de Ptolomeu após a Óptica de Euclides as obras de Hero

Teoria dos espelhos planos, cones, cones convexos, côncavos e cilíndricos leis da reflexão Estudo experimental da refração

10.

No tempo em que o pensamento naturalista começava a florescer no mundo grego, acabava de constituir no centro de Itália um pequeno estado latino cuja capital era Roma. Mas no início do período helenístico, já Roma se estava a transformar numa potência política considerável, que dominava toda a **península italiana**, e preparava para conquistar as **grandes cidades helenicas da Sicília** e se ia envolver numa longa e dura luta com **Cartago**, as "**guerras púnicas**", cujo prémio seria uma posição hegemónica no Mediterrâneo ocidental (-201). Os três séculos seguintes, viu-se Roma apoderar-se de uma área geográfica imensa que não só incluía a Grécia metropolitana e todas as monarquias helenísticas mas também novas províncias como o **Norte de África, a Ibéria, a Galia "cabeluda" e a Inglaterra actual**. Um poder em algo de biscafo — o Imperador e o Senado romano — iam governar durante uns séculos um império que abrangia a **Europa ocidental até ao Reno e ao Danúbio**, a **faixa fértil da África até ao deserto**, a **Ásia Menor e o Próximo Oriente**.

Um estado tão desmedido não poderia ter perdurado se a sua razão de ser fosse apenas uma sucessão de triunfos militares. De facto, esta unificação favorecida pela posição central do Mediterrâneo — o "**Mare Nostrum**" — teve consequências económicas benéficas, nomeadamente pela fortuna de vidas e bens que resultou da celebrada "**pax romana**" e pelo incremento do **comércio** entre as províncias facilitado pela existência de uma **moeda e de uma administração comuns**. Também se poderia esperar que assim se tivessem assegurado condições favoráveis para uma **fusão orgânica de diversas tradições culturais**. Contudo, não só o mundo romano se revelou **quase estéril culturalmente**, como até nos parece hoje surpreendente que o Império tivesse sido capaz de sobreviver tanto tempo aos factores de dissolução que o minavam.

Deste logo, o império nunca alcançou uma verdadeira unidade, pois sempre subsistiu uma dissociação entre a sua **zona ocidental mais ou menos latinizada** e a **área oriental onde subsistiam mentalidades e comportamentos com uma história diferente**. Se o **latim se tornou** como idioma oficial de uma **monarquia omnipotente**, o **grego manteve e até ampliou a sua importância**, tanto mais facilmente quanto nada havia a contrapor à grande cultura helenística. E esta espécie de bilinguismo efectivo revelou-se um factor de **desconfiança ideológica** mesmo ao nível de vida quotidiana, pois a língua grega veiculava para Roma e não só um **helenismo e um orientalismo cada vez mais decadentes**, cada vez mais imbuídos de **misticismos filosóficos e religiosos**, que no melhor dos casos incitavam à **salvação individual através do desinteresse pelo mundo**, mas serviam também para veicular **religiões de mistério ou práticas mais ou menos orgiásticas**. A acolhimento reservado a tais estados de espírito por uma parte apreciável da população diz aliás muito sobre a crise vivida por esta humanidade.

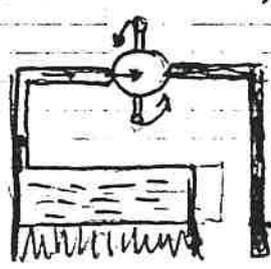
Uma **crise decadente socio-cultural** correspondeu a uma **crise económica** a qual não foi de certo alheia a filiação do império pela oligarquia. De que eram escolhidos para governar uma província dizia-se então que eram obrigados a **extrair-lhe três fortunas** uma para pagar a quem os designava, outra em privado próprio, a terceira para subornar o juiz que os deviam condenar. A voracidade de Roma ainda era crescente

peba necessidade politica de manter tranquila a plebe de capital reduzindo-a a uma condicao de parasitas, oferecendo-lhe "pau e circo". A necessidade de exportar para a India metais preciosos em troca de artigos de luxo exigiu numerosas derivacoes da moeda que afectaram a economia e destruiu a confianca. A utilizacao numa escala nunca vista do trabalho de escravos no artesanato, e na agricultura ou nas minas foi eliminando os trabalhadores livres, incapazes de competir com essas "maquinas humanas" que podiam ser exploradas ate a exaustao pois era renovavel em dificuldade. A concentracao de riqueza nas maos de um grupo cada vez mais restrito acelerou o processo de empobrecimento geral, fazendo declinar o comercio e artesanato, que e, entretanto, as enormes exigencias financeiras do estado, sobretudo para manter em funcionamento o aparelho burocratico e a maquina militar, nao podiam diminuir, tornando immentavel o pagamento dos impostos. Desde relativamente cedo comecaram a formar-se grandes dominios agricolas com tendencia para se tornarem auto-suficientes, a quais annunciavam a economia ^{fechada} ~~mundial~~, o modo rural, tipico do retrocesso que se seguira' ao colapso da civilizacao antiga.

Tal como no caso das monarquias helenisticas embora numa escala muito maior, esta crise economica cada vez mais seria afigura-se ter sido uma consequencia inevitavel do esclaramismo. E isto, alem do mais porque o esclaramismo constitua, a varios niveis, um obstaculo intramontavel a qualquer possibilidade de inovacao tecnologica. Para que tentar explorar ^{outra} ~~uma~~ fontes de energia ou procurar conceber dispositivos mecanicos inovadores, se se podia dispor do trabalho barato de escravos em numero quase inagotavel? De facto houve no periodo helenistico engenheiros, mesmo ate grandes engenheiros, mas as suas invencoes ^{nao foram} ~~numerosas~~ geralmente consideradas senao como uma especie de brinquedos, e quando assim nao foi, apreciava-se sobretudo o espectacular, o monumental.

Assim Sistrato de Cnido e' lembrado por ter construido em -285 na ilha de Faros, a entrada do porto de Alexandria, um torre gigantesca destinada a orientar os navegadores de dia ou de noite, e esta grande obra considerada uma das "sete maravilhas do mundo" vinha a dar o nome a tudo o farois. Mais inovadores tinham sido Ctesibion (300 + 230) e o seu discipulo Filon, lido Filon de Bizancia, que teriam

inventado o primeiro antepassado da maquina a vapor (o qual nunca teve qualquer aplicacao pratica) e a quem se atribui tambem a invencao das bombas aspirantes ("aspirantes-pressantes") as quais, essas sim, viriam a ser utilizadas para uso domestico ou como bombas de incendio.



lido Heron de Constantinopla para nao o confundir com Heron de Alexandria e' um tratado muito tecnico que so e' ~~conhecido~~ ^{conhecido} porque vivia no seu tratado sobreviveram, e esse tratado contem preciosos desenhos. Ele preocupava-se sobretudo com o problema de deslocar grandes pesos e, para isso, descreve cinco maquinas simples, a alavanca, a roldana, a rota de eixo, a cunha e o parafuso. Segundo uma tradicao que parece vir de Filon ele considerava que todas elas se baseavam no principio de alavancagem, a qual aparece a volta de -1500 como o "shabuf" dos egipcios ou o "picotab" dos indios - a uma reforta ou picota - para tirar agua dos poços e, mais tarde, como maquina de guerra, levantando soldados ate ao cimo de uma muralha. A roldana, que tinha numerosas utilizacoes nomeadamente nos navios, ja estava difundida nos concepos da roma era, tal como a cunha, empregue para quebrar pedras ou madeira. O parafuso, que

O Jumento Jaqueira da cultura Helenística - II

Indispensável para o funcionamento das prensas, também foi utilizado como parafuso de água, por exemplo para a extração da pórcia dos navios ou do fundo das minas, pois a velha roda egípcia ou as cabeças de cruzes, tão bem adaptadas às grandes alturas, continuaram a predominar nos trabalhos de irrigação.

"Sapient"

Na verdade, o considerável espírito inventivo dos engenheiros alexandrinos quase só serviu para construir máquinas de guerra ou dispositivos astuciosos capazes de mistificar a gente comum. Mas era objecto assombroso lido os "thaumata", palavra da qual derivou a designação de "autómatos", não pretendiam sequer ter qualquer interesse económico. E no período romano, além de reais progressos feitos no domínio da engenharia civil, nomeadamente na construção de estradas, pontes e aquedutos, o único avanço tecnológico realmente significativo foi a difusão da arte de aproveitar o vento a partir do século III, com a qual houve origem à possibilidade de utilizar a energia cinética do mar e do vento.

11.

Do que ocorreu na fase de declínio da civilização antiga que formou o tempo do Império Romano, podemos deixar de referir aqui a difusão de dois pseudo-saberes, a astrologia e a alquimia, que influenciaram a história das ciências durante muitos séculos a história das ciências e, por isso, merecem alguma atenção.

Robert

HGS I, 81

A astrologia, a pretensão de anunciar o futuro dos humanos graças às posições dos astros em certas ocasiões das suas vidas, foi uma das técnicas divinatórias geradas pelo pensamento mágico arcaico, fruto de uma visão sagrada da realidade íntima do mundo, de crença simplista na influência mútua de todas as coisas. A omromancia, a leitura do oráculo, a haruspícinia, que profetizava a partir da observação das vísceras de animais sacrificados, ou a interpretação dos penáculos são outros exemplos de práticas antigas com fundamentos e objectivos análogos.

HGS I, 81

Nas tabuletas sumérias dos finais do terceiro milénio já se encontra uma haruspícinia altamente elaborada e muito popular, mas primeiras previsões astrológicas apenas se referiam à sorte do rei - Deus o único cuja existência podia responder à natureza divina dos astros. Só tardiamente, cerca de -410, é que nos surge um horóscopo referente a um homem comum, e foi sob esta forma de uma astrologia popular que ela se pôde difundir da Mesopotâmia pela bacia mediterrânica.

HGS I, 286

As crenças irracionais da cultura grega - recorde-se a Pitia de Delfos ou a surpreendente crença de Platão de que certos medicamentos só actuavam quando eram acompanhados por recitações encantatórias - foram seriamente reforçadas pelo contacto com as misticas orientais facilitado pelas conquistas de Alexandre, e assim se entende que o Helenismo de Calcutte tivesse absorvido a astrologia e as técnicas de magia. Tentando resistir à penetração das práticas de magia, a jovem república romana chegou a promover, em -139, a expulsão de Itália dos astrólogos, a quem chamavam os "caldeus", mas no tempo do Império mesmo os mais cultos tinham sucumbido e não foi por acaso que Cláudio Ptolomeu o último mestre de astronomia antiga se assumia como um astrólogo célebre.

Condenc, 107

Através dos bizantinos, do Islã e da cristandade latina, a astrologia conseguiu uma corrente especial- mente afiançada no período renascentista, e embora esteja mais que provado não haver nela qualquer verdade, ainda hoje os astrólogos fazem bom negócio. Contudo, a classificação dos planetas em "benéficos" "males" ou "indiferentes", a atribuição de uma realidade às constelações do Zodíaco que, por regra, são me- das efeitos de perspectiva, as relações postuladas entre essas constelações e determinadas qualidades, o significado atribuído às retrogradações planetárias puramente aparentes, — tudo isto é muito mais demonstrativo do charlatanismo de tais práticas.

Condorcet, 107

Se a astrologia nunca foi mais do que uma utilização espúria do saber astronômico, o caso da alquimia é diferente porque foi dela (embora, de algum modo, contra ela) que a química nasceu, e a separação uma mediável foi recente. Até aí, se a alquimia continha muitas especulações, hoje totalmente alheias à química, o que de facto se sabia de química resultava do labor dos alquimistas, mais ou menos sólidos.

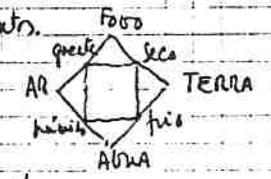
Pode definir-se a alquimia como uma ciência oculta nascida das fundas técnicas químicas mantidas se- cretas em especulações de índole mística e tendente à realização da "grande obra", a transformação dos metais em ouro. Como dissemos, desde cedo possuíam-se bastante conhecimentos empíricos de química e, por exemplo, no Egito faraônico, os químicos como os osíris e os híeracinos organizaram-se em confrarias que não revelaram as suas técnicas. Daí resultou provavelmente a tendência para a escuridão das artes, mais linguagem cada vez mais obscura e, indirectamente, um fecho para inserir esse saber empírico num quadro puramente especulativo.

A tradição atribui a fundação da alquimia a personagens míticas como o lebanês Hermes Trimegisto, o- tra vez poderoso — de cujo nome deriva, aliás, a qualificação "hermética", e a doutrina hermética que se criou é a alquimia — ou até ao filósofo abissínia Dionísio. Crê-se hoje que a figura central das ori- gens foi um sábio ocultista natural do alto Egito que viveu em Alexandria no começo do século II a.C. Ptolomeu de Mendes, de cuja obra "Física e Mística" se restam alguns fragmentos. Teria sido ele quem deu uma fundamentação teórica à especulação vinda do Irã ou do Oriente que se procuravam fundamentar em práticas quotidianas como a emalgação, a metalurgia e a hieturaria.

HS I, 319

Como se sabe, naquela época, as ideias de fundação da alquimia não eram absurdas. Acreditava-se em uma que todas as coisas eram constituídas por uma substância única (que os alquimistas, aliorativamente, representaram por uma serpente que morde a própria cauda) a qual adquire diferentes formas consoante a importância que nela possuem os dois pares de propriedades fundamentais e, assim, dão origem aos Quatro Elementos.

Neste quadro conceptual parecia razoável supor que, fazendo variar as propriedades de uma substância graças a operações laboratoriais adequadas, se poderia transformar uma substância noutra, não era aliás o aparentemente ocioso quando se tingia um tecido ou se dobrava uma estanho? Mas radicalmente, se um sal natural de chumbo ligeiramente aquecido num cadinho frouso liberta uma pequena quantidade de prata, não diremos hoje que se tratava de um sal argentífero, que o aquecimento provocou a formação de óxido de chumbo absorvido pelo cadinho frouso e, assim, foi posta em evidência a pequena quantidade de prata já existente; mas numa época em que não havia análise química nem ideias correctas sobre a estrutura da matéria, percebe-se que o alquimista que realizava esta experiência viu nela uma



A "Junia dos elementos"

se de dobrava uma estanho? Mas radicalmente, se um sal natural de chumbo ligeiramente aquecido num cadinho frouso liberta uma pequena quantidade de prata, não diremos hoje que se tratava de um sal argentífero, que o aquecimento provocou a formação de óxido de chumbo absorvido pelo cadinho frouso e, assim, foi posta em evidência a pequena quantidade de prata já existente; mas numa época em que não havia análise química nem ideias correctas sobre a estrutura da matéria, percebe-se que o alquimista que realizava esta experiência viu nela uma

"les étapes de la chimie" 72

Os frutos frágeis da cultura helênica - 12

confirmação empírica de transformações do chumbo em prata, de acordo com a tese da transmutação das ^{substâncias} ~~matérias~~ que deveria permitir alcançar um dos objetivos fundamentais da alquimia, a "grande obra", que era a transformação dos metais vis em ouro graças à obtenção da "pedra filosofal".

Estes de novo
luros
seriam tempo
naquela época
gnósticos

Mas a alquimia também se viu muito influente noutros domínios. Claudio Galeno (c.121-210) que estudou e trabalhou em Alexandria antes de se tornar um dos mais famosos médicos do Império Romano, inspirou-se no aristotelismo para explicar que o organismo humano comportava quatro humores - o sangue, o fleuma, a bile e a bile negra - e que era o seu desequilíbrio que se manifestava na doença. Galeno concluiu que a função da terapêutica era o restabelecimento desse equilíbrio perturbado, mas os alquimistas, extrapolando, sustentaram que seria ser possível obter um produto miraculoso - os árabes chamam-no de o "elixir" - capaz de restabelecer infalivelmente o equilíbrio humoral e, assim, prolongar indefinidamente a vida.

Com a crise do Império, no contexto cultural típico da dissolução da sociedade antiga, a doutrina alquímica sofreu uma inflexão que tornou predominantes as suas tendências meramente especulativas. A essa imagem favorável as componentes místicas e iniciáticas da alquimia com o desaparecimento das suas facetas técnicas e científicas está ligado o nome de outro egípcio, Zósimo de Panópolis, que viveu na transição do século III para o século IV, e do qual formos (além das obras apócrifas que a tradição lhe atribui) um extenso tratado em 28 "livros", um texto enciclopédico animado por uma vivência mística intensa.

Zósimo concebe a alquimia quase como uma espécie de religião cristã, uma gnose como tantas outras que então floresciam clandestinamente, pois há entre o cristianismo e transformaram a religião oficial e a repressão abria-se sobre igualmente sobre os heréticos, maniqueístas ou maniqueus, ou sobre os gnósticos, que no entanto os alquimistas. As perseguições sofridas levaram os adeptos a arruarem-se como uma seita herética, o que levou ao favoreceu a predominância das componentes irracionalistas da doutrina.

A alquimia sobreviveu e com ela as investigações de natureza química. Mas aqueles que se interessavam apenas ou em primeira mão por tais questões os "teóricos" ou "sopradres" não serão, para os verdadeiros "iniciados" autênticos alquimistas. Para obter a "pedra filosofal" ou do "elixir" nunca poderá resultar de meras experiências laboratoriais pois implicaria a aquisição pessoal de um certo estado de perfeição moral que poderia valer ao alquimista o indispensável "dom de Deus".

Em Bizâncio e no mundo árabe, na civilização medieval como na Europa renascentista continuou a haver alquimistas. Newton, o grande Newton, foi um alquimista e, segundo parece, não apenas um "sopradre" mas um verdadeiro "iniciado". Ainda hoje, e foi estranho que pareça, há quem se reclame da gnose alquímica.

circulo letrado. ^{numerosas vezes} ^{uma} ~~frequentemente~~ de grande tolerancia. A prosperidade geral foi favorecida pela abertura a inovações técnicas e por um comércio activo mesmo à escala internacional, sobretudo ~~entre~~ entre o califado de Córdoba e de Bagdad. Se tomarmos o exemplo da Península Ibérica, que sob o domínio dos visigóticos era uma sociedade semi- feudal vivendo do trabalho de um campesinato pobre, contactamos imediatamente a transformação resultante do advento do islamismo: a agricultura renovou-se com as obras de irrigação, a introdução de novas culturas (com a oliveira ou o limão), aldeias especializadas na produção de seda ou de mel, a modernização da horticultura; mas também reconosce-se a exploração das minas, e as actividades industriais ou artesanais cresceram espectacularmente, produzindo tecidos de qualidade, trabalhando a pele e o couro, fabricando excelentes objectos metálicos, vidro e cerâmicas, pergaminho e papel. Quando já não havia na cristandade nenhuma verdadeira cidade, a vida urbana tornou-se uma realidade esplêndida no mundo islâmico e Córdoba, com meio milhão de habitantes, ficava muito atrás do Cairo ou de Samarcanda, ou da magnífica Bagdad com um dois milhões de pessoas. E com as cidades floresciam a cultura e a ciência, pois não na Espanha havia ~~então~~ ^{vão} centros de estudos superiores (Córdoba, Granada, Mérida, Toledo, Sevilha, Valencia, Almería, Cádiz).

Infelizmente, esta brilhante civilização começou a declinar no século XI. Já antes o império abássida sofreu uma crise económico-política que o partilhara em emiratos independentes e, nessa confusão, tribos de origem mongol convertidas ao islamismo que acamparam nas fronteiras do império, os turcos seljúcidas ~~o~~, puderam apoderar-se do poder, acentuando o declínio com a sua incultura. Estes bárbaros que assim se intitulavam sem cerimónia no tablado da história não se deixaram, aliás, relegar facilmente para posições subalternas: o império bizantino que parecia destinado, por milagre, a sobreviver indefinidamente, acabou por succumbir aos seus assaltos (1453), e no fim do século XVI os exércitos do sultão turco de Istambul continuaram a campar às portas de Viena. De qualquer modo, o declínio do império abássida afectou imediatamente a prosperidade do califado omíyade de Espanha, e a crise económica gerou a crise política com a usual partição num mosaico de pequenos reinos, os "taifas", que a cavalaria cristã iria destruir paulatinamente até à queda de Granada, em 1492. Neste contexto, o apagamento cultural tornava-se inevitável, embora a tradição fosse suficientemente forte para que nos finais do século XIII a universidade de Córdoba ainda dispusesse de um mestre com a emvergadura de Averroes. Mas a época áurea da cultura muçulmana já então estava distante.

A esta cultura, reconhece-se geralmente o mérito de ter contribuído para preservar a herança greco-helenística que se revelaria fundamental na transição para a modernidade na Europa renascentista. Mas esta apreciação é sectária e superficial. Por um lado, a Idade Média latina não foi uma longa "idade de trevas", e a actividade dos tradutores do árabe já era intensa nos séculos XII e XIII, com efeitos tanto ou mais significativos do que no Renascimento. Por outro lado, se os intelectuais cristãos receberam as obras de Aristóteles ou Euclides, Galeno ou Ptolomeu, enriquecidas com as críticas e comentários dos teólogos árabes, teriam igualmente outros livros fundamentais que eram de origens muçulmanas. Enfim, importa insistir devidamente no facto de ter sido o árabe quem permitiu à cristandade entender e utilizar esses textos: sem as explicações didácticas traduzidas do árabe, quem teria sido capaz de apreender a "Metafísica" aristotélica ou o "Almagesto" ptolomaico?

Quando se fala, aliás, de uma cultura e de uma ciência árabes é apenas na medida em que os pensadores

kapri, "Hist. Univ. Cient.", 25

IV O longo interregno - 2

Muçulmanos, de Espanha até à Índia, encoveram essa língua. Tratava-se de uma ciência e de uma cultura que eram, antes de mais, um desenvolvimento da grande tradição mediterrânica clássica, à qual depreen-se vieram juntas contribuições novas de origem egípcia, mesopotâmica ou hindiana e, sobretudo, aquisições importantes vindas da Índia e até grandes invenções de origem chinesa, como a pólvora, a bússola ou o papel. Mas se o Islamismo teve o mérito de se tornar um caldeirão de culturas, não devemos esquecer a sua importância e as capacidades sincréticas, pois se os muçulmanos preservaram e vivificaram o Helenismo unindo e lhe acrescentaram outros saberes, também foram capazes de enriquecer esse espólio com a sua própria criatividade. Tudo isso a Europa viria a herdar, e já é mais do que tempo para reconhecermos finalmente que só assim pôde operar a descolagem decisiva no século XVI e XVII.

Num outro plano, não será inútil acrescentar que o conhecimento da ciência por séculos de afogou ainda permanece muito limitado. Aprecemos-nos cada vez melhor do seu valor, vamos citando os trabalhos dos investigadores que se ocuparam de mais diversos problemas, mas boa parte dos textos (incluindo obras importantes) continua a aguardar a devida atenção. E enquanto tantos manuscritos permanecerem ignorados, as tentativas de síntese das conquistas dos cientistas muçulmanos permanecerão eminentemente provisórias.

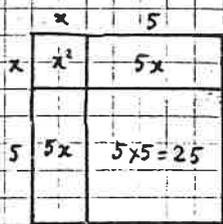
2.

Foi recuado no campo das matemáticas que os muçulmanos obtiveram resultados mais valiosos e, antes de tudo, há que referir essa fundamental descoberta que quase pode ser feita em paralelo com a invenção da escrita alfabética, a introdução da numeração decimal. Uma tão grande novidade não podia ter surgido bruscamente de um elocubração de um homem de génio, mas a sua história constitui um velho problema que ainda permanece controverso.

Assinalá-mos na herida altera que os matemáticos mesopotâmicos já utilizavam um sistema imperfeito de numeração posicional e, durante muitos anos, prevaleceu a ideia de que essa tradição chegara à Índia onde atingira a maturidade antes de ser recuperada pelos muçulmanos. Teses mais recentes atribuem crédito ao algarismo "árabe" uma origem chinesa, onde a invenção foi facilitada pela hipotese de um sofisticado aparelho de cálculo que é o abaco; surgido na China em tempos antigos, o novo sistema de numeração chegou à Índia onde os muçulmanos o foram buscar. Em todo o caso, afigura-se indiscutível que o primeiro tratado ensinando a calcular graças apenas a dez símbolos numéricos foi escrito em árabe, à volta de 830, por um persa chamado Al-Kwarizmi, o qual era bibliotecário do califa Al-Mamun. Esse mestre livro difundiu a grande inovação no mundo islâmico, onde ela foi sendo paulatinamente adoptada, e no século XIII os números árabes começaram a ser conhecidos na Cristandade na qual se difundiram com certa dificuldade.

Do nome de Al-Kwarizmi derivaram as palavras algoritmo e algoritmo (a qual significava, no início, a aritmética nova), e embora a álgebra seja um saber antigo a etimologia também é árabe: "al-gebr" era a operação permitindo transferir um termo entre os dois membros de uma equação. Inspirada em Euclides e outros alexandrinos, a valiosa contribuição islâmica para o desenvolvimento da álgebra parece começar também com Al-Kwarizmi.

ni, o qual estudou os seis tipos de equações canônicas do primeiro e segundo graus. Eis um exemplo de tratamento semi-geométrico de uma dessas equações, $x^2 + 10x = 39$. Trata-se um quadrado cujo lado tem por hipótese o valor x (os árabes chamavam à incógnita a "caixa" ou a "raiz") e por seu comprimento desenharam um triângulo cujo lado para x e $10/2 = 5$; o novo quadrado assim esboçado tem por área $(x+5)^2 = x^2 + 10x + 25$, e como a equação também x pode escrever-se sob a forma $x^2 + 10x + 25 = 39 + 25 = 64$ via $(x+5)^2 = 64$, quer dizer, $x+5 = 8$ ou $x = 3$,



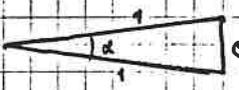
sendo apenas consideradas as raízes positivas. Entre os algebristas árabes, um dos maiores foi o grande poeta da sexualidade Omar Kayan, o qual num tratado escrito em 1074 estudou nitidamente as equações do 3º grau cujas raízes determinava geometricamente pela intersecção de duas cônicas.

De fato, foi a tradição de investigações de matemática telescópica foram retomadas no Islã, embora haja que dar um especial relevo ao que fizeram na sequência de Arquimedes com o cálculo de áreas e volumes pelo método de exaustão.

Assim, chegaram a calcular o valor de π com 17 algarismos ($\pi = 3,1415926535897325$), os 15 primeiros sendo exactos, e conseguiram praticamente avaliar integrais definidas da forma $\int_a^b x^{m/n} dx$, com m e n inteiros. Foi

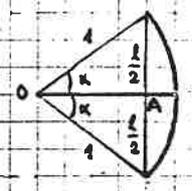
HGS, I, 438

Tobaria da Índia que lhes veio a inspiração para o desenvolvimento da trigonometria plana, pois os alexandrinos caracterizavam o valor do ângulo pelo comprimento da corda entre dois segmentos unitários, e foram



o "Siddhanta", um tratado. HGS I, 155

recursos os indianos, nomeadamente o grande Arya Bhata (n. em 476) quem teve a ideia engenhosa de definir as funções seno e cosseno: bastava caracterizar um ângulo α pelo valor de metade do comprimento $\frac{1}{2}$ da corda do ângulo duplo 2α para se obter imediatamente o seno, pois $\sin \alpha = \frac{1}{2}$ e,



deu tipo $\cos \alpha = \frac{1}{2}$, o teorema de Pitágoras implicando então que $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$. Tobaria, sem

despistar para os indianos, foi no Islã que se desenvolveu esta trigonometria incipiente, quer com o estudo das propriedades das novas funções, quer com a elaboração de tabelas dos seus valores.

Relembremos que no século IX Al-Manwazi - dito Al-Habbar, o "abissínio", foi ser muito moreno - utilizou o método experimental em trigonometria: medindo cuidadosamente o comprimento da sombra de um gnomon vertical unitário para ângulos variando de um minuto entre 0° e 90° obteve uma tabela de valores da cotangente, enquanto as

distâncias entre as extremidades do gnomon e da sombra lhe deram os valores das cosecantes. Os tratados de Nasir Al-Din no século XIII, representaram uma síntese dos conhecimentos existentes na trigonometria plana e esférica.

A trigonometria esférica nasceu em Alexandria como um capítulo da astronomia teórica, que era o seu principal domínio de aplicação. Ora o mundo islâmico sempre se interessou muito pelos estudos astronômicos, isto por motivações de índole religiosa, pois só os astrónomos permitiam fixar exactamente o começo do mês de penitência, o Ramadão, determinar

as horas das orações quotidianas, ou calcular em qualquer cidade a direcção de Meca para onde os fiéis se deviam voltar quando rezavam. Assim, califas e vizires miralizaram na fundação e protecção dos observatórios embora, no campo teórico, esse apoio não tivesse produzido avanços consideráveis.

Trabalhado em árabe no começo do século IX, a obra fundamental de Ptolomeu definitivamente cognominada "Al-Majisti", o grande livro, foi assimilada, comentada e parafrazeada até à exaustão. Introduziram-lhe melhorias de forma e, para evitar um só nome, o grande Al-Battani

Albatteguim

(858-929) aperfeiçoou os cálculos dos valores da obliquidade da eclíptica, da duração do ano e das estações, e confinou a precisão dos equinócios. Mas os seus sucessores não despendiram muito engenho com o estudo de uma

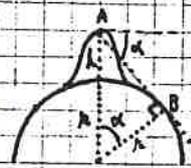
imaginação variável periódica desta precisão (à qual chamavam a "trepidación") e a influência de Aníto

IV - O longo interregno - 3

telas fez perder de vista o desenvolvimento da sua cosmologia; o célebre Geber (Yahir Ibn Afhan) chegou a construir uma teoria das esferas homocêntricas suficientemente complicada para incluir a precessão dos equinócios.

Córdova, Toledo

Os trabalhos de observação sistemática dos movimentos planetários ou das posições das estrelas revelaram-se bastante mais valiosos, sendo aliás facilitados por algumas invenções instrumentais, nomeadamente a do astrolábio esférico. De início, o principal centro de investigação era Bagdad mas, após o ano mil, havia outros observatórios importantes no Médio Oriente, no Egito ou na Espanha. A tradição era tão forte que mesmo os conquistadores muçulmanos fundaram no Azerbaijão o célebre observatório de Maragha, em contacto com os astrónomos chineses, e já no tempo de Alhacén, em 1420, Ulug Beg construiu o grande observatório de Samarcanda; o neto de Tamersão, conquistador sanguinário, dedicou o seu tempo à elaboração de um novo catálogo das estrelas. E no domínio vizinho da geografia física, os muçulmanos também realizaram investigações de valor. A tal propósito, temo oportuno falar de recordar o nome de Al-Biruni (973-1048), um persa que se destacou em quase todas as domínios da ciência e a quem se deve a invenção de um método mais directo de medição do raio da Terra. Do cimo de uma montanha, cuja altura h estava previamente determinada e



que se encontraria junto ao mar ou a uma grande planície, determinava-se o ângulo α que direcção do Sol poente faz com a horizontal; como esse ângulo α caracteriza o triângulo rectângulo ABO cujo lado OB vale justamente r e cuja hipotenusa OA vale $r+h$, a trigonometria conduz a escrever $OB = OA \cos \alpha$ ou $r = (r+h) \cos \alpha$, o que permite escrever r sob a forma $r = h \cos \alpha / (1 - \cos \alpha)$. Al-Biruni não deixou aliás de assinalar que a precisão da medida de r depende do rigor das determinações dos valores de α e de h .

3.

No contributo islâmico para o desenvolvimento da física há que referir os trabalhos de óptica na continuação dos de Arquimedes, com particular interesse pela determinação de centros de gravidade ou pela teoria das balanças, em cuja construção introduziram vários aperfeiçoamentos. Por menor curioso, recorriam à utilização da balança como rebóio; ao peso necessário para equilibrar uma depressão suspensa num dos braços obtinham uma estimativa do tempo decorrido. Contudo, as suas investigações sobre a dinâmica revelaram-se mais originais, pois embora admitissem apaixonadamente Aristóteles não deixaram de se dar conta das fraquezas da teoria peripatética do movimento e queiram procurar remédio.

Civilização Islâmica e ciência árabe - 4

4.

11

Na ~~teoria~~ contribuições islâmicas para a história da física não se mostram espetaculares, nem por isso ~~podem~~ ~~ser~~ ~~ignoradas~~. E, antes de mais, importa relembrar tudo quanto fizeram nas linhas tracejadas por Arquimedes, estudando o problema de equilíbrio com particular interesse pela determinação do centro de gravidade e pela teoria dos balancos, na construção das quais introduziram diversos aperfeiçoamentos. Primeiro, ^{curiosos} interessante, reconheceram a utilização sistemática da balança como relógio; suspendendo uma depressão de um dos pratos, obtinham pela determinação do peso necessário para a equilibrar uma estimativa bastante exacta do tempo decorrido.

HGS I 497

9

No campo da dinâmica, os cientistas muçulmanos foram naturalmente discípulos de Aristóteles, ^{cuja} obra filosófica e científica atribuíam ainda um inenunciado valor. Mas não os impediu talavia de se afeccionarem das fragoras da teoria do movimento teripático; a heterodoxia que fora desenvolvida neste campo por um alexandino tardio, João o Gramático dito também João Filotas, foi perfilhada nomeadamente após o ano mil por esse pensador de envergadura excepcional que se chamava Ibn-Sena, o Avicena dos cristãos, e dois séculos mais tarde Ibn-Batja dito Avenface Avensovero em Espanha tornou a dar mais ouvidas. Falaremos ulteriormente de tudo isto, quando referirmos a grande influência que estas ideias tiveram nos intelectuais da cristandade entre os quais deram origem à famosa teoria do "impeto",

8

7

um conceito que parece ter sido introduzido na Europa com a tradução de um tratado árabe de Ibn Badja em 1217 e que ainda ^{permanece} no centro dos debates sobre a dinâmica na época de Galileu.

HGS I 449

6

Tudo o que é mais importante ^{para o contributo islâmico} ^{para o avanço} ^{gracias sobretudo a esse} ~~do que~~ contribuições islâmicas no campo da mecânica parece ter sido a sua obra no domínio da óptica, e aí todos se referem ao nome de um cientista de nome excepcional, Ibn-al-Haytam (965-1039), um egípcio a quem a cristandade chamava Alhazen. A tradução latina do seu "Tratado de Óptica" continuará a ser lida no século XVII, após ter influenciado já um tanto Melchior, ^o bem possível que algumas das novidades contidas nessa obra tiveram o seu germe de predecessores árabes ainda desconhecidos] o nome de Alhazen ocupa um lugar de destaque na história da óptica.

5

HGS I, 577
Crombie I, 86-87

4

Para assimilar tão só alguns dos aspectos mais notáveis da sua contribuições, citaremos para cruesa a demonstração (contra o que tinham afirmado tantos homens ilustres e, nomeadamente, Euclides) de que a visão de um objecto resulta de algo que vem do objecto para o olho e não o contrário; Alhazen justificava esta tese argumentando, por exemplo, que as luzes muito fortes (V. g., o Sol) provocam nos olhos dores e lágrimas, Alhazen vai mesmo até explicar que a visão de um objecto resulta sempre afinal da existência de uma fonte luminosa ~~que~~ emitindo "raios" que são reflectidos por esse objecto antes de penetrarem no olho, e que, de resto, a imagem do objecto é influenciada pela natureza da fonte luminosa, em particular pela cor da luz que ela emite.

Rondhi
↓

3

Outra velha teoria que Alhazen desacredita definitivamente é a singular doutrina dos "simulacros", ou "cascais", essa invenção dos etíopes. O rabbi egípcio desenvolve um alternativa uma teoria com um

2

1

Outra velha teoria que Alhazen desacredita definitivamente é a singular doutrina dos "simulacros", ou "cascais", essa invenção dos etíopes. O rabbi egípcio desenvolve um alternativa uma teoria com um

claro gosto de modernidade da formação das imagens point by point, cada uma tendo parecer de imagem global sendo o resultado da passagem de um raio luminoso através de abertura estreita de pupila do olho. E esta explicação fundamentamente correta surge aprriada na sua obra por toda uma série de experiências feitas com a câmara escura (a qual foi provavelmente um invenção chinesa) com as que provava nomeadamente que dois feixes luminosos portadores de duas imagens diferentes podiam cruzar-se ou sobrepor-se numa certa região sem que o seu comportamento ulterior fosse afectado por esse facto.

E certo que as ideias de Alhazen sobre a fisiologia do olho ainda eram incógnitas: de admitir, por exemplo, que as imagens se formam no cristalino. Sera' Avenzoar, esse governador de Siracusa e de Génova no século XIII cujos comentários radicais do aristotelismo marcaram tão profundamente as batalhas entre os teólogos cristãos do século seguinte, quem descobriu que a parte sensível do olho é a retina, descoberta que aliás foi ovidada e só foi repetida independentemente por Platner ¹⁷²⁷ no século XVIII. Isto não significa todavia que se possa ignorar a contribuição de Alhazen para o conhecimento da anatomia e de fisiologia do olho.

Outro aspecto significativo da obra de Alhazen diz respeito aos fenómenos de reflexão e refacção. Na esteira de Claudio Ptolomeu, elaborou uma teoria ^{quasi} completa de reflexão de luz e de formação das imagens nos espelhos planos e nos tipos mais importantes de espelhos curvos (côncavo-convexo, esférico-convexo, cilíndrico etc.); mas o mais interessante foi a sua tentativa de explicar as leis da refacção, assimilando o comportamento do raio luminoso a um fenómeno de choque mecânico elástico, no qual se verificaria a conservação de componente transversal do movimento enquanto a componente normal seria invertida da sua componente normal: e igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão torna-se assim compreensível.



Quanto à refacção, Alhazen considera que na passagem de um meio óptico transparente para outro a componente transversal do movimento permanece inalterada, mas já o mesmo não ocorre com a componente normal que será acelerada ou retardada. E para justificar esta tese recorre de novo as analogias mecânicas: uma bola de ferro lançada contra uma tábua fina segundo um certo ângulo atravessa a tábua aproximando-se da direcção normal. Mas mesmo assim surge, sustentando que a velocidade finita de propagação da luz (finita embora demasiado elevada para a poderem medir) varia de um meio óptico para outro, sendo tanto maior quanto mais "subtil" é o meio, e aí estará afinal a razão de ser da variação de direcção de propagação.

Se nos alongarmos a falar da obra de Alhazen deve-se ir ao seu importância. Mas importa afirmar que mesmo no mundo árabe teve continuadas. Al-Farisi (+1320) o último do grande óptico musulmano sugeriu a utilização de lentes hiperbólicas para corrigir a aberraçao esférica, utilizou a câmara escura nas observações astronómicas e fez uma teoria do arco-íris excelente na sua essência. Terá bastantes antes de cristandade se ceter de ultrapassar significativamente este resultado.

4.

Quando a expansão islâmica do século VIII se apropriou do tráfico mediterrânico, extinguiram-se o comércio e a vida urbana que ainda subsistiam na cristandade, e assim se encerram o longo ciclo de transição para uma economia puramente agrícola iniciado com o declínio de Roma. Os muçulmanos não foram muito além dos Pireneus mas, logo a seguir, começaram as incursões por mar de tanto vindo do norte, os "normandos", enquanto os magiares vinham das estepes orientais até ao Danúbio, queimando e pilhando. Sujeta a tanto ataques que a sua fraqueza abalada, a Europa latinizada retornou a um estado de pura barbárie, cobrindo-se de florestas onde só sobreviviam nichos esparsos de camponeses abrigados em cabanas miseráveis, que despois de instantes metálicos, sob a ameaça permanente da fome. Mesmo as antigas cidades de outrora converteram-se em tristes montões de ruínas.

No topo das comunidades aldeãs constituía-se eletricamente uma classe senhorial que, possuindo as melhores terras e estroquindo os camponeses gado e serviços, tinha o dinheiro reserva, dispunha de alimentos em abundância e podia fazer-se a qualquer esforço produtivo, signo de um estatuto social superior. Mas o seu nível cultural não diferia muito do da gente comum: analfabetos, brutais, supersticiosos, tinham por ofício e justificação a guerra, em esse buceirão da guerra que era a casa na floresta oníspere.

As noções de estado e de lei civil desapareceram da memória colectiva. Sabia-se da existência de um personagem ou tanto mítico chamado o rei, ao qual se atribuíam estranhas virtudes, como o poder de curar por imposição das mãos, mas as relações que existiam na vida quotidiana eram o laço de subordinação pessoal, as ligações directas de homem a homem. A dependência enraizava com a distância e, sendo as viagens longas e difíceis, a sociedade só estava proxamente articulada por uma hierarquia feudal complexa e confusa.

(Monte Cassino)

Num tal contexto, os horizontes mentais tinham de ser muito limitados, e se a igreja dispunha de um autêntico monopólio cultural, os eclesiásticos eram pouco menos ignorantes do que os laicos, muitos deles não conhecendo sequer a língua litúrgica o latim. Os mosteiros, que só surgiram no Ocidente a partir do século VI, tiveram uma acção essencial no salvamento de uns restos do saber clássico, mas devesa se crer que em esse epítlio era desoladamente pobre. Com efeito, e além da velha "História Natural" de Plínio, uma mera compilação acrítica que se tornará fundamental para as ciências naturais a medicina ou a agronomia, dispunha-se sobretudo das obras de Boécio e de Cassiodoro, dois homens que brilharam na corte italiana de um rei godo; Boécio escreveu textos elementares de aritmética, geometria, música e astronomia, e traduziu algumas obras lógicas de Aristóteles deformando-as com conceitos neo-platónicos; quanto a Cassiodoro, os seus escritos e as cópias que mantêm fazer continham alguma informação sobre a filosofia helénica. Para além disto, só houverá talvez que citar as "Etimologias" de Santo Isidoro, um arcebispo de Sevilha no último do século VIII que compilou com certa justiça o escasso saber a que ainda tivera acesso.

Na Inglaterra anglo-saxónica resistiu-se mais resistência ao colapso cultural, e Beda o Venerável (+735) ainda era capaz de dicitar a península dos dados de Páscua ou de elaborar tabelas de moeda. Foi portanto aí que Carlo Magno encontrou a maioria dos mestres indispensáveis à preparação dos funcionários encarregados de administrar o seu império, e desse grande esforço algo ficou, nomeadamente a multiplicação das escolas nas sedes episcopais. Mas o hábito de falar de um "Renascimento

mente carolíngio" só serve para criar confusão: **Aleuino (+804)**, intelectual de origem que foi uma espécie de ministro da intrusão do imperador, fracassou no seu ingenuo propósito de "edificar em França uma nova Atenas, superior à antiga porque ensinada pelo Cristo", pois os tentos excluían tais ambições; a sua filosofia só era aliás uma sombra da de **santo Agostinho** com laivos do existencialismo degudado de Boécio, e a sua didáctica pouco mais que uma colecção de jogos de sociedade. Quase ao fim do século, quando o mito "Renascimento" **depinava**, **Scott Erigena** disputava de um inenarrável prestígio por subterfúgio, mas a sua **invenção científica** era tal que ^{trazava} ^{igual} a II o. v. 2.

Outra história exemplar é a do **monge Gerbert**, **crismenado pelo papa** o maior sábio da época e que foi o papa do ano mil sob o nome de **Silvestre II**. Era de facto um homem muito inteligente e, na ausência de aprender até organizar um rede de correspondentes para lhe procurarem livros, um bem tomado raro. Mas também sabemos que o essencial do seu faço está cimentado proveio de ter estado na juventude num mosteiro catalão, em contacto com a brilhante cultura islâmica; atribui-se-lhe a introdução na cristandade do **ábaco** e do **astrolábio**, novidades que só tinham vindo dessa fonte, e assim Gerbert surge como um pensador de tanto intelectual cristão que aproveitaram o saber dos muçulmanos. Em outra altura, formou-se em **Salerno**, no sul da Itália, um **centro científico activo** que **abrigava** o **afogou** no século XII e teve importância sobretudo no campo da **medicina**, mas também era apenas outro reflexo da cultura islâmica, pelo qual a **alquimia** se tornou introduzido na cristandade. Tentou vir em que a Europa subirá a par e fora os seus tesouros culturais ao seu lado.

Contudo, umas décadas após o ano mil, a cristandade europeia entrou numa fase de rápido progresso que nas comunidades rurais se traduziu pela **aplicação de técnicas de cultivo da terra** até al quase só utilizadas nas grandes propriedades de abadias e mosteiros. Foi uma espécie de **revolução agrícola**, que consistiu na adopção de um ciclo trienal de culturas bem mais produtivas, mas também implicou notáveis melhorias do equipamento, com a **vulgarização das alforjas de ferro**, **aproveitamento** as **peças de charruas** puxadas por bois ou mais favelhas e espadas de revolver a gleba em profundidade. Tornou-se possível manter um número muito maior de **cavalos e bois**, cujos excrementos ajudaram a fertilizar as terras; os animais foram providos de **feraduras** e a **introdução do colar rígido** na **atrelagem dos cavalos** multiplicou por **quatro ou cinco** a sua **potência de tração**.

Simultaneamente, começaram a ser muito utilizadas outras fontes energéticas: a **velha azente romana** espalhou-se pelas aldeias para moer o grão, fabricar pano e vários outros fins, tendo-se chegado a dizer que a **energia hidráulica** desempenhou então um papel equivalente ao da máquina a vapor na **revolução industrial**, enquanto os **molinos de vento** de que havia dois modelos (um trazido da Índia pelo cruzador, outro provavelmente de invenção local) permitiam um largo aproveitamento da **energia eólica**. Libertos assim de tantas tarefas penosas, mais robustos devido às melhorias do regime alimentar, os homens acharam com forças para fazer recuar a floresta, aumentando as áreas cultivadas por cada aldeia e fundando comunidades novas com o apoio dos senhores cuja riqueza assim se acrescia; paralelamente, regularizaram-se os rios e drenaram-se os pântanos, o que **valorizou as terras** e **combateu o flagelo das doenças fúlblicas**.

Com todo este acréscimo de prosperidade, o comércio e a vida urbana puderam renascer. Incómodos e perigosos, as viagens tinham permanecido uma tentação como forma de escape à monotonia da vida rural, e os perigos foram diminuindo quando muitos começaram a abalar com razão em **pretexto religioso**: foi o tempo das **cruzadas** mas também o das peregrinações, a Jerusalém, a Roma, a Santiago de Compostela ou, mais modestamente, a um

O longo inverno - 5

santário provincial com relíquias afanadas. E ao lado dos que se desbearam por defastio ou fe', começaram a multiplicar-se outros levados por motivações profissionais, indo de castelo em castelo para explorar a afetência do rico por traços de aparato ou produtos exóticos. Também se desenvolveram então fluxos comerciais muito mais volumosos de sal, vinho ou cereais, de uma província para outra, às vezes até longe por via fluvial ou marítima.

Viagens e tráficos reanimaram o mundo urbano. Nas encruzilhadas das rotas de peregrinos e mercadores, no pontos ativos, onde os santuários ou as feiras atraíam multidões, foram-se instalando comerciantes e artesãos, e embora a reconstrução das cidades se acelerasse logo que elas começaram a atrair os camponeses vizinhos, no meo do século XII quatro ou cinco mil pessoas lá constituíam uma povoação importante; mas um século mais tarde muitas capitais regionais chegaram ao tinto ou quarenta mil habitantes enquanto um grande centro como Paris reunia os cento e cinquenta mil. Era um contexto qualitativamente diferente, propício a uma renovação cultural.

5.

Nessa sociedade à qual a expansão demográfica e económica assegurava uma sólida confiança em si próprios os intelectuais aperceberam-se de que viviam noutra época e, resolutamente, proclamaram-se "modernos". No fim do século XII as escolas episcopais começaram a ser cada vez mais procuradas, e no norte da França surgiram dois centros culturais ativos, Chartres e Paris, que acolhiam mestres e estudantes vindos de toda a cristandade.

A construção da escola de Chartres foi sobretudo a descoberta do valor incomparável da herança clássica, que um dos seus mestres traduziu na célebre sentença de que "assemelhamo-nos a anões encavalitados em gigantes e se vemos mais e mais longe do que eles, não é porque a nossa vista seja mais aguda mas porque eles não são mais altos com a sua enorme estatura". Embora esses homens tivessem ambicionado apreender todo o pensamento antigo, a sua inspiração permaneceu essencialmente platónica; a evidência dos fontes explica a ingenuidade dos seus esforços para fundir a cosmologia mítica do "Timeu" com a versão bíblica da gênese. De qualquer modo, tentar enriquecer a fonte teológica tradicional graças a um helenismo ainda olhado com suspeição, a escola de Chartres ajudou a desencadear a primeira grande vaga de traduções do árabe e do grego em latim, facilitando também a difusão desse saber reconhecido.

Entretanto, em Paris, as controvérsias ardentes sobre as questões teológicas eram contaminadas por uma mentalidade laicizante que lhes dava um outro caráter. A aventura intelectual desse jovem século XII foi simbolizada por um homem "possesso pela raiva de entender", Pierre Abelard (1079-1142), cuja dialética implacável abateu a arrogância dos mestres da lógica e da teologia. Malquisto das autoridades, ídolo das turmas de escolas sem uma linha, conhecido pela ideologia dos "goliardos", Abelardo acabou por ser expulso de Paris para ver formar-se um acampamento à volta da ermida onde se retirara, os estudantes tendo seguido o professor incomparável; retomará incessantemente o combate até morrer condenado pela Igreja, vítima de uma intervenção de S. Bernardo cujo espírito alto mas sectário via na razão um perigo para a fé.

Aplicando às questões teológicas a mentalidade adquirida na reflexão filosófica, Abelardo mostrou-se capaz

de renovar significativamente a problemática do seu tempo. Sustentava que se já havia verdade nas doutrinas dos antigos a Revelação fora apenas parcial, e confrontando as teses divergentes, os doutores da Igreja perguntava quais delas merecem crédito; ele próprio tentou responder aplicando à patristica as técnicas de exegese dos textos que deveriam assimilar as passagens apócrifas e os erros de transcrição, ou esforçando-se por estabelecer uma hierarquia do valor das fontes. Se nada permite duvidar da sinceridade de João de Abelardo, já se encontra na sua obra a pretensão de aplicar também à teologia as armas ainda frágeis da razão.

A influência de Abelardo também abarcou a famosa "querrela dos universais", na qual se discutia se as ideias platônicas ou os universais tinham efectivamente realidade, como afirmavam os "realistas" cujo chefe foi S. Anselmo (1033-1109), um teólogo italiano que tornou arcebispo de Cantuária, ou se os universais eram apenas palavras traduzindo o "sentido das coisas", tese do seguidor de Roscelin (c. 1050-1120), esses "nominalistas" de que Abelardo foi um chefe de fila. Era uma questão de fundo que até influenciou a história das ciências, pois o nominalismo tendia a favorecer o interesse pelo concreto, pelo seres naturais, enquanto o realismo desse tempo se comprazia a discutir, por exemplo, o que haveria de comum entre os quatro elementos, os quatro céus, os quatro pontos cardeais e os quatro humores. Sem se ter extinguido, essa discussão assumiu contudo outras formas quando, no meado do século, a cultura europeia foi profundamente abalada pelo brusco acréscimo do saber resultante da proliferação das traduções.

Foi realmente nesta altura que se iniciou um formidável esforço de transcrição do árabe e do grego em latim, o qual viria a contemplar todos os caudais do saber. Com alto e baixo, de uma forma cada vez mais refinada, esse esforço prosseguiu até aos finais do Renascimento, mas foi com a chamada "primeira geração de tradutores", entre 1130 e 1180, que surgiu a grande revelação. Intelectuais de grande ousadia como Abelardo de Bari ou Bernardo de Gemona consagraram-se a uma tal tarefa, realizada sobretudo no norte da Itália, em contacto com os muçulmanos e os bizantinos através de Veneza e de Pisa, no reino da Sicília, em cuja corte se utilizava intensamente o árabe, o latim e o grego, mas também em Toledo e outras cidades da Ibéria fronteiriças com o Islão. Assim, toda uma série de obras capitais tornaram-se bruscamente acessíveis aos leitores cristãos.

Talvez por acidente, os foram traduzidos três centros hialógicos platónicos, enquanto de Aristóteles, além do resto do "Organon" e de parte da "Metafísica", se transcreveram diversos textos científicos incluindo a "Física"; as duas grandes novidades eram o "Elementos" de Euclides, o "Almagesto" ptolomaico, e o tratado médico de Galeno e de Hipócrates, ao que se deve acrescentar pelo menos um texto puramente islâmico, a "Aritmética" de Al-Kwanizmi, o livro-matiz da numeração posicional. Que um tão brusco acréscimo do saber da cristandade viria responder a necessidades autênticas é um facto cultural muito significativo. Apesar da sua dificuldade intrínseca, esses livros não adormeceram na poeira das bibliotecas mas, lidos e assimilados, alteraram profundamente o panorama científico e cultural, com tanto mais liberdade que nesta primeira fase a Igreja até os encarava com benevolência. Os manuscritos científicos afiguraram-se inofensivos, e as novidades filosóficas, fornecendo sobretudo uma melhor compreensão da lógica, até pareciam oferecer certas vantagens: tanto a filosofia considerada como uma "serva" da teologia, do seu progresso deveria advir um necessário aprofundamento da Revelação. E assim foi, aparentemente, durante umas breves décadas, fogueira por essa porta ir-se-ia engolir uma tempestade.

O longo interregno - 6

6.

Para a cristandade ocidental, o século XIII não foi apenas o tempo de construírem as catedrais, mas também o tempo de adrearem as universidades, instituições novas para uma cultura mais exigente, e seria quase imperdoável esquecer a sua eclosão.

No fim do século XI, já muitas cidades — e além de Chartres e Paris devemos citar, pelo menos, Bolonha — tinham as suas escolas importantes. Ao determinar que todas as sedes episcopais mantivessem um mestre para a formação dos clérigos, o III Concílio de Latrão mostrava que a Igreja estava atenta às transformações sócio-culturais. De facto, tornava-se indispensável preparar minimamente o sacerdote, sobretudo os que officiarão no meio urbano onde as exigências culturais dos leigos tinham aumentado, pois já lá iam os tempos em que os fidalgos não tinham vergonha de ser analfabetos e a instrução tornara-se quase uma condição de sobrevivência para os mercadores; linhas de contabilidade, letras de crédito e sociedades por acção multiplicaram-se rapidamente, homens de lei eram requeridos quer pela actividade comercial, quer pelo aparecimento de um esboço de administração pública, enquanto as cidades e os castelos ofereciam clientela a quem dispusessem de uma formação médica.

A falta de melhor, os estudantes proliferaram nas escolas-catedrais do século XIII forçando-as a diversificarem-se, pois o esquema tradicional do "trivium" e do "quadrivium" revelava-se totalmente inadequado às novas necessidades. Ora, um reflexo típico da mentalidade medieval levava em cada burgo os officiais do mesmo officio a agruparem-se em confrarias para a defesa dos seus interesses; assim, as escolas da mesma cidade tenderam a formar instituições corporativas "mi-generis" que, as mais das vezes, integravam professores e alunos e se tornaram as universidades. Frequentemente em rivalidade aberta, as autoridades civis e eclesásticas afioraram em geral o nascimento das universidades, fontes de prestígio, de influência e até de benefícios materiais, procurando aliás aproveitarem-se delas ou promovendo até a sua formação: a universidade de Bolonha foi acarinhada pelo imperador na luta contra o papado, a de Montpellier surgiu como um instrumento da Santa Sé no combate às heresias cátaras, e quando Frederico II obrigou os seus súbditos a frequentar apenas a universidade de Nápoles, o pontífice excomungou a cidade e estabeleceu uma instituição concorrente em Roma. Em todo o lado, contudo, as confrarias universitárias reivindicaram autonomia e privilégios, conseguindo êxitos assinaláveis.

Neste processo complexo, com histórias muito diferentes segundo as contingências locais, pouco interessa fixar precisamente o ano da fundação desta ou daquela instituição para estabelecer prioridades. Constatemos tão-só que no fim do século XIII já havia uma quinquena de universidades, das quais cerca de metade na Itália e nenhuma fora lá do Reno; incluíam centros cuja influência foi forte e duradoura (como Bolonha, Oxford, Paris ou Padua) e alguns outros sem projecção nem futuro. As suas estruturas, como a organização dos estudos, eram bastante diferentes, mas para tomar apenas um caso, o de Paris, havia quatro Faculdades: a das Artes, espécie de escola preparatória que os estudantes frequentavam, em princípio, desde o começo da adolescência para aí obter o grau de bacharel e, depois, o de mestre; as de Medicina e de Direito (civil ou canónico), as quais podiam aceitar os mestres em Artes e as guardavam durante cinco ou seis anos para a formação profissional; enfim, a de Teologia, onde estudos e estágio não

Alcubito

Quadrivium

- Geometria
- Arithmetica
- Astronomia
- Musica
- Trivium

- Grammatica
- Rhetorica
- Dialectica

permitted obter o almejado doutoramento antes dos 35 anos, com a compensação das facilidades oferecidas pelo grau no acesso a confortáveis situações eclesiais.

Como os estudos se centravam na memorização e interpretações dos textos que os mestres liam e comentavam, as universidades tornaram o livro instrumento indispensáveis de trabalho que tiveram de ser adaptados a nova re produção em larga escala. Para isso, melhorou-se a fabricação do pergaminho, adotou-se a pena de pato, mais eficaz, inventou-se uma caligrafia minúscula de escrita rápida, multiplicaram-se as abreviaturas e suprimiram-se os ornamentos, enquanto o próprio formato se reduzia ao "in-folio" abacial a tiragens mais manuseáveis. De artigo de luxo, o livro transformou-se assim num produto de utilização corrente, fabricado por copistas especializados que eram muitas vezes errantes pobres, e vendidos por um novo tipo de comerciante, o livreiro.

As universidades alargaram muito as possibilidades de acesso à cultura mas também acabaram por difundir muitas atitudes mentais. As técnicas de análise dos textos ensinadas por esta primeira "escolástica" - o método da escola - vieram afinal permitir umas audácias intelectuais que se traduziram no drama ideológico vivido no século XIII.

Com efeito, foi neste tempo que os intelectuais cristãos ocidentais se lançaram ao fascínio do aristotelismo. Se a "primeira geração de tradutores" lhes facultara um melhor conhecimento de Aristóteles, aliás mais do lógico do que do metafísico ou do homem de ciência, a "segunda geração de tradutores", após 1220, já quase só se ocupou do pensamento do Estagirita. Quem na Sicília, sob a égide do inquietante Frederico II e ao orden de Michael Scott, quem na Espanha com Hermann o Alemão e tantos outros, mas também agora em Oxford com Brunetto e em Paris com Tomaz de Aquino, tudo quanto se encontrou de interessante relacionado com Aristóteles foi transcrito em latim: o texto completo da "Metafísica", da "Política", da "Ética" e da "Ética a Nicómaco", o tratado "Da alma", "Do céu e da terra", vários outros de ciências naturais e, em suplemento, o conjunto peripatético de grandes pensadores islâmicos como Avicena e Averroes. De Platão, que a tradição agustiniana deveria contudo favorecer e do qual só se conheciam ainda três diálogos, nem sequer uma linha. Decididamente, tendo encontrado um sistema filosófico a seu gosto, a intelectualidade europeia tentava apertar-lo até ao fim para vesti-lo com ele.

Embora se vienes a verificar que o cristianismo poderia recuperar boa parte das doutrinas aristotélicas, a Igreja apercebeu-se da fragilidade da sua teologia perante os problemas de fundo levantados pela obra do "Filósofo" e, atemorizada, proibiu a sua leitura. Mas foram tanto os que desobedeceram a proibição que se apegou ao livro, em Paris, se ensinou em 1231 outra política, autorizando o estudo da "Física" e da "Metafísica" mas por textos expurgados. Um tal paliativo revelou-se ineficaz e crise ainda mais se agravou quanto o aristotelismo começou a ser interpretado na perspectiva de Averroes, concepção radical propriamente incompontável: a tese da eternidade do mundo, o qual, como Deus, existia desde sempre, como a de que só o "intelecto agente", elemento activo da alma com um a todo o género humano, sobrevive à morte, regaram frontalmente as doutrinas da criação e da salvação individual, pilares da mensagem cristã.

Não clima de grande agitação intelectual que as condenações da Igreja se revelavam impotentes para eliminar, mas posições de fundo acabaram por se definir no terceiro quartel do século. De um lado, os averroístas mais ou menos cretenses cujo defe parisiense era Siger do Brabante (c.1235-1284) adoptavam no fundo a teoria da dupla verdade, a "doppia verità" do seu homólogo pakuano: há uma verdade sobrenatural revelada que sempre os bons cristãos recebem, mas existe outra verdade necessariamente verdadeira, fruto da razão, da filosofia e das ciências. Do outro lado, teólogos

mais ortodoxos acolhiam o aristotelismo mas procurando libertá-lo de Aarons, este "falsificador de Aristóteles"; cancelado à filosofia um domínio só limitado pelas verdades mais altas de origem sobrenatural, recusaram-se contudo a tomar as conclusões da razão como necessariamente verdadeiras porque, de assim fosse, o que era contrário ao tom de se recusariamente falso. Este programa de conciliação, no limite do possível, do cristianismo com o pensamento aristotélico foi empenhado por Alberto Magno (c. 1200-1280) e formalizado nas "Summas" de Tomaz de Aquino (1225-1274).

Um certo pânico impediu a Igreja de entender imediatamente a diferença entre as doutrinas de Siger e de Tomaz. Em 1277, o bispo de Paris (logo imitado pelo de Cantuária) publicou uma lista de mais de duzentas proposições onde muitas foram heréticas e impiedadas, das quais citamos algumas para mostrar a que extremos se chegou: que a religião contém fábulas e erros como hienas as outras, que é contrária à ciência, que a felicidade se encontra na vida terrena que a continência não é si própria uma virtude. Ora, curiosamente, das sentenças recusadas sem apelo, uma violada não era dos averroístas mas dos tomistas.

Um tão grande malentendido acabaria por se dissipar e Tomaz, o "doctor angelicus" seria beatificado, depois canonizado (1323), enquanto as suas ideias adquiriam força de teologia oficial. Deste modo, uma versão do aristotelismo mutilado na forma e desvirtuado no fundo quase foi inserida na teologia cristã, tendo-lhe sólidas bases metafísicas nas ^{ciências} físicas mas erradas, inutilmente, uma espécie de ciência ortodoxa. Outros foram o destino do averroísmo latino: Siger foi exilado e as suas ideias sobreviveram dificilmente em Paris, mas viram a adquirir certa projecção em Inglaterra e, com outras técnicas, obtiveram na Itália uma projecção considerável; quanto ao país estava dividido entre o partido bairro do papa e o do imperador, entre guelfos e gibelinos, uma doutrina que dava à filosofia primazia sobre a teologia facultava argumentos técnicos a uma das facções. Era um averroísmo político cujo centro foi a universidade de Pádua e se difundiu entre a burguesia já vigorosa das cidades do norte da Itália.

7.

No âmbito propriamente científico, a cristandade do século XIII ainda tivera muito pouco a dizer. Escreveram-se numerosas enciclopédias mas que permaneceram tributárias do velho texto de Boécio e de Cassiodoro com mais umas tantas extravagâncias análogico-simbólicas introduzidas pelos redactores, e só parece encontrar-se alguma novidade num livro de apinenoura escrito por um judeu catalão almechado Savasorda, onde se apresentava a teoria das equações do 2º grau. Contudo, sob a influência dos nominalistas interessados pelo concreto e, sobretudo, com o estímulo das obras científicas então trazidas, a situação depressa se alterou e, no século XIII, reapareceu um interesse pela ciência com factos importantes.

No quadro universitário, foi principalmente entre os franciscanos predominantes em Oxford que se verificou de início um recomeço de interesse pelas ciências, pois os dominicanos parisienses estavam obcecados pelo estudo da lógica e da metafísica aristotélicas. A influência de Santo Agostinho sobre os discípulos do "Poverello" decaído contribuiu muito para que Oxford resistisse melhor à vertigem dos silogismos, acolheresse com maior abertura todas as novidades chegadas do estrangeiro, assegurasse uma certa continuidade à tradição platónica de Chartres. As inclinações científicas dos mestres oxonenses do século XIII foram sobretudo profundamente metafísica, por

se juntou numa velha ideia de índole neo-platônica que concebia à luz o papel fundamental na explicação da natureza, mas nem por isso a obra feita deixou de ter certo interesse.

objetivo interessante

O caso de Robert Grosseteste (1175-1253), o primeiro de sua linhagem, pode considerar-se exemplar. Teólogo de formação e de mentalidade, retomou especulações antigas reatadas pelo Islã quanto à importância da luz na formação das coisas; não só o universo teria começado por ser um mero ponto luminoso, como tudo quanto nele ocorre se deve afinal à luz, "forma" primária do objecto, responsável pelas suas dimensões e causa dos seus movimentos, cujos raios transportam as acções mecânicas, caloríficas ou até astronómicas do corpo mas sobre o qual uma tal metafísica levou porém Grosseteste a interessar-se pelos fenómenos naturais (como o arco-íris) onde a luz é determinante e a estudar as propriedades das lentes e espelhos, obtendo assim alguns resultados interessantes, no tocante à interpretação do efeito das lentes por duas refrações sucessivas, mas sem novidade de valor.

operacion

Roger Bacon (1224-1294), o maior dos seus continuadores, foi uma figura singular. Nas "Opus" deste teólogo franciscano, ordenadas pela Igreja em 1278, encontram-se fases duma consciência extremamente moderna quanto, por exemplo, afirma a importância das matemáticas no estudo da natureza ou afirma que "o raciocínio não vale, tudo depende da experiência". Esse místico alquimista que profetizou a construção de veículos a motor, submarinos e avião, tinha tanta confiança nas potencialidades do conhecimento científico que incitou a Igreja a desenvolvê-lo para vencer facilmente os infiéis. Foi um apologeta da experimentação, perseguido pelo nacionalismo siogotico ou pelo argumento de autoridade, e afirmou-se por validar o método intuitivo entre outros métodos. Todavia, e penurando a história do seu homólogo suscitista Francis Bacon, não deixou resultados científicos à altura de tais pretensões metodológicas, limitando-se a estudar alguns fenómenos ópticos. Em síntese, tentou determinar as propriedades das lentes e das suas combinações, definiu o foco dos espelhos esféricos e observou um eclipse solar utilizando a câmara escura, uma velha invenção chinesa. Pode ir mais longe que Grosseteste graças sobretudo à leitura de Alhazen, em tradução traduzido em latim.

itellu

Nata também, um monge italianizado que nasceu no Confinio germano-polaco cerca de 1225 e foi conhecido por Viti ou Vitellio Flazio durante Alhazen para escrever um tratado de óptica, o "Vitellione", que ainda era famoso nos tempos de Kepler. E, nos finais do século, o dominicano alemão Diotrich de Friburgo já conseguiu interpretar o aparecimento do arco-íris por meio de duas refrações e uma reflexão do raio luminoso numa gota de água, explicando também a existência do arco-íris secundário, acima do principal, pela combinação de duas refrações e duas reflexões internas, as cores surgindo então na ordem inversa.

Pierre Curie

Muito mais sólida e original foi a contribuição para o progresso da Física de Pierre de Maricourt (ou Petrus Peregrinus), do qual quase só sabemos ter sido engenheiro militar do rei de França. A sua "Epistola de Magnete", a "carta sobre a pedra-mã, breve texto datado de 1269, trazia realmente realmente grandes novidades sobre o comportamento do corpo magnético popularizado pela introdução da bússola na Europa no começo desse século. Invenção chinesa difundida no Ocidente pelo muçulmano, a bússola era inicialmente uma agulha magnética frouxada sobre um flutuador que lhe dava mobilidade, mas a "Epistola" já debruça a versão ulterior em que essa agulha gira em torno de um eixo vertical. Além de descrever cuidadosamente a pedra-mã, Maricourt apresentou um conjunto de experiências que entusiasmarão Bacon, pois permitiam identificar os polos norte e sul da agulha, enunciar as leis qualitativas de atração ou repulsão entre os polos, e até verificar que uma agulha seccionada

Alquimia
Química

com o aparecimento de novos polos que se neutralizam ao reconstituírem-se a agulha inicial; chegou mesmo a aventar que a orientação permanente das bússulas se deve à existência de grandes massas magnéticas no polo terrestre. De facto, até à publicação de "De Magnete" por Gilbert, em 1600, o que na Europa se sabia do magnetismo estava quase na "Epístola", cuja influência foi tanto maior quanto os renascentistas atribuíam as forças magnéticas em estatutos privilegiados.

Acrescentemos desde já umas palavras relativas à química, que já nessa altura era confundida na cristandade com uma alquimia de estatutos ambíguos: com motivações hírcas, muitos se ocuparam dela embora, na verdade, com fins profanos para o ensino. Alberto Magno, interessado por esses estudos e cujo nome prestigioso foi reivindicado pelos novos alquimistas, embora não excluísse biologicamente a possibilidade da transmutação dos metais, denunciou toda a falta de fidelidade experimental de alguns dos resultados de que a doutrina herética se pautava. Mas outros doutores da Igreja, como Bacon ou o catalão Raimundo Lullio, ter-se-iam realmente dedicado a práticas alquímicas, sobre as quais circularam aliás muitos textos apócrifos. E de toda essa actividade dos alquimistas convictos ou do simples "sofrados" parece ter afinal resultado algo de positivo, dado que se criaram nitidamente nessa época os primeiros ácidos minerais, em particular o ácido sulfúrico e o ácido nítrico.

8.

O interesse apaixonado pela luz não bastou à cristandade do século XIII para ultrapassar significativamente Alhazen, e essa subordinação à ciência islâmica foi a regra em quase todos os domínios. Assim, reapareceu alguma actividade astronómica, tanto sobretudo em mira perisóica astrológica, e dos catálogos de posições dos ~~estrelas~~ ~~estrelas~~ ~~estrelas~~ elaborados destacaram-se as chamadas "Tablas africanas" (1254), escritas em castelhano na corte de Afonso o Sábio, as quais se referiam "Los libros del saber en astronomia" cheios de especulações ocultistas. Ora ambas estas obras ostentam profundas influências muçulmanas e judaicas, e os textos mais rigorosos de John de Holywood dita Sacrobosco (fl. c. 1230) também reiculavam a grande tradição alexandrina recebida dos árabes; o seu famoso "Tratado de esfera" teve novamente grande influência sobre os teóricos das viagens náuticas dos portugueses e, de facto, foi esse oxoniano professor em Paris quem primeiro explicou o sistema ptolomaico à Europa cristã.

A influência das matemáticas islâmicas não foi menor embora, neste caso, haja que reconhecer a criação excepcional de Leonardo de Pisa (1175-1240), mais conhecido por Fibonacci. O pai deste "filho de Bonaccio" era o síndico dos mercadores pisanos no norte de África, o que permitiu ao jovem frequentar as escolas do Islão e, de regresso à Itália, publicar alguns livros que lhe valeram grande prestígio e tiveram larga difusão contribuindo nestes para elevar o nível dos conhecimentos matemáticos da cristandade.

O "Liber Abacci" (1202) de Fibonacci teve um papel importante na difusão do sistema de numeração arábico-indiano na Europa, e o próprio Leonardo afirmava ter mente "que a nossa latina não continuasse privada desse conhecimento". Mas o livro também incluía uma exposição elementar da álgebra que ia até à resolução de algumas equações do 2º grau, cálculo de frações, potências e progressões, e até aliás de muitos outros.

do, o tratamento de questões de interesse puramente comercial como a estimativa de pesos ou a comparação de ligas e moedas. Esta faceta da obra de Fibonacci prenunciava a multiplicação do texto matemático especificamente destinado a uma classe mercantil cada vez mais recrutada de tais conhecimentos. Nesse meio, a utilização do algarismo tinha rapidamente aceite (e o número de escolas de algarismo multiplicar-se-ia, sobretudo em Florença), mas já a aceitação de numeração porcional se revelava bastante mais lenta, tendo de afrontar velhos preconceitos; o estatuto do banqueiro florentino de 1259, por exemplo, ainda impunha a utilização da numeração romana.

Mais tarde, quando escreveu a "Practica geometrica", Fibonacci discutia variados problemas de geometria, frequentemente de aplicação imediata por exemplo à medição das áreas de terrenos, mas também procurava familiarizar a "nasa latina" com essa grande novidade surgida no Oriente, a trigonometria. Seria todavia injusto considerar esse notável matemático ao qual se devem investigações muito originais apenas como um grande divulgador. Assim, foi-se o curioso problema de saber quantos pares de coelhos provêm de um só casal durante um ano, está suposto que nenhum coelho morre entretanto e que cada par gera um novo par todos os meses tornando-se fértil desde o segundo mês de vida. A resposta é que no primeiro mês não nasce nenhum coelho (é o período de gestação da fêmea inicial), no segundo mês surge um primeiro par tal como no terceiro mês surge um terceiro par, no quarto mês já nascem dois outros pares (um do casal inicial, outro do primeiro filho), no quinto mês aparecem três pares, obtendo-se que os números de pares de coelhos vivos, nos meses sucessivos serão 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 88, 143, 231... Esta sucessão é, de facto, uma das primeiras séries conhecidas, a famosa "série de Fibonacci", na qual cada termo responde à soma dos dois precedentes.

Outra história que deu brado foi a crítica de Leonardo numa espécie de desafio, transposição de intelecção das técnicas matemáticas, que lhe foi lançado por João de Palermo e o outro matemático do imperador Frederico II. Fibonacci foi então intimado a encontrar um número tal que somando ou subtraindo 5 ao seu quadrado se obtivessem dois números quadrados, a resposta era $\frac{41}{12}$ porque, com efeito $(\frac{41}{12})^2 + 5 = (\frac{49}{12})^2$ e $(\frac{41}{12})^2 - 5 = (\frac{31}{12})^2$. E no "Liber Quadratorum" generalizou o problema, resolvendo o problema de definir três quadrados tais que juntando ao menor deles um número dado se obtenha o quadrado intermédio, ao qual somando esse número corresponde o quadrado maior.

Fibonacci foi decerto o maior matemático do seu tempo, embora outros de menor envergadura também tivessem dado o seu contributo. O misterioso João de Palermo, por exemplo, não deixou de se ocupar das matemáticas, mas parece ter-se só referido a propósito da mecânica.

9.

João, o Gramático

Nas universidades do século XIII ensinava-se a dinâmica aristotélica, havendo sido conhecidos por fontes árabes das dificuldades de doutrina, das ideias heterodoxas de Filopón retornado por Averroes, e de certas formulações da lei do movimento sugerida por Averroes. Tomás de Aquino, para citar apenas um grande nome, parecia a considerar a proposta de Averroes superior à formulação atribuída a Aristóteles mas, tal como Averroes, rejeitava a ideia de que o motor fornecesse ao móvel qualquer potência motriz porque, se assim fosse, "o movimento violento proviria de um princípio intrínseco ao móvel, o que seria contrário à própria

Aristóteles
o.v. P/R
Averroes
o.v. P-R
Croubie
251, 260

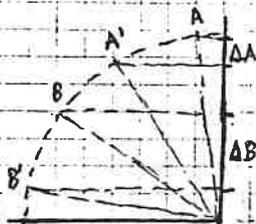
Bacon de verulam
opiniões

O Ingo intermezzo - 9

nosas de movimento violento. Mas estas questões só viram a ter consequências no século seguinte.

Os problemas de estática, as questões de equilíbrio, também eram tratados pelos doutores no quadro do aritmetismo, mas sobre esse tema circulavam paralelamente outras obras, por vezes atribuídas a Euclides, a Arquimedes ou a um tal Jordanus, todos eles designados em conjunto pela "archimedes praeambulis", os tratadinhos de peso. Ora nestes textos em que a estática era encarada sem quaisquer conexões filosóficas, como um simples ramo das matemáticas aplicadas, encontramos novidades muito interessantes, sob a assinatura do referido Jordanus, sobre o qual nada sabemos, e cujos tratados são hoje designados por comodidade como Jordanus I, II e III. Provavelmente foram obras de autores diferentes, que se sucederam no tempo, e há indícios de que Jordanus II tivesse sido Jordanus o Saxão (†1237), o sucessor de S. Domingos à frente dos dominicanos, mas esse texto é muito inferior aos outros dois. Falamos, pois, de Jordanus I e de Jordanus III.

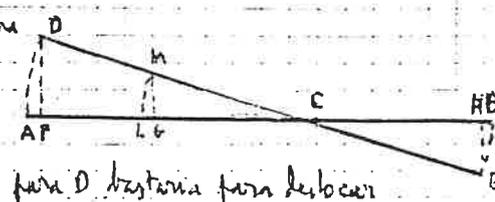
Os "Elementa Jordanus super demonstrationem praeambulis", o Jordanus I, utiliza sete axiomas ou definições para demonstrar nove teoremas, e a sua grande originalidade está na ideia de analisar o equilíbrio dos graves suspensos nas extremidades de alavancas (podendo, assim, descrever arcos de círculos) com o auxílio das deslocações que se efectuam segundo a vertical. Decerto, nunca se fala em "trabalho", mas o raciocínio consistente de facto a uma aplicação rudimentar do nosso actual "princípio do trabalho virtual". Jordanus introduz o conceito de "gravitas secundum situm", a gravidade inercial à posição, a qual será em cada ponto tanto maior quanto mais se aproxima da vertical o movimento do grave aí situado; assim, a "gravitas secundum situm" de um corpo situado em A será muito menor do que do corpo situado em B, porque para o mesmo ângulo AA' ou BB' a deslocação na vertical DA é muito inferior à deslocação DB ou, como Jordanus dizia, o corpo situado em A "toma menos directo" do que em B.



O que Jordanus supõe (e fala-se agora no "postulato de Jordanus") é que dois graves, atarvés em equilíbrio se fornecem a mesma "gravitas secundum situm", o que Delembert traduziu dizendo que isso corresponde a admitir que "o que pode elevar um peso P a uma altura h também pode elevar um peso nP a uma altura h/n"; princípio simples e exacto que atarvés na base da estática de Descartes, de que Leibniz se serviu para introduzir a "força viva" e será enfim convertido no século XVIII no princípio do trabalho virtual. Por na, limitemo-nos a recordar como Jordanus não se detinha à construção de equilíbrio das alavancas, demonstração original muito superior à de Arquimedes.

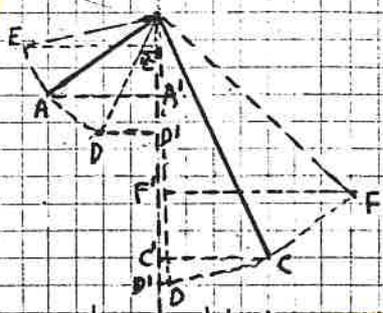
"Seja uma barra ABB e A e B os pesos que ela suporta, e imaginemos que a relação A/B seja a mesma que a relação CB/CA. Digo que a barra não mudará de posição. Com efeito, suporíamos que ela desce do lado de B e tem a DCE; B desce de HE enquanto A sobe de FD. Ora, se colocarmos em L, numa posição tal que CL = CB, um peso igual a B, ele subiria neste movimento uma altura GM = HE. E todavia evidente que FD está para GM com o peso L=B para o peso A; portanto, o peso que basta para deslocar A para D bastaria para deslocar L para M, e como mostramos que B e L se equilibram exactamente, segue-se que o movimento suposto é impossível, conclusão igualmente válida para o movimento na vertical inverso."

$$\frac{A}{B} = \frac{CB}{CA}$$



Jordano I também tenta resolver o problema de equilíbrio na alavanca dobrada, obtendo aí uma resposta falsa por ter tratado incorrectamente a questão das ligações, mas a solução exacta foi deduzida por Jordano III dos mesmos postulados. Embora que texto, o "Liber Jordani de ratione ponderis" se tivesse sido citado em 1565, já estaria citada largamente difundido, e Duham suscitou que ele influenciaria profundamente as investigações de Leonardo da Vinci (1452-1519) o qual, por vezes, nem chegaria tão longe. De facto encontramos aí pela primeira vez as análises de equilíbrio dos pesos nas alavancas dobradas e no plano inclinado.

Consideremos uma alavanca dobrada AOC, com pesos iguais em A e C, e colocada em tal posição que AA' = CC'. É impossível que o peso em A vença o peso em C porque o arco AB e CF correspondentes, do mesmo ângulo em O implicam uma descida na vertical A'B' inferior à subida C'F'; mas o peso em C também não pode vencer o peso em A porque a descida na vertical de C, que é CD' é inferior à subida correspondente de A na vertical que é dada por A'E'.

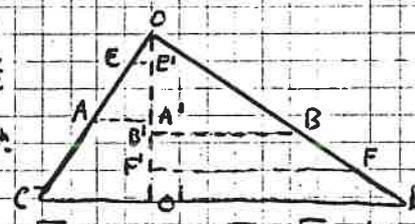


Generaliza-se em seguida este resultado com a demonstração de que uma alavanca dobrada suportando dois pesos diferentes nas extremidades A e B estará em equilíbrio se as distâncias AA' e BB' das posições dos pesos até a vertical passando pelo ponto de apoio estiverem na razão inversa dos valores desses pesos: era uma forma implícita de inferir a igualdade dos momentos das duas forças gravíticas em relação ao fulcro. É com

um raciocínio de teor análogo, Jordano III - chamado, por vezes, o "Desconhecido do século XIII" - também conseguiu determinar os condições de equilíbrio de pesos apoiados em planos diferentemente inclinados, problema a que Pappus deu outrora uma solução falsa. Afinal, trata-se apenas de inferir que o peso A situado sobre OE tenha a mesma "gravitas secundum situm" que o



peso B situado sobre OD; para isso, considera-se um deslocamento AE de A, ao qual corresponde, por o dois pesos está ligado por um fio passando por C, um deslocamento análogo BF de B. Ora AE está para OE como A'E' está para OO', e BF está para OD como B'F' está para OO'; visto que AE = BF, obtém-se



$\frac{AE'}{B'F'} = \frac{OD}{OE}$, e como os pesos em equilíbrio devem estar na razão inversa do que "tomam na vertical", segue-se imediatamente que haverá equilíbrio se o peso de A estiver para o de B como OD está para OE, conclusão exacta.

$$\frac{AE}{OE} = \frac{AE'}{OO'}$$

$$\frac{BF}{OD} = \frac{B'F'}{OO'}$$

$$AE = BF$$

$$\frac{AE'}{OO'} = \frac{B'F'}{OO'}$$

$$\frac{AE'}{B'F'} = \frac{OD}{OE}$$

$$a AE' = b B'F'$$

$$\frac{AE'}{B'F'} = \frac{b}{a}$$

$$\frac{b}{a} = \frac{OD}{OE}$$

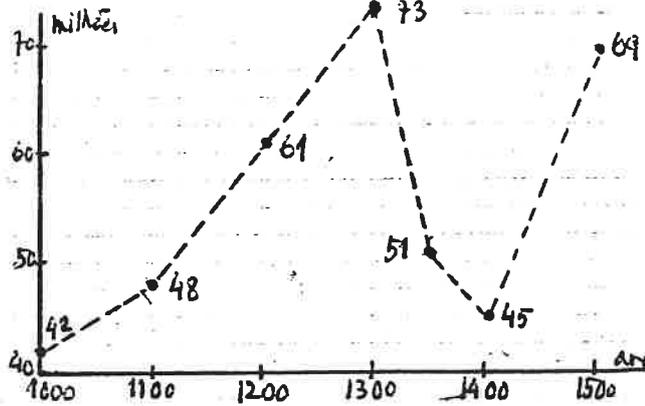
10.

Há somente umas décadas que adquirimos plena consciência da gravidade da crise sofrida pela civilização latina nos finais da Idade Média. Reconheciam-se as profundas sequelas da chamada Grande Peste (1348-49), a qual eliminou cerca de um quinto da população europeia, mas era necessário inserir essa catástrofe num processo de degradação ainda mais de trair e que aliás agravou um tal verticínio. Se bem que desde os começos do século XIV, vastas regiões da Europa foram afectadas por frequentes surtos de epidemias e de carestias, estas resultando em geral de uma sucessão de maus anos agrícolas;

O longo intemegro - 10

ora a carestia trazia consigo a fome e, assim, um enfraquecimento orgânico favorável à difusão das epidemias as quais, diminuindo o número de braços válidos, tornavam mais prováveis novas carestias e novas fomes. Foi neste ciclo infernal que surgiu a Grande Peste, mas o século conheceu nos quarenta anos de epidemia e, pelo menos, duas outras graves mortandades. Um gráfico da população europeia durante meio milénio revela-se aliás aqui particularmente expressivo.

Tais números provêm de estimativas com uma boa margem de incerteza, mas não há dúvidas sobre a forma tão extrema da curva, aliás confirmada por dados bastante mais seguros relativos à evolução demográfica da França ou da Inglaterra. Contata-se um decréscimo da população após o ano mil, acelerado no século XIII e já relativamente mais lento no século seguinte, ao qual se sucede uma queda brutal nas décadas imediatas que, embora atenuada porsegue pelo menos até 1400. A recuperação processar-se-á com uma rapidez que decerto traduz forte vitalidade, embora inexistente.



Afigura-se evidente que, com as estruturas económicas de então, as causas deste processo em cadeia só puderam resultar de uma séria crise agrícola, a qual foi atribuída a diversos factores, desde o esgotamento das terras até ao arrefecimento do clima, foi o clima também tem uma história. Contudo, esses factores parecem insuficientes para explicar um tal fenómeno, e justifica-se porventura a tese de que no fim do século XIII, estando já difundidas as melhores técnicas agrícolas e não sendo possível desbravar mais terras nem deniquilibrar um sistema onde o papel da floresta era essencial, a produção de alimentos estagnou ou até decresceu enquanto a população continuava a aumentar; e assim teriam surgido as primeiras grandes fomes com um demagotamento económico que seria amplificado pelos efeitos nefastos das guerras. Lembra-se que foi neste século que os conflitos feudais se transformaram em guerras de índole nacional, cujo principal instrumento eram bandos de soldados mercenários que, periodicamente, se transformavam em autênticos flagelos saqueando províncias inteiras. Não foi por acaso que a memória colectiva associa numa sinistra trílogia a peste, a fome e a guerra.

Paradoxalmente, esses tempos duros melhoraram a condição dos mais humildes, sobretudo os camponeses, não em consequência das inúmeras revoltas populares então ocorridas mas da fortíssima contracção demográfica. Quando os homens se tornaram tão raras que muitas povoações foram abandonadas, por vezes definitivamente como sem o trabalho do camponês a terra não valia nada, as leis do mercado jogaram a favor dos vilões. Em contrapartida, a nobreza viu-se privada de proventos e de poderes, a crise provocando uma dissolução da velha economia senhorial; fechando-se sobre si próprio, auto-definindo-se em termos de pura hereditariedade os senhores transformaram-se assim numa casta que se abismou doravante como uma aristocracia de sangue.

A burguesia mercantil italiana teve reacções malthusianas de ter análogo, com as aspirações de artesãos e artífices a tentarem reservar o exercício das várias profissões, as que já as praticavam em an sua descendentes, pretensões que serão varridas pelo retorno da prosperidade. E várias universidades, queferam a essa mentalidade, com os ucleres cifrando-se por se transformarem numa nobreza intelectual que imitava a nobreza de sangue e tentando até legalizar a transmissão das cadeiras em suas famílias; tais ambições eram em parte motivadas pelo proventos de tais lugares, o custo exorbitante das propinas tendo aliás quase eliminado o estatuto de condições modesta.

Assim, a multiplicação dos centros universitários sobretudo para lete (Viena, Heidelberg, Praga, Cracóvia) coincidiu com um declínio da qualidade do ensino que se tornou realmente "arcolítico" no sentido pejorativo do termo: o aristotelismo ^{na sua vertente} ~~o~~ tomismo ^{passaram a ser empírico} era ~~afora~~ ^{afora} ~~ensinado~~ em termos totalmente arcolíticos, e o instrumento lógico utilizado em tantas batalhas para conciliar a razão e a fé servia agora para discutir problemas sem grande significado, por vezes fantasiosos ou até ridículos. Houve de certo vestres abertos ao humanismo nascente e algumas universidades contribuíram para uma nova forma laica de teoria do poder e do Estado, que se reclamava do pensamento arcolítico mas traduzia, de facto, as exigências da época.

Nesta sociedade em crise, a neuriosidade e o comportamento dos honres não deixam de ser profundamente afectados e, num livro clássico, Huizinga descreveu-os quase como neuriosicos. Os que viveram em tempo há contribuíram atalavam de contradições, e os vesnos que hoje abandonavam casa e família para seguir um pregador eloquente - os frades, mendicantes andavam de terra em terra falando horas a fio perante multidões, exaltadas - associavam-se a mentes para adquirir um criminoso e regalaran-se com o espectáculo do seu suplício. A consciência da gente comum, embebida de cristianismo, foi sobretudo atingida pela crise que atingiu a própria Igreja: em 1309, o papa saltou-se em Avinhão, a sua velha querela com o imperador germânico levando-o a tornar-se um títere do rei de França, e das múltiplas tentativas para o fazer regressar a Roma só acabou por resultar o grande cisma do Ocidente, o governo da Igreja por dois papas que se excomungaram mutuamente e cada um dos quais, segundo as conveniências políticas, era reconhecido por metade dos estados da Europa. Durante quatro décadas, qualquer boa cristão era ou não "cismático" segundo se encontrasse aqui ou além de uma fronteira geográfica por vezes mal definida.

Impotente para ultrapassar o seus próprios horizontes culturais, a cristandade manifestou sintomas claros de desorientação, frequentemente expressos na busca da salvação pelo retorno à pretensa autenticidade de um cristianismo primitivo. Distinguíram-se místicos simbolizados por personalidades, tão diversas como a do teólogo alemão Mestre Eckhart (1260-1327), que foi provincial dos dominicanos e professor na universidade de Paris, a da feia italiana Caterina de Siena (1347-1380), que nos legou uma descrição dos seus êxtases, ou a da pobre camponesa loana Joana d'Arc (1412-1431), cujas visões a transformaram num chefe de guerra e venerada no fogo. Mas também se multiplicaram as seitas mais ou menos heréticas que, apesar das perseguições, surgiam por todo o lado com o ideal comum da prática da simplicidade e da fraternidade originais.

Seria difícil de entender que não ocnossem também mutações profundas ao nível da terminologia filosófica.

O longo interregno - II

De facto, após um Alberto Magno ou um Tomás de Aquino suficientemente otimistas para pretender conciliar a razão e a fé, os novos teólogos importantes viraram-se às costas à síntese aristotélico-tomista ensinada pelos dominicanos. Já na viragem de século um franciscano, Gersoni, que foi mestre de teologia em Oxford e em Paris, Duns Scot (1266-1308) cunhara a defender o primado do conhecimento intuitivo sobre o conhecimento abstracto e a reger a distinção entre essência e existência; dizia ele que "Deus é tão livre que ultrapassa a razão humana". Mas foi outro franciscano, o inglês Guilherme d'Occam (1290-1349) o mais influente dos inovadores. Técnico do nominalismo, interessado pelas ciências, d'Occam rejeitou a possibilidade de um entendimento racional do Dogma e proclamou a separação da teologia com a filosofia; de facto da metafísica, surge-nos hoje como um precursor do empirismo. E se a audácia que tiraram as suas ideias, nomeadamente a crítica de Aristóteles, e de São Tomás, conduziu por vezes a posições de pleno ceticismo, também contribuiu para facilitar o advento de outras estruturas conceptuais.

..II.

Do ponto de vista científico, foram tempos magalhos. Se o discredito do aristotelismo era cada vez maior, se os doutores eram capazes de por a nu as fraquezas da física peripatética, não tinham qualquer proposta alternativa válida. Assim, o próprio Guilherme d'Occam, mestre de tantos pensadores de vanguarda dessa época apresentara novos argumentos contra a doutrina aristotélica do movimento, assinalando que o motor de um projectil não podia estar no projectil o qual podia até ser destruído, mas também estava no ar atrás; se o estivesse, seria inconcebível que ele provocasse simultaneamente dois movimentos contrários nos instantes anteriores ao choque de dois móveis. Concluiu assim que a tese de Aristóteles de que o movimento violento exige um motor era falsa, mas por aqui se ficava.

Mais construtiva foi a obra de outro teólogo inglês seu contemporâneo, Thomas Bradwardine (1290-1349), o "doutor profundo", arcebispo de Santuária cuja doutrina da predestinação determinante veio a influenciar os teóricos da Reforma. Bradwardine encontrou em Euclides a demonstração de que, se $\frac{a}{b} = \frac{c}{d} = \dots$, então $\frac{a}{c} = \left(\frac{a}{b}\right)^2$, $\frac{a}{d} = \left(\frac{a}{b}\right)^3 \dots$, e tentou utilizar este resultado para modificar a física peripatética. A sua tese era que se um dado objeto de P/R imprimia a um móvel uma velocidade v , a velocidade $2v$ não correspondia ao valor $2P/R$ mas sim a $(P/R)^2$; em geral, a uma progressão aritmética dos valores da velocidade $v, 2v, 3v, \dots$ resultaria de uma progressão geométrica dos valores de P/R, quer dizer, de sucessivas $P/R, (P/R)^2, (P/R)^3, \dots$ o que numa terminologia moderna se exprime sob a forma $v \propto \ln(P/R)$. Embora fantasista, esta primeira tentativa para ultrapassar a ideia de uma relação linear entre "força" e "velocidade" teve sucesso, anunciando a voga de uma espécie de matemáticas da cinemática surgida entre os escolásticos do século XIV.

Com efeito, apareceu no Merton College de Oxford uma verdadeira escola de "calculadores", activa sobretudo entre 1330 e 1340 e cujos nomes mais conhecidos foram Swinhead, autor de um famoso "Liber calculationum", Dumbleton e Heisterbury. Utilizando uma "álgebra das palavras" em que as incógnitas

eram simbolizadas por letras, estes homens interessaram-se pela descrição abstracta do movimento embora, com o seu fôlego matemático, pouco lhes importasse saber se se tratava ou não de movimentos "reais". Dito nestes termos, eles esforçaram-se por representar geometricamente diversos tipos de movimento possíveis, e esse estudo revela-se interessante porque, além do movimento uniforme, também consideraram movimentos "diformes" e, em particular, "diformemente diformes" — ou seja, movimentos uniformemente acelerados. Os resultados dessas investigações que viriam a ser utilizados por Galileu foram adotados por Oresmo e, sem juízo de valor, entraram salvemente deleis em mais formas. Mas antes de falar de Oresmo há que referir a obra de Buridan, o mestre da física escolástica parisiense.

Jean Buridan (1300-1358), um teólogo que foi reitor da universidade de Paris e é por vezes citado a propósito da história do burro que, inebriado perante uma caba de água e um melho do arca, acabou por morrer de fome e de sede — um exemplo da "liberdade da indiferença" — ocupou-se seriamente de problemas dinâmicos nas suas "Questiones octavi libri physicorum". Apresentava aí novos argumentos contra a tese de que o ar poder ser o motor de um movimento violento, sublinhando que, se assim fosse, uma pedra deveria ir mais longe que uma pedra, e que um dardo cujo extremidade posterior fosse aguçada perderia mais depressa a sua velocidade inicial; mais interessante ainda é a observação de que uma noz ou um pião podem rodar longamente sem todavia mudarem de lugar e, portanto, sem que se possa sequer dizer que o ar foi impellido a ocupar qualquer região "vazia".

Buridan não se limitou todavia a criticar e, à falta de alternativa, adoptou ideias inspiradas por Filopón que lhe tinham chegado através dos tradutores árabes. Introduziu assim o conceito de "impetus", que se impôs em dinâmica até à revolução galileica. Nesta doutrina, a acção do motor consiste em fornecer ao móvel um certo "impeto", uma certa potência capaz de o deslocar na direcção em que o motor actua "quer para cima ou para baixo, para o lado ou circularmente". É o "impeto" que explica, por exemplo, o movimento da pedra lançada pela funda, o qual só não se perpetua porque o "impeto" se gasta com a resistência do ar e com a tendência "natural" da pedra para cair, que acaba por prevalecer. Mas o "impeto" também provoca o movimento dos astros celestes, que se perpetua porque não é contrariado por qualquer resistência nem sofre a oposição de qualquer tendência "natural". É cabe ainda ao "impeto" o acréscimo da velocidade dos graves durante a queda, pois o próprio "impeto" do corpo vai aumentando devido à acção da gravidade.

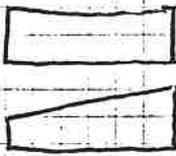
O conceito de "impeto" revelou-se à muito difícil de precisar. Os escritos de Buridan ressalta, sem dúvida, que ele é considerado proporcional à velocidade do móvel e, de algum modo, ao que viria a ser a sua massa, pois devia tanto maior quanto maiores fossem o volume e a densidade do corpo. Daí a considerar o "impeto" equivalente à mesma quantidade de movimento iria só um passo que, todavia, não se afigura lícito dar, porque entraria tenazmente na conservação do "impeto" algo de equivalente a lei da inércia e no seu acréscimo durante a queda um renúncio da lei fundamental da dinâmica. Por muito que pese a Grossete e outros bons historiadores das ciências, foi justamente na sequência da rejeição do conceito clássico de "impeto" por Galileu que a nova dinâmica pôde nascer.

O longo interregno - 12

12.

Após Buridan veio Alberto de Saxe, de cuja vida quase só se sabe ter sido também reitor da universidade de Paris, onde ensinou entre 1350 e 1361. Nos seus comentários à física de Aristóteles retomou as ideias do seu mestre juntando-lhe coisas novas sobre o centro de gravidade terrestre, mas a sua celebridade deveu-se sobretudo aos paradoxos que inventou a partir da esfericidade da Terra, sustentando por exemplo que um corpo em movimento na horizontal primeiro desce e depois sobe, ou que durante um pé de cabeça de homem percorre uma distância maior do que os pés.

Muito mais importante foi a obra de Nicolas Oresme (1323-1382), grão-vestre do Colégio de Navarra em Paris que o rei encarregou de traduzir e comentar o texto físico de Aristóteles sobre "o céu" e "o mundo". Na esteira de Buridan, Oresme adota a tese do "ímpeto", sustentando contudo que, se se cair num poço para além do centro da Terra, um grave que por ele caísse passaria além desse centro antes de voltar para trás, e assim oscilaria tal como um pêndulo no qual, a seu vez, não é devido o pé a causa dos movimentos de subida. Excelente matemático, retoma o trabalho dos "calculadores" oronianos representando graficamente os valores assumidos sucessivamente por uma grandeza: na horizontal ("longitude" traça um recta cuja perpendicular em cada ponto ("altitude" ou "latitude") é proporcional à intensidade ("intensio") respectiva da grandeza. Assim, uma quantidade "uniforme" será representada por um rectângulo, uma quantidade "uniformemente diforme" por um triângulo ou, mais geralmente, por um trapézio, variações mais complicadas sendo tratadas por linhas curvas, admitindo ainda que uma escolha diferente da unidade de "latitude" pode, por exemplo, tornar elíptica uma linha circular. A lógica interna do sistema conduziu até a conceber "grandezas superficiais", quer dizer, a duas dimensões, a representá-las graficamente passando então a ser tridimensional.



A "quantidade total" ou "medida" de uma grandeza correspondia então à área (ou ao volume) da figura correspondente. O caso mais interessante (mas não o único) que analisa a tal propósito é o da comparação de grandezas "uniformes" e "uniformemente diformes": verifica geometricamente que o espaço percorrido por um móvel com movimento uniforme de velocidade v é o mesmo que percorreria outro móvel com movimento uniformemente diforme que, no mesmo tempo, passasse da velocidade $2v$ à velocidade zero. É esta a celebre "regra de Oresme" ou "regra de Mestre", que Galileu utilizou no estudo da queda dos corpos, e cuja descoberta lhe é frequentemente atribuída.



Outro aspecto interessante e menos referido da obra de Oresme é a tese da imobilidade dos céus enquanto a Terra rotava sobre si própria em 24 horas. A esse propósito, tentou refutar as objecções clássicas de índole física contra a sua ideia, como a de pedra lançada na vertical que não poderia voltar a cair no mesmo lugar, e no essencial uma refutação era correcta: dizia ele, em suma, que bastava supor o movimento na vertical com o "ímpeto" recebido pela pedra da rotação da Terra para que tudo se explicasse.

Mas Oresme também discutia outros argumentos tirados da Bíblia em de autoridade dos Autores os quais deu respostas curtas; sustentou, por exemplo, que o movimento de rotação da Terra é "natural" e não "violento", e que as afirmações do Antigo Testamento sobre a imobilidade do novo planeta não devem levar à letra e distorcer de valor científico. E emriqueceu a questão com argumentos da sua leira, afirmando que os platonianos devem atribuir as afétes velocidades invenções em que o estado mais nobre, o superior, contém as céas e não a Terra; o teólogo não se esquece aliás de referir que, de a Igreja em convite a rezar pelo repouso dos mortos, não é raro ver conceber o Céu em movimento.

Difundidas, tardiamente, estas ideias não tiveram provavelmente qualquer influência sobre Copérnico, e valem sobretudo como indicio de um novo estado de espírito o qual, sob formas diferentes, reaparece com Nicolau de Cusa (1401-1461), homem já do século XV que alguns têm visto como o último dos grandes pensadores medievais. Nasceu em Cues ou Cusa, na Renânia, estudou direito e matemática em Bâle e doutorou-se em teologia em Colônia; participou no Concílio de Basileia, e foi enviado pelo papa a Constantinopla para tentar a reunificação das Igrejas católica e ortodoxa. Cardinal em 1448, morrido de um bispo inglês, Nicolau de Cusa foi um alto dignitário eclesiástico cosmopolita muito envolvido em questões políticas. (1437)

Nem foi isso deixo de se interessar pela ciência embora, naturalmente, a maneira de um teólogo. Nada disse de muito original em mecânica, onde se adive como um discípulo de Buridan, mas as suas concepções como lógicas foram extremamente originais. Na sua obra fundamental, a "Docta Ignorância" (1440), negava que o mundo fosse limitado pela esfera das fixas sem foi isso o considera infinito, atributo que só é pertença de Deus; concebia o mundo como "indeterminado", quer dizer, sem quaisquer limites, ideia que será mais tarde retomada por Descartes. Para Cusa, um tal universo ilimitado não pode ser objecto de qualquer ciência precisa mas há-lo de um saber parcial e conjectural — e, daí, a "Docta Ignorância" — cuja valor permanece todavia grande porque o Cosmos é uma expressão de Deus. Essa expressão de um Deus uno na multiplicidade das coisas terá necessariamente de ser imperfeita, embora menor incompreensível do que se poderia supor, porque o todo se reflecte em qualquer das suas partes e as contradições das propriedades das coisas se desvanecem quando se encaramos ultrapassando a sua finalidade. No absoluto, as opoções podem acabar por coincidir.

Os exemplos a que Cusa recorre para ilustrar as suas teses são de índole científica. Assim, se a recta e a curva são geometricamente incompatíveis, num círculo infinitamente grande a curva coincide em cada ponto com a sua tangente, como num círculo infinitamente pequeno se conjuntem afinal com o seu diâmetro. Passando à cinemática, onde é clara a oposição entre repouso e movimento, afirma que um corpo com movimento circular de velocidade infinita está sempre no lugar do que partiu, o que não o impede de também estar sempre algures. Na só no domínio do finito tem sentido falar de "grande" e de "pequeno", de "rápido" ou "lento", conceitos essencialmente relativos, de modo que em termos absolutos uma velocidade infinita pode afinal confundir-se com uma velocidade nula. O centro do mundo, o mínimo, pode entã coincidir com a esfera das fixas, o máximo, falso paratopo que só significa que um e outra são puras aparências, havendo sim que conceber um universo ilimitado e sem centro ou, como ele dizia, "o Cosmos é uma esfera cujo centro está por toda a parte e os limites em parte alguma". Estas teses, de carácter muito mais metafísico do que científico, encontram-se — ao eco, nomeadamente na obra de Giordano Bruno.

Renascimento: na
ocorrer-nos-nossem

1.

A grande crise ^{que atingiu a cristandade} sofrida pela Europa durante o século XIV traduziu-se, no plano cultural, pelo enfraquecimento da confiança na razão, pelo pulular dos misticismos, pelo declínio das universidades. Nem a falta de mão de obra nem a dissolução das estruturas feudais foram capazes de estimular seriamente o progresso técnico, ~~mas~~ as disputas dos doutores mesmo sobre questões fúteis aguçaram os instrumentos lógicos, e as atitudes da gente comum foram profundamente afetadas pelas dificuldades de fé. Outros valores falhados começaram a afirmar-se.

Petrarca (1304-74)

Boccaccio (1313-75)
Decamerão 1353

Favorecida ^{pela} prosperidade econômica ^{de centros urbanos} ^{cuja} atividade mercantil ~~se alçou~~ ~~na~~ expansão ~~com~~ ~~um~~ ~~alterano~~ ~~em~~ ~~larga~~ ~~escala~~ ~~na~~ ~~Italia~~ ~~colocou-se~~ ~~na~~ ~~vanguarda~~ ~~desse~~ ~~processo~~ de renovação, ^{cuja} ^{origem} ^{tem} ^{seu} ^{centro} ^{em} ^{Dante} ^{Alighieri} ^{cuja} ^{"Divina Comédia"} ^{foi} ^a ^{obra} ^{maior} ^{da} ^{literatura} medieval, ^{fez} ^{parte} ^{em} ¹³²¹, nas três décadas mais férteis, Petrarca e Boccaccio já se ocupavam de temas que pouco tinham a ver com ^o ^{valor} ^{de} ^{uma} ^{sociedade} teocrática. Expurgado em Paris, o avoinhado referiu-se nas cidades italianas, contaminando o meio intelectual, arrumando colações políticas e acabou por alcançar uma larga difusão entre a burguesia cujas atitudes se impregnaram cada vez mais de um espírito laico.

Já nessa altura, um tal pensamento laicizante tinha raízes profundas mesmo fora da Itália. Estudando as atitudes ^{de} ^{homens} ^{desse} ^{tempo} ^{perante} ^o ^{morte}, Alberto Tenenti verificou, ^{por} ^{exemplo}, que eles adaptaram ^{radicalmente} ^{um} ^{significado} ^{diferente}, a morte deixando de ser encarada na perspectiva etérea como a passagem para um mundo melhor por ser sentida como uma fatalidade horível: uma outra mentalidade atribuiu um valor inestimável à vida terrena, que nem as ben-aventuranças eternas podiam compensar. Adquiriu ^{assim} ^{uma} ^{consciência} ^{aguda} ^{da} ^{grandeza} ^{do} ^{homem} ^{no} ^{céu} ^{da} ^{natureza}, a qual traduzia ^{apenas} ^o ^{ideal} ^{da} ^{beleza} e a harmonia ^{de} ^{este} ^{mundo} ^{terrenal}. A viagem ^{observada}, ^{mais} ^{do} ^{que} ^{ética} ^{ou} ^{estética}, situava-se ao nível mais fundo ^{da} ^{sensibilidade} e, sem deixarem de se pretender bons cristãos, sem renunciarem à sobrevivência das suas almas, os homens foram adoptando uma vivência quotidiana cada vez mais distante do significado autêntico do ministério da Igreja.

Se quisermos correr o risco de tentar caracterizar por uma única palavra esse século tão complexo que vai aproximadamente de 1450 a 1550 e ao qual se costuma chamar o Renascimento - termo ambíguo e carregado de juízos depreciativos do tempo precedente - teríamos provavelmente que escolher a palavra humanismo. Novamente, após bem mais de um milénio, os homens começam a afirmar-se e assumem-se perante si próprios, e essa afirmação que foi traduzida em termos ideológicos por intelectuais de um tipo novo dito os humanistas, exprimiu-se antes de mais pela invenção italiana (mas também flamenga) de uma nova arte.

A grande arte medieval, as catedrais românicas e góticas, as estátuas-colunas de Chartres ou a figura de Giotto. Fora uma iconografia tendente a exornar o sobrenatural. Enquanto o novo espírito clássico

criado pelo florentino no começo do século XV só glorificava o prestígio dos homens ^{até ao} ~~tratamento~~ tratamento de temas religiosos. Uma história exemplar contada por Vasari diz que Brunelleschi, embora fosse um do outro, teve uma viagem estética com a construção da cúpula da catedral de Florença, censurava ao seu amigo Donatello ter esculpido um Cristo onde "fizera na Cruz um camponês". É que essa nova arte de Brunelleschi, de Donatello e de Masaccio, o inventor da perspectiva linear na pintura, reflectindo as mudanças de scribibilidade ~~era~~ imediatamente laica. As "Madonas" que uma pleiade de mestres pintaram, serão belas mulheres, aristocratas ou plebeias, idealizadas pelos seus pinéis, a alusão evangélica servindo apenas de pretexto.

No tempo da imagem plástica, já estavam em ação os primeiros humanistas, um Leonardo Bruno (1380-1444) ou um Lorenzo Valla (1407-1457), erudito fascinado pela cultura antiga, e que movimento amplificou-se com o contributo dos homens e dos manuscritos escapados à tomada de Constantinopla pelos turcos (1453). Rejeitados Aristóteles com a escolástica abominável — Ramus chegou a afirmar, no século seguinte, que tudo quanto Aristóteles ensinou era falso — foi Platão que se tornou o novo ídolo. Genésio Platon, um bizantino, fundou em Florença uma "Academia platónica" que os Médicis, mecenas actualizados, protegiam, e cujo mentor foi Marsilio Ficino (1433-1499). A influência de Ficino, tradutor de Platão mas também dos neo-platónicos Plotino e Proclus e do "Grupo hermético" dos alquimistas, cada vez se nos afigura mais considerável, e à Academia esteve igualmente ligado o príncipe dos eruditos, Pico della Mirandola (1463-1494), que sabia latim, grego, árabe, hebreu e aramaico, ^{deixando os outros} estava ~~na~~ ^{na} ~~gratiosa~~ ^{gratiosa} de Lourenço o Magnífico embora a Igreja o considerasse herético, e contribuiu sobretudo para difundir as teses da Kabala judaica. Teremos ocasião de destacar a importância destes homens na cultura renascentista e, indirectamente, no contexto genético da ciência moderna.

Verificou-se nesse tempo uma profunda mudança ^{significativa em relação} de atitude relativamente ao legado clássico. Os medievais procuravam nele o que ^{deles} ~~podesse~~ ^{podesse} servir para clarificar e reforçar o dogma, pois eles tentaram apenas compreender uma verdade que já estava expressa na Revelação divina, e isso foi conseguido com a recuperação filosófica e mesmo científica de um certo aristotélismo bem afeiçoado. Quanto aos humanistas, ^{fascinava o praxe das} ~~mas~~ ^{mas} ~~no~~ ^{no} ~~pelos~~ ^{pelos} ~~contrário~~ ^{contrário}, ~~maravilhavam-se~~ ^{maravilhavam-se} com a herança greco-latina ~~por~~ ^{por} ~~encontrarem nela~~ ^{encontrarem nela} o eco de uma civilização diferente, quase uma crítica ^{proposta} em valores do mundo medieval. Que uma obra como o "De rerum natura" de Luécio tenha sido recuperada e difundida por humanistas cristãos mostra indubitavelmente que o interesse pelo grande livro do passado já nada tinha a ver com preocupações de aproveitamento ^{defesa da fé}.

Movimentos de índole erudita, o humanismo afirmou-se cedo no domínio das artes plásticas, mas no campo da literatura as obras primas tardaram a aparecer. Só no começo do século XVI surgiram os livros que foram duríssimos, quando ao azoite de Erasmo no "Elogio de Loucura" (1511) respondeu a gangalhada do Pantagruel (1532) de Rabelais, quando ao releitura do "Príncipe" (1511) de Maquiavel se contrariou a "Utopia" de Tomás Moro (1516). Livros típicos mas que se ocuparam tão só dos problemas dos homens e da cidade dos homens, livro de humanistas numa fase em que o humanismo já se via ameaçado por Reformas e Contra-Reformas. Livros que ~~anunciavam~~ ^{anunciavam} ~~o~~ ^o ~~tempo~~ ^{tempo} ~~em~~ ^{em} ~~que~~ ^{que} ~~nascera~~ ^{nascera} a grande ciência que o humanistas não souberam criar.

Outros homens, outros céus - 2

2.

Seria difícil de entender que

Fundo de formação inconspicua se durante esta mutação irreversível de cultura e de mentalidade euro

peias não tivessem igualmente servido grandes transformações socio-económicas. E embora nos tenhamos de li-
nhar, mais uma vez, a uma explicação simplista na sua brevidade, tivemos que a ^{crítica} ~~descoberta~~ mais signifi-
cativa foi a afirmação de um novo personagem histórico, o burguês.

A burguesia, uma classe que se introduzira quase por fraude através das malhas da sociedade feudal, começou enfim estes tempos, após uma dura caminhada, a subir de um lugar ao sol. Apesar das ambiguidades ainda inerentes à sua condição, ela erccionou-se no ângulo dos múltiplos processos que atravessaram este século tão fecundo os quais, em geral, aceitaram por servis os seus interesses. Os burgueses apoiaram a centralisação monárquica, impulsionaram as grandes viagens, favoreceram as religiões reformadas, compraram os linhos do humanistas e chegaram o mercado das artes plásticas. Poder-se-ia decto contrapelo que foi um príncipe de Portugal quem lançou as caravelas ao largo das costas africanas, que Erasmo se converteu em reis, que Lute no se sobreviveram graças à protecção de um duque, que Rafael e Miguel Ângelo trabalharam para os papas mas nada disso se teria passado assim sem o clima socio-cultural marcado pela ascensão da burguesia.

Se o burguês dese tempo — em cuja esteira se dividiram ^{além as turbas de} ~~além as turbas de~~ alguns negócios de autênticos ~~esta gente miúda~~ ^{da população urbana} — ainda é sobretudo o mercador, um homem que compra e vende, não devemos tão -so' imaginá-lo, voluntamente, no triz do seu balcão, que ao tropel de logistas de variadas espécies e condições já então se sobrepunha uma aristocracia em negócios cujos príncipes tratavam quase de igual para igual com os príncipes de sangue. As redes dos Médicis, banqueiros florentinos batelados pelo talento e pela sorte, desforaram os onttavíssimos reis de França, e os Fugger de Augsburg, um verdadeira família cuja toia de negócios se esten- dia por todo continente, tinham suficiente dinheiro para assegurar a Carlos V o thoro do Santo Império; na segunda viagem do Gama já iam investidos fortes capitais dos genoveses, e a nova rota das especiarias transformou Antuérpia num centros comercial e financeiro de escala mundial. Era um capitalismo ainda frágil, à merci sobretudo das bancarrota reais, mas não deixou de ser um grande capitalismo.

Embora muitos burgueses, nomeadamente os de alta burguesia, se interessassem pelas artes e as letras, esses ho- mens de "leve e haver" cujo espírito preciso difundia uma mentalidade favorecida de abstracção das novas ciências pouco tinham a ver com os humanistas. Assim, e mesmo no quadro meramente cultural, confundir Renascimento e humanismo representa uma grave distorção; inatando da Itália por toda a Europa, o humanismo deixou-lho seu devido um papel muito importante, mas o contributo de outros homens que pouco ou nada sabiam de humanidades, em especial proporcionam de actividades de natureza prática, também se revelou essencial. É hoje fácil ilustrar o peso desta segunda corrente inovadora, e fá-lo-emos aqui com dois exemplos bastante diferentes, o de Leonardo da Vinci e o dos navegadores portugueses.

Nascido em 1452, filho ilegítimo de um notário de província, Leonardo começou a praticar desde a et- lencência na oficina de Verrocchio, um grande artista e arteiro florentino. Não houve qualquer formação ac-

démica, e ele próprio se considerava um "homem sem letras", um não-letrado. Todavia, graças às suas maravilhosas dotes naturais e à sua curiosidade sem limites, não se tornou apenas um dos maiores físicos que o mundo jamais conheceu mas igualmente uma figura importante da história das ciências e das técnicas. Em 1482, quando ofereceu os seus serviços ao duque de Milão, possuía nas suas qualificações de engenheiro que teria aliás ocasiões de demonstrar, e os seus "Cadernos de Notas" contém-nos o ^{desenho} projecto técnico, mais do que as realizações nesse tempo concebidas pela sua mente.

Os "Cadernos" também contém um manual de técnicas e observações propriamente científicas sobre o mais variados temas, e torna-se difícil pretender que eram obra de um simples amador quando, por exemplo, a autoridade de Koyné nos assegura que "a Mecânica do século XVI não oferece nada de comparável às análises de Leonardo". Com estes manuscritos só foram publicados no final do século XVII, disse-se que eles não puderam ter qualquer influência na sua época, mas a verdade é que muito deles foram logo conhecidos e copiados; Cardano, por exemplo, parece ter-se servido sem escrúpulos dessa fonte nos seus tratados de física. Havemos de voltar a falar da obra científica deste "não-letrado".

O caso português ainda se afigura mais significativo. O humanismo surgiu entre nós no meado do século XV, trazido por eruditos italianos chamados pelo rei, e aos quais se juntaram portugueses, enviados para estudar a Siena, Florença, Pádua ou Lovaina e, mais tarde, a Paris. No reinado de D. João III foi fundado em Coimbra o Colégio das Artes, para o ensino das humanidades, sob a direcção de André de Brouçacia, e houve outros humanistas de convergência como Cleonardo e André de ^{Reverde} Brouçacia. No entanto, os pensadores portugueses, mais importantes, e mais originais desse tempo, aqueles que permitem afirmar que durante umas décadas Portugal se encontrou numa posição de vanguarda cultural, um Duarte Pacheco ou um Pedro Nunes, um barão da Órta ou um D. João de Castro, estavam longe do movimento humanista. O Prof. Bernardino de Carvalho, cuja competência neste domínio era reconhecida internacionalmente, afirmou que Pacheco e D. João de Castro eram, como Leonardo, "homens sem letras"; Pacheco era incapaz de ler grego e sabia muito pouco latim, e o que ele tinha de tão inovador a dizer vinha-lhe da experiência profissional como navegador e cartógrafo. Não se vislumbra nesses homens qualquer reverência para com a autoridade dos Antigos, que eles acusavam de terem falado daquilo que não conheciam, enquanto eles o tinham ido ver com os seus próprios olhos. Parece sintomático que Pacheco retome a afirmação análoga à de Leonardo de que "a experiência é a madre de todas as coisas" e que D. João de Castro já esteja epistemologicamente mais além quando afirma que os erros originados por um empiricismo frustado.

3.

Estes homens da prática estiveram, naturalmente, relacionados com os grandes progressos técnicos ocorridos durante o Renascimento, os quais não encontram aliás a um corte com o passado mas, em geral, traduzem uma continuidade com ritmos diferentes, e mais vivos. Progressos que, de qualquer modo, foram favorecidos por uma mentalidade mais aberta, uma curiosidade maior, estruturas mais aptas à inovação, horizontes geográficos e contactos civilizacionais incomparavelmente mais amplos; progressos que asseguraram desde então à Europa uma superioridade tecnológica nitida sobre o outros continentes da qual ela nunca dispusera, e vão permitir a expansão do eurocentrismo por todo o resto do mundo, uma explora-

gas da Terra em seu favor e, paulatinamente, o advento de uma história planetária que, durante os séculos, irá marcar pela história europeia. Mas não antecipemos demasiado e, por ora, vejamos os avanços da **tecnologia mercenária**.

Antes de mais, devemos falar de **impressão**. O seu suporte material, o **papel**, já era fabricado na China antes da era cristã, e o segredo do fabrico foi aprendido pelos muçulmanos no século VIII; só quatrocentos anos mais tarde é que os mercadores italianos o trouxeram para o Europa onde se difundiu lentamente, mas nas vésperas do Renascimento o papel começava a ser bastante utilizado pela boa razão de ser quatro ou cinco vezes mais barato do que o pergaminho tradicional. Uma espécie de tipografia com impressões por vezio era utilizada na China desde o século VII, até que em 1423 um holandês de Harlem inventou uma outra técnica onde se empregavam letras isoladas de madeira para compor e imprimir textos; quando **bruttende** substituiu a madeira pelo metal, o sucesso foi imediato.

O primeiro livro impresso, a famosa **Bíblia de 42 linhas**, data de 1455, mas antes do fim do século já se tinham editado **mais de 35.000 obras** com uma tiragem global de 15 a 20 milhões de exemplares; o ritmo acelerou-se no século XVI, durante o qual se fizeram 150 a 200.000 mil edições, compreendendo a uma produção de ordem de 150 a 200 milhões de volumes, sem falar de prospectos, folhas de anúncio etc., tudo isto para uma população inferior a 80 milhões de habitantes, na sua grande maioria **analfabetos**. As consequências culturais da difusão da letra impressa dificilmente podem ser exageradas, embora tivesse tido por vezes efeitos inesperados.

Outra faceta importante do mesmo processo, a qual ~~marcou~~^{toou} profundamente as **suavidades**, foram as possibilidades novas de **multiplicação das obras de arte**, com a invenção da **talha doce** (gravuras ao esquisso sobre uma placa de cobre esmaltada no cutalho, ficando marcadas as concavidades, decais de tinta), **da ponta seca** (em que a gravura era feita com traços ligeiros de um lápis de aço) e, já nos anos do século XIV, **litografia** graças a Dürer, a **água forte**, na qual o desenho era marcado no verniz que cobria uma placa de cobre antes dela ser atacada pelo ácido.

Muito mais importantes na prática foram o **progresso da metalurgia**, ligado aos desenvolvimentos específicos da **produção das minas** e à **difusão dos objectos metálicos**, sobretudo de ferro. Na Idade Média, o ferro era produzido a umotorato num buraco cónico de um metro de altura com paredes de tijolo e com **des alternadas de mineral e de carvão**, cada operação produzindo uns 4 ou 5 quilos de metal de má qualidade. A partir do século XIV começaram-se a construir fornos cada vez maiores, que passaram a atingir **meia dúzia de metros de altura** e dispunham de **folas hidráulicas**, com o quais já se obtinha **ferro fundido**; se necessário, uma segunda operação permitia extrair dele o ferro propriamente dito. Qualquer destes grandes fornos fornecia anualmente umas 15 toneladas de metal, e o seu número multiplicou-se durante o século XVI.

Maiores quantidades de ferro de melhor qualidade permitiram o desenvolvimento de uma **maquinaria** beneficiando de **invenções importantes**: surgiram possibilidades novas, nomeadamente com a utilização de **dispositivos de engrenagens** e com a invenção do sistema **três-manivela** que permitia transmitir

um movimento de vai-vem num movimento circular. Embora frequentemente associada a James Watt, a biela e a manivela já estas descritos num livro do engenheiro militar alemão Kyser publicado em 1405.

Experimentados na batalha de Crécy, em 1345, os primeiros canhões, eram constituídos por um conjunto de barras de ferro ligadas por anéis e, rebentando facilmente, mostravam-se perigosos sobretudo para os artilheiros. Mas depressa se começaram a fabricar canhões de cobre e, em seguida, de bronze - armas que muito contribuíam para a tomada de Constantinopla pelo sultão Maomé II (1453). Tais instrumentos, pesadíssimos, armados por dezenas de paletas de bois, nem sequer dispunham de dispositivo de pontaria - eram apenas grandes tubos mais ou menos inclinados por palpite sobre umas pedras. Mas os europeus instalaram-nos sobre um rodado, dotaram-nos de um sistema de mira e começaram a utilizar melhor forma; em meados do século XVI os canhões já não rebentam e as armas de fogo portáteis, arcabuzes e pistolas, difundem-se nessa época.

A influência dos canhões na construção naval veio inserir-se no processo de transformação dos navios marítimos. O contributo português na evolução do barco à vela foi importante, ainda que provavelmente menor do que foi vezes se diz. De qualquer maneira, a caravela foi o primeiro navio adaptado à grande navegação oceânica, com um casco de forma diferente e um velame aperfeiçoado, e dela derivariam a nau e o galeão. Foi a superioridade técnica da Europa, nomeadamente no navio e no seu armamento, que facilitou o seu predomínio militar à escala planetária iniciado no tempo do Renascimento.

A invenção da artilharia também alterou significativamente a concepção das fortificações que tinham doravante de poder resistir ao canhoneio e de lhe responder com eficácia. Assim, as muralhas tornaram-se muito mais baixas e espessas, e foram dotadas de casamatas para instalar canhões dispostos do seu fogo rasante de apoio ao das peças instaladas sobre as muralhas, enquanto os bastiões salientes procuravam suprimir os ângulos mortos e assegurar tiro cruzado.

O progresso nas construções militares, estimulou a inovação noutras domínios de engenharia civil, o empenhamento de grandes obras sendo aliás facilitado pela centralização do poder político. Construída entre 1420 e 1436 sem utilização de ardores interiores, a cúpula da catedral de Florença tinha 43 metros de diâmetro e atingia 70 metros de altura. Em 1445 já havia capacidade técnica para deslocar de um 20 metros a torre de uma igreja pesando mais de 400 toneladas. Por ordem de Luís XII, rei de França, abriu-se nos Alpes em 1480 um túnel de mais de 70 metros destinado a facilitar o trânsito das caravanas de mulo. E no meados do século XVI, campos do sul da Espanha eram irrigados pela água de uma branagem com mais de 20 metros de alto e quase 90 de comprimento.

Tais proezas técnicas eram o início de um progresso que, com um ritmo mais ou menos vivo, irá prosseguir sem trinta até à Revolução Industrial. O papel dos artistas, por vezes de grandes artistas como Leonardo ou Durer, na concepção e direcção desses grandes trabalhos afigura-se significativo, não tanto por exprimir o talento multifacetado destes homens mas como um indicio de que as "artes mecânicas" começavam a adquirir um estatuto social mais elevado. Em contrapartida, a ciência ainda não se revelava capaz de assumir o papel que seria o seu a partir do século XVII.

(4)

O essencial do contributo científico do Renascimento foi tardio. Os notáveis progressos da álgebra que ~~de~~ tiveram mais adiante só se iniciam no segundo quartel do século XVI, e somente na década de 40 surgiram os grandes tratados de **Verálio sobre a anatomia humana (1543)**, de **Frascatori sobre as doenças infecciosas (1546)**, de **Copérnico sobre a cosmologia heliocêntrica (1543)**. Apenas esta última merece aqui uma análise atenta ~~antes~~ ^{embora}, antes de mais, ~~ter~~ ^{haja} que travar conhecimento com esse homem singular que se chamava **Nicolau Copérnico (1473 - 1543)**.

Nascido na burguesia da cidade de **Torun**, um porto do Vístula membro da Liga Hanseática, foi o jovem Nicolau criado por um tio, dignitário eclesiástico que viria a ser bispo de **Wárnica**. Aos 18 anos entrou na universidade de **Cracóvia**, onde encontrou boas oportunidades para satisfazer o seu interesse pela **matemática e a astronomia**, e em 1496 enviaram-no para Itália estudar-se em **direito canónico**. Passou então 4 anos em **Bolonha**, hospedado em casa de **Domenico Novara**, um professor de quem se tornou amigo e que o influenciou muito, podendo continuar a estudar astronomia, de modo que durante uma breve estadia no Vaticano, em 1500, foi estatura em comissão de fazer conferências sobre essa ciência difícil. Em 1501 ^{volta} ~~volta~~ ^{de volta} à **Polónia** para ser, enfim, nomeado cônego de **Wárnica**, mas conseguiu que o reenviassem para Itália, desta vez para estudar **medicina em Pádua**. Só regressou definitivamente ao país natal em 1503, homem maduro com 30 anos feitos, doutor em **direito e em medicina**; e sempre se comportou como um bom patriota polaco, opondo-se à expansão para leste então empreendida pela Ordem Teutónica, mas se pode deixar de recordar com **Koyne** que, culturalmente, estava voltado pelo **humanismo italiano**.

Secretário de um tio poderoso, médico requerido de personagens importantes, arroboreado pelas tarefas que lhe delegava o capitão de **Wárnica**, ainda conseguiu arranjar tempo para continuar a **reflectir sobre astronomia** e foi neste ano que Copérnico se convenceu definitivamente da superioridade de uma cosmologia heliocêntrica. Esboçou essas ideias num opúsculo cujo ^{estilo} ~~estilo~~ nome latino hoje abreviamos chamando-lhe apenas o "**Commentariolus**", provavelmente redigido antes de 1509, que aliás nunca quis imprimir e do qual circularam somente algumas cópias manuscritas. Durante, ele não esforçou-se por matematizar adequadamente a sua teoria dando-lhe a forma comparável à do modelo que era o "**Almagesto**" ptolemaico, mas o confronto com os **monges cavaleiros teutónicos** eram constantes e ele tinha de se ocupar permanentemente de questões administrativas e económicas por vezes bem hípficas. Foi o caso, nomeadamente, quando a **Pomerânia** foi inundada por emissão de moeda falsa de origem alemã, e análise feita por Copérnico demonstrando **levar-lo-ia a escrever um "Tratado sobre a moeda" (1526)** no qual se encontra as constatações de que "**a moeda má expulsa a moeda boa**", agora chamada a **lei de Gresham-Copérnico**.

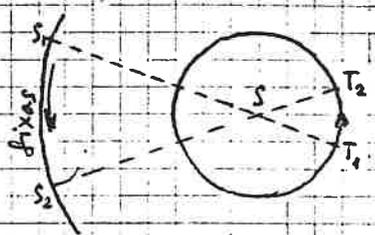
Apezar de tudo, o seu grande livro de astronomia encontrava-se praticamente concluído em 1530, muito embora o autor continuasse a retocá-lo e a diferir a sua publicação. Conseguiu todavia a vencer nuances sobre a existência dessa obra excepcional e em 1539, um jovem matemático vai

residência de Wittenberg chamado Georg Reticus decidiu-se a ir procurar Copérnico, acabando por o convencer a entregar-lhe o manuscrito para ser dado à estampa. Logo no ano seguinte, Reticus anuncia a grande novidade na sua "Narratio Prima" (1540), um resumo muito simplificado do texto original, o qual foi finalmente editado em Nuremberg, em 1543, sob o título "De Revolutionibus Orbium Coelestium". Diz-se que Copérnico recebeu um exemplar no seu leito de morte.

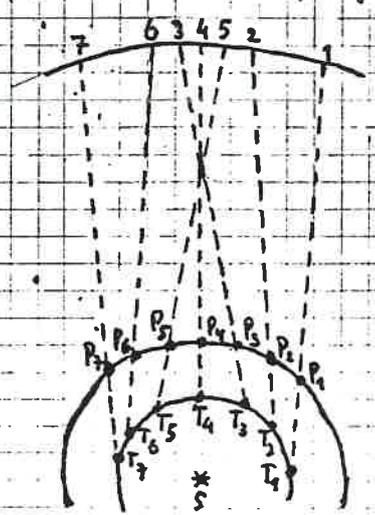
5

Examinemos o "De Revolutionibus" na perspectiva em que o próprio texto o coloca, quer dizer, como um tratado teórico de astronomia, uma análise matemática dos movimentos dos astros nos céus. A tese fundamental de Copérnico é que a hipótese heliocêntrica torna muito mais simples a explicação dos movimentos do que o geocentrismo tradicional e, à primeira vista, os argumentos que ele invoca nesse sentido afiguram-se extremamente convincentes.

Assim, a atribuição à Terra de um movimento diurno sobre si própria, de oeste para leste, em torno do eixo polar, eliminava evidentemente a necessidade de dotar os outros astros de movimentos diurnos, de leste para oeste, em torno do eixo do mundo, tais movimentos ficando reduzidos a meras aparências. Confinava-se a conceber a Lua como um satélite da Terra e que se girava com a imobilidade do Sol pagava-se com o movimento de translação anual atribuído à Terra, o qual transformava numa pura ilusão o trânsito anual do Sol através das constelações do Zodíaco. Mas era na explicação do comportamento dos planetas que a superioridade do heliocentrismo se manifestava de forma mais espectacular, e Copérnico tinha boas razões para fazer



gala disso. Na verdade, as duas facetas mais intrigantes da cinemática planetária, isto é, quer as famosas retrogradações que, de tempo a tempo, todos desistem, quer a falta de periodicidade dos seus movimentos, a variação do tempo necessário para que um planeta regresse a um dado lugar no céu, reduzem-se ambas a simples efeitos de perspectiva.



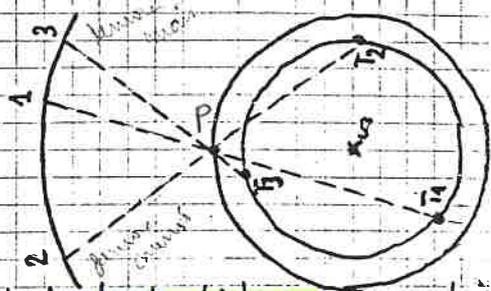
Para explicar a retrogradação de um planeta exterior (e o argumento também vale para os planetas interiores) basta efectivamente considerar que esse planeta e a Terra se movem à volta do Sol com velocidades angulares diferentes; essa velocidade é tanto menor quanto mais for a distância ao Sol, de acordo com o que exprimirá a 3ª lei de Kepler,

$T^2/n^3 = \text{const.}$ Se a relação entre os raios for 5/3, como no exemplo figurado, o planeta exterior percorrerá 90° enquanto a Terra se deslocava de 180°, e torna-se então geometricamente evidente que, observado da Terra, o planeta pode, em certas ocasiões, parecer retrogradar, embora realmente mantenha os seus movimentos regulares sempre na mesma direcção.

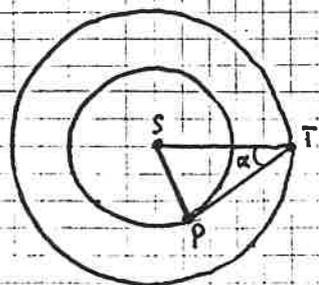
Quanto à irregularidade dos períodos dos movimentos planetários, também é fácil verificar o seu carácter ilustório. Para isso, consideremos um exemplo no qual, somente para facilitar a construção da figura

Outros homens, outros céus - 5

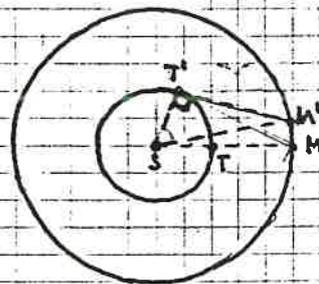
se supõe que o período do planeta exterior é $4/3$ do ano terrestre. Se, no instante inicial, com a Terra em T_1 , e o planeta em P , este é visto ao ponto 1 da esfera das fixas, quando o planeta volta à posição P passarão-se 16 meses, a Terra já fez mais de uma revolução encontrando-se agora em T_2 , e o planeta exterior alinhado com o ponto 2 (para além do ponto 1), induzindo a crer que o período do planeta é inferior ao seu valor real. Mas 16 meses mais tarde, com a Terra agora em T_3 , o planeta será observado ao ponto 3, e um observador poderá inferir erradamente que este nova translação demora mais do que a precedente.



O heliocentrismo também facultava uma explicação óbvia do facto dos planetas interiores (ou superiores) nunca se situarem a uma grande distância angular do Sol, pois o maior ângulo possível entre eles é o da direcção TS com a tangente tirada de T à órbita circular interior. Mas, sendo assim, até se torna possível calcular o raio SP da órbita do planeta interior em função do ângulo α , há muito conhecido, e da distância TS já determinada por Aristarco de Samos: como o triângulo é rectângulo em P , vem $SP = TS \operatorname{sen} \alpha$. Não só se tornaram possíveis as grandes variações do brilho de Vénus ou de Mercúrio em termos das suas distâncias à Terra como agora realmente se sabia que eram planetas interiores. A observação dos planetas em torno do Sol deixava de ser uma conjectura extremamente plausível, tornava-se uma certeza fundada na possibilidade de também calcular as distâncias ao Sol dos planetas exteriores.



Tome-se, por exemplo, o caso de Marte, e consideremos o instante em que Marte e o Sol estão em oposição relativamente à Terra. Aguardemos o tempo t necessário para que as direcções Terra-Marte TM' e Terra-Sol TS façam um ângulo recto. Conhecendo quer a duração do ano terrestre quer do ano de Marte, podemos, conhecendo o valor de t , determinar os arcos $\widehat{TT'}$ e $\widehat{MM'}$, e como o ângulo $T'SM'$ é igual à diferença entre $\widehat{TT'}$ e $\widehat{MM'}$, fica especificado o triângulo rectângulo $ST'M'$ em função dos valores conhecidos de $T'S$ e do ângulo $T'SM'$, o que determina o raio SM' .



6

Se ficiéssemos por aqui, seria difícil imaginar sequer que a proposta de Copérnico não tivesse sido aceita da triunfalmente. Mas a verdade é que a tais fortes argumentos favoráveis à tese heliocêntrica se contra-punham dificuldades igualmente muito sérias que também mereciam ponderação.

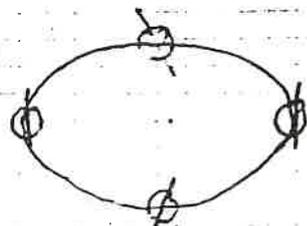
Para Copérnico, a esfericidade do Cosmos tal como a da Terra e dos outros planetas era uma consequência de ser essa a forma geométrica perfeita, a única que convém à perfeição do céu. Ora, a seu ver, o carácter esférico de um corpo implica que este seja dotado com o mais simples e mais natural de todos os movimentos possíveis, o movimento circular uniforme. Logo, tornava-se desnecessário conceber qualquer causa

externo para a cinemática planetária: os planetas esféricos rodavam naturalmente sobre si próprios e, estando encastrados em rbas. esféricas transparentes que formavam uma realidade física, eram forçados pela rotações dessas rbas a descreverem trajetórias circulares em torno do Sol. Assim, nas suas bases, a cosmologia nova permanecia análoga à antiga, e justificava-se a tese de Thomas Kuhn de que o "De Revolutionibus" tivesse tido menor importância pelo que disse do que por aquilo que levou outros a dizer, que ele foi, mais um texto gerador de uma revolução do que propriamente um texto revolucionário. Apesar das aparências em contrário, Copérnico surge-nos como um astrónomo profundamente tradicionalista, que censurava sobretudo aos ptolomaicos o desrespeito pelos dogmas metafísicos da circularidade e da uniformidade manifestado nomeadamente pela imperdoável utilização dos equantes. Uma tal mentalidade conservadora tornava-o aliás ainda mais sensível às críticas que a sua cosmologia não poderia deixar de suscitar e às quais procurava responder antecipadamente. Tarefa nada fácil, como podemos crer.

Quanto à hipótese da rotação da Terra sobre si própria, recordava que os pitagóricos e Heráclito já tinham defendido esta ideia, sustentava que um tal movimento era uma consequência necessária da eficiência de terrestre, e insistia na simplificação do sistema do mundo assim obtida, graças à possibilidade de eliminar para cada um dos planetas a órbita destinada a imprimir-lhe um ilusório movimento diurno. Contra as provas clássicas da imobilidade da Terra, como a da pedra lançada na vertical que retorna ao ponto de partida, apresentava novas analogias às de Cresmo (que, aliás, não citava), e à objecção formidável de que as partes de um corpo em rotação tenderiam a afastar-se umas das outras, reforçava que essa questão deveria sobretudo preocupar os ptolomaicos, forçados a atribuir à esfera das fixas um movimento rotacionário. A bem dizer, este último argumento era especioso, pois a física dos céus e da Terra eram então concebidas como distintas, mas há que reconhecer que, no fundo, a hipótese da Terra em rotação não se revelava demasiado árdua a defender.

Eram muito maiores as dificuldades subjacentes à ideia de um movimento translacional do nosso planeta. Desde logo, e embora estivesse já um tanto desacreditada, a física aristotélica permanecia a doutrina aceite, se mais não fosse por ausência de alternativa. Ora, nesse quadro conceptual, o centro da Terra tinha de coincidir com o centro do Cosmos, sob pena nomeadamente de deixar de se poder explicar a queda dos corpos em virtude da sua "natureza". Expulsando a Terra do centro do mundo era afinal toda a física periférica que Copérnico, sem a poder negar, contradizia. Ele tentava torcer a dificuldade introduzindo outra concepção da gravidade, a qual seria "uma inclinação natural atribuída pelo Criador às partes dos corpos para que estas constituíssem uma esfera" mas a debilidade dessa escapatória era evidente: assim, o que seria então a leveza? A coerência da doutrina de Aristóteles excluía argúcias tão superficiais.

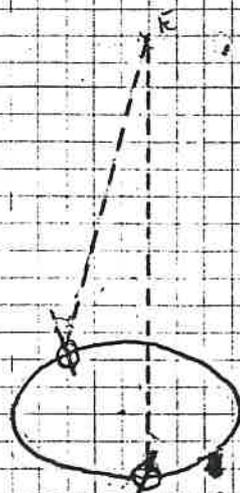
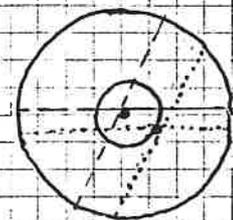
Maliciosamente, era no domínio da própria astronomia que a tese heliocêntrica se revelava sobretudo mais frágil. Copérnico situava naturalmente o movimento da Terra em torno do Sol no plano da eclíptica, cujo perpendicular faz com a direcção dos polos um ângulo de uns 23°, e esse eixo terrestre desempenhava agora o papel atribuído pelos ptolomaicos ao "eixo do mundo", devendo porí apontar sempre para um ponto do céu vizinho da Estrela Polar. Mas sendo um tal movimento da Terra uma consequência da rotação de uma órbita esférica



Outros mundos, outros céus - 6

em que a Terra estava engastada, a orientação do eixo terrestre tinha de sofrer ao longo do ano variações consideráveis, da ordem de 46° ao cabo de seis meses, em claríssima contradição com o que se observava. Então, "para salvar o facto", Copérnico via-se obrigado a postular uma rotação compensatória anual do eixo dos polos à volta de perpendicular à elíptica. Era evidente que este hipotético "terceiro movimento" só era introduzido para eliminar uma consequência inevitável da nova teoria.

A nível mais concreto, se se considerava a Terra no centro do mundo entendia-se muito bem que, fosse qual fosse a posição do observador, estaria sempre acima do horizonte exactamente metade da esfera celeste; mas já não seria assim se o Sol ocupasse o centro do mundo e a Terra se movesse à volta dele porque, neste caso, cruzando a posição do observador sobre a Terra seria visível mais ou menos metade da esfera das fixas. Na mesma ordem de ideias, se a orientação dos polos terrestres em relação às fixas era invariante — facto indubitável que até forçara Copérnico a postular o seu "terceiro movimento" — então, no decurso do ano terrestre, a direção em que era observada uma estrela não podia fazer sempre o mesmo ângulo com esse eixo norte-sul; a deslocação da Terra à volta do Sol deveria fazer variar ao longo do ano as posições aparentes das estrelas no céu, levando-as a descrever pequenos círculos em torno da posição realmente observada.

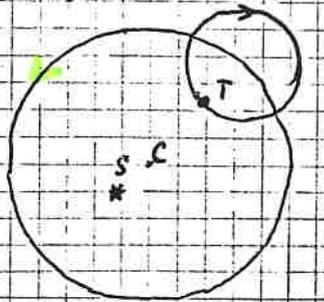
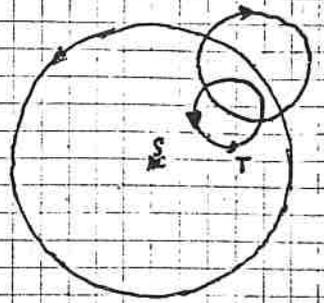


A resposta de Copérnico a estas duas objecções era idêntica: a esfera das fixas estava tão longe que, embora esses dois efeitos fossem efectivamente previsíveis, não havia qualquer possibilidade de os detectar. Sabemos hoje que esta resposta era correcta mas, nessa época, tinha pouca capacidade de convencimento. Havia estimativas da distância à qual se encontrava a esfera das fixas e, por exemplo, o grande astrónomo muçulmano Al Fatigani (Alhagani) atribuiu-lhe um valor não 20.000 vezes maior que o raio da Terra; com a precisão das observações astronómicas atingida antes dos finais do século, mesmo este valor era insuficiente para validar o argumento de Copérnico, e percebe-se que houvesse pouca disponibilidade para multiplicar o volume do Cosmos por um factor da ordem das centenas de milhares para o satisfazer.

Enfim, e convém insistir neste ponto, a bela simplicidade com que a nova teoria reduzia a várias aparências tanto fenómenos fundamentais — o movimento do Sol ao longo do Zodíaco, a retrogradação das planetas ou a irregularidade dos seus períodos — era meramente qualitativa: tratava-se de uma explicação de princípio, não de uma previsão de carácter numérico. Tomemos o caso exemplar do movimento da Terra à volta do Sol, com o qual se pretendia agora explicar um movimento aparente do Sol em torno da Terra. Se Copérnico se limitasse a atribuir à Terra uma trajectória circular à volta do Sol, isso equivaleria no sistema ptolomaico a dar ao Sol de um movimento circular à volta da Terra, o que já os astrónomos gregos sabiam ser insuficiente para dar conta das observações. Tal como os ptolomaicos tinham sido forçados a descrever o movimento do

Sol à volta de Terra graças às excêntricas e aos epiciclos, Copérnico via-se agora obrigado a recorrer aos mesmos meios para descrever o movimento de Terra à volta do Sol.

Na primeira versão da sua teoria, escrita no "Commentariolus", Copérnico colocava o Sol no centro do deferente terrestre e, por conseguinte, era obrigado a dotá-lo com os dois epiciclos tradicionais; mais tarde, no "De Revolutionibus" decidiu-se a substituir o epiciclo menor, resignando-se para isso a colocar o Sol numa posição excêntrica, afastado do centro do deferente terrestre, pois to seu espírito primava o desejo de economizar tanto quanto possível o número de orbes necessárias ao sistema. E, naturalmente, o que ocorria com o movimento de translação de Terra também se verificava com os outros planetas, todos eles requerendo um deferente e um ou mais epiciclos e os seus centros de rotação nem sequer coincidentes.



Esboçava-se assim a bela simplicidade de princípio da cosmologia copernicana, da qual tanto esquemas antigos ou modernos nos têm uma imagem de uma elegância ilusória. Não era sequer um verdadeiro sistema heliocêntrico, pois o Sol era relegado para uma posição sem quaisquer privilégios geométricos, tratava-se efetivamente de um mero sistema heliostático, em que o Sol era suposto imóvel. De facto, Copérnico podia alegar com razão que necessitava de bastante menos orbes do que os modelos ptolomaicos mais aperfeiçoados mas como, mesmo assim, ele ainda tinha que introduzir uma trintena de esferas, uma tal economia acabava por não ter grande significado. Para cúmulo, se a teoria de Copérnico tornava indubitavelmente mais fáceis os cálculos dos movimentos dos planetas, as previsões obtidas não eram ^{superiores} ~~melhores~~ que as fornecidas pela maquinaria ^{geocêntrica} do geocentrismo igualmente ~~propunha~~ ^{propunha} ~~afinal~~ ^{ultrapassar}.

7

A elaboração da cosmologia copernicana exigiu um enorme esforço a um homem que já tinha uma vida extremamente ocupada, Assim, só um incentivo muito forte ^{de uma obra} ~~justificava~~ ^{agradável} esse apego à realização de um projecto tão exigente e que, para mais, frisava a heterodoxia religiosa. Com efeito, e embora ele nunca ^{se fosse} ~~fizesse~~ ^{antes} ~~fizesse~~ qualquer alusão a esse tema, o douto cônego estava muito ciente das relações entre o geocentrismo e a teologia cristã: Era a posição única da Terra no centro do Cosmos que, de algum modo, explicava ter sido aqui que Deus criasse o homem à sua imagem e semelhança, e que aqui tivesse ocorrido esse acontecimento excepcionalíssimo para a criação, o Mistério da Paixão. Quais seriam então as motivações que levariam um pieboso eclesiástico a dar tanto trabalho para convencer os seus semelhantes de que a Terra podia ou devia ser considerada um planeta como os outros?

Estamos hoje praticamente seguros de que Copérnico construiu o seu sistema ^{nas} ~~por~~ razões de natureza filosófica e não científica, porque acreditava numa metafísica de raízes muito antigas a

qual atribua ao Sol, imagem de Deus, a posição privilegiada de centro do mundo. Eis, aliás, a singular consonância lírica em que, no "De Revolutionibus", ele se refere ao Sol:

"E no meio de todas as coisas resplandece o Sol. Nesse tempo esfêruido, quem iria realmente coloca uma luminária num lugar diferente ou melhor do que aquele de onde ela tubo fole iluminar ao mesmo tempo? Na verdade, não foi impropriamente que alguns lhe chamaram a pupila do mundo, outros o seu Espírito, outros enfim o seu leito. Trinegista chama-lhe Deus visível, a Electra de Sófocles aquele que tudo vê, e assim é, com efeito, pois o Sol como que instalado num throno real governa a família dos astros que o rodeiam... A Terra cresce ao Sol, e torna-se gravida produzindo todos os anos."

Este texto de inspiração claramente neo-platónica, que alude a uma mística da luz que já inspirara alguns teólogos medievais e seu sequer receia citar o mitológico Hermes, do alquimistas, foi escrito por Copérnico, um homem por vezes considerado um arauto de uma concepção mecanicista da natureza que só se afirmará um século após a sua morte. Bastariam contudo estas frases para nos forçar a olhá-lo como um espiritualista um tanto esotérico. E se na aquisição de uma tal metafísica se fez cutaneamente sentir a influência do seu mentor em Bolonha, esse Domenico Novara que era um neo-platónico convicto e, nessa perspectiva, um crítico acerbo do geocentrismo, a verdade é que os círculos universitários e humanistas italianos dessa época estavam tão marcados por ideias dessa índole que quase se pode dizer que seria um Copérnico com uma mentalidade diferente que nos pareceria estranho. Ele foi, muito simplesmente, um intelectual do seu tempo.

Este singular fenómeno da história da cultura europeia só se tornou formidável na sequência da rejeição apaixonada do aristotelismo, que criou um grande vácuo ideológico pela ausência de outra visão do mundo com a amplitude e a coerência para o preencher. Surgiu então a possibilidade de se afirmarem todo um conjunto de tradições culturais até aí marginalizadas e que se reclamavam das autoridades mais diversas. Assim se difundiu um amalgame de ideias muito complexo e, inevitavelmente, cheio de contradições, mas as contradições não abastaram os intelectuais de então que se pretendiam abertos a todos os sistemas e que, com uma desenvoltura filha da época, tentaram até conciliar o inconciliável. No meio desta confusão aceite, há todavia que assinalar a influência exercida pela "Academia platónica" de Florença e pelo seu chefe incontestado Marsilio Ficino (1433-1499).

Ficino era, à sua maneira, um homem de envigadura. Foi êle quem pôs na moda quer o platonismo, quer o neo-platonismo, oferecendo à Europa traduções em latim das obras de Platão, de Plotino e de Proclus parafusadas numa perspectiva espiritualista; como muitos outros humanistas, ansiava por uma renovação profunda do cristianismo (que Lutero empreenderá noutros moldes) e acreditava que esses textos lidos adequadamente podiam contribuir para alcançar esse fim. Mas iria ainda mais longe traduzindo e comentando o "Corpus hermeticus" da tradição alquímica, ou patrocinando a tese de Pico della Mirandola de que o sumo saber se encontra no texto da "Cabala", conjunto de especulações místicas elaborado ao longo dos séculos pelos judeus da Diáspora. Os livros de Ficino fazem uma

apologia calorosa da liberdade e da responsabilidade dos homens, mas ele não deixava de usar amuleto para captar as influências astrais benéficas.

Subjacente a tudo isto, teria estado a crença de muitos humanistas na existência de um saber perdido de uma filosofia "prima" e "pia" conciliável com o cristianismo e detentora de grandes verdades. Ali se encontra firmemente quer a explicação da obra de Ficino, quer a razão de ser da profunda influência dessa obra sobre a Europa culta. E entende-se que misturando forças diversas de platonismo, neo-platonismo, pitagorismo, neo-pitagorismo, alquimia, astrologia, cabala e outras gnoses se pudessem obter ideologias múltiplas, por vezes muito estranhas, as quais nem os maiores escapavam. Para citar apenas alguns cientistas famosos, Copérnico foi um neo-platónico, Cardano sobretudo um astrologo, Paracelso um alquimista herético, Kepler um neo-pitagórico.

Embora seja prudente evitar generalizações num tão caótico magma, afigura-se-nos contudo afeccionar aí algumas grandes ideias mestras: o sentimento de uma correspondência mais ou menos velada entre Deus e o mundo por ele criado — e daí o fascínio do Sol, olhado como um símbolo visível da divindade; a crença numa harmonia profunda entre macrocosmos e microcosmos — e a voga da astrologia exprimiu, a seu modo esta ideia; enfim, um espiritualismo desapegado e universal, em que a alma humana no seu invólucro carnal estaria equidistante do puro mundo celeste e do mundo impuro das coisas materiais, estas próprias concebidas como habitadas por algo de anímico — pois que a matéria seria inseparável do espírito.

Tentou-se ^{caracterizar} definir esta ideologia mal definida, típica do Renascimento embora só entrasse realmente em declínio por meados do século XVII, chamando-lhe a "magia natural", e a expressão sugere bem que era a própria natureza que se encarava como mágica. Nessa perspectiva, até os próprios milagres podiam obter pseudo-explicações de carácter natural porque, afinal de contas, se nem tudo quanto ocorre na natureza era milagroso tinha, pelo menos, algo de mágico. Pomponazzi (1462-1525), considerado um dos espíritos fortes do seu tempo, narra a história de um milagre ocorrido em Áquila onde a população rogava a S. Celestino que fizesse parar as chuvas, e não só estas cessaram como o santo apareceu à multidão. A explicação que ele propôs do acontecimento tornou-se famosa pelo que tem de significativo:

"Não há necessidade de recorrer ao auxílio dos demónios... Eis o que se passou: os habitantes de Áquila, atemorizados e ovelhos, fizeram oração a São Celestino para que afastasse a chuva... e não só a imagem de São Celestino se imprimiu na sua imaginação mas no próprio ar, o que fez que fosse visto por tantas pessoas. E é assim com todas as aparições. Se se admitir que elas podem produzir-se em sono, é necessário supor que também se podem produzir na atmosfera."

Com a sua argúcia habitual, Koppe afirmou que a mentalidade renascentista se caracterizava pela crença de que "tudo é possível". Na ausência de uma visão do mundo coerente deixava efectivamente de haver fronteiras entre o verossímil e o inverossímil, não se fazia exclusão à priori o quer que fosse. Por isso, nunca houve falta de astrólogos, tantas bruxas e feiticeiros, tantos homens e mulheres a caminho da fogueira confessando relações com o Malíquo. Mas essa desorientação coexistia com uma enorme abertura de espírito, com a disponibilidade para todas as aventuras, com uma riqueza de vivência que

tibiã, real ou imaginária, raramente igualada. E foi afinal com enorme confusão que serviu de celso à cultura do advento da ciência moderna.

(8)

As relações entre a magia natural e as matemáticas foram ambíguas. Por um lado, as matemáticas podiam invocar o pitagorismo e o platonismo, e não deixava de se reconhecer que a "magia dos mineiros" era uma chave para a decifração dos segredos da natureza. Mas, por outro lado, o raciocínio matemático apresentava-se demasiado ao dos lógicos, pilares do aristotelismo abominado, e ^{fez} ^{que} ^{se} ^{temera} ^o ^{que} ^{ele} empobrecia imediata e visivelmente a visão de uma natureza estranha. Assim, se alguns continuavam a pesar as matemáticas atribuindo-lhe até poderes que elas não tinham, outros recusaram-lhe qualquer atributo de privilégio. No meado do século XVI foi a química, uma química de fundo alquímico e aliás estreitamente associada à medicina, que toda uma corrente tentou considerar como a ciência fundamental para a compreensão da natureza, e esse movimento escolheu um estranho mentor, Paracelso.

Philippus Bombastus von Hohenheim (1493-1541) mais tarde chamado Paracelso — quer dizer, "maior que Celso", o mais famoso dos médicos romanos — era filho de um médico alceão da Suíça muito dado à alquimia, na qual o rapaz foi iniciado desde cedo. Ainda menino, trabalhou nas minas dos Fuggers, e dessa breve experiência tirará mais tarde proveito, especulando sobre o crescimento dos metais no seio da terra e escrevendo um livro sobre as doenças dos mineiros, a primeira obra já dedicada ao estudo de afecções profissionais. Ao chegar à adolescência deixou a casa paterna para visitar diversas universidades, tendo talvez obtido um grau de doutor em medicina em Ferrara, mas nunca se importaria de trabalhar ao nível menos qualificado de cirurgião, nomeadamente como cirurgião militar.

Paracelso andava de terra em terra, exercendo a medicina, informando-se sobre os saberes ou ^{os} ^{saberes} tradicionais e escrevendo muito. Ocupou bons lugares, como o de médico municipal em Basileia, mas nunca pôde ou quiz fixar-se em sítio algum, exorato pelos colegas que ^{de} ^{aliás} ^{trata} ^o ^{seu} ^{trabalho} publicamente com desprezo: "Deixe-me dizer-lhe que cada pelo do meu nariz tem mais conhecimentos do que você e todos os seus escribas, que as fivelas dos meus sapatos sabem mais que o seu baleno e o seu Avicena que a minha língua tem mais ciência que todos os seus ilustres colegas." Era um personagem controverso, inteligente e criativo mas de uma excentricidade suspeita, que uns consideravam um magizo charlatão, outros um médico de grande saber, todos tendo provavelmente razão. Tratava-se, afinal, de um representante num grau superlativo da mentalidade mágica renascentista.

Após a morte obscura de Paracelso, começaram-se todavia a espalhar em largos círculos histórias sobre curas maravilhosas que ele obtivera e os seus manuscritos, que se todos inéditos, foram editados e traduzidos em notas e comentários. Constituiu-se então através da Europa uma fonte oculta de para-celsismo, imitadores para o velho Aristóteles, mas que também recuaram a medicina galénica.

universitária porque, justamente, a consideravam tributária do aristotelismo. A alternativa que eles tinham a propor, embora não suficientemente clara para que todos eles vissem o mesmo, era apresentada com uma enorme convicção e, à mistura com especulações herdadas de Ficino, de astrologia, alquimistas e outras gnósticas, incluía realmente algumas novidades interessantes.

Considerando os galênicos que a doença era essencialmente uma consequência do desequilíbrio dos célebres "quatro humores", a sua terapêutica procurava sobretudo alterar a composição do organismo, e daí a importância atribuída às sangrias, aos vomitivos ou aos purgativos. Os paracelsicos afirmavam ao contrário, que a principal causa das doenças eram as ações do meio exterior e, em consequência, rejeitavam esses métodos e pretendiam que era necessário utilizar medicamentos específicos; obtinham-nos do brechdo da farmacopeia tradicional, à base de extractos de plantas ou de animais. Mas embora houvesse em Paracelso e nos seus discípulos um reconhecimento claro do valor da observação e da experiência, a sua ideologia "mágica" firmava-os na crença de que existiam na natureza correspondências ocultas cujo conhecimento era essencial: a forma de uma folha podia recomendar-se para tratar uma certa doença.

Palmaria

Bem mais importantes foram as suas tentativas para utilizar sistematicamente fármacos de natureza química, como o mercúrio no tratamento da hidropnia. Tal ideia já se encontra nalguns dos grandes médicos islâmicos, mas a influência considerável dos paracelsicos provocou a eclosão de uma vigorosa escola de "iatroquímicos" - assim chamados porque, em grego, "iater" significa médico. Com a iatroquímica aumentou significativamente o número dos que utilizavam alambiques e fornálias, o que não podia deixar de provocar novas descobertas empíricas; quanto à teoria, que também permaneceu durante um século sob a influência paracelsica, ainda terá muito que oferecer fundamentos sólidos pois as ideias do início brilhavam pela confusão.

"pediatria"

Rejeitando os Quatro Elementos aristotélicos, Paracelso negava o fundamento da velha doutrina hermética, mas não se pôde substituir por uma outra alquimia influenciada pelo neo-platonismo e pela cabala. Adveria que a nível profundo existiam quatro "qualidades elementares" muito mal definidas cuja união em proporções variáveis originava cinco "principios": o mercúrio, o enxofre, o sal, o flegma e o "caput mortuum", o resíduo da destilação; contudo, só os três primeiros eram activos, e não se confundiam aliás com as respectivas substâncias químicas porque eram princípios espirituais correspondentes às pessoas da Santíssima Trindade. Paralelamente, sustentava que o destino natural de todos os metais era transformarem-se em ouro, embora as transformações estivessem além das possibilidades humanas, só se processando lentamente ao seio do grande laboratório de Terra que era dotado de poderosas forças cósmicas criadoras dos jazigos minerais.

Tudo isto nos parece muito mais extravagante do que o aristotelismo clássico. Mas Paracelso era moderado quando o comparámos a alguns dos seus seguidores, por exemplo John Dee (1527-1608), o humanista britânico que construiu uma "monada hieroglífica", figura semelhante ao símbolo alquímico do mercúrio, através de 24 letras matemáticas em cuja ordenação ele via reproduzida a criação do mundo por Deus. É significativo que apesar de tais excessos, os paracelsicos mantiverem uma tão forte e duradoura influência e, reclamando-se do estudo dos dois "livros divinos", a Bíblia e a Natureza, pudessem pretender estar na boa via para desvendarem o segredo do mundo.

Outros homens, outros céus - 9

9

Outro tema importante que contribuiu para dar asas à magia natural e, por isso mesmo, fascinou um tanto intelectuais desse tempo foi o magnetismo. Após a difusão da bússola, os europeus tinham-se familiarizado com as "forças magnéticas" e, no século XIII, Pierre de Maricourt descreveu excelentemente o que se afigurava haver então a dizer sobre o assunto. Parece ter sido o próprio Cristóvão Colombo, durante a sua primeira viagem à América (1492) quem observou o fenómeno da declinação magnética e, em 1544, o alemão Hartmann descobriu a inclinação da agulha. Este facto foi redescoberto por um técnico de navegação inglês, Robert Norman, o qual num livro publicado em 1581, "A Nova arte de navegar", reclamava uma carta de rotas da inclinação e da declinação em diversas partes do mundo, sem saber que Mercator já iniciara esse trabalho; Norman também afirmava a meia verdade de que se não devia considerar ser a bússola atraída pelo pólo para o qual se orienta, que não tende a provocar qualquer movimento de translação mas apenas a fixar-lhe uma direcção. As características essenciais do magnetismo terrestre eram assim conhecidas antes dos finais do século XVI. Mas eram as características "mágicas" das forças magnéticas que apaixonavam os ^{estudantes} investigadores dessa época.

Polo + e - da agulha à mesma distância do polo magnético terrestre

A tal propósito, convém lembrar Gianbattista Della Porta (1534-1615), curioso personagem que, antes de se tornar na velhice autor dramático, consagrou quase toda a vida à ciência e foi olhado pelos seus pares como um dos maiores corifeus da magia natural. Fundou em Nápoles, onde nasceu e viveu, uma das primeiras sociedades científicas de que há memória, a "Academia dei Secreti", cujo nome definia uma mentalidade e foi extinta por decisão papal. Interessou-se pela óptica, na qual procurou fazer reviver a teoria do "simulacro" aplicando-a nomeadamente ao fenómeno da refacção, mas sem que isso o impelisse de ir mais longe no estudo das letras: parece ter sido o primeiro a conceber um novo instrumento "mágico", a luneta, que os oculistas profissionais neerlandeses realizaram e da qual balileu viria a obter notáveis resultados científicos.

Na sua "Magia naturalis", de 1598, Della Porta ocupou-se longamente do magnetismo, já que um tanto misteriosa que o intrigava pois lhe atribuía virtudes inexploradas. Retomou as experiências de Maricourt mas juntando-lhe outras da sua obra: assim, seccionando um ímã ao longo do eixo (e não na perpendicular) verificou que continuava a obter dois ímanes, de acordo com a taxa de qualquer fracção de um corpo magnético formadas propriedades do todo; constatou que o aquecimento destrói a magnetização e que uma simples lâmina de ferro aplicada contra um polo suprime-lhe o poder atractivo; também parece ter sido o primeiro a observar que a linha de ferro espalhada em torno do ímã descrevia certas linhas características, prenunciando as linhas de força.

Tudo isto, bem entendido, era exposto à mistura com muitas divagações inspiradas pela mentalidade "mágica", a qual permanece subjacente à obra do seu contemporâneo William Gilbert (1540-1603). Este famoso humanista inglês, médico da rainha Isabel, encabeçava contudo o seu tratado "De Magnete Magneticisque corporibus..." (1600) com um apelo a uma física diferente numa linguagem que quase anuncia a do célebre lord-chanceler Francis Bacon (1561-1626) — um homem afastado da política por irregularidades que se assumiu como o arauto de uma

Sobre o magnetismo dos corpos magnéticos

nova ciência empírica e do qual havemos de voltar a falar. Eis o que Gilbert escrevia no seu prefácio: "Foi ironia te para vós, o que sabeis verdadeiramente filósofos, homens sem ideias preconcebidas que não procurais a ciência nos livros mas nas próprias coisas, que eu escrevi estes princípios de magnetismo resultantes de uma nova maneira de praticar a filosofia."

Gilbert realizou efectivamente numerosas experiências, graças às quais eliminou diversas fantasias tidas por factos asseridos e alcançou resultados importantes. Distinguiu claramente a electricidade do magnetismo e descobriu que, além do âmbar, havia muitas outras substâncias (as pedras preciosas, o enxofre, o vidro, a resina, etc) electrizáveis por fricção; o fenómeno eléctrico adquiria assim outra amplitude, e Gilbert até construiu um electrosκόpio rudimentar, uma simples agulha metálica rodando sobre um eixo vertical. Constatou que a magnetização de um corpo não provocava qualquer acréscimo observável de peso e também podia ser anulada pela fumaça ou a humidade. Enfim, e isso influenciou seriamente as suas ideias, observou que um corpo podia ser magnetizado sem contacto, a distância, tal como um corpo magnetizado permanecente nas vizinhanças de um ímã mas na posição inversa de que lhe seria natural perdia lentamente a sua virtude magnética.

Tais são as conclusões de Gilbert com fundamento experimental, pois tudo o mais que lê no "De Magnete" exprime apenas, em contradição frontal com o programa prefácio, meras extrapolações ou especulações. Oriado por ideias oriundas da magia natural, Gilbert procurava efectivamente explicar o magnetismo partindo da ideia de que a Terra é fundamentalmente um ímã, não foi entre corpos magnéticos como Marcicourt supunha, mas porque a virtude magnética é uma propriedade essencial, a "primeira" e a "principal" do globo terrestre.

"A força magnética é animada ou imita uma alma; de vários pontos de vista ultrapassa a alma humana..." pois, em efeito, enquanto esta "... utiliza a razão, vê as coisas, procura... a forma animada do globo terrestre (como a dos outros astros), sem órgão dos sentidos, sem erros e sem doenças, exerce constantemente uma acção ininterrupta, rápida, definida, constante, directiva etc. através de toda a massa da matéria..." Esta força magnética manifesta-se também no espaço circundante, "... os seus raios espalham-se por todos os lados em zonas concêntricas..." muito embora as suas virtudes só se mostrem eficazes e só subsistam realmente quando se acham presentes corpos magnéticos". Ora se a Terra tem uma essência magnética por possuir uma alma ou um espírito que lhe conferem tal virtude, o mesmo deverá ocorrer a qualquer fragmento da Terra, a qualquer corpo, e Gilbert sustentava que a magnetização de um corpo trazia apenas o "despertar" ou o "acrescer" de uma virtude que ele já possuía.

Essa alma magnética inerente a todas as coisas materiais não poderá deixar de as animar, de lhes conferir faculdades para se confortarem ou moverem de certas maneiras, e Gilbert atribuiu-lhe a razão de ser de cada movimento "natural" produzido pela Terra e pelos seus fragmentos. Desde logo, um movimento de atracção, propriedade de manifesta de qualquer corpo magnético; depois um movimento de orientação, reconhecido no caso da Terra — Gilbert, semi-copernicano, considerava-a animada de uma rotação sobre si própria em torno de um eixo cuja direcção é invariável — embora, no caso dos pequenos corpos magnéticos, seja afectado pelo magnetismo terrestre e só se tenha a fazer afinal pela inclinação e declinação das bússulas; enfim, um movimento de rotação, considerado evidente no caso do globo terrestre mas que, para os seus fragmentos, seria prejudicado pelo peso, essa atracção entre a matéria da Terra e a dos corpos que não se reduz a interacções de carácter magnético.

Esqueçamos as elocubrações gilbertianas para explicar as variações geográficas da inclinação e da

Não foi em prática e da qual Galileo tirará grandes resultados científicos.

Na sua "Magia naturalis", de 1589, Della Porta ^{trata} ~~trata~~ ^{trata} ^{longamente} ^o ^{magnetismo}, força ^{que} ^é ^{tão} ^{misteriosa} ^{que} ^o ^{intrigava} ^{porque} ^{ele} ^{atribuia} ^{virtudes} ^{aiada} ^{por} ^{es} ^{magias}. Retomou as ex-
ciências de Maricourt ^{justando-lhe} ^{outras} ^{da} ^{sua} ^{teoria}: ^{que} ^o ^{conduziram} ^a ^{revelar} ^{os} ^{interesses}
de Abin, ^{ao} ^{seccionar} ^{um} ^{ímã} ^{segundo} ^o ^{eixo} (Maricourt só o fizera na perpendicular) verificou
que se continuavam a obter dois ímãs, confirmava-se a tese de que qualquer fracção de um corpo
magnético possuía as propriedades do todo; ^{observou} ^{que} ^o ^{aquecimento} ^{destrói} ^a ^{magnetização} e
que uma simples lâmina de ferro aplicada contra um polo suprime-lhe o poder atrativo; também
parece ter sido o primeiro a ^{observar} ^a ^{realizar} ^a ^{experiência} em que a lâmina de ferro espalhada à volta do
ímã ^{desenha} ^{linhas} ^{características}, anúncio das linhas de força de Faraday.

Tudo isto, bem entendido, era exposto à mistura com muitas divagações ^{inspiradas pela} ~~que se inspiraram~~ e m
estranha filosofia mágica, a qual ^{se} ^{permanecerá} ^{subjacente} à obra do seu contemporâneo Willi
Gilbert (1540-1603). Este humanista inglês que tudo lera, médico da rainha Isabel, abraçou
o seu famoso tratado "De magnete magneticisque corporibus" (1600) em um apelo a uma física
nova numa linguagem que quase anuncia do célebre lord chanceler Francis Bacon (1561-1626)
- um homem que ^{ao} ^{se} ^{afastado} ^{da} ^{política} ^{pelas} ^{suas} ^{irregularidades}, ^{se} ^{quiz} ^{transformar}
^{de} ^{uma} ^{coisa} ^{em} ^{outra} ^e ^{do} ^{qual} ^{voltava} ^a ^{falari}.
no arauto ^{da} ^{ciência} ^{moderna}, e teve ^{realmente} ^{influência} ^{em} ^{uma} ^{numerosa} ^{abertura} ^{de} ^{novas}
generalidades apologeticas. Eis o que Gilbert escrevia: "Foi somente para mim, o que sabreis verdadeiramente
filosofar, homens sem ideias preconcebidas que não procuram a ciência nos livros mas nas próprias
coisas, que eu escrevi estes princípios do magnetismo resultantes de uma nova maneira de praticar
a filosofia".

^{realizou} ^{efectivamente} ^{numerosas} ^{experiências}, ^{graças} ^{às} ^{quais} ^{eliminava} ^{numerosas} ^{falsas} ^{teorias} ^{em} ^{facto} ^{absente} e alcançou novos resultados de real importância. Distinguiu claramente a electricidade
de do magnetismo e descobriu que, além do âmbar, havia muitas outras substâncias (as pedras preciosas, o enxofre, o vidro, a resina, etc.) que também se electrizavam por fricção; os fenómenos eléctricos adquiriam assim outra amplitude, e Gilbert até construiu um electroscope inventado, uma simples
placa metálica rodando sobre um eixo vertical. Constatou que a magnetização de um corpo não
provocava qualquer acréscimo observável do peso e que também podia ser anulada pela frotagem ou
pela humidade. Enfim, e isso influenciou muito as suas ideias, observou que um corpo podia ser magneti-
zado em contacto, a distância, até pela influencia do magnetismo terrestre, tal como um corpo magneti-
zado ao permanecer nas vizinhanças de um ímã mas na posição inversa da que seria natural
perdia lentamente as suas virtudes magneticas.

Tais são as conclusões de Gilbert com fundamento experimental, e tudo o mais que se lê no "De Magnete" exprime apenas, em clara contradição com o programa-prefácio citado acima, meras extr-

Sobre o magnetismo nos corpos magnéticos

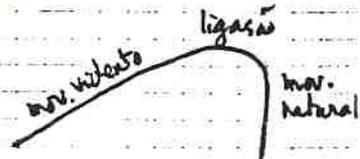
⑩

19th C. Sci

Não se justifica tratar em separado a matemática e a física renascentistas porque, em geral, os mesmos homens ilustraram-se nos dois domínios. Cronologicamente, os primeiros nomes a citar são os de Peurbach (1423-1491), astrónomo do rei da Hungria e professor em Viena, e o do seu discípulo Johann Müller (1436-1476) bispo Regiomontano, que muito viajou por Itália e nomeou bispo. Foram quase somente dois divulgadores, e a sua reputação provém sobretudo de terem divulgado a astronomia ptolomaica; também ajudaram a difundir a trigonometria plana e esférica, de raiz islâmica, e publicaram uma útil tabela de senos.

Na verdade, o que de mais importante ocorreu nesse tempo no âmbito das matemáticas foi o interesse despertado pela sua prática num vasto público, sobretudo de mercadores, o qual de certo contribuiu para o advento de uma mentalidade de índole mais quantitativa. Das muitas obras escritas para tais leitores é típico o longo e indigesto tratado do franciscano Luca Paccioli (1445-1514); refere-se que ele ainda ensinava três métodos para efectuar subtração, oito para realizar multiplicações e três para fazer divisões, mas também explicava como se extraíam raízes quadradas ou cúbicas, discutia alguns problemas práticos de geometria e não se esquecia de incluir uma espécie de manual de contabilidade. Também relacionado com a mesma evolução socio-cultural é o aparecimento de cátedras universitárias exclusivamente consagradas às matemáticas, que até finais do século XV só existiam em Bolonha e em Cracóvia mas que, nas décadas seguintes, se multiplicam sobretudo na Itália e nos países de língua alemã. Surgem igualmente nessa altura cátedras de astronomia embora por outras razões, a astronomia estando subordinada à astrologia que fazia parte do "currículo" de formação dos médicos.

Há que falar agora de Leonardo da Vinci (1452-1519) que, sem ter sido um bom matemático, deu todavia à mecânica um contributo importante. De facto, se na estática não ultrapassou Jordan III, cuja obra de certo conhecia pelo menos por via indirecta, introduziu na dinâmica duas ideias novas cuja influência foi incalculável. Assim, para tentar explicar no quadro da balística do "impeto" um fenómeno que o desenvolvimento da artilharia tornava fácil de observar - a trajetória dos projecteis - Leonardo considerou que um tal movimento percorre três fases, na primeira predominando o impeto e a trajetória sendo rectilínea, na segunda havendo uma acção conjunta do movimento natural e do movimento violento dando azo a uma trajetória curva, enfim na terceira o movimento natural impõe-se e a trajetória passando a ser uma recta vertical: só Galileu será capaz de dizer muito melhor. Paralelamente, e na sequência do seu estudo das leis do choques que não suplantou a conservação do "impeto" (e aqui há algo de análogo ao que fará Descartes) quase conseguiu formular o que viria a ser o princípio de igualdade da acção e da reacção: "tão grande é a acção do corpo percutante sobre o objecto como a do objecto percutido sobre o corpo". Bastaria esta frase para assegurar a Leonardo um lugar honroso na história da mecânica.



Deixem de lado os múltiplos esforços paralelos feitos nesse tempo para assegurar às matemáticas uma

simbologia eficaz, os quais, como veremos, só se aproximaram desse objetivo mais para os fins do século. Ocasionalmente, mesmo assim, da grande escola de algebristas italianos teve tempo, lembrando a célebre história de que foram protagonistas e que nos parece tão típica das mentalidades de então.

Essa história começa com **Scipione del Ferro** (1465-1526), um professor de Bolonha que descobriu a solução de uma forma particular da equação do 3º grau ($x^3+bx=c$) mas se limitou a comunicá-la a um dos seus discípulos. Este, ofuscado pela reputação de **Niccolo Tartaglia** (1500-1557) — assim chamado porque os parentes da guerra o tinham tornado gago (tartaglia significa tartamudo) e que, sem nunca ter podido frequentar uma universidade, se tornou um matemático conceituado — decidiu desafiá-lo publicamente, certo da vitória graças à descoberta ignorada de del Ferro. Mas o grande Tartaglia, procurando a solução dessa forma particular de equação, descobriu a de outra ($x^3+bx^2=c$) que ganhou para si mas lhe assegurou um claro triunfo.

Então entrou em cena **Gerolamo Cardano** (1501-1576), um grande senhor que era matemático mas também médico e astrólogo famoso, o qual em juras e promessas convenceu o pobre Tartaglia a comunicá-lhe o seu segredo que logo tornou público. Diga-se que mais tarde, em 1545, o grande tratado de Cardano cita os que del Ferro quer Tartaglia, porém porque este tanto de próprio tinha conseguido resolver a equação do 3º grau na sua forma mais geral. Mas a álgebra avançava então com um tal ritmo que já aí também se referia a resolução da equação do 4º grau por **Ludivico Ferrari** (1522-1565), feroz e genioso e dissolto mas com um tal gênio matemático que, tendo começado como simples criado de Cardano, ao 21 anos já era professor da universidade de Milão.

Enfim, há que citar **Rafael Bombelli** (1526-1572), o último e porventura o maior desta pleiade de matemáticos. Na sua "Álgebra", escrita em meados do século embora só publicada em 1572, não só se consideram legítimos os números negativos (como Cardano já fizera) mas as próprias raízes de tais números, a que hoje ainda chamamos números "imaginários"; por exemplo, para $\sqrt{-4}$, que nos representaríamos por $2i$, Bombelli escrevia $\sqrt{-4}$ grandeza suscetível de ser manipulada. O próprio Cardano se mostrou desorientado, considerando que tais números eram "sophistic", mas essa novidade difícil de aceitar não foi esquecida.

Para voltar à física, Cardano parece ter-se limitado a copiar em escríptulo, bem a seu modo, as teses de Leonardo sobre o movimento dos projéteis ("De subtilitate", 1550) que assim se tornaram conhecidas. Quanto a Tartaglia mostra-se mais original e já na "Nova Scientia" (1537), obra em preparação de tratamento axiomático, se encontra a descrição da trajetória por duas retas ligadas por uma curva alínea desenhada quase como se fosse uma parábola; mas, ao retornar a questões vinte anos mais tarde, introduz a ideia sutil de que a combinação dos movimentos natural e violento faz com que toda a trajetória seja curva, embora só se afaste progressivamente da reta e quase se volte a confundir com ela na fase final. A objeção imediata de que essa tese contraria a prática dos artilheiros quanto apontam diretamente ao alvo, Tartaglia retrucou que não é assim porque, nesses casos, a trajetória é praticamente retilínea. Mas esta ideia original não teve efetiva influência.

⑤ ⑪

O essencial do contributo científico do Renascimento foi também pois o notável progresso na álgebra durante o segundo quartel do século XVI e só na década de 40 é que surgiram as obras realmente fundamentais

Novos homens, novos céus - II

mas criaram-se condições indispensáveis às revoluções do século seguinte. Por ora, o interesse centrava-se no **cálculo numérico** estimulado pela redescoberta da obra de Diofanto, numa **trigonometria em fase de maturação**, nessa **teoria das equações** à qual os italianos tinham dado um tal impulso, espina na procura de um **sistema de notações algébricas** mais eficaz.

De entre os numerosos matemáticos desse tempo sobressaiu **François Viète (1540-1603)**, jurista de profissão e, por isso, cognominado o "príncipe dos amadores", o qual foi todavia ultrapassado por **Rheticus**, o discípulo de Copérnico, no **cálculo dos valores das funções trigonométricas** que este calculou com uma precisão de 10 algarismos e para arcos só repetidos por intervalos de 10 segundos. Com a trigonometria, entrou na moda o problema da quadratura do círculo e a determinação exacta do valor de π que Viète calculou com **10 decimais exactas em 1586** mas, antes do fim do século, **Ludolph van Coolen**, de Delft, chegou às **trinta decimais** e, numa obra póstuma (1615), ultrapassou as **trinta**. Entretanto, Viète abordara a questão de maneira mais profunda, exprimindo o cociente da área do quadrado pela do círculo circunscrito (quer dizer, $2/\pi$) sob a forma do produto de um número ilimitado de factores $f_1 \times f_2 \times f_3 \times \dots \times f_n \times \dots$, com $f_n = \cos(\pi/2^{n+1})$, o primeiro algarismo infinito jamais concebido. A faceta mais notável da obra de Viète foi todavia a sua contribuição ao velho problema da formalização dos cálculos: representou por **constantes** os **coeficientes numéricos** das equações e por **letras** as respectivas **incógnitas**, escreveu as potências de forma à relação-las com as grandezas ("A quadratum" para A^2) e introduziu os **binários + e -**. Era um grande passo numa evolução que só com Descartes se aproximaria do seu termo.

De inspiração muito diferente mas não de menor valia foi a contribuição matemática de **Simon Stevin (1548-1620)**, burguês de Bruges que começou a vida como **contabilista**, estudou letras, tornou-se em **engenheiro militar**, depois em **inspector dos diques da Holanda** e, graças à amizade de Maurice de Nassau, chegou a ser **intendente geral dos exércitos dos Países Baixos**. Homem de acção com uma mentalidade prática, ainda encontrou tempo para demonstrar as suas excepcionais capacidades científicas, publicando muito sobre variados temas. Interessou-se pela **aplicação das matemáticas a problemas financeiros**, introduziu melhorias nos **sistemas contabilísticos**, foi um engenheiro de valor, legou-nos uma obra importante em **física** (da qual falaremos mais adiante) mas foi o seu contributo à **teoria dos números** que queremos referir agora.

Por estranho que pareça só com ele é que a **numeração posicional** assumiu enfim todas as virtudes literais que continha, pois só na sua "**Arithmetique**" (1585) surgiram as **fracções decimais** e, mesmo assim, sob uma forma complicada; com símbolos intercalados 0, 1, 2, ... assinalando as respectivas potências de $1/10$; por exemplo, Stevin escrevia 3,14 sob a forma 3 0 1 4 2, no sentido de $3 \times (\frac{1}{10})^0 + 1 \times (\frac{1}{10})^1 + 4 \times (\frac{1}{10})^2$, mas meia dúzia de anos mais tarde já se tinham suprimido esses símbolos inúteis e, como era notação moderna se dignaria rapidamente, os cálculos multiplicativos

$$\frac{1}{\pi} = \prod_k f_k$$

$$f_k = \cos \frac{\pi}{2^{k+1}}$$

algarismos
 $\pi = 3,141592653589793238462643383279502884197169399375105820974941598001474715$

cararam-se muitíssimo. Paralelamente, Stevin deu ao próprio conceito de número uma generalidade que ele nunca alcançara, encarando o número "imaginário" como tão "racional" como quaisquer outros e admitindo sem reservas o número negativo. Era uma atitude inovadora que permitia tomar plena consciência de que a subtração de um número positivo equivale à adição de um número negativo e que não deixam de ter consequências práticas; por exemplo, Stevin reduziu a uma as três formas clássicas da equação do segundo grau $ax^2 + bx = c$, $ax^2 + c = bx$, $ax^2 = bx + c$.

(13) 112

Se no domínio da mecânica nada ocorreu de fundamental, algo se vislumbra à posteriori que se não afigura muito significativo: o acréscimo da influência do pensamento de Arquimedes, cuja obra já interessara Tartaglia e da qual Comandino publicou uma excelente tradução latina em 1558. O maior físico italiano deste tempo foi aliás um discípulo de Tartaglia, que desempenhou as vagas funções de matemático do duque de Saboia, Giambattista Benedetti (1530-1590), crítico acurado de Aristóteles.

Benedetti ocupou-se seriamente do problema da queda dos corpos e, sob a influência de Arquimedes, chegou a conclusões muito interessantes. Diante da existência da impulsão do meio fluido, foi levado a rejeitar a tese aristotélica de que a velocidade de queda de um corpo grave era proporcional ao seu peso: a velha ideia de uma ação exterior igual à diferença entre a "potência" e a "resistência" traduzia-a de sustentando que a velocidade de queda crescia com a diferença entre o peso e a impulsão, esta sendo proporcional ao volume do corpo e à densidade do meio. Mas não se ficou por aqui: comparando o movimento do centro de gravidade na queda de uma bola de 4 libras com o de 4 bolas idênticas de 1 libra, ligadas entre si, concluiu que elas se processariam com velocidades idênticas que é também a velocidade de queda de cada uma das 4 bolas isoladas. Afinal, a velocidade de queda num dado meio já não dependerá do peso do corpo mas tão-só do peso específico, da densidade, outra noção arquimédica.

Na sequência destas ideias, Benedetti será levado mais tarde (1585) a rejeitar as próprias noções tradicionais de "gravidade" e de "leveza", atribuindo-lhes apenas um significado relativo; todos os corpos são pesados, e só nos parecem "graves" ou "ligeiros" consoante a sua densidade e não em função do que a do meio em que se encontram. E a física aristotélica recebia um novo golpe quando se declarava não vislumbrar qualquer argumento para negar a existência do vácuo. A conclusão inacessível de que os corpos adquiririam até uma velocidade infinita repousava, do seu ponto de vista, sobre falsas premissas porque, no vácuo, o movimento dos graves (e todos os corpos agora eram "graves") revelar-se-ia até particularmente simples, todo caído com uma velocidade finita proporcional à sua densidade.

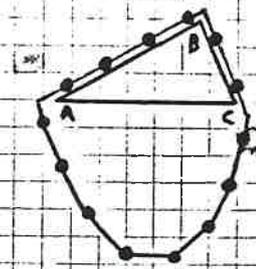
No seu esforço de matematização do movimento, Benedetti já está muito longe de Aristóteles. A sua dinâmica continua todavia a apoiar-se na noção ambígua de "impetus" essa espécie de vitalidade que o motor transmite ao móvel e que não é matematizável. Bem se esforçou de por deparar o próprio conceito de "impetus", negando a existência de um "impetus" circular, insistindo em que provoca sempre uma trajetória retilínea (como a da pedra lançada pela funda) e que, apesar das aparências, assim se entende o movimento

de um corpo que rola, onde cada uma das suas partes só não se afasta tangencialmente à trajetória por está retida pelas forças que a ligam no todo. Apesar de todos os seus esforços, Benedetti não conseguiu libertar-se das cadeias da velha física, mas de onde ele ficou partirá Galileu.

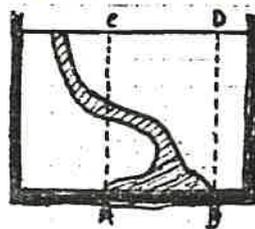
Muito mais sólida do que a de Benedetti, a obra de Stevin no capítulo da mecânica, não teve uma importância histórica comparável. Nesse tempo, o cerne das dificuldades estava na compreensão do movimento e Stevin limitou-se a fazer uma única experiência de cinemática para concluir dela que nem a tese de Aristóteles nem a de Galen sobre a variação do tempo de queda dos corpos com o seu peso eram aceitáveis. Fora isto, só se ocupou de problemas de equilíbrio, e fez-o com tal fidelidade ao espírito e letra do mestre de Siracusa que lhe chamaram lisonjeiramente o novo Arquimedes.

Deu uma nova demonstração das condições de equilíbrio da alavanca cujo valor está só na sua elegância. Sem saber que o problema já fora resolvido pelo misterioso Jordanus, elaborou as condições de equilíbrio dos corpos sobre planos inclinados, resultado de que estava tão orgulhoso que o reproduziu sobre a capa dos seus livros com a legenda "a maravilha não é uma maravilha"; mas podemos desculpar-lhe essa fraqueza atendendo à simplicidade do raciocínio de Stevin fundado no postulado de que o movimento perpétuo é impossível (postulados sãos falso em termos puramente mecânicos!).

Sobre um triângulo ABC com $AB = 2BC$ e AC horizontal colocamos uma cadeia de 14 bolas idênticas e equidistantes de maneira que fiquem 2 bolas em BC e, portanto 4 em AB, as 8 restantes permanecendo suspensas. Se um tal sistema não estivesse em equilíbrio deslocar-se-ia num ou noutro sentido, acabando por reconstituir a situação inicial e dando assim assa a um movimento perpétuo, "o que é absurdo"; logo, o corpo está em equilíbrio sobre os planos inclinados se o seu peso for em proporção com os comprimentos dos planos. Ao generalizar esta conclusão Stevin foi levado a enunciar um resultado esse efectivamente novo, a regra do paralelogramo das forças, que apresenta no caso particular em que as componentes são perpendiculares.



A hidrostática de Stevin foi bem mais original. Independentemente de Benedetti, reencantou as condições de equilíbrio de um líquido em vasos comunicantes, mas soube exprimi-las introduzindo o conceito fundamental de pressão. Demonstrou que a pressão exercida por um líquido sobre o fundo de um recipiente de forma qualquer só depende da altura do líquido e da sua densidade, conclusão de qual resulta o celebre "paradoxo hidrostático": um fluido pode exercer sobre o fundo do vaso que o contém uma força muito superior ao seu peso. Stevin elucidou esta e outras aparentes dificuldades das graças à brilhante ideia de que a pressão não seria alterada se uma pressão qualquer do líquido fosse substituída por um sólido com a mesma densidade - chamamos-lhe hoje o "princípio de solidificação"; determinou a influência sobre a pressão das paredes laterais do recipiente e explicou, por exemplo,



Como, no caso reproduzido na figura junta, as pessoas exercidas sobre AB pelo volume de líquidos ABCD e pela estreita coluna tracejada eram necessariamente iguais. A obra de Pascal em hidrostática, justa-
mente famosa, levou a de Stevin.

Não se afigura possível deixar de dizer aqui uma palavra sobre esse mistério que envolve **Domínguez de Soto (1492-1570)**, um teólogo espanhol conhecido no seu tempo e em cuja obra se encontra a afirmação de que o movimento se queda do grave, é "uniformemente diforme", quer dizer, uniformemente acelerado. Não entendam que razão teriam levado este escolástico a anunciar com léguas de avanço ^{mas} conclusões revolucionárias à qual Galileu e Descartes chegaram posteriormente e num quadro conceptual totalmente diferente. Talvez tivesse sido apenas um tiro ao acaso que acertou no alvo. Seja como for, esta tese de Soto não foi retomada por ninguém e não exerceu qualquer influência, e isso parece-mo compreensível, uma tal lei fora do seu contexto próprio não tendo qualquer sentido.

14 13

20 de agosto

Voltemos de novo à astronomia, a cuja história o advento do heliocentrismo copernicano levou a ser léguas em estatuto privilegiada. Na verdade, o destino dessa teoria cientificamente tão discutível e ideologicamente tão ambígua representaria uma das condições essenciais ~~da física~~ da eclosão ^{por} de uma nova física ^{por} também de outra epistemologia e de outra concepção da natureza e do homem. Temos pois de examinar com certo pormenor qual o acolhimento recebido pelas ideias heterodoxas do excelente cônego.

Ver Kuhn e Hesse para mais

Numa primeira fase, a Igreja católica manifestou uma inegável tolerância ~~em relação~~ ao heliocentrismo, porque Copérnico fora um eclesiástico prestigiado e respeitável e isso dava credibilidade ao tão falado prefácio do "De Revolutionibus". É sabido que, para editar em Nuremberg o grande tratado, **Rheticus** submeteu-o a um teólogo luterano seu amigo, **Anthon Osiander**, que, embora fosse um tanto herético, achou todavia prudente inserir à cabeça da obra um texto não assinado em qual a doutrina heliocêntrica era apresentada apenas como uma nova maneira de calcular os movimentos planetários, uma simples técnica matemática sem qualquer significado físico. Esse prefácio assinado de Osiander, que provocou a indignação de Kepler, em nada correspondia ao pensamento de Copérnico mas, na altura, foi naturalmente atribuído e contribuiu para ilibar a obra de intensões subversivas. Durante umas décadas o Vaticano não fez nada para impedir ou dificultar a difusão do copernicanismo.

Muito mais apegado à **versão literal do Antigo Testamento**, os reformados mostraram-se desde o início, e, se assim se pode dizer, bem mais clarividentes: ^{mesmo que} ~~o~~ se tratasse do ^{fundamento} ~~uma~~ mera técnica de cálculo ~~de~~ de uma verdadeira tese cosmológica, a ideia de um Sol imóvel e de uma Terra em movimento constituía uma perigosa heresia em contradição expressa com o ensinamento bíblico. Lutero afirmou-lho-a ainda antes da publicação do "De Revolutionibus", que seria condenado ^{injunction} ~~em~~ em termos inequívocos, de forma que nas províncias luteranas tornou-se indispensável a maior prudência sobre esse assunto. **Rheticus**, por exemplo, ^{intelectual de tendência heterodoxa} ~~sujeito~~ ~~era~~ nas inclinações que após a influência de Copérnico sofreu a de Paracelso, após a "Nematio Prima" nunca mais publicou nada de astronomia, e quando um outro luterano de

Bíblia Josué 10,13

Anúncio uma "Nematio Secunda"

não, Reinhold, imprimiu tabelas de posições dos astros, as "Tabulae Prutenicae" (1551), foi censurado por que os seus cálculos se baseavam no modelo matemático de Copérnico, isto embora ele ^{sem} ~~seu~~ apresentasse apenas uma exposição do sistema heliocêntrico em cuja verdade ^{nessa} ~~nessa~~ acreditava.

A posição de Reinhold anunciava aliás a de inensa maioria dos astrónomos profanos, os únicos com preparação para entender realmente o "De Revolutionibus": louvando as capacidades de Copérnico, só atribuíam à obra certo valor prático na medida em que poderia facilitar determinados cálculos mas sem aceitarem as hipóteses de base tidas por insustentáveis e, para mais, inóculas. Entre os homens de ciência só houve meia dúzia de exceções a esta regra: dois ou três independentes nos países alemães, nem um ^{único} em França, na Itália apenas Benedetti que pouco sabia assunto, enfim, um verdadeiro prosélito em Inglaterra, Digges, e um semi-convencido, William Gilbert. Não podemos deixar de atribuir significado a esta rejeição massiva do copernicianismo pelo meio científico.

- Em contrapartida, houve noutros círculos um movimento de curiosidade por essas ideias cuja novidade e audácia chamavam a atenção; Montaigne, por exemplo, refere-as com o seu habitual ceticismo. Mas esse interesse traduzia sobretudo gosto por algo de análogo à ficção científica e não podia ter consequências de maior. Só nos começos do século XVII, graças a Babilien, é que o heliocentrismo adquiriu suficiente credibilidade para desencadear uma verdadeira batalha ideológica e isto porque a luneta lhe facultou argumentos bem mais difíceis de rebater. Mas, antes disso, o grande sistema astronómico já dera ao espectáculo filosófico-cosmológico de cariz subversivo cuja importância não pode ser ignorada e, a tal propósito, há que falar de Digges e sobretudo de Bruno.

15 (13)

Se o universo de Copérnico fôra obrigado a colocar muito mais longe a esfera celeste, continuava a ter em comum com o de Aristóteles e de Ptolomeu a característica essencial de ser um mundo finito e fechado, um cosmos. Uma tal finitude era praticamente indispensável aos sistemas anteriores onde as estrelas rodavam todas ou duas à volta da Terra imóvel, pois de outro modo haveria que atribuir-lhes velocidades infinitas, mas ^{podia} ~~há~~ não existia qualquer razão ^{de ser} ~~que a impusesse~~ num cosmológia em que as estrelas eram consideradas imóveis no espaço. Em suma, o universo de Copérnico não lia, sem inconvenientes, ser considerado infinito.

A ideia de um universo infinito não era nova. Na física de Epicuro em que os átomos eram impelidos em movimento no vazio, um tal vazio assemelhava-se ao espaço euclidiano sem limites: na "Doutrina da Ignorância", Nicolau de Cusa também se referia a um espaço indeterminado, embora o fizesse no quadro brumoso da sua metafísica teológica onde o "infinitamente lento" e o "infinitamente rápido" coincidem. Após Copérnico, a tese do infinitismo podia contudo ser encarada em termos muito diferentes.

Apologie de
Raimond Le Rond
Essai II

Apologie de
Raimond ??
Essai II

Digges

Neste ponto, uma certa prioridade parece caber ao matemático e astrônomo britânico Thomas Digges (1576-95). Em 1576 publicou uma "Descrição perfeita das orbes celestes segundo a antiquíssima doutrina dos Pitagóricos, recentemente ressuscitada por Copérnico e reprovada por uma demonstração geométrica", a qual não constitui apenas a primeira exposição clara do heliocentrismo aparecida após a "Nova História Prima" pois Digges introduzia neste texto a ideia de que as estrelas se acham a distâncias muito diferentes do Sol, ocupando uma coroa esférica de espessura infinita. Podia assim não só interpretar as grandes diferenças observadas no brilho das estrelas como até concluir que a maioria delas não são incandescências e, inventando o argumento tradicional, tentava até utilizar a sua hipótese especulativa para reforçar a tese de que as estrelas não podem estar em movimento e, por consequência, a Terra não se movimenta sobre si própria. Mas, com este esquema, via-se em apuro para atribuir um lugar ao Céu dos cristãos, desde sempre colocado além da esfera das "fixas", e para escapar à dificuldade porosa de admitir, tanto ~~deuses~~ e almas de justos todo esse espaço imenso que dava por reino às estrelas. Assim, entendem-se que Keyne e outros tenham considerado que o espaço infinito de Digges ainda tinha muito de teológico e se recusem a minimizar a originalidade do pensamento de Bruno.

Gianbattista Bruno nasceu em 1548 em umetines de Nápoles em cuja universidade estudou lógica e filosofia antes de se tornar frade dominicano, tomar ideias brancas e brontear-se em teologia. Mas a pureza do seu comportamento não lhe evitou um processo por heterodoxia e fuga do convento (1576). A partir de então e durante 15 anos, Bruno ~~viajava~~^{levou} uma vida errante através da Europa, exposto por todo o lado um sistema filosófico cada vez mais acabado mas vendo-se constantemente perseguido pela intolerância religiosa, talvez porque se recusasse a tomar partido. Primeiro ~~foi~~^{foi} para benebr onde se converteu ao calvinismo ~~para~~^{por acesso} frequentar a universidade, mas ~~foi~~^{expulso} por desrespeitar os aristotélicos; professor de filosofia em Toulouse, as guerras de religião forçam-no a partir para Paris onde publica as primeiras obras e ganha tal prestígio que o rei cria para ele uma cátedra extraordinária no Colégio de France; novamente em perigo com o recrudescimento das querelas entre católicos e protestantes, instala-se em Londres sob a protecção do embaixador francês e, nestes anos (1584-86) escreve em italiano dois de seus livros mais importantes, "De la Cena de le Genesi" em forma de diálogo, e o "De l'infinito universo e mondi"; volta a Paris, mas como as lutas religiosas recomeçam, abandona a França e dirige-se para Wittenberg onde é bem acolhido pelos luteranos. A hostilidade dos calvinistas obriga todavia a partir mais uma vez; fica uns meses em Praga junto do imperador Rodolfo II, e recomeça a sua peregrinação afóra pelas universidades alemãs; em 1591 publica em Francofort, em latim, os seus últimos três livros, em particular o "De l'immense e innumerabili".

Fatigado, Bruno cometeu a imprudência de aceitar o convite de um patricio veneziano, Mocenigo, para voltar a Itália, mas a audácia das suas ideias existiu de tal modo o seu protector que o levou a cometer a vileza de o denunciar oficialmente à Inquisição (1592). Foi o caso de um primeiro processo em que ~~foi acusado~~^{foi acusado} de ter frequentado hereges, de ter dividades quanto aos milagres e a centralização da Igreja, enfim de ter exposto publicamente teses sobre o crime em oposição à doutrina católica. O caso afigurou-se suficientemente grave para que o Vaticano obtivesse a extradição de Bruno,

Novo homens, novo céus - 14/19

encarcerado em Roma, no calabouço do Santo Ofício, desde 1593 e sujeito a uma inquisição minuciosa. Apesar de todas as pressões rotundas durante 7 anos, o filósofo manteve-se firme com uma dignidade exemplar, sem negar qualquer das suas opiniões e admitindo que podia ter escrito heresias em matéria dogmática mas não em domínio da filosofia ou da ciência, que pela sua natureza própria se situam noutro âmbito que a fé. Mas houve que pagar o preço de tanta coragem: oito das Teses de Bruno foram declaradas heréticas pelo papa e, caso de se recusasse a abjurá-las, o tribunal do cardeal da Inquisição excomulgou-o, degradou-o e ordenou-o à morte. A 17 de Fevereiro de 1600, perante a multidão dos peregrinos acaudado a Roma para celebrar o "ano santo", Giordano Bruno foi queimado vivo.

No âmbito da história da ciência, hoje o martírio de Bruno parece-nos duplamente prematuro. Anunciava que a nova concepção do mundo eclosionaria em conflito violento com as ideias tradicionais, cuja sobrevivência as autoridades constituídas — a igreja católica como as igrejas protestantes — se esforçariam por assegurar recorrendo à intimidação directa: boa parte dos criadores da ciência nova correram perigo em consequência não só das suas ideias, ou serão forçados a dissimulá-las. Mas a pertinácia desse monge apostata também fazia pressentir que coacção e violência não bastariam para travar sequer esse movimento ideológico profundo com o qual se inicia uma outra fase da velha história dos homens.

Bruno não foi um homem de ciência mas um filósofo e é nessa perspectiva que se deve ler a sua obra. Tendo estudado na juventude os epicuristas, Cusa e Copérnico, foi levado a conceber a ideia de um universo infinito, o único que lhe parecia compatível com a onipotência divina. Na esse universo infinito era extenso (e, portanto, distinto de Deus que se fosse extenso não seria uno) não podia ter sido criado pela bondade divina noutro lugar do que noutro, de modo que o Sol não era de certo um astro privilegiado. Tratava-se apenas de uma estrela, que não ocupava o centro do mundo porque um mundo infinito não tem centro, e só se nos afigura excepcional por estar na sua vizinhança, mas não era afinal senão uma estrela como todas as outras. De certo, não sabemos se outras estrelas têm planetas ou até planetas habitados circulando em seu redor, mas como isso acontece com o Sol e há uma infinidade de estrelas análogas seria inverosímil se assim não fosse.

Estas magníficas intuições de Bruno que deturpam realmente o velho cosmos, eram tão originais que nem Kepler nem Galileu as conseguiram entender. Elas inseriam-se contudo numa concepção da natureza bem filha do tempo, em que os astros se moviam no espaço conduzidos pela vida que os anima, e em três fases da Santíssima Trindade ao Pai correspondia a matéria, ao Verbo a razão e ao Espírito Santo a "alma" neo-platónica do mundo. O relativismo essencial da sua cosmologia levou, no entanto, esse visionário, ao argumentar contra as objecções do aristotélico ao movimento da Terra, a fazer a analogia fundamental com o que se passa num navio deslizante tranquilamente na água e onde uma pedra lançada do alto de um mastro cai na vertical como se o navio

estivere parado. Era o alicerce do princípio da relatividade do movimento, que seria um dos pilares da física do futuro.

(16) (15)

Muito diferentes das de Bruno foram a vida e a obra do seu contemporâneo Tycho-Brahe (1546-1601), considerado unanimemente a figura central da astronomia no último quartel do século XVI. Foi o fascínio de astrologia que levou esse aristocrata dinamarquês a interessar-se pelo céu, que estudou desde jovem na universidade de Copentague e depois em varias grandes centros de lingua alemã. Tendo constatado por experiência própria a imperfeição das taboelas astronómicas decidiu melhorá-las radicalmente para obter predições de um rigor incomparável e a realização desse projecto ambicioso ocupou-lo durante toda a vida.

Como era rico, podia oferecer-se instrumentos inacessíveis ao comum dos mortais. Em 1569 fez construir em Augsburgo um quadrante monstruoso, com mais de 6 metros de raio, para medir as "alturas" dos astros, um gigantesco sextante com cerca de dois metros, para determinar as distâncias angulares e um globo "da altura de um homem" para inscrever os resultados das observações. De regresso à Dinamarca assim equipado pôde empreender nas melhores condições o estudo de uma "nova", uma estrela mais brilhante que todas as outras que surgia no céu em 1572 e despertava grande curiosidade. Era realmente um facto insólito, em contradição com o dogma da imutabilidade da esfera das fixas, o que levava os tradicionalistas a afirmar que se tratava apenas de um cometa, objecto então considerado como pertencente ao "mundo" sub-lunar (corruptível). Tycho verificou (mas outros, com Digges, chegaram à mesma conclusão) que a "nova", não tendo qualquer paralaxe observável, tinha de estar mais longe que Saturno e sea, portanto, uma verdadeira estrela.

Este trabalho foi sobretudo importante porque decidiu o rei da Dinamarca a fazer-lhe uma oferta sumptuosa: o senhorio de uma ilha no Báltico, Hveen, onde lhe ia construir um palácio-observatório, Uraniborg primorosamente equipado. A construção iniciada em 1576 e demorada pelo espírito minucioso de Tycho exigiu-lhe tais cuidados que quase lhe fez perder a oportunidade oferecida pela súbita aparição de um cometa que originou inensas especulações. Todos os astrónomos se dedicaram à determinação da trajectória desse misterioso objecto, mas se a publicação das observações do dinamarquês foi tardia - "De mundi ætheris...", 1588 - o rigor do seu trabalho superava de longe todos os outros.

Tycho confirmava que o cometa nunca estivera mais perto da Terra que Vénus (era o fim da concepção dos cometas como pedaços do mundo sub-lunar e, portanto, o fim da ideia de imutabilidade dos céus) e concluía que se o cometa podia atravessar impunemente os orbes planetários eles não podiam ser sólidos e seriam, em outras palavras, meras construções matemáticas; outros, nomeadamente Averroes e os averroístas, já o tinham dito há muito, mas agora já não era uma questão de opinião.

Nem a "nova" nem o cometa tinham distraído Tycho de observações rigorosas do céu. Arranjara tantos ajudantes e tantos instrumentos que se tornou indispensável juntar a Uraniborg um anexo erigido de cima das suas ruínas, para minimizar os erros provocados pelas cometas atmosféricas. Mas ainda lá

Galileu contra HOS II

Novos homens, novos céus - 15

que a grandeza e a precisão dos instrumentos foi esse caráter sistemático das medidas, feitas inicialmente norte após norte pela equipe que Tycho organizara que permitiu um avanço espetacular na precisão; nos tempos de Copérnico, um erro de ordem dos $10'$ era considerado excelente, e para Tycho não vai além dos $4'$ e, no caso das estrelas, desce até às vizinhanças de $1'$. E embora menos espetacular, a supressão do erro que a tradição e a inércia dos copistas introduziam nas tabelas, revelou-se fundamental para a descoberta das leis matemáticas dos movimentos dos astros.

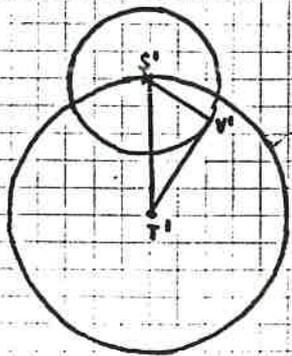
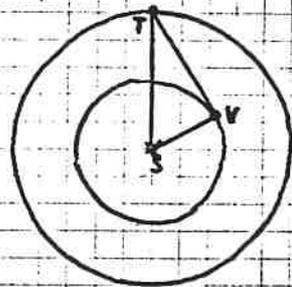
Como teórico, é possível que Tycho tenha sido tratado pelo historiador das ciências com alguma injustiça. Não foi um inovador e o seu sistema representa, de algum modo, um retrocesso em relação ao heliocentrismo copernicano, ao qual aliás ele negava qualquer influência sobre as suas ideias. Mas o que ele realmente tentou foi construir um copernicanismo híbrido, recuperando o essencial da capacidade explicativa do "De Revolutionibus" sem assumir as dificuldades implícitas na atribuição à Terra de qualquer movimento. Para Tycho a Terra está imóvel e o Sol (como a Lua) rodam em torno dela, mas todos os outros planetas rodam em torno do Sol. E assim, para tomar só um exemplo, o raciocínio que permitia a Copérnico determinar a distância

Terra-Vênus permite a Tycho chegar ao mesmo objetivo e obter o mesmo resultado. Era um compromisso razoável e bem determinado em texto e assim foi entendido pelos astrónomos da época.

As despesas do observatório de Uraniborg eram elevadas e Tycho vivia como um grande senhor. Para mais, tinha deficiências administrativas, de forma que tinha muito e ainda gastava mais, mas Frederico II lá se pagando as dívidas a troco de uns honrários para a família real do astrólogo incomparável. Quando Frederico morreu, em 1588, Tycho foi prevenido de que teria de se contentar com as rendas que lhe tinham sido atribuídas, o que não o preocupou porque dilapidava uma herança familiar. Mas tudo recomeçou e o incorrigível gastador foi perdendo tudo quanto tinha, até que em 1597, quando lhe retiraram a pensão, ficou tão zangado que

abandonou Uraniborg e partiu para Rostock em busca de uma nova situação a seu lado.

Aí lá de propaganda, fez aí editar um livro importante, com a descrição dos seus famosos instrumentos, e os exemplares que enviou ao imperador da Alemanha Rulolfo II juntos um catálogo manuscrito com as posições de um milhão de estrelas, no qual aliás mais de 200 só figuravam para dar ordem ao número total. Mas conseguiu assim, em 1598, um honrário matemático (astrólogo) imperial e instalado na Boémia onde procurou reconstituir uma boa equipa de colaboradores; escolheu para seu primeiro assistente um jovem astrónomo alemão chamado Kepler e recomeçou a trabalhar. Morreu pouco depois, em 1601, mas desta aventura resultou que o seu posto e, sobretudo, os



$$\overline{ST} = \overline{S'T'}; \overline{VT} = \overline{V'T'}; \overline{TV} = \overline{T'V'}$$

Resultados das observações de toda a sua vida (que nunca publicou) ficaram a pertencer a esse tal Kepler. O menos que se poderia dizer é que este não fez mau uso da herança.

A viagem - 1

21/1/2020

Kepler
(1571-1630)

1.

Esse Johann Kepler surgiu acidentalmente no final da vida de Tycho e se tornou, afinal, o seu herdeiro científico nascera no sul da Alemanha em 1571 e estudara na universidade literana de Tübingen cujo professor de astronomia, Maestlin, se interessava pelo copernicianismo e até falava dessa estranha teoria a alguns dos seus estudantes. Kepler parecia vaticinado para uma carreira eclesiástica, mas como parecia já ter ideias um tanto bizarras cobriu-se apenas um lugar modesto de professor de matemáticas na escola de Graz, situação que só teve a vantagem de lhe deixar tempo para de escrever o seu primeiro livro, o "Mysteriorum cosmographicum", publicado em 1596 graças ao apoio de Maestlin.

O "Mysteriorum cosmographicum" constituía sobretudo uma apologia cabrosa da doutrina de Copérnico, ali proclamada como a expressão de uma realidade física. Mas Kepler não se limitava a expor com força as teses do "De Revolutionibus", também lhes introduzia algumas melhorias; assim, enquanto Copérnico permanecera apegado à concepção ptolomaica de que os planos das órbitas planetárias se intersectavam no centro da Terra, Kepler, mais coerente, sustentava que essa intersecção se verificaria no centro do Sol, o que até lhe permitia reduzir um tanto o número de epiciclos necessários à teoria. Era pois a primeira de suas teses ao seu talento como astrónomo, mas não é essa a principal razão por que essa obra de juventude lhe interessa hoje.

Verificou, com efeito, que o problema mais importante para Kepler nesta época era a descoberta das razões que teriam levado o Criador a colocar em torno do Sol justamente seis planetas — pergunta que hoje, para nós, não teria qualquer significado mas para a qual o jovem astrónomo pensava ter encontrado uma resposta que derivava um dos grandes "mysterios cosmographicos": havia seis planetas porque existiam cinco sólidos regulares. Após ter ensaiado em vão muitas outras hipóteses do mesmo jaez, verificara efectivamente que, circunscrivendo cada uma das esferas geométricas planetárias a um dos sólidos regulares e inscrevendo nela outro desses sólidos, obtinha muito aproximadamente os valores relativos das distâncias já conhecidas entre os vários planetas e o Sol. Os deneguidos de Deus estariam portanto criados na sucessão Mercúrio/octaedro/Vênus/icosaedro/Terra/dodecaedro/Marte/tetraedro/Júpiter/Cubo/Saturno, e Kepler nunca deixou de estar convencido de que esta especulação constituía uma grande descoberta.

Outra tese ainda mais curiosa defendida nesse livro era a correspondência entre os elementos cósmicos do sistema copernicano com as três pessoas da Santíssima Trindade, a busca de tais analogias assumindo nessa época formas muito diversas. Para Kepler, o Sol era semelhante ao Pai — eis, de novo, o prestígio místico do Sol — a esfera das fixas ao Filho, o espaço intermédio correspondendo ao Espírito Santo. Mas esta mistura abstrusa de astronomia com a teologia Kepler foi capaz de obter uma ilacção finalmente muito importante, que todos os elementos incluídos nesta correspondência deriam formar o mesmo estatuto ontológico e, portanto, ser governados pelas mesmas leis físicas. Queria isto nomeadamente dizer que se havia razões para se pergun-

tar foi que se movem os projecteis, razão análoga levaram a inquirir por que se movem os planetas: assim se esboçava uma relação entre a "física terrestre" e a "física celeste", dois domínios desde sempre separados. De qualquer modo, a própria índole da problemática levantada por Kepler definiamo como um adepto da "magia natural" renascentista, um homem cuja mentalidade tinha muitas marcas do neo-pitagorismo e do neo-platonismo.

Embora o "Mysterium cosmographicum" não tivesse alcançado nenhum sucesso, permitiu a Kepler relacionar-se com Tycho, que achava totalmente descabido um tal entusiasmo pelo heliocentrismo mas apreciava muito as elucubrações pitagórico-platónicas, acabando assim por considerá-lo como um jovem desconhecido para seu lugar-têntente. Incumbiu-o da tarefa de delimitar o quebra-cabeças do movimento de Marte, especificando bem que se tratava de fazer no quadro do sistema ticoónico. Mas Tycho morreu pouco depois e Kepler, promovido brevemente a astrónomo e astrólogo imperial, só tinha obrigação de elaborar uns tantos horóscopos em cujo valor ele próprio também acreditava. Disputado de tempo para empregar um cuidadoso cálculo da trajetória de Marte, e fez-lo quer no sistema de Tycho, quer no de Ptolomeu e de Copérnico, quer segundo as suas ideias próprias, no seu copernicicismo aperfeiçoado. Um tão grande esforço saltou-lhe afinal por uma razão deceção: subsistia uma diferença de $8'$ de arco entre a melhor das posições teóricas e os dados empíricos, diferença insignificante umas décadas mais cedo mas que agora se revelava catastrófica porque, como o próprio Kepler reconhecia frontalmente "a bondade de Deus deu-moi, com Tycho, um observador tão fiel que um erro de $8'$ é inaceitável".

Nessa situação desencorajadora, Kepler mostra que a sua força de carácter, sustentada pela crença mística na harmonia dos números, estava à altura do seu génio. O fracasso não lhe abalou a confiança no heliocentrismo, só o levou a injunção que devia haver um erro sistemático na descrição do movimento da Terra à volta do Sol. Na verdade, quando se observam as posições sucessivas dos planetas para os situar em certas direcções relativamente às estrelas fixas, tais direcções vão variando devido aos movimentos desses planetas mas também porque a plataforma de observação, a Terra, não permanece imóvel; com uma deslocação incessante das posições sucessivas da Terra a interpretação das observações seria falsificada, e Kepler necessitava realmente de se assegurar da solidez terrestre. Mais ainda, soube encontrar maneira de o fazer.

Escolheu-se um instante em que o Sol S e Marte M estão em oposição, e seja E uma qualquer situação nessa direcção de Marte. Após 687 dias, duração conhecida do ano de Marte, este terá retornado a posição M , enquanto a Terra (pois 687 não é múltiplo de 365) estará agora em T' , outro ponto do círculo centrado em C . Ora, conhecendo o ângulo $\widehat{S'T'M}$ e $\widehat{E'T'M} = \widehat{S'T'M} = \alpha$, e tomando a distância SM como unidade, o triângulo $M'T'S$ fica determinado, definindo a nova posição T' da Terra. Repetecendo a operação 687 dias mais tarde, quando Marte regressou de novo a M , teremos outra posição T'' da Terra em função de SM , e assim sucessivamente. Se a órbita terrestre fosse circular bastariam aliás três posições para determinar esse círculo e fixar assim a posição de S em relação ao centro da órbita C mas, de facto, os cálculos eram muito mais complicados porque tinham de ter em conta o epiciclo.

Kepler não teve sequer necessidade de realizar as medições necessárias à aplicação do seu método, pois



A viagem - 2

Os registos de Tycho forneceram-lhe esses valores com uma precisão exemplar e, assim, ele pôde confirmar a grande oposição à grande tradição astronómica de Ptolomeu a Copérnico, a excentricidade do Sol no círculo de órbita pela Terra não tinha um valor da ordem de 0,36 do raio da órbita terrestre r , mas não ia além de cerca de 0,187 r , aproximadamente metade do valor aceite até então. Confirmava-se pois a existência do erro sistemático de que ele suspeitara, e essa foi a sua primeira grande vitória.

2.

Esperar-se-ia que um tal sucesso encorajasse Kepler a retomar o problema da determinação da trajetória de Marte, mas aquela proventura saturado por factos milhens de páginas de cálculos e, entretanto, lera o "De Magnete" de Gilbert, acontecimento de importância capital na evolução de uma problemática científica. O espírito dessa obra estava demasiado próximo do seu para que as especulações gilbertianas sobre as "virtudes magnéticas" do corpo celeste não o influenciarem profundamente; julgou ter encontrado os elementos essenciais para responder à grande questão da origem dos movimentos planetários já levantada no "Mysterium Cosmographicum".

As reflexões de Kepler sobre este tema surgem-nos como uma inextinguível mistura de grande pensamento criador e de surpreendentes confusões especulativas. Acabou por concluir que, na ação mútua entre os corpos, o mais importante é eles serem ou não "aparentados": luas pedras, ou uma pedra e a Terra, ou mesmo a Terra e a Lua seriam "aparentadas", mas tal já não aconteceria para os diversos planetas entre si (incluindo a Terra) e, muito menos ainda, para os planetas e o Sol. Ora, a bem ver, os corpos "aparentados" deviam atrair-se mutuamente com forças iguais e opostas, espécie de princípio da ação e reação que também permeava as interações gravitacionais, mas Kepler considerava em essa atracção a causa de uma pedra ser parada embora sem conseguir entender que a Lua e a Terra não caíam uma sobre a outra. Contudo, para corpos "não aparentados" a explicação teria de ser diferente, e foi aqui que Kepler recorreu ao magnetismo. Aprendeu com Gilbert que o magnetismo provocaria a rotação do eixo sobre si próprio e, extrapolando, inferiu que o Sol rodando devia ser um corpo magnético, um centro de emanção de forças magnéticas; do Sol proviria assim algo de inaterial semelhante ao magnetismo e à luz que, agindo sobre os planetas, dos próprios corpos magnéticos provocaria os seus movimentos. No entanto, como essa "ação" de origem solar iria de certo enfraquecer com a distância, afigurava-se-lhe essencial conhecer a lei quantitativa desse enfraquecimento - para um bom neo-pitagórico, o comportamento dos corpos é regido pelos números.

Assim se explica o súbito interesse de Kepler pela Óptica, à qual escreveu em 1604 um tratado de 30 páginas, "Ad Vitellionem Paralipomena". No fim da obra estão, naturalmente, questões de fotometria em particular o estudo da variação da intensidade luminosa com a distância à fonte, e Kepler obtém a lei correcta de um enfraquecimento proporcional ao quadrado da distância. Partindo de uma questão excelente - qual a força responsável pelos movimentos dos planetas? - e distando de uma excelente resposta

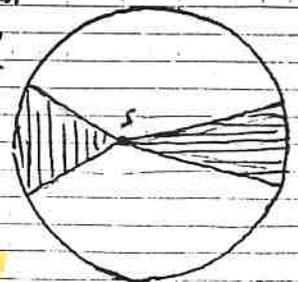
— é uma força oriunda do Sol cuja intensidade varia como $1/r^2$ — poderia Kepler ter obtido, com 80 anos de avanço, o resultado fundamental que materializaria Newton?

Tal não aconteceu nem podia realmente ter acontecido. Após Galileu e Descartes, Newton conhecia a lei da inércia e, portanto, era levado a conceber a atração solar como perpendicular à trajetória do planeta, servindo tão só para compensar a aceleração centrífuga. Ora Kepler permanecia apegado à dinâmica circular, considerando a força proporcional à velocidade e não à aceleração; e se foi ele quem inventou a falaciosa inércia, deu-lhe o significado de "resistência de um corpo a p-ir em movimento" no lugar do conceito moderno de "resistência de um corpo a alterar o seu estado de movimento". Aliás, no seu esquema conceptual, Kepler tinha de imaginar a "specie" emanada do Sol afiada segundo a tangente às trajetórias planetárias e, embora partisse de uma lei em $1/r^2$, acabou até por ter de a abandonar.

Com efeito, Kepler explorou verdadeiramente uma ideia de que as velocidades dos planetas variavam na razão inversa do quadrado das suas distâncias ao Sol. No seu modelo copernicano todos os planetas descreviam trajetórias circulares (isto se se esquecerem os efícidos) mas em torno de um foco em relação ao qual o Sol ocupava uma posição excêntrica, de próprio tendo concluído que essa excentricidade valia cerca de $1/5$. Por conseguinte, ao percorrer a sua trajetória circular, cada planeta encontrava-se a distâncias do Sol bastante diferentes e, como a sua velocidade variaria como o quadrado dessas distâncias, teria que assumir valores muito maiores quando o planeta estava mais perto do Sol do que quando se encontrava mais longe.



Graças de novo aos dados das observações de Tycho, Kepler pôde empreender a análise de veracidade desta ideia insólita e constatou efectivamente que os planetas não descrevem as suas trajetórias com velocidades constantes, mas, com grande desapontamento seu, a variação prevista da velocidade proporcional a $1/r^2$ revelava-se demasiado importante para concordar com os valores empíricos. E para "salvar o facto" sem contrariar radicalmente a lei planetária experimental, Kepler introduziu então uma hipótese adicional que se nos afigura inverosímil mas reflecte bem a sua mentalidade: a "specie" motriz emanada do Sol que deveria enfraquecer como $1/r^2$ só diminui, afinal, proporcionalmente $1/r$, isto porque Deus com a sua infinita sabedoria decidiu não a dispersar espalhando-a em todas as direcções do espaço mas concentrá-la apenas no pequeno ângulo sólido onde se situam os planos de todas as órbitas planetárias. Para atenuar a bondade desta lei matemática em que as velocidades dos planetas variariam agora meramente na razão inversa das suas distâncias ao Sol, Kepler reconeu com plena consciência a um cálculo incorrecto do qual inferiu estar na boa via; acabou por concluir que o segmento de recta unindo o planeta ao Sol deve varrer áreas iguais



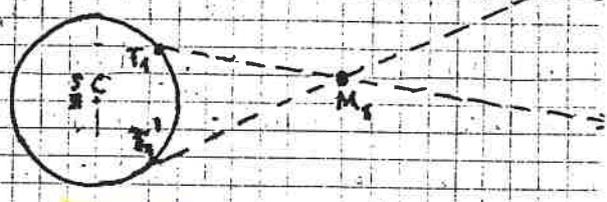
em tempos iguais, ilacção teórica que era bem confirmada pelos valores das observações. Assim surgiu a famosa "lei das áreas", à qual chamamos hoje a segunda lei de Kepler mas que, de facto, foi a primeira que ele encontrou.

A viagem - 3

3.

Entendo agora exatamente a posição excêntrica do Sol na órbita da Terra e sabendo, além disso, que ele é devorido com uma velocidade variável dada pela lei das áreas, Kepler pôde então voltar ao problema da determinação da trajetória de Marte muito mais bem afiechado: pôde utilizar o resultado das escrupulosas observações de Tycho sabendo de que posto as várias observações tinham sido feitas, quer dizer, qual a posição da Terra em cada hora relativamente ao Sol ou às fixas. E embora o seu raciocínio fosse de índole analítica, é bem mais fácil entendê-lo em linguagem geométrica.

Suponhamos assim que a Terra se encontra no ponto conhecido T_1 e seja E_1 uma órbita elíptica em a posição M_1 então ocupada por Marte. Após o seu período de revolução de 687 dias este terá regressado ao ponto M_1 mas, como entretanto a Terra se desloca para a posição T_2 (calculada de acordo com a lei das áreas), Marte passará a ser visto na direcção da recta E_1E_2 e a intersecção das linhas T_1E_1 e T_2E_2 determinará o ponto M_2



onde Marte se encontra quando a Terra está em T_2 ou T_1 . Mas como o ponto T_2 de que partirmos não goza de qualquer privilégio, pode-se repetir o mesmo raciocínio a partir de qualquer outro ponto T_2, T_3, \dots em que a Terra se encontre noutros dias do ano. Deste modo que aqui apresentamos muito esquematicamente pôde fixar e obter um grande número de posições de Marte.

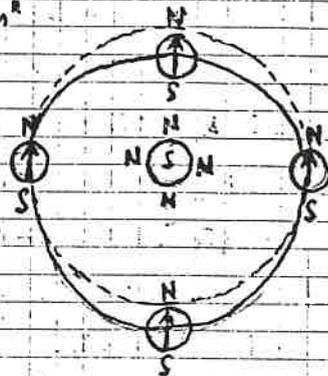
Já era previsível que tais pontos não corresponderiam a uma trajetória circular - havia o inevitável epiciclo - embora um bom pitagórico não deixasse de sustentar a ausência dessa maior perfeição. Mas, de facto, as ideias insólitas de Kepler não lhe permitiam contentar-se com a mera cinemática dos movimentos planetários, de necessitava de apreender a sua dinâmica e, por isso, era forçado a rejeitar a tradição tradicional com excêntricas e epiciclos; o movimento de Marte sendo produzido pela força oriunda do Sol a qual age sobre corpos materiais, não poderia provocar a deslocação do centro do epiciclo, simples ponto geométrico, ao longo do deferente. Por outras palavras, era inconcebível nesta perspectiva que a trajetória de um planeta resultasse da sobreposição geométrica de vários movimentos, tinha de responder a um movimento indecomponível.

Admitindo que a trajetória de Marte era uma curva simples e analisando a disposição em torno do Sol das posições que determinara, Kepler decidiu de forma intuitiva que essa curva devia ser uma oval e, em busca de uma confirmação, tentou verificar se a lei das áreas era respeitada. Mas a oval pretava-se tão mal a esse cálculo que, para facilitar, Kepler introduziu uma elipse auxiliar, tão vizinha quanto possível da hipotética oval. Então, tudo se tornou miraculosamente simples, pois as posições de Marte já determinadas situaram-se precisamente sobre essa elipse da qual o Sol ocupava aliás um dos focos e onde a lei das áreas continuava a afirmar-se válida.

Convicto da unidade profunda do sistema solar, ainda reforçada aos seus olhos pela crença de que a

mesma "ação motora" do Sol era a causa de todos os movimentos planetários, Kepler não hesitou em generalizar esta conclusão obtida para Marte, admitindo pois que todos os planetas (incluindo a Terra) descrevem elipses com o Sol imóvel num dos focos e movendo-se com uma velocidade variável dada pela lei das áreas. Mas, para além de uma construção teórica a seu gosto, ainda necessitava de encontrar uma razão de ser para a elipticidade das trajetórias, pois os movimentos circulares lhe pareciam "naturais" dispensando qualquer explicação suplementar.

Foi ainda no magnetismo gilbertiano que Kepler julgou encontrar tal razão. Atribuiu ao Sol estranhas características magnéticas, situando no seu centro o polo "sul" que, portanto, não exerceria qualquer influência, enquanto o polo "norte" se distribuiria pela periferia, dele emanando a "species" que atua sobre os planetas; estes também seriam corpos magnéticos com o polo nas extremidades do eixo de rotação, cuja orientação permanecería constante no espaço durante o movimento. Em consequência, durante a metade da revolução em que o planeta visa para o lado do Sol o seu polo sul haverá atrações e o planeta tenderá a aproximar-se dele, e na outra metade haverá um efeito repulsivo devido à predominância da repulsão entre os dois polos norte, o planeta desviando-se então para lá da trajetória circular. Tudo se faria assim de acordo com a variação em $1/r^2$ atribuída à força.



Tais foram as leis e teorias expostas por Kepler em 1609 na sua "Astronomia Nova", um livro cujo título estava plenamente justificado. Se a dinâmica do céu subjacente à doutrina era incorrecta — e nem poderia deixar de o ser antes do nascimento de outra física — o valor das leis cinemáticas era inestimável. Os dogmas platónicos da circularidade e da uniformidade aceites em reservas durante quase dois milénios eram enfim rejeitados, permitindo a aparência da simplicidade profunda dos movimentos planetários. A inovação era contudo demasiado brusca e radical para poder ser aceite ou apreciada; Maestlin, por exemplo, aconselhara solícitamente a Kepler que exprimisse os seus resultados na linguagem usual dos epíciclos, para evitá-lo de que não entendesse nada. Passar-se-iam décadas antes do reconhecimento do valor destas grandes conquistas teóricas.

Haverá de completar a história de Kepler, o qual ainda viria a descobrir um outro resultado essencial, a terceira das leis que governam a cinemática dos movimentos dos planetas. Deverá todavia interromper aqui esta história porque em 1610, no ano seguinte ao da publicação da "Astronomia Nova", um florentino chamado Galileu Galilei publicou sensacionais novidades sobre os céus.

4.

Sete anos mais velho do que Kepler, Galileu nasceu em Pisa em 1564, numa velha família de banqueiros toscanos, filho de um músico e musicólogo de vasta, Vincenzo Galilei. Para tentar melhorar a sua situação material, a família Galilei regressou a Florença em 1674 e foi aí que o jovem Galileu frequentou a escola. Tinha ele 18 anos quando seu pai decidiu enviá-lo para Pisa formar-se em medicina, isto pela boa razão

A grande viagem - 4

os meios necessários para o enviar fazer esse curso na universidade de Pisa.

1564-642 Os quatro anos que ali permaneceu não foram inúteis, pois travou conhecimento com as doutrinas de Platon e de Aristóteles e até com a física universitária da época, leccionada em Pisa por um tal Braccio cujo inteligente tratado ainda continua a ser referido. Por esta razão acidental, segundo Viviani, o primeiro dos biógrafos de Galileu, cujo texto goza de uma especial autoridade porque o autor teve o privilégio de viver junto do mestre no duro ano final de reclusão, teria sido nessa altura que Galileu fez a sua primeira descoberta científica, a lei do isocronismo das pequenas oscilações pendulares, e isto por mero acaso, ao observar o balançar dos lustres na catedral. Mas o que esta história mostra realmente é que Viviani tinha pouca noção ou demoradas imaginações, pois nessa altura ainda nem sequer havia lustres na catedral de Pisa.

De qualquer modo, quando o jovem regressou a casa, em 1584, não obtivera qualquer diploma e afirmava não querer ser médico mas sim estudar matemática e mecânica. Encontrara a sua via, e tudo iria bem se as finanças paternas não estivessem tão penhoritantes. Ottavio Ricci, um amigo da família que ensinava matemáticas aos jovens aristocratas florentinos, ajudou-a a resignar-se perante o facto consumado e até se encarregou de orientar a formação de Galileu nas matérias que o interessavam: fez-o aprofundar o conhecimento do platonismo e do aristotelismo, estudar as obras dos grandes clássicos como Euclides e Arquimedes, e familiarizar-se com os textos dos mestres da ciência escolástica e de seus estimadores, Cardano, Tartaglia ou Benedetti.

Cardano publica uma excelente obra sobre Arquimedes em latim (1558).

O jovem progrediu tão satisfatoriamente que, no ano seguinte, já se revelava capaz de tratar pequenos problemas de estática e de hidrostática com uma nitida influência arquimédica, e esse fascínio que passou a exercer sobre ele o pensamento de Arquimedes (e, por simpatia, o do neo-arquimédico Benedetti) foi um dos acontecimentos decisivos da sua biografia intelectual. Mas não antecipemos: tudo quanto Galileu conseguiu realizar nesta época foi introduzir algumas inovações menores nas teorias da balança hidrostática e da determinação do centro de gravidade. Entretanto, os seus problemas pessoais agravavam-se, pois estava um pouco doente e permanecia a cargo da família sem recursos para o manter.

As circunstâncias mostram-se, às vezes, quase providenciais. No círculo em que esses modestos sucessos tinham valido a Galileu algum prestígio figurava um personagem considerável, o marquês Guido Ubaldo del Monte, um bom matemático que possuía nele qualidades excepcionais e, por isso, decidiu protegê-lo. Graças a esse homem que era irmão de um cardinal e amigo do grão-duque, tornou-se possível conseguir coisas muito difíceis, e bastou realmente a sua influência para que Galileu, embora sem diplomas nem obra publicadas fosse nomeado professor de matemáticas na universidade de Pisa em 1589.

Diz-se que Galileu foi infeliz em Pisa devido à hostilidade dos peripatéticos locais, atropelado pela dureza das suas críticas, e Viviani parece confirmar isto com a história de que Galileu teria convocado os professores e outros doutores para o verem deitar cair do alto da janela uma inclinação dos corpos de mesma natureza mas de peso diferente, assim verificando a falsidade de tese de Aristóteles de que o tempo de queda depende do peso. Ora tudo isto se afigura altamente suspeito, pois nem se entra por enquanto na análise da evolução dos ideias

de Galileu sobre a mecânica, poder-se-ia dizer que já nessa época uma tal experiência não teria para ele qualquer sentido. Um tal exibicionismo de um jovem sem prestígio afigura-se aliás tanto menos verossímil quanto há indícios seguros de que Galileu se mostrava então muito prudente: na carta que escreveu a Kepler, em 1595, para agradecer o envio de um exemplar de "Mystorium cosmographicum" confessa-se copiosamente (deco-
to sob a influência de Benedetti) mas acrescentando que não estava em condições de o dizer publicamente.

A verdade parece ser que Galileu achava Pisa um meio demasiado provinciano, onde não tinha condições de viver e que, para mais, só lhe garantia um salário bastante modesto. Após a morte de seu pai, em 1591, ficou com a família a cargo, e essa responsabilidade seria uma das causas de falta de dinheiro que o afligia durante muitos anos. Parece-se que ele adivinasse por um mundo mais animado e um ambiente intelectual mais estimulante, e graças notadamente à protecção de Guidobaldo del Monte acabou por conseguir obter um lugar de professor numa universidade bem mais considerável, Pádua. Ali iria permanecer dez anos até que em 1610, já famoso, retornou a Florença.

Instalado em Pádua, Galileu podia ir frequentemente a Veneza, encruzilhada de tantas rotas, e em ambas as cidades arranjar bons amigos com quem podia conversar e discutir. Foi sempre bem tratado, obteve até aumento de salário, e sem abandonar nem os seus cursos nem a investigação sobre os problemas da mecânica, teve tempo para se ocupar da teoria das máquinas simples, e até de questões de índole técnica que lhe inspiraram algumas obras menores. Em 1610, no começo de 1610, um francês que fora seu aluno encontrado por acaso em Veneza falou-lhe de um óculo construído na Holanda o qual permitia aperceber distintamente os objectos afastados; tinha Galileu 45 anos quando esta conversa fortuita veio modificar o seu destino.

Sem outras indicações, utilizando um simples tubo, uma lente plano côncava e outra plano-convexa, fabricou uma primeira luneta cujo poder amplificador não ia além de um factor da ordem de 3 mas, após várias outras tentativas, "sem contar o tempo nem a despesa, acabou por construir um excelente instrumento que permitia ver os objectos mil vezes maiores e mais de trinta vezes mais próximos do que a vista natural". Propunha-se utilizar o seu óculo para observar os céus e, embora não tivesse isto sequer o primeiro a fazê-lo, dispunha de vantagem de saber o que interessava procurar. O que ele viu nos firmamentos durante os meses seguintes e contou num pequeno livro, o "Sidereus Nuncius" — o Mensageiro dos Céus — publicado ainda em 1610 deu brado no centro científico de toda a Europa. A cosmologia heliocêntrica, que praticamente ninguém levava a sério, tornava-se agora difícil de contestar.

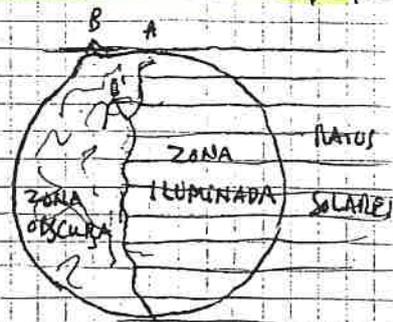
5.

Fazamos um balanço dos resultados das observações astronómicas de Galileu e da mensagem que os céus assim nos enviavam através da luneta. Folheando o "Sidereus Nuncius", começamos por referir que a Lua pertinha visivelmente a perfeição geométrica atribuída pela cosmologia tradicional aos corpos celestes: com uma aparência desolada onde não se apercebiam indícios de vegetação, fumaça, rios e montanhas, planícies e mares (os mares eram ilusões mas o termo ficou), não havendo dúvidas quanto às suas semelhanças

A grande imagem - 5

com a Terra. Era já um rude golpe para a cosmologia clássica, um dos esteios de qual era a tese da diferença essencial entre o mundo "lunar" e o mundo "sub-lunar".

O engenho de Galileu até lhe permitiu fazer uma operação da altura das montanhas lunares, hoje aliás bem confirmada. Na sua interpretação, o aparecimento de pontos brilhantes na zona obscura da Lua próximo da zona iluminada mereceria a presença de cumes de montanhas elevadas; ora o raio r do disco lunar era conhecido desde a Antiguidade e se, por exemplo, um desses pontos brilhantes foi observado em B, a linha perpendicular AB em função de r . O raio solar que ilumina B sendo tangente ao círculo em A, logo o ângulo



BAC sendo recto, se se designar por h a altura das montanhas o teorema de Pitágoras permite escrever $(r+h)^2 = r^2 + AB^2$ e, assim, determinar h . Galileu atribuiu às grandes montanhas lunares alturas de um 6 km comparáveis às das mais elevadas picos da Terra, concluindo que a Lua, com bem menores dimensões, se apresenta relativamente mais da esfericidade perfeita do que o nosso planeta.

Tal conclusão já tinha um significado considerável, mas a observação de Lua fornecia outra informação interessante: a zona obscura do satélite permanecia iluminada por uma luz "cinzenta", explicável em termos geométricos pela reflexão de luz solar na superfície da Terra; mais ainda, qualquer outra hipótese tornava imprescindível o facto de essa luz desaparecer quando um eclipse priva a Terra dos raios do Sol. Galileu tinha portanto o direito de escrever que "numa troca leal e apalçada, a Terra assegura à Lua uma iluminação análoga à que dela recebe quase durante todo o tempo da grande obscuridade da noite". Contrariamente às teses dos aristotélicos que negavam ao nosso planeta um brilho em propriedade, inconciliável com um estatuto ontológico diferente, a Terra também brilhava nos céus.

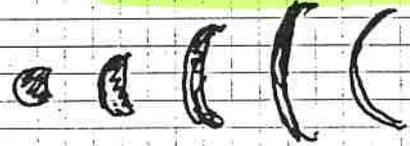
Examinando a abóbada celeste com a luneta, Galileu ficou encantado com a prodigiosa quantidade de estrelas brilhantes que agora podia distinguir, e somente nas constelações de Orion, onde se conheciam 9 estrelas, identificou logo mais de 30. A Via Láctea era um delírio, e todos os debates que a natureza desta faixa leitoria estendida através do céu provocara deixaram de ter sentido porque, nessa zona, para onde quer que se apontasse o seu ocular, ele via distintamente múltiplas estrelas tão estreitamente agrupadas que pareciam quase sobrepostas. O número das estrelas era assim multiplicado por um factor inenunciável, a insignificância aumentando na proporção inversa.

Vinha finalmente a descoberta de que Galileu se encontrava mais orgulhoso, de que havia em torno de Júpiter quatro "estrelas" (na época, um planeta era genericamente chamado uma estrela, uma estrela ornada) as quais acompanhavam fielmente o planeta através do espaço mesmo no seu movimento de retrogradação, próximo a volta dele com os seus períodos próprios. A existência destas "estrelas de Júpiter", como Galileu lhe chamou por razões de deferência pessoal, tinha arruinado o argumento do platonismo de que a Terra nunca se poderia mover arrectando consigo a Lua, porque qualquer deslocamento do movimento de

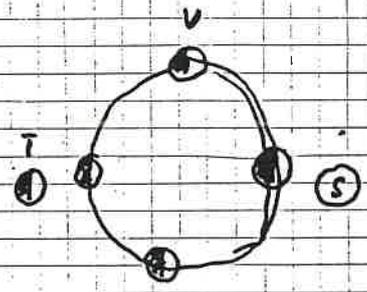
Júpiter e, contudo, os seus satélites permaneciam impermutáveis a sua volta. Além disso, se outros planetas também possuíam satélites, desaparecia uma característica que singularizava a Terra no sistema heliocêntrico e, além disso, tornava impossível sustentar o postulado geocêntrico de que a Terra era o único centro dos movimentos dos astros. Para Galileu, em todo o caso, isto significava que tanto a Terra como Júpiter rotavam em torno do Sol servindo de centros a uma espécie de mini-sistemas solares.

Tais eram os "espectáculos grandiosos e dignos de muito espanto" que, no próprio título, o "Sidereus Nuncius" assinalava "ao exame de todos e, em particular, dos filósofos e dos astrónomos." Mas, nos anos seguintes, até 1612, Galileu realizou outras descobertas astronómicas que não podem ser esquecidas. Observou assim as manchas solares, provocando uma reclamação de proximidade do jesuíta Scheiner que relatou via alibi um efeito da interposição de corpos opacos entre a Terra e o Sol, enquanto Galileu concluiu que nem o Sol era um corpo perfeito e utilizava as manchas para determinar o período de rotações da estufa sobre si própria.

As limitações do poder de resolução da sua luneta não permitiram o significado das alterações do aspecto de Saturno, que ora lhe aparecia como um disco semelhante aos outros planetas, ora se apresentava com prolongamentos laterais como se fosse "tríplice". Em contrapartida, a observação de que Vénus tinha fases análogas às da Lua mas com notável diferença de que se via o planeta tanto maior quanto menor era a sua zona iluminada não constituiu para Galileu nenhum argumento contra o geocentrismo que não se pode deixar de lhe conceder uma breve explicação.

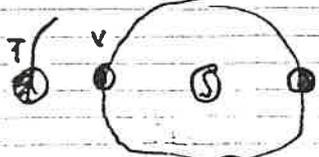


No sistema ptolomaico, para explicar que a distância angular α entre Vénus e o Sol permanecesse sempre bastante pequena, concebia-se o movimento do planeta em meio de um epiciclo cujo centro se deslocava sobre o deferente formado a estas condições alinhado com o Sol. Então, torna-se geometricamente evidente que a fração do disco de Vénus que um observador na Terra vê iluminada só depende da posição do planeta sobre o epiciclo e não da posição do Sol; mais precisamente, essa fração cresce com o valor do ângulo α sendo nula quando $\alpha = 0$, quer dizer, nas duas posições em que a Terra, Vénus e o Sol estão alinhados, e não podendo nunca atingir valores próximos de 1/2. Era flagrante o desacordo com as observações de Galileu.



Só uma pequena "fatia" iluminada pode ser visível PTOLOMEU

Na cosmologia heliocêntrica tudo se tornava, pelo contrário, muito simples de entender. Metade da esfera de Vénus, a que se encontra voltada para o Sol imóvel durante o movimento circular do planeta, permanece iluminada, e o que se observa da Terra depende evidentemente da posição relativa em que ela se encontra. Quando Vénus e a Terra se encontrarem em oposição relativamente ao Sol, Vénus aparecerá como um pequeno disco brilhante mas de dimensões muito pequenas; à medida que Vénus se aproximar da Terra, as suas dimensões aparentes aumentarão mas, simultaneamente, uma fração cada vez maior da sua superfície tornar-se-á obscura; quando Vénus e a Terra estiverem praticamente em conjunção — e nunca há, de



A grande viagem - 6

que Júpiter se movesse e, contudo, os seus satélites permanecessem imperturbáveis à sua volta. Além disso, se outras planetas além da Terra também possuíam satélites, necessitava algo que singularizava a Terra e, sobretudo, tornava impossível sustentar o postulado geocêntrico de que a Terra era o único centro dos movimentos dos astros. Para Galileu, em todo o caso, tudo era muito claro: tanto a Terra como Júpiter rodavam em torno do Sol e, por sua vez, cada um destes astros era o centro de uma espécie de mini-sistema solar.

Tais eram os "espectáculos grandiosos e dignos de muito espanto" que, no próprio título, o "Sidereus Nuncius" apresentava "ao exame de todos e de filósofos e astrónomos em particular". Mas Galileu ~~ainda~~ realizara ^{no ano seguinte} outras descobertas astronómicas que não podem ser esquecidas. Em 1610 e em 1612 observou as manchas solares, indicio de que mesmo o Sol não era um corpo perfeito, e esse facto provocou uma polémica como o jesuíta Scheiner o qual reclamava a prioridade da descoberta e que interpretava o fenómeno como uma mera consequência da interposição de corpos opacos entre a Terra e o Sol; Galileu, pelo seu lado, determinou deste modo o período de rotações do Sol sobre si próprio.

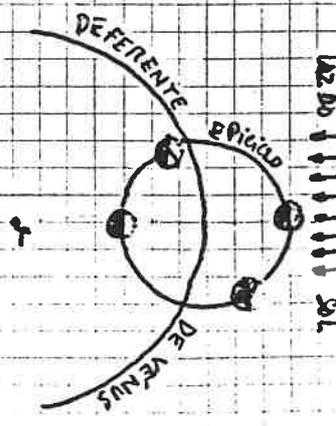
163 II 298

24 dias no Equador

O significado do aspecto de Saturno, que ora lhe aparecia como um disco semelhante aos outros planetas ora se apresentava com dois prolongamentos laterais como se fosse "triplo"; foi um mistério que Galileu nunca pôde elucidar com as limitações do poder de resolução da sua luneta. Em contrapartida, a observação de que Vénus tinha fases como a Lua, só com a notável diferença de que o planeta em vista tanto maior quanto menor era a sua zona iluminada, serviu a Galileu como um tão forte argumento contra o geocentrismo que não podemos deixar de lhe consagrar umas linhas de explicação.

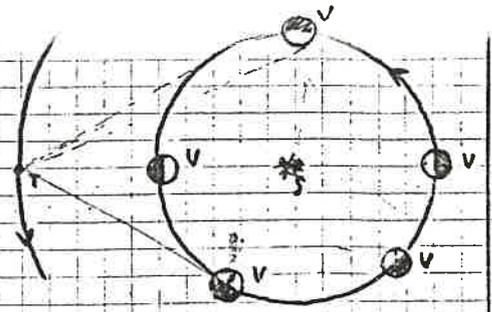
Kuhn, 223
Westfall 14

No sistema ptolomaico, para explicar que a distância angular α entre Vénus e o Sol seja sempre bastante pequena, descrevia-se o movimento do planeta graças a um epiciclo cujo centro se deslocava sobre o deferente de maneira a permanecer sempre alinhado com o Sol. Nesta condição, é geometricamente evidente que, da Terra, se vê iluminada uma fracção do disco de Vénus que só depende de posição do planeta sobre o epiciclo e não da posição do Sol; mais precisamente, essa fracção cresce com o valor do ângulo α , sendo nula quando $\alpha = 0$, isto é, nas duas posições em que a Terra, Vénus e o Sol estão alinhados, mas não podendo nunca atingir valores próximos de 1/2. O desacordo com as observações de Galileu é flagrante.



Numa perspectiva heliocêntrica, pelo contrário, tudo se torna maravilhosamente simples de entender. Me tade la esfera de Vénus, aquela que se encontra voltada para o Sol invisível durante o movimento circular do planeta, está constantemente iluminada, e o que se vê da Terra depende, como é evidente, da posição relativa desta. Consideremos, antes de mais, qual o aspecto que apresentará visto da Terra o planeta Vénus quando o ponto da sua trajetória onde ele se encontra. É deste logo evidente que se Vénus

e a Terra se encontram em oposição ao Sol, Vênus aparecerá como um disco brilhante mas de muito pequenas dimensões; à medida que Vênus se vai aproximando da Terra, as suas dimensões aparentes aumentam mas, simultaneamente, uma fração cada vez maior da sua superfície virá a obscurecer-se, e quando a



Terra e Vênus se encontram praticamente em conjunção (nunca há, de facto, nem conjunção nem oposição perfeita porque o plano das órbitas da Terra e de Vênus não coincide) Vênus surgirá apenas como um estreito "meniscado" brilhante mas de muito pequenas dimensões, o planeta estando então muito mais próximo da Terra. O ritmo das transformações do aspecto de Vênus será afectado pelo movimento da Terra mas não a sequência, e tudo isso concordava perfeitamente com as observações de Galileu.

(6)

Assim, à volta de 1610, em termos meramente científicos a vitória do heliocentrismo fica brava e definitivamente assegurada: Kepler demonstrara a simplicidade profunda da descrição teórica e as observações galileicas arruinaram os fundamentos da doutrina rival. Desnaturalmente, os platonistas imperitantes ganharam total apoio com a decisão da Igreja católica de condenar expensivamente as teses de Copérnico (1616), tentativa absurda de eliminar pela autoridade uma conclusão científica considerada incómoda e que não podia deixar de ter graves consequências. Mas antes de tratar esse ponto, temo de retornar a história de Kepler que interromperamos após a publicação da "Astronomia Nova", quando o esperava a surpresa de receber de Galileu um exemplar do "Sidereus Nuncius".

Imagina-se sem dificuldade o entusiasmo com que Kepler acolheu essa obra; o imperador Rodolfo II usou a sua influência para obter uma das lunetas de Galileu, a fim de que o seu astrónomo pessoal pudesse verificar tais sensacionais novidades, e este meteu-se diligentemente à obra confirmando tudo quanto ali se dizia. Kepler nada acrescentou às observações de Galileu, mas abordou um problema que este desprezara totalmente, a explicação física das capacidades da luneta, que muitos consideravam um intrínseco "mágico" criado das próprias imagens dos objectos observados. Ora compreender o funcionamento de uma luneta requeria afinal uma teoria da óptica geométrica, na qual a "Dioptrica" Kepleriana (1611) representou o primeiro esboço coerente.

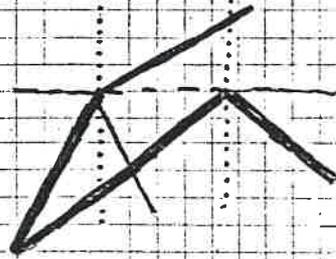
Pode afigurar-se estranho que Kepler tenha podido realizar um estudo quase correcto das propriedades das lentes, sem conhecer a lei de refração, cuja descoberta só será feita 20 anos mais tarde. É que toda a sua teoria se baseava numa hipótese muito simples (mas perfeitamente válida desde que se trate de ângulos suficientemente pequenos para que o seu seno se possa confundir com o do respectivo arco), a de que o seno d , definido como a diferença entre o ângulo de incidência i e o ângulo de refração r é proporcional a i , $\frac{d}{i} = s$, sendo s uma constante que só depende da natureza dos dois meios ópticos. Para o fazer in-vitro, que era o que usou o Sidereus,

A grande viagem - 7

Kepler trouva $n = \frac{1}{3}$ e é fácil verificar que isso corresponde aproximadamente à nossa fórmula $\frac{1}{2}$; teremos então, com efeito, $\frac{1}{n} \approx \frac{3}{2}$, isto é $\frac{d}{c} = \frac{1-n}{c} = 1 - \frac{n}{c} = 1 - \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$, o valor de Kepler. A partir daqui, Kepler pode calcular as distâncias focais de lentes biconvexas ou plano-convexas, e até bi-convexas desde que as duas faces tivessem o mesmo raio de curvatura.

Mas Kepler não se ficou por aqui. Concebeu para a luneta uma excelente ocular que será creditada pelo padre Scheiner, o adversário de Galileu na questão das manchas solares. Constatando que na passagem de um raio óptico mais grosso para outro menos grosso o desvio era sempre uma função crescente de i , perguntou-se o que aconteceria quando o raio luminoso efetuasse o percurso no sentido inverso e com um ângulo de incidência suficientemente grande θ , deste modo, foi capaz de identificar esse fenômeno ao qual chamamos hoje a **reflexão total**.

Kepler deu igualmente uma grande contribuição à teoria da visão, explicou ^{que as imagens se formam na retina, qual o} ~~caráter~~ natureza física da miopia e da hipermetropia e determinando, em consequência, qual o tipo de lente adequada para corrigir essas deficiências.



Após esta incursão no domínio da óptica, impunha-se a Kepler um retorno à astronomia o qual, aliás, se vai processar em condições difíceis. Com a morte de Rudolfo II, em 1612, teve de abandonar as funções de astrônomo imperial e de aceitar um posto muito mais modesto de matemático provincial na Austria, em Linz, cidade à qual nada o ligava. A sua solidão agravou-se ^{quando} ~~de logo a seguir~~ ^{de que} ~~foi~~ perdeu sucessivamente a mulher e o filho preferido, e ^{so} ~~foi~~ a creança não harmonia do cosmos que ~~estava em vias de desvendar~~ o ajudou a escapar ao desespero. Uma **mística pitagórica** cada vez mais exacerbada levou-o a procurar nas apenas as leis matemáticas que governam os astros mas, mais além, os **significos ocultos** do Deus geometra que criara um tal mundo.

Na **"Epitome Astronomice Copernicanae"** de 1617, o astrônomo retornou sob uma forma ~~de~~ ^{mais} ~~mais~~ ^{mais} perfeita os temas de "Astronomia Nova", quer dizer, a descrição de cada um dos movimentos planetários mas sabia que ainda não resolvera o problema fundamental de relação entre estes esses diversos movimentos, quer no que se refere às dimensões das trajetórias quer no que respeita aos tempos necessários para as percorrer. Sem abandonar a explicação pelo sólido perfeito a qual nunca deixou de atribuir um significado profundo, Kepler considerava que não fora suficientemente longe, tanto mais que as elipses tinham destruído os círculos.

Herético neste ponto, o pitagórico Kepler empreendeu então o estudo das harmonias celestes não a partir de distâncias mas de velocidades, das velocidades angulares dos diversos planetas no afélio e no perélio, e assim atribuiu a cada um dos astros umas tantas notas que, no seu conjunto, deveriam alcançar a **polifonia celeste**, ^{na} música para o ouvido mas para a inteligência. E de novo se fez parte observativamente, a questão de relacionar esta partitura com a arquitetura do sistema solar. Diz-se

A grande viagem - 8

escreveram ao seu amigo Castelli e à grã-duquesa da Toscana para serem tomadas públicas, reivindicaram a liberdade do pensamento científico, recusaram a submissão da ciência e da filosofia à teologia e iam ao ponto de afirmar que as Escrituras não deviam ser interpretadas literalmente. Eram mais achas para uma fogueira que o padre Le Nini acendeu quando, em Fevereiro de 1615, denunciou oficialmente o fisico à Inquisição.

Preocupado, Galileu voltou a Roma no final do ano supondo que ainda podia escapar um processo pelo delito. Sob a impulsão do cardeal Belarmino, o maior responsável pelo martírio de Bruno, o Santo Ofício deliberou que chegara a altura de meter Galileu na ordem: sob pena de prisão, ele devia negar as teses da imobilidade do Sol e do movimento da Terra, comprometendo-se a deixar de as ensinar ou defender. Convocado perante Belarmino em Fevereiro de 1616, o mestre sujeitou-se a tudo quanto lhe exigiam.

Embora o processo e a abjuração não tivessem sido tomados públicos, corriam rumores de que Galileu foi condenado a penitências e, para evitar esse julgamento desonroso para um bom católico, de lá conseguiu obter graças ao ^{hora} Médico ^{antecâmara} do papa a qual, segundo veio dizer, o recebeu muito bem; depois, o próprio Belarmino ^{recompôs} ^{tal} "culúcia" da abjuração e das penitências, afirmando que apenas fora notificação da doutrina oficial da Igreja. Com efeito, a linha romana tinha-se enfim decidido a tomar uma posição de junco, e um decreto oficial de 5 de Março determinava que "a doutrina de Pitágoras, falsa e contrária à divina Escritura, sobre o movimento da Terra e a imobilidade do Sol, também ensinada por Nicolau Copérnico, ia contra a verdade do catolicismo. O "De Revolutionibus" entrava no "índice" de livros proibidos.

De regresso a Florença, amargo e cansado, Galileu retomou os seus trabalhos astronómicos, inventando um método de determinação da longitude baseado na observação ^{do} ~~das~~ ^{de} satélites de Júpiter ^{que} ~~ele~~ ^{foi} descoberto. Também se de ~~uma~~ ^{questão} da maior importância para a navegação, pela qual o fisico se interessava tanto mais quando esperava tirar dela ^{obter assim boas} substâncias preciosas monetárias. Mas as negociações com a Espanha, que ainda era o potência marítima dominante, prolongar-se-ão durante quase vinte anos sem nenhum resultado, pois um método fundado nas posições de estas invulvas a olho nu e que, para mais, se afigurava ter algo de bête-noir, não merecia confiança a rígida corte de Madrid.

Entretanto, os amigos de Galileu tinham dificuldade em mantê-lo tranquilo. Em 1618, ~~quando~~ ^{três} cometas permaneceram visíveis durante vários meses, ^{reacendendo a discussão} ~~reacendendo-se a polémica~~ sobre se se tratava de corpos do mundo sub-lunar e embora Galileu, doente, não tivesse podido realizar as observações indispensáveis, ^{foi} ~~se~~ envolvido na polémica pelas insinuações dos jesuítas, e assim foi levado a emprender a redacção de uma resposta cuidadosa que se transformaria num livro audacioso "Il Saggiatore" (o ensaísta). Felizmente, a atmosfera ideológica tinha-se entretanto desanimado, com a morte de Paulo V ^o ~~cujo~~ ^{do} ~~terível~~ Belarmino, a eleição do papa de Gregório XIV, ~~anunciava um liberalismo~~ ^o ~~refrescado~~ ^{por} influência inerecente do cardeal Matteo Barberini, um florentino humanista, velho amigo e protector de Galileu.

"Il Saggiatore", ^{trifletto} ~~uma~~ ^{polémica} sobre a natureza dos cometas e tudo quanto lhe estava subjacente, recebeu a honra que para ser publicado (1623) e, distinguí significativamente, pôde até ser dedicado ao papa a quem foi solenemente entregue pelo embaixador de Florença. É que entretanto Gregório XIV morreu e era o nome de Urbano VIII, o novo

pontífice fria o referido cardinal Barberini, candidato da ala mais liberal da Cúria. Entusiasmado, Galileu voltou a Roma, mas embora tivesse sido acolhido pelo papa com grandes honras, quando lhe solicitou a renovação do decreto condenando o heliocentrismo só ouviu falar de prudência, da necessidade de muita ponderação, de questões de oportunidade. Se, em privado, o chefe da Igreja considerava a doutrina de Copérnico temerária mas não herética, em público nada se alterava, e Galileu considerou que era altura de forçar a mudança.

8.

Para começar, preparou uma resposta a Francesco Ingoli, nessa época secretário da Congregação para a Propaganda da Fé, mas que logo publicara um opúsculo justificativo do decreto que condenava as teses de Copérnico. Embora tartadamente, vinha mostrar que, do ponto de vista científico, o argumento exposto por Ingoli não valiam nada, isto sem prejuízo de dever os cristãos de acatarem as decisões do Santo Ofício em matéria teológica. Como o texto era moderado, o papa autorizou a sua publicação, refusando assim a crítica de Galileu de que tinha adoptado uma boa tática.

Decidiu então a realização de um projecto muito mais ornado e ambicioso, a escrita de uma obra onde qualquer homem cultivado pudesse compreender a superioridade da cosmologia de Copérnico sobre a de Ptolomeu. Foi um trabalho longo, porque teve de o recommençar várias vezes até encontrar a forma adequada aos seus objectivos e o texto apresentar-se-lhe exprime como um diálogo de estilo platónico entre três interlocutores: Simplicio, que exprime os argumentos tradicionais dos escolásticos, Salviati, o arauto do espírito novo defensor do heliocentrismo, enfim Sagredo, homem de mentalidade aberta a quem os dois outros procuram convencer. Neste "Diálogo intorno ai due massimi sistemi del mondo", as preocupações didácticas sobrepõem-se a qualquer propósito de dar relevo à novidade da argumentação científica que lhes contém.

Em Março de 1630, já o "Diálogo" estava pronto, Galileu foi a Roma para aí obter a indispensável autorização para o publicar, e a influência de amigos comuns ajudou a que o Mestre do Sano Palácio manifestasse disposições favoráveis. Contudo, as notícias que iam chegando a Florença falavam de resistências, e, mais tarde, da necessidade de introduzir alterações no texto. Só com muitas pressões do embaixador florentino se acabou por chegar a um compromisso: a obra sairia mas com um preâmbulo e um conclusão escritos por Roma. Em condições muito ambíguas, o livro acabou por ser posto à venda em Fevereiro de 1632, obtendo um sucesso brilhante e imediato.

Era inevitável que os ortodoxos se mostrassem descontentes, começou a sentir um mal-estar difuso e foi aberto um inquérito confidencial para determinar as responsabilidades na autorização concedida. Quando o pontífice nomeou uma comissão de teólogos para analisar a obra, todos homens sem competência filosófica e científica sobre as teses literais, e as tentativas de intervenção do grão-duque da Toscana foram repelidas, os amigos de Galileu só puderam aconselhar que se evitasse qual iniciativa imprudente que agravasse mais a situação, pois se dizia estar o próprio papa muito encolerizado. Na verdade, assim era. O cardinal humanista que apreciava Galileu era agora o chefe de uma Igreja com os seus problemas doutrinais e tinha de reger nessa qualidade; após as manifestações de resistência que deu ao papa, Urbano VIII entendia que este desprezara as recomendações de prudência recebidas e que, de algum modo, abusara da sua boa fé. As pessoas políticas do rei de Espanha, cujo embaixador acusava o papa de favorecer a heresia por excesso de tolerância, eram ainda mais eficazes porque se estava em plena guerra da Trini-

Tipografia de Feurs para o "Prémium"

A grande viagem - 9

Bentivoglio, antipapa de Calisto em Pistoia, que muito o admirava, era o presidente do Tribunal

na Anon, durante a qual o pontífice teria assumido-se como o paladino incólume do catolicismo. Em setembro desse ano, o processo foi submetido ao Tribunal do Santo Ofício e, para prevenir qualquer surpresa, o papa chegou como inquisitor o cardeal Antônio Barberini, seu irmão. O resultado estava decidido, em termos de ser sancionado ao que se supunha ser o interesse de uma instituição.

1633

Intimado a apresentar-se em Roma, Galileu tentou adiar o inevitável excusando-se com a velhice e a doença, mas teve de acabar por obedecer e, em Abril, os interrogatórios começaram. A defesa do velho mestre não foi fortíssima muito hábil, tendo de facto que o "Diálogo" não representava uma apologia do heliocentrismo, afirmava-se fácil de refutar, e invocando o castigo de Belarmino após o processo de 1616, como se aceitasse que a inquisição não utilizaria os seus arquiões. Qual seria, aliás a argumentação conveniente numa situação tão insustentável? O Tribunal deliberou finalmente que Galileu se tornara suspeito de heresia por ter defendido a doutrina falsa e contrária às santas Escrituras da imobilidade do Sol no centro do mundo e do movimento da Terra; contudo, as graves penas em que encorria ser-lhe-iam perdoadas se aceitasse abjurar publicamente de tais erros. E nesse mesmo dia, a 22 de Julho de 1633, foi forçado a ajoelhar-se como um criminoso na nave da igreja de Santa Maria, declarando-se arrependido de todos os seus crimes e pecados, e comprometendo-se também a denunciar ao Santo Ofício os hereges que conhecesse.

Enviado transmissões de livros italianos a 30 de Junho

Desta vez, a Cúria romana jurou o necessário para que a sentença e a abjuração fossem divulgadas em toda a Europa. Os tradicionalistas, exultantes, pediam agora mostrar-se na autoridade da Igreja para rejeitar em bloco toda a ciência nova e afirmar a preeminência da eclesiástica. Temerosos, os partidários de Galileu calculavam-se, desolados de ver que ele tinha maculado a sua imagem. E quando, em Julho, o condenado chegou a Siena onde ia servir como prisioneiro no palácio arcebispal, viu-se que a morte seria uma misericórdia para aquele velho espiritualmente torturado.

Julho a Dezembro

Piccolomini

Contudo, o brando prelado de Siena, em vez de se considerar como uma espécie de carcereiro, acolheu Galileu como um amigo por quem se fez muita atenção, até ao ponto de encorajar o diálogo físico e astronómico. E um papa e nove cardeais quase tinham destruído Galileu, mas o bispo deu-lhe a coragem para recomeçar a viver. No fim de ano, ao ser-lhe fixada residência definitiva na sua casa de Arcetri, no arredores de Florença, nem a solidão em que se encontrava, nem a morte de uma filha muito amada o impediram de continuar a trabalhar. Graças a uma correspondência mais ou menos clandestina devia que a sua influência e o seu prestígio científicos mesmo fora da Itália eram cada vez maiores, e a consciência de que o seu esforço e o seu sacrifício não tinham sido em vão deu-lhe coragem para esse derradeiro esforço. Ao perder a vista, em 1639, já concluiu esta grande obra final iniciada em Siena e, após ter sido recusado por muitos editores com medo de inquisição, os "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze" foram finalmente editados pelos Elsevier de Leyden em 1638.

Correspondência com Bossenti, Pezirec e visita de Hobbes em 1635. Tradução das "Mecânicas" por Merienne em 1634

Os "Discorsi" repunham em cena os mesmos personagens que tinham figurado no "Diálogo", mas também agora para discutir essencialmente problemas de mecânica, em termos mais profundos do que anteriormente e sem voltar agora o recurso à apofelagem matemática. Para nós, hoje, este livro escrito em circunstâncias tão dramáticas é a "opus magna" de Galileu, aquela onde se mostram mais claramente a riqueza inovadora do seu pensamento científico e a ruptura epistemológica que lhe estava subjacente. Não podemos deixar de retomar estas temas.

Entretanto, quando Galileu completamente cego e, com enorme transtorno o delegado florentino de inquisição, que a co

beça mais virada para a obra que para o cálculo matemático"; o Santo Ofício acendeu em 1639 a que um dos seus bispos fosse de a viver com ele. Essa honra cabia ao jovem Viviani, então com 17 anos, o qual seria o autor da primeira biografia de Galileu, na Torricelli e Castelli também gozaram por um tempo desse privilégio. Lucido, o mestre ditava aos jovens longas cartas sobre questões científicas e instruiu-o pacientemente até ao dia da sua morte, a 2 de Janeiro de 1642.

O corpo foi depositado na Igreja de Santa Croce onde o duque de Toscana, honra lhe seja feita, lhe pretendia erguer um monumento funéreo, mas o papado opôs-se a que a memória de um réprobo recebesse tal homenagem. Também quando um século após que se pudesse erguer em mármore, aliás triste e feio, numa boa igreja de Santa Croce em Florença, onde também repousam Maquiavel, Miguel Ângelo, Rossini e tantos outros. De facto, o velho mestre fustigado, a sua lição imortal, continuava viva e bem viva no espírito de todos nós, no cerne da cultura moderna.

(1734)
Obras autorizadas
sem publicadas em
1822

9:

A mecânica galileica foi o fruto da meditação durante quase uma vida em que o pensamento do seu criador evoluiu profundamente. Seria decerto interessante e instructivo tentar reconstituir essa trajetória intelectual, mas essa ambição seria excessiva e leve nos limites - no aqui à análise de alguns tópicos que se afiguram mais significativos.

Percurso
intelectual
difícil?

Antes de mais, convém assinalar a profunda influência da obra de Arquimedes sobre Galileu, cuja fama de investigador já pervinhava dessa fonte em anos de aprendizagem em Florença. Segundo a testemunha de Viviani, este caso digno de crédito, ao ser nomeado professor em Pisa já ele estava virado para as questões da dinâmica, crente no velho aforismo de que "compreender o movimento é compreender a natureza", e perguntar-se-á de que modo a física arquimédica inteiramente consagrada aos problemas de equilíbrio, o poderia continuar a inspirar. A verdade é que essa influência se exercia a um nível mais profundo, e tal como Arquimedes fundara a estática sobre leis expressas em termos matemáticos, Galileu propunha-se aplicar a dinâmica em termos análogos, e esse propósito de conhecer matematicamente o movimento nunca mais será abandonado.

Arquimedes

↓
mistérios

Nesta perspectiva, não era somente a dinâmica aristotélica que Galileu tinha de recusar, era também a metafísica que lhe estava subjacente. Na essência do aristotelismo encontra-se uma descrição da natureza de índole essencialmente qualitativa, porque, embora Aristóteles prezasse as matemáticas, na sua filosofia nem tudo se podia matematizar, pois as diversas categorias da "qualidade" não tinham grandeza ou, numa linguagem mais moderna, não eram susceptíveis de serem atribuídas. Guiado pelo exemplo da construção arquimédica, o físico afastava resolutamente na possibilidade de descrever o movimento em termos de certas "quantidades".

metafísica

"qualidade"

↓
quantidade

No programa de construção de uma dinâmica "arquimédica" Galileu tivera um precursor que obtivera alguns resultados interessante e, assim, em natural que as suas primeiras investigações sobre o movimento se inspirassem na física de Benedetti. Nesta encounter nasceu para recusar a partida a distinção fundamental no aristotelismo entre corpo "pesado" e "ligeiro"; todos os corpos são graves e caem naturalmente, e se alguns mostram tendência a subir isso só se deve (como Arquimedes demonstrara) ao facto de se encontrarem mergulhados num fluido de densidade superior à sua, a impulsão tornando-se superior ao peso e criando esse movimento excecional.

Osilio Ricci

↓
Benedetti

↓
pesado + leve

4
impulsão

Para descrever o movimento dos graves de uma forma precisa, Galileu tentou, como Benedetti já tinha tentado, matematizar a doutrina do "ímpetu", e pelas mesmas razões também se viu obrigado a fazer-se, tal conceito sendo demasiado ambíguo para se prestar a essa operação. Nos anos de Pisa, quanto ainda se se tinha libertado parcialmente do quadro

1 - tentativas

↓
matematiza

↓
ímpetus

A grande viagem - 10

tradicional de abordagem dos problemas, discutia largamente se o "impetus" seria uma qualidade "natural" do corpo de que, portanto, dependeria a persistência nele, ou se se trataria apenas de uma qualidade "substantial", e então o corpo se iria libertando dessa "força impressa". Concluiu, de acordo aliás com a tradição dos técnicos anteriores, que o "impetus" seria algo que o corpo se vê forçado a suportar, o que excluía a ideia de sua persistência intrínseca, se de tudo pela ação do meio exterior; não se contentando com a analogia clássica de um corpo aquecido que amolece e finalmente, Galileu apresenta outra imagem que lhe parece mais sugestiva, a de "qualidade sonora" de um sino fencado cujo som enriquece gradualmente até se extinguir por si mesmo.

Carloano e outros tinham defendido a tese da imutabilidade de "impetus" na qual se tentou por um período de lei da inércia, e pode pensar-se assim que aquela conclusão de Galileu lhe dificultou o salto para a nova hipótese. Mas a gênese das ideias é muito complicada; como, no quadro conceptual onde ele se movia, a sua resposta era correcta, isso ajudou-o a abandonar a própria doutrina do "impetus", embora não tivesse ido para lá mais além. Foi por outra via que ele chegou à lei da inércia, isto na medida em que se pode dizer que ele lá chegou, e como o conceito de "impetus" se revelava incompatível com a nova teorização, havia que estar preparado para o rejeitar. O que Galileu deturcou foi aliás o conceito e não a palavra, que Newton ainda utilizaria, continuando a falar do "impetus" embora em um significado que cada vez se aproximava menos do dos seus predecessores.

40.

Se não se pode ~~ser incorrecto~~ afirmar que Galileu chegou ao conceito de lei da inércia porque era copernicano, ~~mas~~ ^{então} há nessa atribuição uma fonte de verdade ~~especialmente relevante~~ ^{de facto, não houve sucessivamente} e ~~por isso~~ ^{mas} ~~grandezas~~ ^{grandezas} ~~mutuamente~~ ^{mutuamente} ~~independentes~~ ^{independentes}, na cosmologia e na mecânica, ~~mas~~ ^{que} ~~eram~~ ^{eram} ~~então~~ ^{então} ~~ligadas~~ ^{ligadas} que ~~eram~~ ^{eram} ~~consideradas~~ ^{consideradas} por ocasião uma única realidade, que ~~se~~ ^{se} ~~desenvolve~~ ^{desenvolve} ~~no~~ ^{no} ~~céu~~ ^{no} ~~com~~ ^{com} ~~Copérnico~~ ^{Copérnico}, ~~desenvolve~~ ^{desenvolve} ~~à~~ ^à ~~Terra~~ ^{Terra} ~~com~~ ^{com} ~~Galileu~~ ^{Galileu} e ~~vai~~ ^{vai} ~~ao~~ ^{ao} ~~céu~~ ^{ao} ~~com~~ ^{com} ~~Newton~~ ^{Newton}. Examinemos, por ora, as consequências ^{físicas} ~~que~~ ^{que} ~~se~~ ^{se} ~~derivam~~ ^{derivam} ~~no~~ ^{no} ~~tempo~~ ^{tempo} ~~de~~ ^{de} ~~Galileu~~ ^{de} ~~da~~ ^{da} ~~hipótese~~ ^{hipótese} ~~do~~ ^{do} ~~heliocentrismo~~ ^{heliocentrismo}.

Como Aristóteles ^{em} ~~o~~ ^o ~~heliocentrismo~~ ^{heliocentrismo}, quando hoje estudamos os movimentos dos corpos fazemo-lo em relação à Terra, e isso naturalmente porque é ~~o~~ ^o ~~referencial~~ ^{referencial} ~~que~~ ^{que} ~~observamos~~ ^{observamos} ~~e~~ ^e ~~definimos~~ ^{definimos}. ^{mas} ~~Galileu~~ ^{Galileu} ~~na~~ ^{na} ~~física~~ ^{física} ~~aristotélica~~ ^{aristotélica}, a Terra era também o centro imóvel do Cosmos, e a descrição dos movimentos em relação ~~ao~~ ^{ao} ~~mesmo~~ ^{mesmo} ~~planeta~~ ^{planeta} ~~impunha~~ ^{impunha} ~~se~~ ^{se} ~~igualmente~~ ^{igualmente} ~~por~~ ^{por} ~~razões~~ ^{razões} ~~de~~ ^{de} ~~princípio~~ ^{princípio}: a Terra era o referencial fisicamente privilegiado, e numa esfera finita e rodeada ^{por} ~~por~~ ~~o~~ ^o ~~centro~~ ^{centro} ~~do~~ ^{do} ~~Cosmos~~ ^{Cosmos} permitia atribuir a expressões como "para cima" ou "para baixo" um significado absoluto. Uma parte das objecções dos escolásticos à ideia do movimento ^{em} ~~em~~ ^{em} ~~relação~~ ^{relação} ~~à~~ ^à ~~Terra~~ ^{Terra} ~~derivava~~ ^{derivava} ~~justamente~~ ^{justamente} ~~do~~ ^{do} ~~facto~~ ^{facto} ~~de~~ ^{de} ~~física~~ ^{física} ~~na~~ ^{na} ~~tese~~ ^{tese} ~~de~~ ^{de} ~~Aristóteles~~ ^{Aristóteles}, ~~que~~ ^{que} ~~era~~ ^{era} ~~concebida~~ ^{concebida} ~~para~~ ^{para} ~~uma~~ ^{uma} ~~cosmologia~~ ^{cosmologia} ~~geocêntrica~~ ^{geocêntrica}, e ~~era~~ ^{era} ~~sustentada~~ ^{sustentada} ~~com~~ ^{com} ~~uma~~ ^{uma} ~~outra~~ ^{outra} ~~lógica~~ ^{lógica} ~~que~~ ^{que} ~~se~~ ^{se} ~~considerava~~ ^{considerava} ~~o~~ ^o ~~Sol~~ ^{Sol} ~~imóvel~~ ^{imóvel} ~~no~~ ^{no} ~~centro~~ ^{centro} ~~do~~ ^{do} ~~Cosmos~~ ^{Cosmos}, ~~de~~ ^{de} ~~se~~ ^{se} ~~conferia~~ ^{conferia} ~~o~~ ^o ~~privilegio~~ ^{privilegio} ~~de~~ ^{de} ~~referencial~~ ^{referencial} ~~físico~~ ^{físico} ~~à~~ ^à ~~Terra~~ ^{Terra}; assim se um canhão imprimisse a um projectil um "impetus" capaz de o lançar a uma determinada distância, esta distância seria considerada em relação ao Sol imóvel, e bastaria o movimento de rotação ^{sobre si próprio} ~~da~~ ^{da} ~~Terra~~ ^{Terra} ~~para~~ ^{para} ~~que~~ ^{que} ~~o~~ ^o ~~projectil~~ ^{projectil} ~~desse~~ ^{desse} ~~por~~ ^{por} ~~distâncias~~ ^{distâncias} ~~diferentes~~ ^{diferentes} ~~quando~~ ^{quando} ~~fosse~~ ^{fosse} ~~lançado~~ ^{lançado} ~~para~~ ^{para} ~~ocidente~~ ^{ocidente} ~~ou~~ ^{ou} ~~para~~ ^{para} ~~oriental~~ ^{oriental}.

Para o copernicano Galileu, se o mundo tinha um centro seria efectivamente o Sol. Mas se se reconhece ao Sol

impetus = qualidade natural (persistente) / qualidade (substantial) (esgotável)

pr. Galileu

impetus

inércia

Relações cosmológicas

Física

Aspectos do movimento em relação à Terra

Um estado privilegiado achava-se incapaz de responder à objecção técnica do tipo do câmbio ou de explicar a observação ainda mais simples da queda de um grave na vertical. Como já vimos anterior, a única escapatória e estas graves objecções estava numa perspectiva da relatividade do movimento: embora o Sol ocupasse a posição central, não por isso se lhe deveria outorgar no quadro da mecânica o privilégio que o aristotelismo concedia à Terra. Em última análise, o movimento de um corpo é sempre definido em relação a outro corpo e, muito bem, até se podia entender que para um observador terrestre o movimento de um corpo em relação à Terra se afigurasse idêntico ao próprio movimento da Terra em relação ao Sol.

Est. relativo

Barco

Retornemos, com Galileu, o exemplo simples do barco deslocando-se com velocidade constante num lago sem ondas e de cujo mastro cai uma pedra. Para Galileu é evidente que essa pedra cairá ao longo do mastro como se o barco estivesse imóvel e, em bon lógica, a moça na queda será vista da margem descrevendo uma curva; analogamente, se a pedra cair de um mastro colocado na margem, não deixará também de cair ao longo do mastro, e neste caso é do barco que ela se afigura descrever uma curva. Ora, se as descrições de um mesmo movimento nos dois referenciais, o barco e a margem, são diferentes, mas igualmente válidas, tal conclusão leva muito longe.



Ela implica que o movimento deixa de ser uma propriedade intrínseca do corpo (como aconteceria se houvesse um referencial privilegiado) para se transformar apenas numa propriedade-relação com outros corpos, tal como se vê, por exemplo, no exemplo precedente. Facto da pedra que cai for duas coisas diferentes em relação ao barco e em relação à margem. Mas até se debate a distinção, radical no aristotelismo, entre movimento e repouso, pois um objecto em repouso ou movido com velocidade constante em relação à margem e vice-versa; ora se o repouso é um estado, quer dizer uma situação que se perpetua sem necessidade de qualquer acção exterior, então o movimento (ou outro movimento) também deverá poder ser um "estado", algo que se pode manter indefinidamente sem que haja acção de nenhum motor. A ~~teoria~~ ^{aceitação} da relatividade do movimento implicava, assim, a ideia de um movimento sem motor, e as fontes com a doutrina peripatética estavam inevitavelmente entaladas. Havia que passear no frente e contrariar uma outra dinâmica.

movimento
abstracção mais de
ao repouso
movimento
estados

Ora a queda livre da pedra do mastro do navio, um movimento a que os aristotélicos chamariam "natural", possui vista da margem uma trajetória curva a qual corresponde outro movimento que, sem ser já "natural", também não ~~é~~ ^é ~~considerado~~ ^é ~~por~~ ^é ~~violentos~~ ^{violentos}, ~~mas~~ ^{isto que} a pedra lá ia caído. A comparação de movimentos "naturais" e "violentos" era uma heresia quase inenunciável que a balística popularizadora e Galileu perguntar-se-ia se eles seriam realmente incompatíveis: o grave que sobe na vertical sob o efeito da "violência" rápida inicialmente acaba sempre por adquirir um movimento "natural" de queda e, a seu modo, em péntulo não faz outra coisa. E se retornarmos o caso da pedra caída do mastro do navio, para os escolásticos a causa do movimento "violento" que ela tem no referencial da margem se poderia ser um "impetus" que lhe fora comunicado, explicação que já se tornara insustentável para Galileu. As suas análises diziam-lhe que a "força impetuosa" se dissipa espontaneamente, enquanto aqui esse pretérito movimento "violento" da pedra não se pode gastar, é "um estado", pois tra-
za somente que no plano horizontal a pedra permanece em repouso ^{em movimento} ~~em~~ movimento uniforme.

movs. naturais e movs. violentos

referencial
barco
movs. natural
mas
f. terra
movs. violentos

Assim, no âmbito da ~~nova~~ ^{nova} concepção de movimento como estado-relação, Galileu já não necessitava de supor que uma "violência" fura explicar as suas trajetórias, a qual vista do barco era de pura queda, e vista

A grande viagem - 11

do barco e, vista da margem, resultava da composição dessa queda em o movimento-orbita horizontal, rectilíneo e uniforme
possuía por se encontrar no barco. A hipótese aristotélica de um "impetus" aplicado à pedra era claramente insustentável
com esta interpretação tão coerentemente satisfatória e, por conseguinte, o "impetus" foi rejeitado e, com ele, rejeitada
também a categoria de movimentos violentos.

Eliminando o conceito de "impetus" como causa de movimento, Galileu continuava todavia a utilizar ^{a mesma} palavra em
boa com outro significado. O "impetus" ^{deixava agora de} ~~passar-se~~ ^{ser uma} ~~propriedade~~ ^{causa para tornar} característica do movimento, uma propriedade
relativa porque o movimento é essencialmente relativo, e que ao contrário do "impetus" - causa ~~fora~~ ^{fora} ~~fora~~ ^{fora}
ser definido como uma quantidade pelo produto do peso do corpo pela sua velocidade; nesta nova concepção exprime
simplesmente certas características do movimento-estado relativos adquiridas a título permanente; para retomar ainda mais
uma vez o exemplo da pedra, relativamente ao barco ela parte do cimo do mastro com uma velocidade nula, logo com um
"impetus" nulo, e há a sua queda na vertical, mas já em relação à margem da terra com uma velocidade inicial v (a velo-
cidade do barco), portanto um "impetus" não nulo por que permanece inalterável e, confrontado-se com a queda vertical in-
mente aos corpos graves, gera a trajetória curvilínea observada neste referencial.

A objecção dos aristotélicos ao heliocentrismo que se fundamentava em argumentos de natureza física está agora completa-
mente ultrapassada, incluindo até a conclusão com algo de paradoxal. Assim, no problema clássico do tiro de canhão, o
projectil lança-se sob o efeito de um certo "impetus" p , sempre o mesmo no referencial Terra qualquer que fosse a direcção escolhida.
Pois neste referencial o canhão encontra-se imóvel, e o alcance do tiro não depende do disparo ser para leste ou para oeste.
Mas na perspectiva do referencial Sol, no qual o canhão possui a velocidade v' de própria Terra, o projectil lançado para
leste partilha com um "impetus" $p(v+v')$ e irá decerir mais longe do que se for projectado para oeste com o "impetus"
 $p(v-v')$. Existe realmente uma assimetria, mas enquanto os aristotélicos a consideravam observável na Terra, a
física galileiana supõe essa possibilidade de observação para o referencial Sol.

III. Uma questão de Diálogo

Privilegiando o referencial Terra por razões meramente circunstanciais, Galileu constatava que aí o movi-
mento de um corpo era-lhe em geral comunicado por outro corpo que já o possuía, havendo pois uma espécie
de conservação do movimento. Todavia, a queda dos corpos surgia-lhe como uma notabilíssima excepção a esta regra, visto que
nem tal processo havia obviamente origens de movimento. Galileu está ciente da sua ignorância quanto à razão de ser
da gravidade, e, numa passagem célebre do "Diálogo", Simplicio é advertido de que falar do peso, da gravidade, da ten-
dência para o centro ou de tendência para baixo exprime apenas o reconhecimento de um facto, o que não constitui
uma explicação. Mas nem por isso se podia ignorar a constatação empírica de todos os corpos serem graves, e como
os seus movimentos tinham de sofrer sempre a influência dessa acção gravítica, seria impossível desenvolver matematica-
mente o movimento de um corpo - o movimento de um grave - sem conhecer previamente como ele se comporta sob a acção
do seu próprio peso. Daí o interesse que Galileu atribuiu à investigação da lei da queda dos corpos, cujo conhecimento
se lhe afigurava indispensável para determinar, por exemplo, a trajetória de uma bala de canhão, um problema
tão intrigante nessa época.

e faz a descrição matemática dos outros movimentos de queda de destes!

→ impetus
movimento
impetus
impetus = p v
Objecções
dos aristotélicos
ao heliocentrismo
resumidas
Moss. f. para de
este de Q. do
do

peso ou
gravidade
considera-se de
como um
facto
não explicável
movimento
de que de
um + impetus
q. não era
sensível
no outro
corpo

No tempo de Pisa, quando ainda era semi-aristotélico, inventara uma teoria curiosa para explicar a aceleração durante a queda; admitindo a proporcionalidade entre a velocidade e a força, como esta era o peso constante não podia ser responsável pelo aumento da velocidade, o qual resultaria do deslize na queda de uma certa "ligeireza" adquirida pelo corpo ao subir para o lugar de onde caía. Mais tarde, em Pádua, quando já começara a aproximar o conceito de movimento-etado e a entender que um movimento se podia processar sem motor, já era capaz de admitir que o peso constante podia fazer variar a velocidade. Qual seria então a lei da queda? Ao contrário do que sugereu muitos autores, ele descobriu-a sem recorrer à experiência.

Galileu admitia a verdade que essa lei deve ser tão simples quanto possível porque a natureza age com simplicidade, e a que de mais simples lhe ocorreu foi supor um aumento da velocidade proporcional à distância percorrida, hipótese tão natural que Descartes também a introduziu em circunstâncias análogas. Mas Galileu apercebeu-se de que com esta lei $v = at$, um corpo que estivesse imóvel não se pedia em movimento, e isso levou-o a substituí-la por outra quase tão simples — a de um aumento da velocidade proporcional ao tempo, $v = at$. Ora, sendo assim, a regra de Meton ou de Dnesmo (segundo a qual o espaço percorrido em qualquer intervalo de tempo é o mesmo que o de um móvel deslocando-se com a velocidade constante $\frac{v}{2}$) permitia-lhe calcular facilmente a lei dos espaços correspondente: seria $l = v't$, e com $v' = \frac{v}{2} = \frac{at}{2}$, obtinha-se logo $l = \frac{at}{2} \cdot t = \frac{at^2}{2}$. Galileu ficou encantado com estas conclusões, as quais na sua linguagem significavam que, em instantes sucessivos, a velocidade aumenta como a sucessão dos números ímpares enquanto os espaços percorridos crescem como a sucessão dos números ímpares.



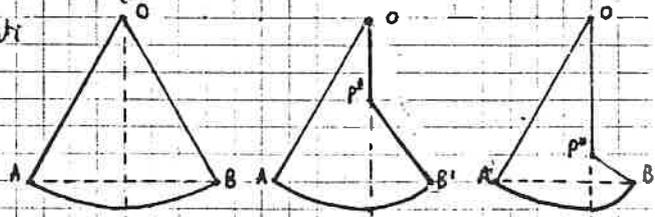
Apesar de tudo, para agudos espíritos que não se contentaram com o argumento da simplicidade, havia que esboçar um método de verificação experimental da validade destas leis, e Salviati-Galileu propôs que numa longa tábua de uns seis metros de comprimento se escava um sulco com as dimensões de um dedo, o qual seria revestido de pergaminho lustroso para diminuir o atrito; colocada a tábua segundo um certo ângulo com a horizontal, um bola de bronze polida iria deslizar pelo sulco, retirando-se os tempos necessários para que ela percorra quer toda a tábua, quer $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{9}$ ou $\frac{1}{16}$ do seu comprimento, e verificou-se-a então que esses tempos se reduzem a $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ do tempo inicial isto qualquer que seja a inclinação da tábua. Há boas razões para acreditar que Galileu se tivesse dado ao trabalho de realizar ele próprio esta experiência, tão confiante ele estava na exactidão das duas leis. Em todo o caso, alguma coisa se evidencia que o recurso ao plano inclinado era apenas uma maneira de diminuir a aceleração do movimento, de modo a facilitar as observações.

Então, um tal dispositivo presupunha obviamente que o movimento no plano inclinado era da mesma natureza que o movimento de queda livre, e Galileu sabia que era assim. Sabia até que um corpo lançado de uma certa altura adquire a mesma velocidade quer caia em queda livre quer deslize ao longo de um plano com uma inclinação qualquer. E sabia-o porque o deduzira de uma espécie de princípio de reversibilidade do movimento: um grave que desce um plano inclinado de altura h e adquire assim um velocidade v deverá ser capaz de subir qualquer outro plano inclinado até atingir essa mesma altura h , porque, se assim não fosse e o móvel parasse a uma altura $h' \neq h$, fê-lo-íamos partir do ponto de menor altura para o voltar atingir o ponto de maior altura e, repetindo esta operação, elevá-lo indefinidamente em virtude do seu próprio peso, conclusão inaceitável porque o peso só pode aproximar o corpo do "centro das coisas graves", o centro da Terra.

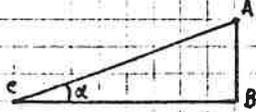
Qual
 Menor a
 seu
 queda
 Experimento
 qual?
 $(v = at)$
 $\frac{dl}{dt} = at \Rightarrow l = at^2$
 $l=0$ para $t=0$
 $l=0$ $h=0 \Rightarrow l=0$
 Ynguet
 $(v = at)$
 $ad = l =$
 $= \frac{at}{2} \cdot t$
 mas $v = at$
 $= 0 \left(\frac{1}{2} at^2 \right)$
 Método
 a área
 inscrita
 plano
 medi
 arado

A grande viagem - 12

Para Galileu, o seu princípio de conservação do momento segundo a vertical manifestava-se com clareza no comportamento das oscilações pendulares, para ele afinal equivalentes à subida e descida de uma sucessão de planos com inclinações ligeiramente diferentes. E, com esse fito, subviati propôs ao "diálogo" uma experiência convincente: se um pêndulo constituído por uma bola suspensa de um fio oscila paralelamente a um muro, a bola partindo do ponto A alcança o ponto B à mesma altura que A; todavia, se anavermos na parede, no plano de simetria do pêndulo um prego saliente (P' ou P'', por exemplo), o movimento da bola será alterado em metade do seu percurso, mas sem que os pontos (B' ou B'') agora alcançados deixem de situar-se à altura de A.



Metodologicamente, Galileu caracterizou o movimento de queda dos corpos, queda livre ou ao longo dos planos inclinados, pelo valor constante das suas acelerações, e o conceito de aceleração traduziu-se por um enriquecimento formal que se tornou indispensável; o próprio Galileu ilustrará a sua fecundidade utilizando-o para caracterizar analiticamente o movimento nos planos inclinados. Assim, e de acordo com a tese galileica, um corpo largado em A deve chegar em A mesma velocidade v quer a C, após ter descido o plano AC, quer a B,



após uma queda livre; os tempos t_c e t_B gastos nos dois percursos serão diferentes, mas como ambos os movimentos se processam com acelerações constantes, a velha regra de Oresmo permite escrever $\overline{AC} = \frac{v}{2} t_c$ e $\overline{AB} = \frac{v}{2} t_B$ ou, dividindo membro a membro, $\overline{AC}/\overline{AB} = t_c/t_B$. Por outro lado, designando por g a aceleração em queda livre e por a a aceleração no plano inclinado, a lei das velocidades posta lado por Galileu traduzia-se aqui pelas relações $v = g t_B$ e $v = a t_c$, das quais se deduz $t_c/t_B = g/a$. Comparando esta proporção com a anterior obtém-se $g/a = \overline{AC}/\overline{AB}$ ou $a = g \overline{AB}/\overline{AC}$, e como é geometricamente evidente que $\overline{AB} = \overline{AC} \sin \alpha$, chega-se à relação hoje clássica $a = g \sin \alpha$.

$$a t_c = g t_B$$

$$\frac{t_c}{t_B} = \frac{g}{a}$$

Destacamos este terreno de outro do mesmo jaez que Galileu também demonstrou porque ele tem uma consequência imediata muito interessante. De facto, se na fórmula precedente tomarmos $\alpha = 0$ obtemos $a = 0$, quer dizer, num plano horizontal o peso provoca uma aceleração nula e um corpo não actuado por outras forças permanecerá indefinidamente com a mesma velocidade. Era, de novo, a ideia do movimento como estado embora a lei da inércia, no sentido histórico do termo, se exprimisse agora de uma forma muito mais precisa. Ora, se o velho vestre se apercebeu bem de certo desta consequência da sua teoria, só considerou um tal resultado válido na medida em que pudesse ser aproximado localmente a superfície da Terra esférica a um plano, pois a verdadeira inércia seria circular e, como ele próprio exemplificou, seria em que um navio deslocando-se na água sem encontrar resistência descreveria um círculo completo para readquirir a velocidade inicial no ponto de partida. Denariado apegado ao referencial Terra, admitindo ainda um círculo finito que, de algum modo, implicava o reconhecimento da circularidade, Galileu não era capaz de apreender completamente a lei da inércia. E, neste contexto, entende-se que nem sequer tivesse aprofundado o problema de entender as causas da aceleração constante durante a queda - um problema cuja resposta implicaria a distinção clara entre matéria e peso da qual nunca se apercebeu.

Em contrapartida, tornara-se-lhe fácil resolver a questão das trajetórias dos projecteis que há mais de um século

permanecia sem resposta, pois tentava-se para isso contra geometricamente dois movimentos simultâneos, um deles em
 forma horizontal, o outro uniformemente acelerado na vertical. E assim, bastava pôde calcular, por exemplo, o alcance
 de uma bala de canhão lançada com uma velocidade inicial v_0 fazendo um ângulo α com a horizontal, atribuindo-lhe
 uma trajetória parabólica, o que era na época uma novidade considerável. Com estas e outras, a superioridade da
 sua doutrina afirmava-se insofismavelmente.

movimentos actura
e violentos incógnitos

12.



2

A teoria e a experiência - 1

①

25 de Maio

O que havia de revolucionariamente novo na obra de Galileu, sobretudo na nova maneira de abordar os problemas físicos, foi entendido pelos cientistas mais abertos e atentos do seu tempo. Essa vantagem não se limitou a constatar, desafiando os anátemas das igrejas protestantes e católicas, que a **luneta galileica** tinha demonstrado a verdade do heliocentrismo copernicano, implicando assim a rejeição definitiva do velho geocentrismo ptolomaico; o mais importante foi a compreensão de que as **investigações de Galileu no domínio da mecânica** tinham aberto o caminho à elaboração de uma **alternativa à física aristotélica**, já há muito desacreditada mas que vislumbrasse outra doutrina realmente capaz de a substituir. Donavante, essa outra física tinha-se tornado possível, e as gerações seguintes vão empreender a sua construção, os avanços em várias frentes sucedendo-se desde então a um ritmo sem paralelo mesmo nos tempos áureos do apogeu da ciência antiga.

Embora entre os discípulos italianos de Galileu existissem ^{homens} de grande valor como **Torricelli Cavalieri ou Bonelli**, cujas descobertas teremos ainda ocasiões de referir mais adiante, não foram eles quem mais contribuíam para o desenvolvimento de todas as potencialidades de todo o mestre: a Itália entrava nessa altura numa longa fase de **declínio económico e cultural** e naturalmente, as interdições da Cúria romana revelavam-se aí particularmente sensíveis. Foi sobretudo em França que, numa **primeira fase**, foi explorada essa grande herança, foi no meado do século XVII a ciência francesa dispor de um notável conjunto de **homens de génio ou de grande talento** - **Descartes, Fermat, Borelli, Pascal, Peiresc, Roberval** etc - cuja criatividade foi ainda estimulada pela acção de um singular personagem, **Mersenne**.

O **abade Marin Mersenne (1588-1648)**, embora filho de camponeses pobres, recebeu uma excelente educação no **colégio dos jesuítas de La Flèche**, que Descartes frequentara uns anos mais tarde, e tornou-se **padeiro dos oratórios**, **titor do Minimo**, em 1611. Apaixonado pelo estudo, começou a publicar, a partir de 1623, várias obras eruditas e muito extensas nas quais combatia não só **os ateus e os deístas** mas, mais significativamente, **os naturalistas**, quer dizer, os adeptos dessa visão da natureza e do homem tão característica da mentalidade renascentista. Depressa ficou ciente de que o principal adversário a combater era aquele natural, essa espécie de **animismo** que, sob diversas formas, se continuava a afirmar com vigor e, para levar a bom termo um tal combate, percebeu que havia que **procurar apoio na nova ciência**, ao dispor da qual foi desvidentemente sensível desde muito cedo. Assim, foi ele o primeiro que **traduziu do italiano obras de Galileu**, a quem sempre votou uma imensa admiração.

As investigações pessoais de Mersenne que incidiam sobretudo sobre problemas de **acústica** não tiveram grande importância. Mas a sua bondade e a sua tolerância tornaram-no amigo

e particularmente sobre os grandes físicos e matemáticos franceses dessa época, para não falar da rede de seus correspondentes além fronteiras. Numa época em que ainda não existiam revistas científicas, as cartas que seu convento em Paris o frade mínimo recebia e enviava regularmente a todos esses cientistas desempenharam de algum modo essa função. Era através de Mercenne que **Gansendi ou Fermat** iam tendo conhecimento dos trabalhos de **Descartes** e reciprocamente ou, para dar outro exemplo, foi por essa via que o jovem **Pascal** obteve conhecimentos da experiência **barométrica de Torricelli**. Mas o excelente homem, sempre atento às susceptibilidades de cada um, não se limitava a informar passivamente, pois em **termos directos ou velados as suas cartas acabavam por ter influência no trabalho de investigação** de seus muitos e célebres correspondentes que, tantas vezes, se degladiaram asperamente sem que conseguissem nunca que o amigo comum tomasse partido nessas querelas.

Nesta fase de transição da ciência europeia, o papel desempenhado por Mercenne afigura-se tanto mais significativo quanto, nesse período, outros homens desempenharam, em maior ou menor grau, funções análogas: é o caso de **Habert de Mortmor em Paris**, a partir de 1654, que organizou uma **autêntica assembleia de cientistas** dotada até de um estatuto, ou dos grupos de pensos análogos criados em Inglaterra como o círculo patrocinado em **Londres por um rico e culto mercador Sir Thomas Bresham**, o qual fundou em Londres no meado do século o famoso **Bresham College**, onde havia cátedras de geometria, astronomia e medicina.

Hall 137 e seguintes

Foi dos grupos formados espontaneamente pelos cientistas nos grandes centros que eram Paris e Londres que acabaram por surgir as duas principais instituições características desta nova do desenvolvimento da ciência, a **"Royal Society"** e a **"Académie Royale des Sciences"**. Já anteriormente tinham existido academias em Itália, como a **"Academia dei Lincei"** em Roma, a qual pertenceu **Galileu**, fundada pelo **Príncipe Cesi em 1609** mas que se extinguiu em 1630 com a morte do seu patrono, ou a **Academia del Cimento (A Academia de Experiências)** que sob a égide do **Grão-Duque de Toscana** aguçou os galileus durante uns dez anos, entre 1657 e 1667. As novas academias fundadas em Paris e em Londres, não tiveram esse carácter efêmero, pois mantiveram-se em actividade até hoje sem interrupções.

op. cit. 134 - 35

A **Royal Society**, fundada no **Bresham College em 1660**, seria institucionalizada por diploma real ~~em 1662~~ enquanto a **Académie Royale des Sciences** foi expressamente fundada por Colbert, o poderoso ministro de **Luis XIV**, em 1666. Indício de que já se viviam outros tempos, o rei da Prússia fundou, sob a influência de **Leibnitz**, a **Academia das Ciências de Berlim em 1700**, e o imperador da Rússia **Petro o Grande**, no seu esforço de europeizar-se, não criou em 1724 a **Academia de São Petersburgo**. **Porventura ainda mais significativo foi o aparecimento, na década de 60, das duas primeiras revistas científicas, as "Philosophical Transactions" em Londres e o "Journal des Sçavants" em Paris, às quais se juntaram as "Acta Eruditorum",** ~~publicadas~~ publicadas em **Leipzig a partir de 1682**, e redigidas em **latim para facilitar a sua difusão internacional.**

2.

O mais célebre dos muitos e notáveis amigos do Padre Mersenne foi incontestavelmente René Descartes (1596-1650). Na verdade, o cartesianismo teve tal influência no pensamento filosófico e científico do seu século que não é indispensável examiná-lo de perto. Mas, antes de mais, refaça-se este pensamento com esse grande homem.

Cronologicamente, podia ter sido filho de batilheu. Fidalgo francês, de uma aristocracia de extracção burguesa, nasceu na Touraine em 1596, foi educado num famoso colégio de jesuítas e, aos 20 anos, licenciou-se em direito na universidade de Paris. Embora já estivesse encarando as matemáticas como um caminho possível para alcançar a verdade, o seu espírito ávido de certezas estava profundamente desiludido com o saber lúcido que lhe tinham facultado e, por isso, decidiu que lhe convinha adquirir experiência de vida e, como escreverá mais tarde, "não se ater a outra ciência que aquela que possa existir em mim próprio ou no grande livro do mundo".

Pensou então que a carreira das armas serviria temporariamente os seus desígnios e foi-se alistar no exército protestante de Henrique de Nassau. Durante essa primeira estadia no Países Baixos relacionou-se com o físico irlandês Isaac Beeckman (1588-1637), com o qual estudou o problema da lei de queda dos corpos: tal como batilheu, Descartes começara por admitir que a velocidade cresce proporcionalmente ao espaço percorrido ($v = at$) mas, graças a Beeckman, acabou por concluir que v varia linearmente com t , o que implica ser o espaço percorrido proporcional a t^2 .

Em 1619, quando prestava serviço no exército católico do duque da Baviera teve a percepção de "fundamentos de uma ciência admirável"; a sua meditação prosseguiu nos anos seguintes, durante os quais se passava calmamente através da Europa, mais interessado ainda pelo comportamento dos homens comuns, o saber da artezaos ou a observação dos fenómenos naturais que pelos estudos com os eruditos. Uma permanência em Paris entre 1625 e 1628, em que a vida mundana o não impede de redigir umas "Regras para a direcção do espírito", convence-o de que as suas ideias lhe poderiam acarretar serios contratempos e decidiu a instalar-se na Holanda, na época o estado mais liberal, e aí viveu desde então apenas com breves ausências.

No começo dos anos 30, Descartes redigia um grande tratado a que chamara "Le Monde" e no qual, além dos temas de índole metodológica e metafísica, abordava a seu modo as diversas ciências, da matemática à física, das ciências da vida às ciências do homem. Naturalmente, considerado o heliocentrismo uma verdade científica adquirida, de modo que a condenação de batilheu pela Inquisição em 1633 o inquietou a tal ponto que renunciou a publicar essa obra, só editada postumamente em 1664. A laia de contrapartida, empreendeu a redacção de um livro menos ambicioso - e bem perigoso - que veio à estampa em 1637 com o título "O Discurso do Método" ou, mais precisamente, "O Discurso do Método para bem conduzir a razão e procurar a verdade nas ciências, mais a

mais a Dioptrica, os Meteoros e a Geometria que são os Essais sobre o Método. Tratava-se, em conjunto, de um passo essencial no caminho para a modernidade.

Com o abandono progressivo das velhas certezas que tinham assegurado aos neoplatônicos a tranquilidade espiritual, com o incesante alargamento dos horizontes geográficos e dos horizontes intelectuais trazido pelo Renascimento, com a inextricável confusão filosófica subjacente à naifia natural renacentista, os pensadores mais lúcidos desse tempo a consciência de que tudo o saber era conjectural, de que nenhuma verdade era segura, de que a razão humana só podia conduzir ao ceticismo. O caso de Montaigne revela-se, neste contexto, exemplar pois os seus "Essais", empreendidos para encontrar a verdade na natureza, nas sociedades humanas ou em si próprio, acabam por lhe revelar que não existem certezas, que só há, afinal, "opiniões".

É este pesimismo essencial, este inimutável ceticismo, que Descartes se propõe duradamente a ultrapassar. Pois que a razão justifica tantas dúvidas, exijamos a própria dúvida em método de procura da verdade; abandonemos todas as ideias recebidas, destruamos em nós todas as noções e todas as opiniões, libertemo-nos de tudo em que acreditamos, evaquemos totalmente o espírito para evitar que nele permaneça algo capaz de falsear o julgamento. Adquirida assim uma espécie de pureza original, poder-se-á então discernir o verdadeiro do falso: será por em causa tudo em que se possa discernir algo de confuso ou de obscuro, tudo quanto se afigurar minimamente sujeito à própria dúvida, e só se poderão reter aquelas ideias que se apresentem "tão claras e distintamente ao meu espírito que em não tivesse motivo algum para as por em dúvida".

A ambição de método de Descartes é por reconstruir o mundo a partir de algumas ideias tão claras e tão simples que não possam ser recusadas: a primeira das regras enunciadas no Discurso para "se conduzir a razão" ^{leguere-nos} ~~discussões~~ justamente "nunca aceitar qualquer coisa como verdadeira sem a reconhecer de um modo evidente como tal". Já as três outras são claramente inspiradas pela essência do raciocínio matemático porque, como ele explica "entre todos os que até agora procuraram a verdade nas ciências só o matemático puderam achar algumas demonstrações, ou seja, algumas razões certas e evidentes": daí se inspiram as regras que mandam "dividir cada uma das dificuldades em tantas partes...", "conduzir ordenadamente os pensamentos a partir dos objectos mais simples...", e por fim "fazer enumerações tão completas...", e procuram definir a metodologia para a prática de uma nova racionalidade.

Esboçado metodologicamente no "Discurso", o pensamento de Descartes in-tendeu-se explicitando nas "Meditações metafísicas" de 1641, depois no "Principia Philosophiae" de 1644, onde se encontra o essencial da sua Física, e por fim nas "Paixões da alma" de 1649. Durante esses anos de intensa reflexão a vida de Descartes tornava-se aliás cada vez mais difícil; acusado de "blasfêmia" e de "ateísmo", alvo dos ataques das elites protestantes mais sectárias, sem a modestia e a discrição do seu comportamento lhe serviam de salvaguarda, e foi levado a mudar várias vezes de local de residência para tentar em vão passar despercebido. Fatigado com essa existência que se tornara quase clandestina, Descartes acabou por aceitar o convite da rainha Cristina da Suécia, instalando-se em Estocolmo

A teoria e a experiência - 3

em 1649, para assim obter a tranquilidade a que aspirava. Mas o clima do norte mostrou-se demasiado rude para a sua saúde frágil, e o grande pensador faleceu em 1650, apenas com 54 anos.

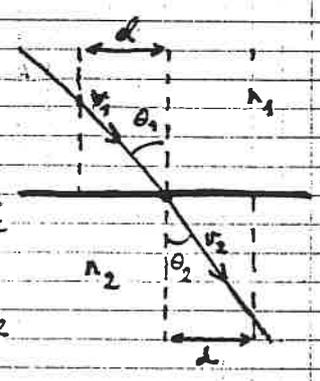
3.

Se o "Discurso do Método" é hoje editado e lido como um novo texto filosófico expurgado de todo o caráter científico que originalmente incluía, não podemos esquecer que o próprio Descartes considerava essas essas indispensáveis para dar credibilidade à inovação metodológica. Vale a pena olhá-las mais de perto.

Pouco há a dizer sobre os "Métodos", onde se procura explicar a ocorrência de certos fenômenos meteorológicos intrigantes, como o arco-íris ou o "falso sol", pois as explicações aventadas por Descartes não traziam grandes novidades. Já a "Dióptrica" contém pelo menos uma inovação importante, a expressão da lei que governa a refração da luz. Sabemos ~~que~~ que essa lei já tinha sido descoberta em 1600 pelo astrônomo e matemático holandês Snell van Royen, dito Snellius (1580-1626), mas esse resultado carece de divulgação e parece seguro que Descartes o obteve independentemente;

Em todo o caso, foi ^{graças à} ~~através da~~ "Dióptrica" que ele se tornou conhecido.

É curioso assinalar que, bem à sua maneira, Descartes não atribua a lei à observação experimental mas a argumentos teóricos. Sustenta ele que a transmissão do raio luminoso de um meio óptico para outro se processa em alteração da velocidade segundo o plano de separação, embora intervenha uma força que modifica a componente da velocidade na direção normal a esse plano. Assim, vetando no plano de separação a mesma distância d de dois lados do ponto de incidência, a igualdade das componentes transversais da velocidade amarra $d = c v_1 \sin \theta_1$ e $d = c v_2 \sin \theta_2$, quer dizer,



$$v_1/v_2 = \sin \theta_2 / \sin \theta_1$$

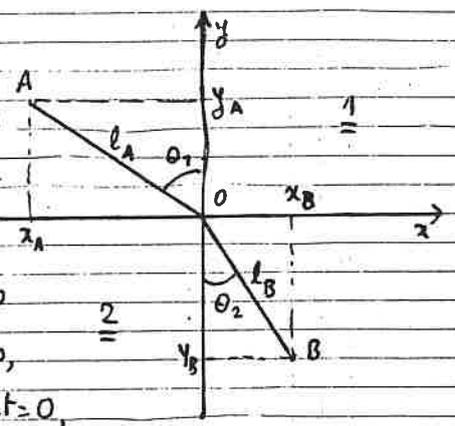
Portanto, Descartes era levado a afirmar que, quanto o ângulo de incidência θ_1 era maior que o ângulo de reflexão θ_2 (isto é, $\sin \theta_2 < \sin \theta_1$), a velocidade da luz era maior no segundo meio do que no primeiro, por exemplo, maior na água do que no ar. E era isto que Descartes pretendia concluir pois v_1 e v_2 deviam ser proporcionais às "densidades ópticas" n_1 e n_2 dos dois meios e, no caso considerado, vivia $n_2 > n_1$; isto agradava a Descartes porque ele assemelhava essas "densidades ópticas" a uma espécie de coeficientes de dureza e penetração — tendo observado que uma bala penetra mais profundamente num meio duro, como num pedaço de madeira do que num meio plástico, como num barril de fez — que a velocidade fosse justamente proporcional a n .

Esta conclusão foi impugnada logo a seguir por Pierre Fermat (1601-1665), outro de seus amigos de la rue Menusene. Fermat, que nasceu e viveu tranquilamente no sul da França, homem de grande cultura, filólogo do grego e do latim, vinca: tenia sido julado e não fosse o seu imenso gênio matemático. Referimo-lo aqui porque aos argumentos de Descartes para interpretar a lei de refração, de contradição entre interpretações, tal afirmativa como a primeira, que era o "princípio do tempo mínimo", hoje geralmente

Filólogo - estudo de uma língua para conhecê-la melhor em seu contexto

chamado o "princípio de Fermat". O que ele admitia é que um raio luminoso vai sempre de um ponto A a outro ponto B de forma a depender no percurso possível o mínimo de tempo, e este princípio bastava-lhe para deduzir quer a lei de refração quer a da reflexão. Proeza tanto mais notável quanto se trata do primeiro dos muitos "princípios de extremos" introduzidos em Física, numa época em que nem sequer existia ainda o cálculo infinitesimal, que a técnica inventada por Fermat para calcular máximos e mínimos ajudou aliás a criar.

É fácil reproduzir o raciocínio de Fermat numa linguagem moderna. Introduzimos os eixos coordenados rectangulares x e y e, para simplificar situamos a origem no ponto O em que o raio luminoso que vai de A a B atravessa o plano de separação dos dois meios. Então, sendo v_1 e v_2 as velocidades de propagação nos meios 1 e 2 o tempo t necessário para ir de A a B será $t = \frac{l_A}{v_1} + \frac{l_B}{v_2}$ e, portanto, $dt = \frac{dl_A}{v_1} + \frac{dl_B}{v_2}$; o princípio do tempo mínimo supõe que seja $dt = 0$, ou dizer $dl_A/v_1 + dl_B/v_2 = 0$.



Ora $l_A = (x_A^2 + y_A^2)^{1/2}$, o que acarreta $dl_A = \frac{1}{2}(x_A^2 + y_A^2)^{-1/2} 2x_A dx_A$, pois y_A é necessariamente constante, qualquer que seja a posição de O; tem-se pois $dl_A = x_A dx_A / l_A$ e, analogamente $dl_B = x_B dx_B / l_B$; mas como, evidentemente, $dx_A = -dx_B$, substituindo tem a condição $\frac{1}{v_1} \frac{x_A}{l_A} = \frac{1}{v_2} \frac{x_B}{l_B}$ ou ainda, porque $x_A/l_A = \sin \theta_1$, $x_B/l_B = \sin \theta_2$, vem

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

ou ainda, pois há-de continuar a ser $v_1/n_1 = v_2/n_2$, $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_1}{n_2}$ que é a lei da refração. Observe-se aliás que se A e B estiverem situados no mesmo meio, ter-se-á $n_1 = n_2$, quer dizer $\sin \theta_1 = \sin \theta_2$, o que neste caso significa $\theta_1 = \theta_2$, a igualdade dos ângulos no caso da reflexão.

Conven assimilar que enquanto Descartes obtinha $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_2 / v_1$ (velocidade da luz na água que no ar) Fermat era conduzido a escrever $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_1 / v_2$ (velocidade da luz na água que no ar que na água). Descobriram dois séculos antes da experiência ser capaz de decidir qual destas conclusões era verdadeira.

Falemos agora da "Geometria" de Descartes, sem dúvida o mais célebre dos seus ensaios inseridos no "Discurso". Para ratarizá-lo devidamente esse texto tão importante não é necessário cair no exagero de dizer, como tantas vezes se disse, que ele fundou a geometria analítica. Na verdade, foi o velho Claudio Ptolomeu utilizava coordenadas — a latitude e a longitude — para referenciar a posição de um ponto numa superfície e, depois dele muitos outros (desde Pappus a Oresme) representaram equações algébricas por curvas geométricas. O que Descartes introduz de realmente novo é a relação coerente entre a descrição algébrica, de uma álgebra aliás profundamente ampliada no século precedente, e a descrição geométrica que tanto devia aos Antigos: cada curva traduzia agora o que de característico havia nas equações algébricas — uma problemática que, na mesma época, Fermat tratava igualmente indo até mais longe do que Descartes.

A teoria e a experiência - 4

Além disso, e apesar do seu título, boa parte de "geometria" era consagrada à teoria das equações algébricas, e aí se apresenta nomeadamente a famosa "regra de Descartes" para determinar o número de raízes das equações, quer positivas quer negativas (lidas ainda "verdadeiras" e "falsas"). Outro grande mérito desse texto está nas grandes melhorias introduzidas no sistema de notação que adquire enfim uma forma quasi moderna, com todas as vantagens assim conseguidas para o desenvolvimento teórico.

4.

26.06.20

Quanto ao que mais nos interessa aqui, a física metafísica de Descartes, apenas faremos uma breve referência às suas investigações no domínio da estática, onde ele contrapõe ao "princípio do trabalho virtual", a tradição do misterioso Jordanus, ao "princípio das velocidades virtuais" como os doutores de Escola e a balística. Para Descartes, todos os problemas de equilíbrio são solúveis postulando, "o que não pode deixar de ser aceite", que "a mesma força que pode elevar um peso, por exemplo, de 100 libras à altura de 2 pés, pode também elevar um peso de 200 libras à altura de 1 pé, ou um peso de 400 libras à altura de 1/2 pé". Da fecundidade deste princípio apresentamos diversas ilustrações.

O essencial, sem dúvida, era todavia a concepção do mundo físico inerente ao cartesianismo. O seu osteio pode encontrar-se na identificação da matéria com o espaço porque, nas suas próprias palavras, "não são o peso, a dureza ou a cor que constituem a natureza do corpo mas unicamente a sua extensão". Assim, os corpos não estavam no espaço, eles seriam o próprio espaço, e n'os três conceitos só se afigurariam distintos nas nossas mentes. Apenas a extensão merece ser considerada uma qualidade "primária" de matéria, pois tudo o resto, a cor ou o cheiro, a dureza ou o peso, surgem como qualidades "secundárias", dependentes das circunstâncias ou das sensações que produzem. Autêntica geometria incarnada nas formas espaciais móveis, o universo físico de Descartes não deixava de ser, como a geometria usual das formas espaciais sem movimentos, de nível de axiomas apriorísticos evidentes para a razão humana. Boa parte do carácter especulativo de física cartesiana resultava deste pressuposto.

Uma tal doutrina tinha de negar a existência do vácuo, que neste contexto implicaria até uma espécie de contradição lógica, pois dois corpos separados pelo vácuo, quer dizer, pela ausência de matéria, estariam afinal separados pela ausência de espaço, o que quer dizer que não estariam separados. Paralelamente, a realidade dos átomos, fragmentos inextinguíveis de matéria, só podia compreender a um "vaco grosseiro", isto que as figuras geométricas são independentemente indivisíveis. Entende-se bem a natureza polémica de Descartes com Gassendi, outro dos seus amigos de Menckene, que, como veremos, focaram nessa época o atomismo antigo.

Se a matéria se identificava com o espaço, um espaço implicitamente infinito e indivisível, o universo físico passava a não ter fronteiras, deixava enfim de ser esse Cosmos fechado e hierarquizado que os escolásticos tinham herdado de Aristóteles e ao qual Kepler e Galileu ainda firmemente se fiavam. Era um avanço notável que, embora sem filiação directa, retomava as intuições de Nicolau de Cusa ou de Guilherme Bruno, agora inseridas num sistema com outra grandezas e outra coerência. Por mais curioso, Descartes continuava a recorrer-se à graça

ter o espaço infinito, considerando-o tal - só indefinido, sem limite, tal como considerava indefinida e não infinita a sucessão dos números; para de, a infinitude era um atributo exclusivo de divindade, muito embora Deus, como o outro seres de natureza espiritual não fosse dotado de extensões, e, portanto, necessariamente a sua indivisibilidade essencial. De qualquer modo, esse espaço indefinido não poderia ser ontologicamente diferente de uma região para outra, e daí resultava outra importante inovação do cartesianismo, a eliminação das velhas diferenças entre o mundo lunar e o mundo sub-lunar: agora todo o universo passara a ser governado pelas mesmas leis físicas.

Tal como identificava a materia com o espaço, Descartes relacionará o tempo com o movimento: a seu ver, num universo perfeitamente imóvel o tempo deixaria de ter sentido. E, por isso, gala - do cartesianismo como de uma descrição do mundo por figuras e por movimentos. Contudo, para descrever ou mesmo definir o movimento, há que referi-lo a algo, a um sistema de referência, que agora já não podia ser a Terra, como defendiam os peripatéticos, nem o Sol, como Copérnico implicitamente pretendia. Era uma questão crucial que Galileu não se viu obrigado a afrontar explicitamente embora, ao insistir no conceito de movimento-relação, tivesse indicado a boa via para lhe dar resposta. Ciente dessa lição, Descartes aproveitá-la-á, concebendo o movimento como essencialmente relativo, definindo o movimento de um corpo sempre em relação a outro corpo. E com a multiplicidade de corpos substanciais no espaço, qualquer corpo terá de ser encarado simultaneamente em movimento e em repouso, em movimento relativamente a A, em repouso relativamente a B. Por conseguinte, o movimento, tal como o repouso, são um estado, algo que permanece sem carácter transitório, pois movimento e repouso são apenas formas diferentes de exprimir um mesmo fenómeno cruzante o referencial escolhido.

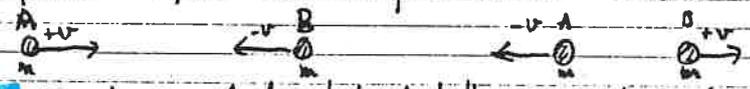
Homenagem do seu século, o metafísico Descartes só poderia atribuir a Deus, à vontade do Criador, o movimento que anima o mundo ou, como ele próprio escrevem, "Deus onnipotente criou a matéria com o movimento e o repouso e, em a sua acção, conserva actualmente no universo a mesma quantidade de movimento e de repouso que aí foi quanto o criou". A citação é interessante porque, por um lado, exprime a intuição de uma espécie de princípio de conservação de "quantidade de movimento" — que, de algum modo, já se apercebe na obra de Galileu — mas, por outro lado, explicita que Descartes não tinha (nem, aliás, poderia ter) ideia de que esse princípio de conservação poderia ser uma mera consequência das propriedades do movimento. Assim, a suposta conservação da quantidade de movimento podia, de boa fé, ser atribuída à intervenção do Criador, ilacção vantajosa numa física de cariz mecanicista que, apesar de tudo, e de acordo com as exigências ideológicas de então, necessitava de preservar as manifestações de uma acção presente de Deus sobre o mundo físico.

Seja como for, se Deus vela pela conservação do movimento, Descartes infere naturalmente que, a menos que um obstáculo lho impedia, o corpo salvaguarda o movimento adquirido deslocando-se em linha recta com velocidade constante. Surge aqui a lei de inércia, liberta do malentendido da circularidade que Galileu lhe atribuía, a supremacia da recta encontrando condições para se afirmar no espaço aberto, euclídeo, do cartesianismo. Importa porém constatar que o próprio enunciado da lei de inércia tem um conteúdo ambíguo, para não dizer contraditório, numa doutrina em que o movimento se concebe como essa

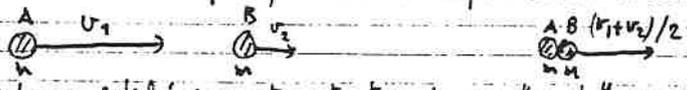
A teoria e a experiência - 5

cialmente relativo a qualquer outro corpo: trata-se, afinal, de um movimento retilíneo e uniforme em qual dos muitos referenciais possíveis? A resposta não é clara mas há razões para pensar que Descartes acabava por privilegiar o referencial definido pelas **estrelas fixas**, relativamente às quais seria ainda válida a lei de inércia. Num contexto totalmente diferente, Newton não adoptará, na prática, uma **linha diferente**.

A interrupção do movimento retilíneo e uniforme de um corpo resultando do encontro com outro corpo, o problema físico do **choque** adquire no cartesianismo uma importância considerável. Como Newton constatará amargamente, os **pensadores do século XVII** não concebiam uma **interacção entre dois corpos sem contacto mútuo**, de acordo com o que Descartes sustentava. Para descrever o processo do choque, este propôs **sete regras**, das quais a primeira afirmava que "se dois corpos iguais chocam com velocidades iguais, reflectem-se para trás cada qual com a sua velocidade". Esta regra é exacta se se tratar



de **corpo elástico**, como por exemplo duas bolas de bilhar, mas já não é esse o caso para as outras seis regras cartesianas. Assim, a terceira afirma que "se dois corpos iguais com velocidades desiguais chocam, o mais lento será anulado de modo a que velocidade comum seja igual a metade da soma das velocidades que tinham antes do choque"; ora uma tal previsão nunca é exacta porque, para os dois



corpos se passam a deslocar solidariamente este tem de ser "mole", e neste caso haverá dissipação de uma fracção da energia cinética inicial, a velocidade final sendo então inferior à prevista cartesianamente.

A **teoria cartiana do choque** derivava implicitamente da exigência de conservação de quantidade de movimento a qual seria definida pelo valor de mv mas no qual v não tinha um carácter vectorial explícito, era apenas definida em módulo, sem grande atenção ao sinal algébrico de velocidade. Das consequências das regras obtidas, das quais o próprio Descartes não deixava de se aperceber mas sem ser capaz de as remediar. Por isso ele escrevia que "acontece muitas vezes que, à primeira vista, a explicação pode mostrar-se rebelde às regras que acaba de explicar, mas a razão disso é evidente, visto que essas regras pressupõem serem os corpos perfeitamente duros e nada existir à volta deles capaz de afetar ou de prejudicar o seu movimento, condições que nunca se verificam neste mundo". Abre-se aqui pelo seu **nacionalismo metafísico**, o pensador refugia-se numa utilização indevida da **língua galileica da diferença entre facts e fenômenos**. Só na geração seguinte, a volta de 1670, é que com Huygens, Wallis e Wren as **leis do choque - ou, melhor, do choque, elástico e inelástico** - serão esclarecidas.

5.

Assimilámos que, para Descartes, havia uma **total identificação da matéria com o espaço** e, no entanto, falamos em **momentos dos corpos e dos seus choques** como se eles, afinal, se pudessem deslocar através do espaço livre. Não há neste qualquer contradição real porque o cartesianismo, sob pena de contradizer a evidência,

Fontes e Dijs:
Kosterhans,
H.G.S.B., Duijn

não podia conceber no mesmo termo a matéria e a matéria, i.e. exemplo, com o espaço do globo terrestre e a ela circunscrita com o espaço existente entre a Terra e o Sol. Tornava-se indispensável admitir a existência de **mais do que um tipo de matéria**, e essa exigência foi inserida por Descartes no âmbito de uma **cosmologia** e mesmo de uma **cosmogonia altamente especulativa** as quais, naturalmente, não podiam deixar de fazer, pelo menos, uma referência incerta.

No início, Deus teria dividido a **matéria em pequeníssimas partes**, de dimensões sensivelmente idênticas ^{e com esféricas formas} ~~de formas diferentes~~, de maneira a que pudessem "ocupar" todo o espaço. Mas a aglutinação das partes desse primeiro elemento teria provocado a formação de um **segundo elemento**, cujas **partes são esféricas e ainda muito pequenas**, e também de um terceiro elemento mais grosseiro, o qual constitui a **Terra ou os outros planetas**. Evidentemente, para que não houvesse vazio, os interstícios entre as partes do terceiro elemento estariam ocupados pelas esferas constituintes do segundo, e os espaços mínimos existentes entre estas esferas seriam preenchidos pela "poeira de matéria" original, o primeiro elemento.

Portanto, a matéria existia sob três formas distintas, resultantes de uma história cósmica, e as diferenças das suas propriedades explicariam o comportamento do universo tal como ele é agora. Para Descartes, as partículas esféricas da matéria de segunda ordem, do segundo elemento, formariam no céu por elas essencialmente constituído — e daí que também lhes chamasse "partículas celestes" — enormes vórtices ou turbilhões os quais, devido às suas tendências centrífugas, fariam as partículas do primeiro elemento, a "matéria subtil" a concentrar-se no seu centro, assim se formando as estrelas, as estrelas fixas ou o Sol.

Assim, em torno de cada estrela e, nomeadamente, do Sol, existia um **gigantesco turbilhão** de partículas celestes, semelhante àquelas que se formam no rio quando "a água fechando-se sobre si mesma e, rodando, forma círculos". **Seram estes turbilhões os responsáveis pelo movimento dos planetas e até dos cometas que neles se encontravam** imensos os quais, não tendo movimento ^{em relação} ~~relativa~~ às partículas celestes que os rodeavam, seriam arrastados por ela e descreveriam por isso **trajetórias circulares ou quase circulares em torno do centro do turbilhão, a estrela**. Tal era a interpretação cartesiana da **dinâmica do sistema solar**.

Mas Descartes vai ainda mais longe. Ele admite que numa estrela certas partes da poeira original — as famosas "colunas canaladas a três canais" formadas nos interstícios das partículas celestes — se poderiam aglomerar à superfície "como a espuma na superfície de um licor em ebulição" e, assim, formar **progressivamente manchas mais solidificadas que penam a transformação da estrela em planeta**. Ora como um tal processo seria acompanhado por um enfraquecimento do dinamismo do respectivo turbilhão, ^{total ou parcialmente} este poderia ser absorvido por um turbilhão vizinho, de uma estrela que não sofresse da mesma maneira. Nestes termos, a doutrina pretendia explicar a **origem dos planetas, espécie de estrelas degeneradas**, justificando simultaneamente a **formação de sistemas solares**. O universo actual teria resultado de uma **longa evolução** durante a qual, por exemplo, o turbilhão do Sol teria aumentado significativamente as suas dimensões.

Não iremos muito mais longe, ainda que haja mais um ponto que se não pode deixar de referir: a explica

A terra e a experiência - 6

Gãe proposta foi Descartes para justificar a existência da gravidade ou do peso dos corpos, factor que babilien se li-
 tava a constatar empiricamente. Nessa explicação, a terra era suposta ser o centro de um pequeno vórtice,
 o qual, não só a fazia rodar sobre si própria como tendia a provocar nos corpos à sua superfície uma afasta-
 mento tangencial, equivalente em suma a uma força actuando segundo o raio da esfera. Mas esta força centri-
 fuga não influenciaria o comportamento de uma pedra, por exemplo, lançada no ar, porque a pedra, corpo denso e,
 por isso, em pouca matéria celeste, poderá vencer, o seu lugar sendo ocupado pelo ar onde a matéria celeste
 é abundante. A tendência dos corpos para cair seria afinal uma consequência da sua relativa carência da
 matéria do segundo elemento.

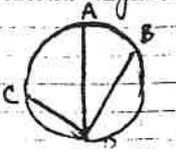
Forbes e al
 H 228-9
 H65II 266

6.

Descartes não pôde naturalmente evitar que a sua tão específica concepção da natureza fosse contestada,
 em especial por Pierre Gassendi (1592-1655), defensor de teses quase radicalmente opostas às suas. Velho ami-
 go de Mersenne, Gassendi tratava-se em Avignon antes de tomar adeus em 1616; foi professor de filosofia em
 Aix (1617-1623) e tornou-se então um adversário da Escolástica. A partir de 1632 consagrou-se ao estudo
 do pensamento de Epicuro, embora o resultado desse trabalho só tivesse sido publicado mais tarde,
 primeiro nas "Instantiae" (1644), depois nas "Animadversiones" (1649), enfim, sob uma forma mais ace-
 lada no "Syntagma philosophicum" (1653). Professor de matemática, quer dizer, de astronomia no
 Colégio Real, em Paris, desde 1645 a 1649, graças a Richelieu, Gassendi voltará à sua Provença na
 tal onde morreu.

No essencial, a obra de Gassendi corresponde a resuscitar o atomismo antigo embora, ao contrário de Epicu-
 ro, se recusasse a dotar os átomos de um peso essencial e, por conseguinte, de um "clinamen". Por outro lado,
 e para tentar conciliar estas ideias com o cristianismo, sustentou que os átomos e o vazio não seriam eter-
 nos, teriam sido criados por Deus com o mundo. Um tal acrescento era insuficiente, e Descartes explorá-lo-á
 acusando Gassendi de "materialismo", ao que este respondeu acusando o adversário de ser "dogmático": em
 cada matéria, e para além das intuições de cada um, ambas as certezas tinham algum fundamento.

Outro mérito teve, contudo, a actividade científica de Gassendi. Excelente astrónomo, foi quase o único a
 conseguir observar, em 1631, a passagem de Mercúrio em frente do disco solar, o "trânsito de Mercúrio", que Kepler
 tinha previsto dois anos antes, aproveitando a oportunidade para fazer a apologia de esse Kepler quase esquecido e
 cujas ideias ele aliás compreendia mal. Também contribuiu para dar crédito à mecânica galileica: tanto quanto
 sabemos, foi ele o primeiro a realizar em 1640, no porto de Marselha, a observação electiva do comportamento
 de uma pedra lançada do cimo do mastro de uma galera em movimento, verificando que ela cai realmente ao
 longo do mastro; por outro lado, e para rebater aqueles que pretendiam ter constatado que, na queda de um gra-
 ve, a velocidade cresce proporcionalmente ao espaço percorrido e não ao tempo gasto, instalou sobre uma grande
 roda de madeira tabo de vidro hipócrita, quer segundo o diâmetro vertical AD, quer segundo
 as cordas BD, CD etc, verificando assim que se confirmava a previsão específica de babilien.



Koyne, P.H.
 P.S. 325

ib. 327

Ten. II, P. 314

de que pequenos corpos partindo simultaneamente de A, B, C, ... chegassem simultaneamente a D.

O atomismo de Gassendi parece ter tido bastante aceitação no círculo de Merenne, talvez até mais aceitação do que o plerismo cartesiano. De facto, se a ontologia gassendista acabou por se afinar, graças à influência indirecta que veio a ter sobre o pensamento de Newton — pois os corpos materiais de Newton descendiam dos átomos de Gassendi e de Epicuro — a superioridade do cartesianismo não tardou a afirmar-se e de modo duradouro. É que Descartes era um pensador com outra envergadura e o seu sistema, "uma árvore cujas raízes eram a metafísica, o tronco a física, os ramos as outras ciências", mostrava uma amplitude e uma coerência comparáveis às do cristianismo. De facto, essa nova concepção do mundo veio enfim suprir a carência provocada nos finais da Idade Média pela rejeição de Aristóteles e que dera azo ao florescimento da magia natural. Agora, e tal como em tempos fora feripatética, a Europa culta tornou-se cartesiana.

Afigura-se evidente a influência de Galileu sobre Descartes, o qual leu o "Diálogo" em 1634 com tal interesse que lhe consagrou trinta horas de trabalho ininterrupto, e escreveu o "Discorsi" logo após a sua publicação. Curiosamente, e reconhecendo embora que Galileu "filosofa bastante bem sobre o movimento", mostrou-se bastante crítico para o "Diálogo" e, numa carta confidencial a Merenne, em Outubro de 1638, não é menos severo para os "Discorsi", sobretudo quanto à discussão da queda dos corpos no espaço vazio que ele rejeitava totalmente. Há que constatar que, já em 1634, Descartes elaborara o fundamento do seu próprio sistema, cuja física reencontrava no essencial as conclusões da mecânica galileica, mas a cujo fundamento metafísico o pensamento de Galileu era alógeno.

Retomando a seu modo o projecto galileico de matematização da natureza, Descartes não se criaria de o levar a um ponto extremo, tentando reduzir a física quase a uma espécie de geometria. E, ao fazê-lo, deu corpo a uma ideia já implícita na obra do mestre florentino, a ideia de que era possível explicar o mundo em termos puramente mecânicos ou, num sentido mais restrito, que o mundo se comportava como um gigantesco maquinismo. Essa tese, o mecanicismo, que outrora como Merenne ou Gassendi também persistiram nessa época, não emersponde necessariamente à doutrina cartesiana, a qual exprime todavia, sob uma forma acabada, uma concepção de mundo desse tipo. Daí a confusão que na altura se estabeleceu entre mecanicismo e cartesianismo, com vantagens incalculáveis para a difusão das ideias de Descartes.

Os quarenta ou cinquenta anos após o aparecimento dos "Principia" de Newton, o quais traziam consigo potencialidades de percepção quantitativa a que a física especulativa de Descartes parecia incapaz de responder, é que o cartesianismo foi finalmente abandonado, e isto na sequência de um acontecimento muito duro. É uma das principais razões de um tão longa resistência de uma doutrina física de caráter meramente qualitativo — mau grado os esforços ulteriores de matematização empreendidos pelo seguidor de Descartes — é que o mecanicismo não parecia compatível com o paradigma mecanicista. Não nos faltará ocasiões para retomar este tema.

7.

22019

Ao contrário do que tantas vezes se afirma, a revolução que no século XVII modificou completamente a Física resultou de inovações de índole conceptual, a nível teórico, e não do progresso da experimentação. Na verdade, só na sequência do aparecimento de uma forma diferente de conceber a Física é que o papel da experiência se tornou importante. Só quando se entende que "o livro da natureza está escrito em linguagem matemática", quando se passou a conceber a Física como uma via permitida explicar os "factos" através dos fenómenos, quando o quantitativo se pôde sobrepor ao qualitativo, é que a experiência encontrou o seu significado autêntico na busca de relações matemáticas entre valores de grandezas características de um dado fenómeno, quer dizer, na investigação laboratorial daquilo a que chamamos as leis físicas. Então sim, o experiencialismo tornou-se realmente importante e significativo.

Por isso, convém recordar que o progresso da física experimental durante o século XVII (e aqui, englobamos na física a astronomia de observação) foram espectaculares, bem maiores que os de qualquer época precedente. Custava-lo facilmente de, mesmo sem pretensão de elaborar um lista exaustiva, recordar os novos instrumentos de observação ou de medida aparecidos nessa altura. Assim, logo nos inícios do século e um tanto por acidente, temo a laneta, da qual Galileu fez bom uso mas que seria superada na década de 70 pelo telescópio, em cuja construção o papel de Newton foi determinante. Veio depois o microscópio, inventado igualmente pelo empirismo dos oculistas holandeses cerca de 1615, ainda que só se revelou efectivamente operacional umas décadas mais tarde, vindo então a ser útil sobretudo às investigações no campo da biologia. De muito maior importância para a física, foi a invenção, já após a morte de Galileu, do barómetro e da máquina pneumática, graças aos quais se avançou significativamente no estudo dos gases e do "vazio". Não se pode esquecer o pendulo, ao qual já Galileu dedicou tanta atenção e que será cuidadosamente estudado por Huygens, que o utilizou para construir relógios de pendulo capazes, enfim, de medir o tempo já com bastante precisão. E só para não esquecer o muito que os experimentadores deram neste século crucial ao conhecimento das propriedades da luz pode-se referir, por exemplo, o prisma, com o qual Newton decomps e recomps a luz branca nas cores do arco-íris.

A história da invenção do termómetro ^{exemplifica perfeitamente a influência decisiva que tiveram} constitui uma ilustração excelente do modo como as inovações conceptuais puderam influenciar decisivamente no progresso instrumental. De facto, os físicos do período helénico ~~possuíam~~ possuíam um dispositivo, ~~mas~~ grosseiro, capaz de anotar as variações de temperatura, cuja descrição se encontra nomeadamente na "Pneumática" de Heráclito de Alexandria: o indicador era a posição de uma simples gota de água introduzida num gargalo estreito que prolongava um globo de vidro cheio de ar.

Na a "Pneumática" de Heráclito foi traduzida em latim em 1575, fazendo assim com esse dispositivo, o "termoscópio", se tornasse bastante conhecido. Embora nunca se tivesse ocupado dele, Galileu contribuiu decisivamente para a evolução deste instrumento. É que reagiu tendo formado em gradientes o termoscópio,

criando assim um termómetro, pela via a razão que Aristóteles ensinara serem o quente e o frio qualidades e não quantidades, isto é, acidentes que não eram susceptíveis de expressões numéricas; só um insensado iria tentar criar um aparelho para medir uma qualidade! A lição de Galileu implicava, entre muitas outras coisas, a possibilidade de eliminar esse obstáculo conceptual e, destruído o preconceito, a transição do termoscópio para o termómetro era um operasão quase evidente.

É aos discípulos directos de Galileu (Aggiunti, Viviani, Bonelli, Magiotti, Renaldi e etc) que se atribue geralmente a construção do primeiro termómetro, no qual o recipiente por um tubo estreito e fechado estava incompletamente cheio de álcool. Parece ter sido um obra colectiva em que é difícil (e aliás ^{imeliorante} ^{determina} ~~uma grande interesse~~) identificar o contributo de cada um deles, até porque estas novidades se encontram na obra colectiva, or "Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento", publicado em 1667, justamente quando a famosa Accademia cessava praticamente a sua actividade.

De facto, são citados numerosos percursos, por exemplo o médico francês Jean Rey, em 1630, ou ainda, no que se refere a graduações do termoscópio o biólogo italiano Santorio, que em 1612 já definira uma escala termométrica tomando como pontos fixos a temperatura da neve e a da chama de uma vela e graduando-a por subdivisões decimais; o seu propósito era rebater a ideia de que a temperatura do corpo humano é mais baixa de noite que de dia. Nada nos importa as polémicas de prioridade, o que merece realmente referir é que o termómetro se difundiu na Europa a partir de 1670 por influência dos florentinos.

Claro está que esse processo de difusão foi complicado, foi nada impuêdo a priori estas ou aquelas ~~temperaturas~~ ~~padrões~~ nem uma das muitas divisões possíveis da escala. Só pouco a pouco é que se foi popularizando a definição dos pontos fixos pela fusão do gelo e a ebulição da água, o respectivo intervalo sendo atribuído uma diferença de 100° apenas em 1742, de acordo por um proposta do astrónomo sueco Celsius que parece, aliás, ter sido sugerida pelo seu amigo Linneu, o famoso botânico. Mas em meados do século XVIII ainda se utilizavam correntemente mais de 60 escalas termométricas diferentes, das quais pelo menos uma, a escala Fahrenheit, ainda hoje sobrevive nos países anglo-saxónicos. Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1776) era um ^{higienista} ~~medicador~~ de Dantzig muito hábil na construção de arcómetros e sobretudo de termómetros, cuja qualidade era assegurada pelo cuidado em recorrer a tubos de vidro de secção constante e pelas vertigens inerentes à utilização sistemática de um excelente líquido termométrico, o mercúrio; para mais, Fahrenheit foi dos primeiros termómetros de pequenas dimensões. A precisão destes termómetros fez surgir a escala de temperaturas inercial (e que, ulteriormente, foi redefinida com maior precisão) utilizada pelo seu construtor: 0° graus era a temperatura da mistura refrigerante, provavelmente gelo moído com sal de amoníaco, 96° a temperatura do corpo humano. A escala Fahrenheit é, hoje, um feitiço anacronismo.

Os galileicos do Cimento utilizaram o termómetro para realizar algumas experiências interessantes. Verificaram, por exemplo, que quantidades iguais de dois líquidos diferentes à mesma temperatura não provocavam a fusão de mesma quantidade de gelo, resultado que sugeria a introdução do conceito de calor específico o qual, todavia, só surgiu um bom século mais tarde, quando se distinguiu nitidamente o calor da temperatura. Colocando um grande pedaço de gelo, de uns duzentos quilogramas, diante de um espelho côncavo, verificaram que a coluna de termómetro posto no foco do espelho descia rapidamente, processo que era interrompido pela intercessão de um écran opaco.

A teoria e a experiência - 8

uma das observações mais intrigantes que fizeram consistia em colocar um termómetro num recipiente com gelo, a temperatura observado não se alterando quando esse recipiente era mergulhado em água a ferver. Verifica-se que o grupo contribuiu mais para levantar problemas do que para lhes dar respostas, mas o futuro mostraria não serem essas respostas evidentes dado o tempo que tardaram a aparecer.

8.

Ainda antes da invenção do termómetro surge a do barómetro, com consequências imediatas bem maiores. Galileu conhecera acidentalmente o facto curioso de que as bombas aspirantes não eram capazes de elevar a água acima de umas 18 braças, cerca de 9 metros, mas embora o seu amigo **Baliani** lhe tivesse sugerido (1630) que isso podia estar relacionado com o peso do ar atmosférico, permaneceu apegado a outras explicações habitualmente expostas nos "Discorsi". Assimilava ele que qualquer corpo homogêneo de secção constante, por exemplo uma corda ou uma vara metálica, suspenso por uma extremidade acabaria por se romper, em virtude do seu próprio peso, desde que seja suficiente longo; esta "força de ruptura" característica de cada substância seria, assim, definida por um certo comprimento o qual, no caso da água, corresponderia às tais 18 braças. Daí provinha a limitação do poder das bombas aspirantes, a cujo êmbolo a coluna de água estaria suspensa, e Galileu concluiu que se a natureza não tem "honra ao vácuo", como pretendiam os aristotélicos, ele manifestava-se com uma certa força.

Ainda em vida do mestre, em 1641, dois galileus que tinham estudado os "Discorsi", **Magiotti e Berti**, empreenderam em Roma uma demonstração pública do curioso fenómeno: utilizando um longo tubo metálico coroado superiormente por um balão de vidro, mostraram efectivamente que a bomba não era capaz de elevar de água todo o balão, porque estava colocado demasiado alto. Mais ainda, instalando uma torneira na outra extremidade do tubo podiam elevar de água o conjunto tubo-espina antes de o colocarem na vertical com o balão para cima; então, abrindo a torneira, verificavam que a água só descia até às tais 18 braças. Como nada tinha entrado no balão, Magiotti e Berti concluíram que na parte superior do balão abandonada pela água existia agora o vácuo, ilacção que contradizia radicalmente a física peripatética.



Tal não era, naturalmente, a opinião do **jesuíta Kircher**, o qual sustentava que o ar pudera penetrar no balão ao longo das paredes do tubo, de modo a ocupar esse pretérito espaço vácuo. Ele poderia aliás ter argumentado, mais pertinente mente, que a superfície da água no balão se tornara agitada como se fervesse, o que era de facto um efeito da libertação do ar dissolvido da água. Fosse como fosse, Kircher propôs o que foi aceite, a realização de uma nova experiência capaz de decidir se o som se propagava na parte superior da coluna. Para isso, instalaram ali previamente uma sineta com um balão metálico colocado exteriormente à dita e, repetida a experiência precedente, acionaram o balão aproximando e afastando um íman. O som ouviu-se e os peripatéticos triunfaram, embora alguém tivesse sugerido que fora talvez o eixo de suspensão que transmitia o som para o exterior. Berti faleceu em 1643 e Magiotti, discípulo



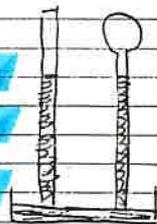
Kircher, F.H. P.S. 383

de perplexidades, decidiu-se a recorrer ao mais famoso dos discípulos de Galileu, Torricelli.

Evangelista Torricelli (1608-1644), um dos que tinham merecido a honra de partilhar a redacção do teste em Aretri, sucedera a Galileu como matemático do grão-duque da Toscana, prova inequívoca do prestígio de que gozava. Apesar de ter somente nove, realizou trabalhos importantes quer no domínio das matemáticas puras, onde foi um dos **precursores do cálculo infinitesimal** (quadratura da cicloide etc), quer no capítulo da mecânica, ao desenvolver muitas ideias esboçadas no "Discorsi"; e ainda considerado como um dos fundadores da hidrodinâmica, um dos seus resultados mais célebres dizendo que a velocidade de escoamento de um líquido por um orifício situa-se no fundo de um tubo é **proporcional à raiz quadrada da altura do líquido acima do orifício**.

Tornado muito prudente por tudo a quanto assistia, Torricelli não se mostrou muito entusiasmado pela ideia de realizar uma experiência tendente a **demonstrar a existência do vácuo**, quer já que não podia deixar de provocar com fronte perigosas com o aristotélico. Só porque **Magnott** insistiu muito e que Torricelli acabou por aceitar ocupar-se do problema, **Evangelista** foi **Evangelista** (1622-1703) que, nessa altura, tinha pouco mais de vinte anos, de refazer a experiência, e foi **Evangelista** quem teve a ideia de substituir a água por mercúrio, quase 14 vezes mais densa que a água, exigia a utilização de um tubo muito mais curto e, por isso, muito mais barato.

Torricelli, sem vocação para heróis, nunca publicou nada sobre as experiências que **Evangelista** fez sob a sua direcção. Sabemos o que ele pensava pelas graças apenas à sua correspondência com **Pico**, um homem de ciência romano de quem era amigo, mas essas cartas são esclarecedoras. Enchendo de mercúrio um tubo de vidro com umas duas braças de comprimento, tapando com um dedo a sua extremidade aberta e invertendo-o sobre um recipiente contendo mercúrio, o mercúrio desce no tubo mas, embora muito pesado, permanece suspenso a certa altura que é aliás a mesma se a extremidade superior do tubo fosse substituída por uma esfera de muito maior volume. Para Torricelli, neste ponto em oposição a Galileu, isto era a prova de que a força que sustém o mercúrio no tubo não é de origem interna, não se deita ao vácuo ou à **potência** altamente rarificada, pois se assim fosse a sua acção seria maior na segunda experiência que na primeira. A queda parcial do mercúrio no tubo provocaria efectivamente a **aparência de um vácuo**, de uma região sem matéria, mas o que mantinha o mercúrio suspenso era uma causa exterior, o peso do ar.



Como ele dizia "viremos submersos no fundo de um oceano de ar elementar, o qual sabemos que tem peso graças a experiências impressionáveis, tanto que nas profundidades da superfície terrestre — onde é mais denso — pesa aproximadamente 1/400 do peso da água". Como se tinha já feito uma estimativa da altura da atmosfera, 50 ou 54 milhas, e dado que a pressão exercida pela coluna de mercúrio sobre a superfície livre do líquido deve equilibrar a pressão do ar, Torricelli concluiu até que a grandes alturas o ar deve ser muito denso.

9.

Tudo isto teria permanecido ignorado se um dos correspondentes de **Evangelista** que vivia em Roma não se tivesse referido à curiosa experiência, levando o frasco, cheio de curiosidade, a partir para Itália em Novembro desse ano. Em Florença não conseguiu praticamente saber nada, pois o cauteloso Torricelli inventou múltiplas desculpas para não falar do assunto. Mas em Roma foi mais bem sucedido, acabando até por convencer **Pico** a repetir a expe-

A teoria e a experiência - 9

mência na sua frente. Só em **meados de 1646** e que Merenne, novamente instalado em Paris, se pode consagrar a esta tão interessante novidade que, como em seu hábito, comunicou aos seus amigos.

O principal obstáculo a repetição da "experiência de Itália" era de ordem técnica, vista da dificuldade de obter um tubo de vidro de secção constante e suficientemente comprido. Daí que Merenne tivesse recorrido para o efeito ao seu amigo **Etienne Pascal**, porque este vendia cutão na **Normandia** onde trabalhavam o **velho, o irmão** do França. De facto, a experiência de Torricelli foi novamente executada em Dieppe, nos finais do **outubro de 1646**, nela colaborando o jovem **Blaise Pascal (1623-1662)**, já então conhecido pelo seus dotes matemáticos.

C/ Pieme Peti*

les instr. math. scient.

Com efeito, Blaise Pascal foi um menino prodígio. Criança ainda, já era capaz de entender o "Elemento de Euclides", aos 16 anos escreveu um "Estatuto sobre as cônicas" muito original, em 1642 construiu uma máquina de somas destinada a facilitar o trabalho de seu pai que era recebedor dos impostos. Sob a influência de **Desargues** e, depois, de **Roberval**, para importantes descobertas sobre as propriedades do triângulo aritmético, e partilha com **Fermat** a glória de ter fundado o **cálculo das probabilidades**. A partir de 1654, Pascal consagrou-se unicamente a **questões de natureza teológica**, em defesa dos **jesuítas** contra os **protestantes**, e a isso se referem as suas duas obras mais conhecidas, as "**Provinciais**" e o "**Pensamentos**".

A obra de Pascal como físico, o que mais nos interessa aqui, foi decisivamente influenciada por essa experiência a que assistira por mero acaso. E embora a originalidade real desta obra seja uma questão altamente controversa, não há dúvidas que os seus escritos sobre este tema foram então muito lidos e tiveram real influência. Justifica-se, pelo menos por isso, que os examinemos com certo cuidado.

Em **outubro de 1647** Pascal publicava em Paris um opúsculo, "**Expériences nouvelles touchant le vide**", no qual não havia efetivamente grandes novidades experimentais, Pascal limitando-se a assinalar diversas variantes do dispositivo inicial; o autor nem sequer ousava sustentar claramente que tais experiências demonstravam a existência do vácuo. Mas a desfova má, e será exaustivamente explorada, com a célebre experiência do **Puy de Dôme**.

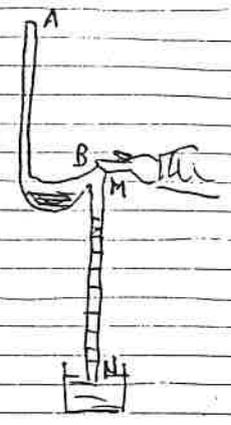
Com efeito, desejando obter a demonstração de que a **altura da coluna barométrica varia com a altitude**, Pascal recorreu aos bons serviços de seu cunhado **Florin Perrier** que, em **setembro de 1648**, verificou com auxílio de um grupo de amigos que, à mesma hora, a **coluna de mercúrio no cimo de montanha era umas três polegadas mais curta do que no vale**. Foi sobretudo a **alteração de grandeza de diferença observada** — **umas três polegadas** —, valor muito superior às variações temporais já constatadas no mesmo local — que impressionou os presentes porque, embora Pascal pretendesse o contrário, a ideia não tinha nada de original. Até é muito possível que **Perrier** tivesse razão quando dizia ter sido ele quem sugeriu a Pascal tais observações.

Puy de Dôme 1648

Uma experiência muito mais significativa seria a **experiência do "vácuo no vácuo"**, que Pascal afirmava ainda ter realizado. Eis como ele a apresenta no seu "**Tratado do peso da massa de ar**", publicado postumamente em **1663**. Requer-se um tubo curvado na sua parte inferior, fechado no extremo A e aberto em B, assim como um tubo recto aberto nos extremos M e N, embora soldado por M ao extremo curvo do outro como se pode ver na figura. A **altura do extremo curvo do primeiro tubo B** deve ser a

Tratado de peso mássas 1663

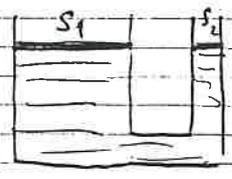
far-se com um dedo - e dar então a volta... ao dois tubos, enchê-la de mercúrio e voltar novamente para cima o extremo A, mergulhando então o extremo N num recipiente com mercúrio; o mercúrio do tubo inferior descerá totalmente e ficará alojado na curvatura... enquanto o do tubo inferior se cairá parcialmente ficando suspenso a uma altura de 26 ou 27 polegadas... A razão da diferença vem de que o ar exerce o seu peso sobre o mercúrio do recipiente onde desemboca a extremidade do tubo inferior e assim se mantém suspenso e em equilíbrio o mercúrio do interior do tubo, não exercendo todavia nenhum peso sobre o mercúrio alojado no extremo curto do tubo visto que o dedo... impede-lhe o acesso até dele, assim - porque não há ar que pese neste lugar - o mercúrio cai livremente já que nada se opõe à sua queda. É Pascal a acrescentar que se retirar o dedo, o mercúrio de MN desce, enquanto o que estava na curvatura de B sobe bruscamente.



O que Pascal omite acrescentar é que uma experiência semelhante foi realizada no verão de 1648, do seu vulto em Jirica Roberval, daí lhe tendo vindo a inspiração. De resto, a compreensão das particularidades do fenómeno tinha vários limites, o essencial sendo a distinção entre os efeitos do peso do ar e os da sua pressão, esta estando na sequência da sua elasticidade. Roberval, por exemplo, ficou boquiaberto ao verificar que bastava introduzir no tubo uma pequena massa de ar para que a coluna de mercúrio descesse significativamente. baseando, ajudado pela sua filosofia atomista percebeu que o essencial era a pressão do ar elástico, pressão resultante do peso das camadas atmosféricas superiores - e Boyle, como veremos, percebeu-lhe ainda mais, claramente. Mas Pascal não percebeu e, tratando o ar como um líquido, reduzindo a Aerostática à Hidrostática não o podia perceber.



Porque a teoria a que Pascal recorre é realmente a Hidrostática, tal como a aplica ao seu "Tratado de equilíbrio des líqües", também só citando após a sua morte. Nesse Tratado as novidades são bem mais aparentes do que reais. e É o estilo brilhante de Pascal que irá aí um ar original aos resultados já conhecidos, que se encontram nomeadamente em Stevin. O mais célebre desses resultados é o paradoxo hidrostático, que Stevin já conhecia e que servirá, no fim do século XVIII para construir a primeira prensa hidráulica. Um líquido está contido num recipiente com dois ramos verticais com secções constantes S_1 e S_2 , tal que $S_1 \gg S_2$. sendo o líquido incompressível (na prática, o caso de água) a pressão p exercida no diâmetro S_1 transmite-se integralmente a S_2 , de modo que a força $F_2 = p S_2$ produz uma força muito maior $F_1 = p S_1$ (mas, em troca, $Al_2 \gg Al_1$, de modo a que haja conservação do trabalho $F_2 Al_2 = F_1 Al_1$) Pascal bem pode proclamar que, assim, um homem abrigue a força de cem homens, mesmo nessa altura o resultado era cientificamente banal.



10.

Otto von Guericke (1602-86) foi um personagem extremamente colombo, um homem que indagou coisas

Devaux, 22
Paff, 58
Kipner, 123

Otto von Guericke (1602 - 86) personagem extremamente colorido
A teoria e a experiência - 10

de alegria de viver. Burgomestre de Magdeburgo durante os tempos conturbadíssimos de guerra da Trinta Anos, revelou-se um hábil diplomata na defesa dos interesses da sua cidade mas também inovou na técnica de construções de fortificações. Como físico, inventou a primeira máquina electrostática, embora o essencial do seu trabalho, que lhe valeu renome na Europa inteira, tivesse sido consagrado às famosas experiências sobre o que então se chamava o vácuo. Há mesmo que lhe conceder prioridade relativamente ao galileu por os seus trabalhos, feitos em moldes diferentes, iniciaram-se em 1631.

Guericke acreditava que a infinita potência de Deus não impede a existência do vácuo e, para o obter, achou que bastaria extrair a água contida numa bacia hermética: retirado a água, esse espaço fixaria vácuo. A experiência fracassou e Guericke compreendeu que as paredes do recipiente só eram relativamente estanques pois o ar podia passar através delas. Recomeçou então a evacuar o bocal de água mas agora colocando-o num tonel também cheio de água, para que o ar não pudesse passar, mas o único resultado foi facilitar a penetração de água do exterior.

Desgastado los recipientes de madeira, Guericke mandou fabricar um esfera de cobre que encham de água para ser extraída. No início tudo foi fácil mas, à medida que a experiência prosseguia, era cada vez mais difícil manter o êmbolo da bomba, que só dois homens fortes conseguiram mover. E quanto se se aproximava que a experiência resultara, eis que a esfera estora muito ruidosamente.

Este dramático epílogo parecia confirmar a teoria de que o vácuo é o "nada", sendo a impossibilidade de existência do nada que levava as paredes de esfera a procurarem juntar-se. Mas Guericke tinha outras ideias, era muito temeroso e só acreditava nos resultados experimentais. Como de costume

Kistner, 124

naí muito mais tarde, no prólogo de sua obra "Experimenta nova Magdeburgica de vacuo spatio" (1692), "nas questões de ciências naturais, os belos discursos não têm nenhum valor" e, mais adiante, "os filósofos afirmam apenas as suas opiniões e juízos nunca poderão obter conclusões certas e seguras nos fenômenos da natureza porque não têm em conta a natureza".

Assim, Guericke recomeçou a extracção de água de outra esfera de cobre agora fabricada com funde muito espessa e, evidentemente, a experiência pôde ser levada até ao fim sem que o recipiente estornasse. Recompensando tanta perseverança, a existência do "vácuo" deixara de ser uma questão especulativa para se tornar um facto experimental. E, ulteriormente, Guericke foi capaz de obter esse "vácuo" por extracção directa do ar contido na esfera, isto graças à invenção de primeira bomba de ar, a máquina pneumática.

Guericke deixou-se, como se pode imaginar, debruçar das propriedades desse "vácuo" que ele fazia primeiro si criar. Verificou que, ao abrir a esfera vácuo, o ar penetra nela tão violentamente que "se se aproxima demasiado a cara não se consegue respirar"; constatou igualmente que, no vácuo, as chamas se apagam, o animal morrem e um látex rebenta. Mas também se apercebeu de que podia assim demonstrar ser o ar pesado: novamente, para obter vácuo preciso, a uma balança cujos braços tinham comprimento muito diferentes ("balança romana") constatou que um recipiente onde ficava o vácuo

ambiente de peso desde que se deixasse entrar o ar.

E' interessante notar que Guericke entendeu o papel da pressão atmosférica na interpretação dos fenômenos que estava, atribuindo-lhe momentaneamente a responsabilidade do rebentamento dos recipientes em que se tentava produzir o vácuo e cujos paredes não fossem bastante espessas. Também soube verificar de forma muito simples que a pressão variava com a altitude, fechando a torneira de uma esfera metálica de fora, de a deixar encher de ar no caso de uma torva, quando reabria a torneira ao nível do chão deixava entrar um pouco de ar, o qual voltava a sair espontaneamente e se voltasse ao fundo de partida.

Mas Guericke vivia e igualmente do vácuo para realizar experiências de tipo quase recreativo, tais como tentativas que os bons burgueses de Magdeburgo obtinham com uma admiração recíproca e maravilhada perante o seu formidável burgomestre o qual, aparentemente, se divertia muitíssimo. Representando a sua cidade, participou em 1654 na Dieta do Santo Império em Ratisbona, e diz-se (o que é contestado, mas pouco importa) que tinha apresentado esse palco privilegiado para exhibir as suas habilidades que tornavam que falar em todos os Salões da Europa. Citamos, a título de curiosidade, três desses "mirabilia magdeburgica" que Guericke refere no livro "Experimenta Nova", editado em 1672.

Fisher I 24

Na primeira, ligava-se uma garrafa à esfera em que se fixava o vácuo e estava cerrada por uma torneira a qual, uma vez aberta, permitia que boa parte do ar da garrafa se escapasse para a esfera, a garrafa estorvando com um ruído terrificante. Outra utilização da mesma ideia, do êmbolo de um cilindro solidamente fixado ao chão partia uma corda que, após passar por uma roldana no topo de um mastro, se subdividia em vinte cordas menores ligadas a outros tantos torrens; quando se abria a torneira de uma esfera variava ligada ao êmbolo, o êmbolo recuava bruscamente no cilindro e os torrens eram arrastados a um metro do chão. Enfim, havia a célebre experiência dita dos "hemisférios de Magdeburgo", na qual dois hemisférios metálicos de uns 60 cm de raio estavam justapostos com uma junta de couro molhada e, uma vez extraído o ar do interior, 24 cavalos atrelados eram incapazes de os separar.

Durante essa estadia em Ratisbona, Guericke encontrou um frade capuchinho que o informou da experiência de Torricelli da qual se pretendia, aliás, o autor. O frade alemão, em excelente sintonia para entender o que se tratava, aproveitou a ideia para fazer construir em Magdeburgo um gigantesco barômetro de água na interior do qual flutuava um boneco de madeira dito "o homem indicador do tempo". Quando o boneco se situava mais acima ou mais abaixo, assim se percebia mau tempo ou bom tempo. Foi, como se disse, o primeiro serviço meteorológico local de que há memória.

No "Experimenta Nova" verificamos que, a partir de certa altura, Guericke se começou a interessar por outro domínio da física, a electicidade, ao qual deu um contributo importante ao inventar a máquina electrostática. Como ele próprio explica, ^{invenção de} ~~invenção de~~ construiu um tubo de vidro que, por aquecimento, permitia obter uma esfera de enxofre, a qual era recuperada partindo o vidro. Um cixo de ferro passando através de esfera de enxofre permitia colocá-la sobre um suporte e a electricidade obtinha-se que espregando a esfera com um pedço de lã que se fixava a rolar em contacto com a lã ou com a mão bem seca. Infelizmente, o autor não soube ou não pôde explorar devidamente a sua descoberta: observou que os objectos ligeros eram atraídos pelo globo electrizado mas, uma vez que o tocavam, passavam a ser repelidos, até entrarem em contacto com outro

Desvauz "Guericke" p. 23-24

A teoria e a experiência - II

objecto não electrando, por exemplo o chá. Guericke pediu-lhe as tentativas utilizar o fenómeno observado em termos speculation, numa tentativa vã para explicar estes voltes, os movimentos planetários.

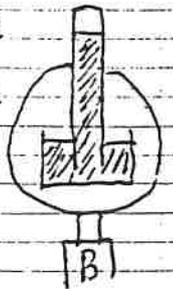
Considerado, e muito justamente, o maior físico experimental alemão do século XVII, Guericke teve um fim de vida triste. Acabou por se incompatibilizar totalmente com os seus concidadãos e naímonen sozinho, em Hamburgo, já muito velho.

II.

As duas formas diferentes como se aborda o problema do vácuo, por Torricelli e Pascal por um lado, por Guericke por outro convergem na obra de Boyle. Robert Boyle (1627-1691) era um rico aristocrata inglês, homem muito tímido que dedicion a vida à investigação científica sobre os mais diversos temas ligando as pompas mundanas. Químico e físico, desfrutou em vida de grande prestígio — chegou a ser eleito presidente da Royal Society, que ajudara a fundar, embora devesse renunciar a essa honraria — e fez uma grande influência sobre a ciência britânica do seu século. Newton, por exemplo, que não tinha um carácter fácil, sempre lhe manifestou uma especial deferência.

A fortuna pessoal de Boyle permitiu-lhe oferecer-se colaborador, de grande carreira, nomeadamente Hooke, (1635-1703), experimentador habilíssimo que se tornaria o amigo petileto de Newton, e depois Denis Papin (1647-1714), cujo nome permanece ligado à invenção do autoclave e à história da máquina a vapor. Foi com a ajuda de Hooke que Boyle aperfeiçoou a máquina pneumática de Guericke, instrumento essencial das suas investigações em Física.

O propósito essencial de Boyle foi demonstrar que o ar é uma substância elástica e que é essa elasticidade que explica a pressão que ele exerce sobre a superfície de um líquido a qual é medida pela altura da coluna barométrica de Torricelli. Nesta perspectiva, o que ele próprio considera fundamental é a experiência a que deu o nº 17 das vácuas que apresenta no seu livro de 1660 "New Experiments Physico-Mechanical touching the Spring of the Air and its Effects". Um barómetro de Torricelli é encerrado num recipiente hermético do qual, graças a uma bomba pneumática se extrai progressivamente o ar; em consequência o mercúrio do tubo desce quase até ao nível do que se encontrava na tina. A extracção do ar do recipiente diminui a sua pressão sobre o mercúrio da tina e, assim, provoca a descida do mercúrio do tubo.



Diz-se muitas vezes que Boyle era um positivista de atomista, na sequência de Cartesio, mas essa afirmação, sem ser falsa, necessita de ser colocada num contexto muito específico. É que Boyle era, acima de tudo um baconiano, nação impeditiva de o deixar a defender claramente qualquer posição técnica, e os seus contemporâneos mataram-se clarividentes ou considerá-lo o grande realizador do programa de Bacon. Ora Francis Bacon (1562-1626), homem político inglês que chegou ao posto de grande chanceler antes de ser afastado por intrigas, pretendia ser o arauto de uma nova ciência, os seus ideias sendo

apresentadas nos livros "Da dignidade e do acréscimo das Ciências" (1655) e "Novum organum" (1620).
 Aparente numa filosofia empirista que o levava a querer criar a nova ciência exclusivamente a partir da
 experiência (há que dotar a inteligência não de asas mas de sapatos de chumbo, que a obriguem a evitar
 flutuar as hipóteses), desdenhando as matemáticas que considerava apenas como "o grande apêndice da filoso-
 fia natural" que só forneciam processos de medida capazes, ao fim de investigações, de permitir exprimir
 as verdades descobertas — o profeta falhou nas suas profecias pois não foi assim que a nova ciência
 nasceu.

Novas lógicas
 Challenge, 105
 10

A influência de Bacon explica estas características singulares da obra de Boyle. Explica que assim, os ba-
 conianos, o tiveram iguais aos filósofos enquanto Huygens, por exemplo, excoava Leibniz (e este concordava)
 que "parece bastante estranho que Boyle não tenha construído nada sobre tantas experiências que en-
 chem os seus livros". Também explica que Boyle tivesse sido um experimenter muito sólido mas que
 nas suas obras questões de interesse científico muito distintas sejam tratadas com a mesma atenção
 a mesma minúcia — como não podia deixar de ser se tratava, por princípio, de observar apenas o
 comportamento das coisas, recorrendo a integrações das experiências em qualquer esquema teórico capaz
 de as orientar. Como alguma lição, das 5.000 páginas das obras completas de Boyle só talvez 17 por-
 centagem tenham algum interesse científico. O Baconismo era um obstáculo epistemológico mais que suficiente para
 impedir a compreensão da inovação galileiana.

Santos 1011
 30

Não nos devemos assim admirar que a interpretação teórica de Boyle para a elasticidade do
 ar fosse descepcionante, o ar sendo assim tratado a "uma montanha de pequenos corpos apinhados uns
 sobre os outros" mas a elasticidade do conjunto resultando meramente da elasticidade dos constituintes,
 os pequenos corpos comportando-se à semelhança de molas que resistem à compressão, e a limitação
 a transições para o nível microscópico o que conhecia dos objectos macroscópicos.

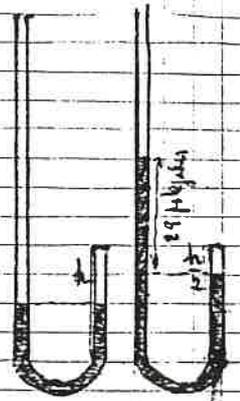
Paralelamente, torna-se compreensível que, embora as experiências apresentadas por Boyle nos "New Ex-
 periments" de 1660 sugerissem claramente a existência de uma relação matemática simples entre a
 pressão e o volume do ar, não fosse realmente ele quem descobriu a celebrada lei de Boyle (dita
 também lei de Boyle-Mariotte ou simplesmente a lei de Mariotte, para amentar a confusão. Sob a
 influência dessa obra de Boyle, essa relação foi apresentada e verificada experimentalmente por
 um físico francês, Torricelli em 1660-61, que a sugeriu a Boyle. Este só se lhe refere na segunda
 edição do livro (1662), incluído num apêndice destinado a refutar as teses de um tal Francisco
 Linus, aka. Francis Hall, um sábio jesuíta que foi professor de matemática e de teologia em Leyden e
 pretendia que o mercúrio no tubo não estava suspenso devido à pressão mas a uma espécie de membrana
 elástica, o "funiculus" existente acima do mercúrio. Boyle refere aliás Torricelli como autor da
 sugestão, mas há a acrescentar a este mérito o facto de ele, naturalmente, considerar secundária esta
 descoberta de uma lei quantitativa. Relembremos todavia, embora esquematicamente como Boyle verificava
 experimentalmente a exactidão da "lei de Torricelli" $pV = \text{const.}$

Relação de
 pressão
 relativa a
 elasticidade
 e peso do ar

Tome-se um tubo em U com dois braços de comprimentos muito diferentes, o mais longo aberto e o outro
 fechado, introduza-se nele uma certa quantidade de mercúrio e afete-se até que o mercúrio fique à mesma

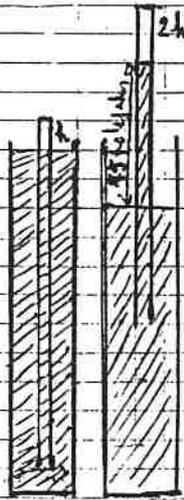
A teoria e a experiência - 42

altura em dos braços, o que era a prova de que o ar encerrado no braço mais curto estava à pressão atmosférica, correspondente à altura de uma coluna de mercúrio com 29 polegadas. Se se deitar em seguida mais mercúrio no tubo, ele vai subir nos dois braços mas muito menos no braço curto e fechado porque a elasticidade do ar aí encerrado se opõe à subida. Boyle pode determinar os sucessivos volumes do ar assim comprimido e, simultaneamente a pressão suplementar à que está sujeita, definida pela diferença de nível do mercúrio entre os dois braços, e a tabela de valores obtida concorda com a relação teórica $pV = \text{const.}$



Sesta Sécs
85-87

Para verificar a lei no caso de pressões inferiores à pressão atmosférica, a experiência tinha de ser diferente. Um tubo longo e fino aberto nas duas extremidades, era quase totalmente mergulhado na vertical num recipiente contendo mercúrio; depois, a extremidade superior do tubo era lacrada, de modo a encerrar uma certa quantidade de ar à pressão atmosférica, 29 polegadas. Deslocava-se então o tubo para cima, o que provocava simultaneamente um aumento do volume ocupado pelo ar e uma subida do mercúrio no tubo; a pressão do ar sendo igual à diferença entre as 29 polegadas e a diferença de nível entre as superfícies do mercúrio no tubo e no recipiente, a tabela de valores confirmava novamente a relação matemática.



12.

No seu tempo, Boyle foi tanto ou mais conhecido como químico do que como físico, e isso dá-nos uma excelente oportunidade de nos perder o contacto com a história de química. Vamo pois começar por situar as obras de Boyle sobre esta ciência que foram "The Sceptical Chymist" em 1661 e "The Origin of Forms and Qualities" em 1667.

A doutrina paracelsica, com a enorme difusão que conhecera tinha aumentado significativamente não só os conhecimentos de química empírica mas também a importância dada à essa ciência, com a consequência da multiplicação dos livros de química e a extensão do ensino de química nas universidades. Paralelamente, as ideias paracelsicas tornaram-se cada vez mais vulneráveis a contestações que proviham do desenvolvimento da experimentação que do advento de uma outra concepção de natureza. Mas antes de mais convem referir as novas descobertas empíricas.

Durante muito tempo tinham-se chamado sais a todos os produtos que não fossem simples metais embora já se conhecessem muitas substâncias que não se incluíam neste última designação. Por exemplo alguns ácidos, hoje então os vitriolos, tinham sido claramente identificados a fe finais do século XVI, reconhecendo-se mesmo a diferença entre eles analogias profundas: aqui o urinaque (ácido acético), o ácido nítrico era preparado na idade média e, no Renascimento, identificou-se que o ácido sulfúrico (o óleo de vitriolo) que o ácido clorídrico, chamado o espírito do sal porque era volátil e se preparava graças à acção do óleo de vitriolo sobre o sal de cozinha. Têm o caráter

saltear) eram chamados espíritos — o álcool era o espírito do vinho, mas o anímico ou as substâncias aromá-
ticas de que se derivam ou perfumam também eram espíritos. O conceito de espírito surgiu alai em oposição
à natureza das substâncias bem concretas como o sal, os outros espíritos, litas ou bores.

O personagem curioso deste fase transição foi o médico belga Jean-Baptiste van Helmont (1577 - 1644) um contemporâneo de Balileo que rejeitou os Quatro Elementos alquímicos tal como o Cinco Princí-
pios dos paracelsianos, ^{existência} água a essência de todas as coisas. A ideia teria surgido no seu
espírito picado por influência de textos bíblicos mas, dinas, do novo tempo, ele fez um ter-
mo solido fundamento empírico com a célebre experiência onde verificou que em cinco anos um jovem
champo aumentara consideravelmente de peso embora só lhe tivesse sido fornecido a água com que era
regado, como o peso da terra em que crescia não diminuía, concluiu que a água se transformara em
madeira e, por extrapolação, inferiu que a água se podia também se podia transformar em madeira em
outra, nesse caso, forse indispensável a intervenção do "espírito seminal dos vegetais", um conceito
de inspiração alquímica. Também trabalhou com um agente universal, o alembic, espécie de dissolvente
insensível, do qual deu a entender que formava uma pequena forca.

Foi Van Helmont quem criou a palavra gás (talvez de raiz flamenga) dando-lhe o seu signi-
ficado um tanto místico, relacionado com o "espírito selvagem" libertado nas fermentações de matéria
pantanosas ou até de cerveja. Para ele, havia um só gás, que de resto não tinha a ver com a atmosfera
e a atmosfera só se diferenciava muito mais tarde e no contexto por entretanto, continuou-se a
falar de ar, no singular, a importância do papel das substâncias gasosas em Química só sendo
entendido muito tarde.

O papel de Boyle nesta evolução não foi dispensável, ainda que possa haver muito exagero em considerá-lo
"o pai da química moderna". Experimentador rigoroso, verificou no laboratório que o corpo não se decom-
põem no famoso "Quatro Elementos" mas sim em substâncias muito diferentes e, em geral, complexas,
receptivas de novas decomposições. Daí o seu escepticismo quanto à validade das doutrinas de Paracel-
so ou de Aristóteles. Atribui-se-lhe o mérito de ter dado uma boa definição de elemento químico
— uma substância impossível de decompor — mas não foi capaz de identificar quaisquer elementos nem
de propor técnicas operacionais para o fazer. Seguindo neste ponto baixado, admitiu que "casos de
alturas diferentes" podem manter-se nas reações químicas. Em suma, criticou eficazmente as teorias
químicas do passado mas sem lhes contrapor qualquer alternativa.

De resto, Boyle acreditava na possibilidade de transmutação dos elementos, uma das bases fundamen-
tais da alquimia. Parece mesmo ter pretendido deixar pistas para alcançar esse objectivo, legando
expressamente a Newton e a Locke um "to" de projectar que lhes deveria permitir a desvelar
níveis de tais experiências. A tentativa de criar uma química diferente era realmente ainda
primária nessa época e, para mais, a filosofia baconiana de Boyle em nada o ajudava
num tal empreendimento.

A terra e a experiência - 13

13.

29-11-02

Embora outros capítulos de Física, ^{em particular} a óptica tivessem progredido significativamente durante o século XVII, era na **Mecânica** que se centravam as atenções, pois era a partir dela que se esboçava uma **nova concepção da natureza**. Essa novidade essencial, já **era** claramente visível nos "Discorsi" de Galileu (1638) e ~~de~~ ^{de} forma ainda mais nitida, nos "Principia Philosophiae" de Descartes (1642), ~~em~~ ^{em} continuava a afirmar-se nas décadas seguintes, o contributo maior a esse avanço tendo sido dado por **Christian Huygens** (1629-95). Huygens foi efectivamente um dos **gigantes** desse "século de gigantes" e a importância da sua obra nem sempre foi devidamente reconhecida como deve-se sobretudo a uma circunstância fortuita: é que, cronologicamente, ela está ^{como que} ~~quase~~ espalhada entre as de Galileu e Descartes, que não o precederam de muito, e de Newton que veio quase logo a seguir. Mas basta comparar o que Galileu ou Descartes sabiam dizer com aquilo que Huygens disse para entender a que ponto se avançara.

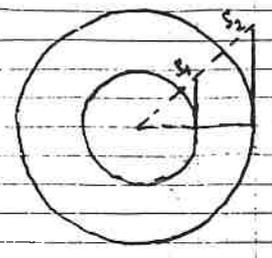
Filho de um grande burguês da Holanda, homem poderoso e culto, amigo de Descartes e correspondente de Mersenne, recebeu o jovem Christian uma educação geral nas universidades de Leyden e de Breda, onde se licenciou em **direito** mas pôde também adquirir uma **profunda cultura matemática**, ciência para a qual já então revelava dotes excepcionais. Foi aliás às **matemáticas** que ele consagrou o essencial das suas investigações no tempo da juventude, e os resultados que assim obteve na **grande tradição arquimédica** valeram-lhe desde cedo uma honrosa reputação internacional. Sem nos alongarmos sobre este ponto, vale a pena lembrar sobretudo Huygens quem publicou em 1657, na sequência dos seus contactos com Fermat, o primeiro livro sobre a **teoria das probabilidades**, "De calculis in joco de azar".

As capacidades matemáticas de Huygens não só se lhe mostraram úteis nas suas investigações sobre a física e mesmo as técnicas, que o começaram a interessar cada vez mais. Na verdade, este grande burguês requintado sempre nutria um interesse activo por **questões de índole prática**, que de aliás nasciam de uma forma altamente inovadora, começando por tentar resolver os problemas técnicos de natureza meramente científica, subjacentes às dificuldades tecnológicas encontradas. Também isso não seja muito evidente nas suas investigações astronómicas: grande construtor de lentes, com a ajuda do seu irmão Constantino, para a **fabricação de telescópios**, foi o primeiro a observar um **satélite de Saturno** (agora chamado Titã) e interpretar a estranha aparência desse planeta, que já Galileu assumira, afirmando que Saturno tinha a sua volta um anel de pequena espessura. Mas o significado das interações entre **ciência pura, ciência aplicada e técnicas** na obra de Huygens existe-se claramente na imensa quantidade de trabalho que ele fez com os estados e a construção de **relógios de pêndulo**.

O problema da medição do tempo com máxima exactidão humana tinha sido, há já algum tempo, um dos grandes desafios técnicos. As viagens oceânicas a larga distância tinham então adquirido grande importância económica e requiriam, evidentemente, técnicas capazes de determinar as navegações determinarem a sua posição no mar, traçando o cálculo da **longitude** não bastava a **latitude**.

A teoria e a experiência - 14

mente ao centro dos círculos. Neste caso, temos $s_1 = \frac{1}{2} j_1 \Delta t$ e $s_2 = \frac{1}{2} j_2 \Delta t$, quer dizer, $j_2/s_2 = s_1/s_1$ e como, por razões geométricas evidentes, $s_2/s_1 = R_2/R_1 = K$ uma $j_2/s_2 = K$. Contudo esta relação pressupõe móveis deslocando-se com velocidades diferentes e se atribuímos ao segundo móvel a velocidade $v_1 = v_2/K$ do primeiro tomamos, de acordo com o resultado anteriormente deduzido, que toma no lugar de j_2 uma aceleração $j'_2 = j_2/K^2$, o que mostra $j'_2/s_1 = 1/K$, ou ainda, $j'_2/s_1 = R_1/R_2$, quer dizer $j \propto 1/R$. Conjugando o triângulo e se levando a equação $j = v^2/R$, finalmente chega-se à lei clássica.



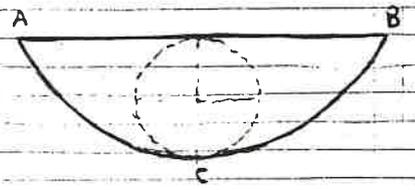
Diz-se-a que Huygens, ignorando ainda a lei fundamental da dinâmica, tinha de se limitar ao cálculo dos valores das acelerações, sem possibilidade de introduzir as respectivas forças. Mas a verdade é que no "Horologium Oscillatorium" ele não se contenta de equacionar que "se um móvel percorre a circunferência de um círculo com a velocidade que adquiriria caindo de uma altura igual ao quadrado do diâmetro, a sua força centrífuga será igual ao seu peso, quer dizer, entretém o fio que o retém com tanta força como se este estivesse suspenso". Tememos exprimir em linguagem moderna este teorema que já não se refere à aceleração mas à força centrífuga. Sendo a velocidade v de um corpo que cai de uma altura h dada pela fórmula $v = \sqrt{2gh}$, e sendo aqui $h = \frac{R}{2}$, obtém-se $v = \sqrt{Rg}$; ora a tese é que a força centrífuga actuando sobre um tal móvel é igual ao seu peso P e como a aceleração centrífuga $j = \frac{v^2}{R}$ tem, neste caso, o valor $j = g$, isto se entende se se admitir $\frac{F}{P} = \frac{j}{g} = \text{const.}$ de forma mais ou menos implícita, Huygens já admitia a proporcionalidade entre força e aceleração.

$h = \frac{1}{2}gt^2$
 $v = gt$

Voltamos ao problema dos relógios, que abandonamos para adiantar estes importantes resultados sobre os movimentos circulares. Recordemos, assim, que os relógios construídos por Huygens numa primeira fase, com a novel disposição mecânica que ele próprio lhes introduzira, funcionavam correctamente desde que, bem entendido, o seu movimento regular não fosse perturbado. Ora, justamente, esta utilização inutilizava o furo e que devia ser esta a sua principal aplicação prática, a determinação da longitude no mar. Como a acção das vagas imprime aos barcos movimentos incontroláveis, a amplitude de oscilação dos pêndulos transportados a bordo tinha de variar muito significativamente e, por isso mesmo, afectava de uma maneira grave o isocronismo essencial dos movimentos pendulares.

Huygens procurou ultrapassar esta dificuldade a partir de uma análise teórica complicada, perguntando-se se seria possível definir uma curva ao longo da qual um ponto material sob a acção da gravidade oscilasse justamente com um período que fosse independente da amplitude das oscilações. Conspicua isto a tentar definir aquilo a que os matemáticos chamariam a "taucírona", quer dizer, uma curva tal que um móvel deslocando-se sobre ela sem velocidade inicial atingisse o seu ponto mais baixo sempre no mesmo tempo, isto fosse qual fosse o ponto de partida da curva do qual tivesse partido.

Embora o cálculo infinitesimal ainda só existisse numa época sob uma forma incipiente e parcelar, Huygens era um matemático suficientemente brilhante para mostrar que a taucírona existia e



de la noche quaisquer dificuldades - bastava medir a altura da altura da linha do horizonte do Sol no zénite em da
altura polar - e mesmo não se podia dizer o conhecimento da longitude. Em princípio, a solução do problema
era fácil: se, por exemplo, um barco partido de Lisboa se deslocava para oeste de uma longitude de 10° , isso
traduzia-se na falta de 4 fenômenos astronômicos diurnos (e o curso do meio dia solar) serem sete
observados 4 minutos mais tarde do que o comum em Lisboa; bastava por uma simples tabela das horas do meio
dia solar em Lisboa e um relógio fiel para que a longitude ficasse bem determinada.

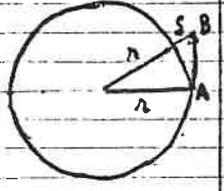
O problema vinha em que não se formavam relógios dignos de confiança, sobretudo para as longas dura-
ções das viagens de mar, e isso tinha sido inconveniente que praticamente todas as grandes potências
da Europa tentavam estimular a solução da dificuldade instituindo prémios chamados para quem
fosse capaz de o fazer. A dificuldade que Huygens teve de vencer para alcançar uma solução e que
se podia ser ultrapassada por um cientista de primíssimo plano. Numa primeira análise se trata
do seu "Horologium" de 1658 mas, sobretudo, nessa obra prima que é "Horologium oscillatorium"
de 1673, ele mostrava que a construção de um relógio de pêndulo eficaz para os fins pretendidos exigia
a resolução prévia não só de delicadas questões técnicas mas também de importantes problemas de mecânica
pura.

14

Já Galileu acarinava a ideia de utilizar em relógios as propriedades de isocronismo das pequenas
oscilações pendulares por ele descobertas. Se Huygens, contudo, foi capaz de realizar um tal projecto, graças
por um lado às invenções técnicas por ele introduzidas na própria estrutura dos relógios (nomeadamente o
balancane que opera em conjunto com a mola em espiral), graças por outro lado às investigações em
mecânica técnica por ele realizadas.

Começamos por referir o citado feito por Huygens dos movimentos circulares e a sua descoberta da fórmula
das forças centrífugas, que já se encontra no seu livro "De vi centrifuga", escrito em 1659 embora só publicada
do após a sua morte, mas os resultados sendo apresentados sem demonstrações no famoso "Horologium oscillat-
orium". Mas, neste caso, a elegância e a simplicidade das demonstrações são quase tão interessantes como a pró-
pria lei.

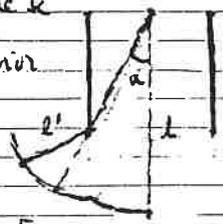
Sejam por isso dois corpos que descrevem com movimentos uniformes mas com velocidades
diferentes v_1 e v_2 círculos com o mesmo raio r . De acordo com a lei da inércia, se não
existisse uma aceleração centrípeta num corpo que se encontra em A acabaria por se deslocar,
no fim de um tempo Δt , para o ponto B situado a distância s da trajetória circular; logo s é o espaço
percorrido no tempo Δt sob a acção da aceleração centrípeta j , e Galileu ensinava-nos que há de ser $s = \frac{1}{2} j \Delta t^2$
No caso dos dois móveis em velocidades diferentes, se tomarmos $\frac{v_2}{v_1} = n$, teremos $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = n$ e, portanto, sendo
 $s = \frac{1}{2} j_1 \Delta t_1^2 = \frac{1}{2} j_2 \Delta t_2^2$ ou $j_1 n^2 \Delta t_2^2 = j_2 \Delta t_2^2$, isto é $j_2 = n^2 j_1$ donde se tira imediatamente $j_2 = \frac{v_2^2}{r}$
ou ainda $j = \frac{v^2}{r}$



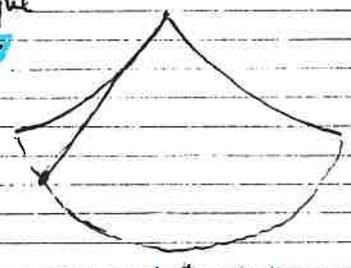
Consideremos agora que os dois móveis se deslocam sobre círculos concêntricos de raios diferentes r_1 e $r_2 =$
 $K r_1$, mas com velocidades diferentes v_1 e $v_2 = K v_1$, de tal modo que podem permanecer alinhados relativos

que até então parecia, aliás, a uma curva feia, qual muito outros já se tinham. Interessado: chamamos-lhe hoje a **cicloide** ^{mais}, nessa altura, era vulgarmente designada por "noleta", sendo definida pelo lugar geométrico da, pontos de um dado ponto de um círculo que roda sem deslizar sobre uma recta. Já Pascal demonstrou que a área compreendida entre o arco de cicloide e o eixo horizontal é exactamente três vezes maior que a área do círculo gerador e ^{mesmo} "rectificou" a cicloide, provando que o seu comprimento é igual a oito vezes o raio desse círculo. Agora, no **terceiro XXV do "Horologium oscillatorium"**, Huygens demonstrava que a cicloide era a **tamborona** e que o tempo — sempre o mesmo — que qualquer móvel levava para atingir o ponto mais baixo da vaza era exactamente $\frac{\pi}{2}$ vezes maior que o necessário para cair livremente ao longo do diâmetro do círculo.

Este resultado brilhante não bastava todavia para solucionar o problema: **como conseguir que a massa pendular descrevesse justamente uma isócrona?** A massa oscilante quando suspensa de um ponto fixo por um fio inextensível parecia ser forçada a descrever um arco de círculo. Huygens apercebeu-se todavia que se colocasse de um lado e de outro do fio uma **"estera" rígida**, para ângulos de valor superior a θ o pêndulo passava a oscilar com um comprimento $l' < l$ e o período sendo dado aproximadamente pela fórmula $T = 2\pi \sqrt{\frac{l'}{g}}$ diminuindo em consequência. Seria então possível introduzir "esteras" com uma forma e uma posição tais que, justamente, levassem a parte oscilante a descrever a cicloide pretendida?



Huygens demonstrou matematicamente que a resposta era afirmativa: bastava que as próprias esterhas fossem duas lâminas que se encontravam no ponto de suspensão e que tinham, ambas elas, a forma de uma semi-cicloide, o comprimento do pêndulo sendo igual ao diâmetro dos respectivos círculos geradores. Um tal pêndulo era realmente isocrono, forsem quais fossem as amplitudes das oscilações.



Dugas

Restava uma última e séria dificuldade a vencer: a passagem do estado do comportamento do **"pêndulo matemático"** ao do **"pêndulo físico"**, em que a massa oscilante deixava de ser um vero ponto material para ser um corpo pesado de extensão finita. Dir-se-ia que o comprimento do pêndulo físico era simplesmente definido pela distância do ponto de suspensão ao centro de gravidade da massa oscilante. Mas afirmando-se no axioma de que a gravidade nunca pode fazer subir o centro de gravidade de um conjunto de corpos materiais, Huygens demonstrou que a inferência precedente era falsa: o que determinava o comprimento do pêndulo físico não era o centro de gravidade da massa oscilante mas aquilo a que Huygens chamou o seu **"centro de oscilação"** e que hoje designamos por **"centro de inércia"** — quer dizer o ponto definido pela ^{semi da} **modos de cada massa pelo quadrado de sua distância ao ponto de suspensão**, tudo isto dividido pela massa total.

Estes notáveis trabalhos de Huygens não ilustram sómente os progressos ^{da matemática e da} **precisamente** da ciência moderna. Mostram também que se a ciência moderna não foi filha dos conhecimentos técnicos, como alguns pretendem, **hoje exagerava quando pretendia que as interações ciência-técnica só tiveram consequências significativas a partir do século XIX**. A construção do relógio de pêndulo por Huygens mostra bem as limitações da validade desta tese.

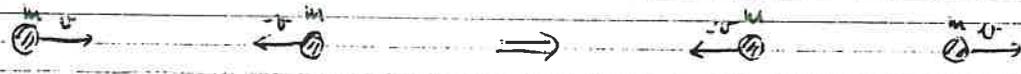
A teoria e a experimencia

15

Outra faceta da obra de Huygens em mecânica que não pode deixar de ser assinalada refere-se ao seu contributo para a teoria dos choques. Sabemos que esta questão adquiriu grande importância no âmbito de uma física onde só se concebiam interações por contacto, e que a tentativa de Descartes para a solucionar fora quase fracasso. Respostas correctas só surgiram em 1668, na sequência de uma espécie de concurso sobre este problema aberto pela Royal Society do qual foram vencedores três homens: Wallis, Wren e Huygens.

John Wallis (1616-1703), matemático ilustre cuja "Arithmetica Infinitorum" (1656) já anunciava o cálculo infinitesimal, ocupou-se sobretudo do que ele chamava de corpos "duros" e que, chocando, permaneciam colados, com a mesma velocidade, que era naturalmente a média ponderada dos valores algébricos das velocidades iniciais. Sir Christopher Wren (1632-1723), de início matemático e astrónomo, um dos fundadores da Royal Society e que se iria celebrar como arquitecto — deve-se-lhe, por exemplo, a Catedral de S. Paulo em Londres — ocupou-se do caso mais difícil do choque elástico para o qual obteve ideias soltas, suportadas por verificações experimentais ainda que nem sempre teoricamente convincentes. Quanto a Huygens, o seu tratamento puramente teórico do choque elástico é uma obra prima de elegância e de simplicidade conceptual, como vamos ver.

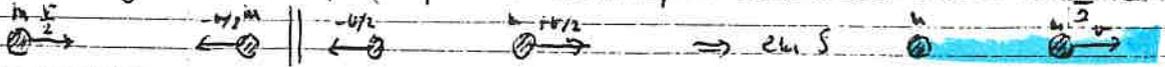
Admita-se, a priori, a primeira das celebradas regras cartesianas, decerto verdadeira até por razões de simetria: dois corpos de massas iguais chocando com velocidades iguais e opostas limitam-se a trocar as suas velocidades.



Seu é assim, qualquer outro problema de choque entre corpos de massas idênticas pode reduzir-se a este utilizando apenas o princípio da relatividade de Galileu. Considere-se, por exemplo — a extensão a outros casos não oferecendo dificuldades — o choque elástico de um corpo que, num certo referencial S (digamos, a Terra) tem velocidade v com outro corpo idêntico imóvel (v=0) nesse mesmo referencial.

S' será, por exemplo, um barco movendo-se num rio.

Considerar o problema de outro referencial S', deslocando-se em relação a S com a velocidade v para se ter levado a atribuir, em S', uma velocidade v/2 ao primeiro corpo e uma velocidade -v/2 ao segundo corpo, e, segundo a regra cartésiana, o choque atribuirá ao primeiro (em S') a velocidade -v/2 e ao



segundo com velocidade +v/2; portanto, no referencial S, após o choque o primeiro corpo fica imóvel, o segundo corpo adquire a velocidade v, o problema ficando resolvido com uma bela simplicidade.

Se dois corpos idênticos se deslocam em sentidos inversos chocam com velocidades na mesma intensidade das suas grandezas (massas) cada um dele, resulta com a mesma velocidade que tinha antes do choque.

Princípio de conservação das forças vivas

CITAÇÃO → "É realmente muito difícil descobrir e separar com eficácia os movimentos aparentes dos vários corpos das suas movimentações verdadeiras, porque as partes do espaço imóvel onde se realizam esses movimentos não são acessíveis à observação do nosso sentido. A situação não é todavia inteiramente desesperada, pois dispõe-se de alguns elementos para nos guiar, quer nos movimentos aparentes que têm diferenças de vezes, quer nas forças, causas e efeitos dos verdadeiros movimentos... Mas o modo de obter os verdadeiros movimentos das suas causas, efeitos e diferenças aparentes, e o inverso disto, serão explicados mais em pormenor neste tratado. Foi com esse propósito que o escrevi" [1] → Tirado do "Principia"

30-169 Distinguindo o real do aparente no movimento de queda dos corpos, Galileu representou a principal objeção contra o sistema copernicano, cuja verdade se tornou mais verossímil quando Kepler discerniu, sob a simplicidade aparente dos movimentos planetários, a bela simplicidade das órbitas elípticas. Esses resultados culminaram na obra de Newton que, unificando a mecânica galileiana, fundou definitivamente a distinção entre realidade e aparência e tornou indiscutível a autonomia de Kepler. As duas grandes correntes da física do século XVII foram unificadas no "Principia" de Newton (1687), graças a uma combinação fecunda e hábil das matemáticas com a filosofia mecânica que conduziu à lei da gravitação e reduziu as leis de Kepler a um caso particular das leis do movimento apontadas por Galileu. Quatro nomes de pensamento representados pelos grandes predecessores de Newton — Galileu, Kepler, Descartes e Huygens — não só surgiam agora compatíveis como inseparáveis, o triunfo de Newton significando a confirmação de toda a revolução científica do século.

Quando Isaac Newton nasceu, em 1642, no momento crucial dessa revolução, a obra de Galileu ainda não fora aceita, as descobertas de Kepler permaneciam ignoradas, e a influência de Descartes, Boyle e Huygens estava para vir. Foi durante a infância de Newton que a ciência europeia numa idade nova em que outros métodos apoiados nas matemáticas e na experimentação depressa adquiriram preeminência e em que teorias diferentes vieram ilustrar a metafísica mecanicista e empírica. Em Inglaterra, a pleiade de talentos que era a Royal Society facultou ao gênio transcendente de Newton um apoio adequado, legando-lhe uma herança intelectual tão rica de problemas importantes como de armas para os resolver.

A educação que ele recebeu na escola e na universidade não estava atualizada e, oriundo da mais baixa aristocracia, Newton não beneficiou das mesmas vantagens sociais que outros grandes cientistas como Huygens ou Boyle. Mesmo assim, quando ingressou no Trinity College de Cambridge em 1661 já adquirira um bom domínio do latim, que continuava a ser a língua científica internacional, e provavelmente de geometria elementar. Nos primeiros anos de Universidade, estudou grego, lógica, ética, retórica (a arte da composição literária), mais matemática e, embora nunca tivesse ido ao estrangeiro, também adquiriu conhecimentos de francês. O seu único ^{deste} ^{aroma} ~~viagem~~ ^{de} ~~estudo~~ a Londres ocorreu em 1663 e, após trabalhar um par de anos, o pupilo de Isaac Barrow (matemático de viar, recentemente regressado a Cambridge como primeiro "Lucasian professor") ultrapassou o mestre; na mesma época, após fundar a física estudando as obras de Galileu, Kepler, Descartes, Boyle e

Newton desenvolveu-se tardiamente frígido, entrando na universidade aos 18, era 3 ou 4 anos mais velho que muitos licenciados, mas no seu período estudantil obteve um preparo minucioso em ciência e em matemática, muito acima do nível corrente. Nos dois anos seguintes, 1665 e 1666, todas as suas realizações literárias foram esboçadas. Estava confinado em casa, em Woolsthorpe no Lincolnshire, pois a universidade fechou devido à grande praga, e foi no campo que a criatividade científica de Newton começou antes de morrer nos campos acadêmicos comuns. Na primavera de 1667, quando regressou, elegeram-no para um "Fellowship" no seu college, e ali ficou durante cerca de 30 anos; muitos dos seus colegas abandonavam a carreira por se absterem ou desejarem casar-se, mas Newton não se absteve nem casou e o seu pequeno patrimônio libertava-o da miséria universitária. Uma dispensa real concedida 5 anos após ter recebido o Baccalariatus "Licentia Professor" (1669) permitia-lhe guardar o seu "Fellowship" sem a obrigação normal de tomar ordens sacras. Claramente, a sua via era a ciência.

ITAGARÁ
fo do

Muito mais tarde, Newton escreveu sobre esses tempos juvenis que passara no campo: "No ano de 1665 descobri o método de aproximação por séries e a regra para reduzir a tais séries um binómio de potência qualquer. Em Maio desse ano encontrei o método das tangentes de Gregory e Fluxius e, em Novembro, formei o método directo das fluxões; no ano seguinte, em Janeiro, obtive a Teoria das Cônicas, e em Maio, abordei o inverso do método dos fluxões. Nesse mesmo ano comecei a reflectir na gravidade extendida à órbita da Lua e (tendo conseguido calcular a força com que um globo em movimento dentro de uma esfera faz pressão sobre a superfície desta) deduzi da lei de Kepler... que as forças que mantêm os planetas nas suas órbitas devem ser inversas dos quadrados das suas distâncias aos centros em torno dos quais se movem; e, além disso, comparando a força requerida para manter a Lua na sua órbita com a força da gravidade à superfície da Terra, em breve encontrei uma boa resposta. Tudo isto ocorreu nos três anos da peste de 1665 e 1666, por esse tempo estava numa idade melhor para a invenção e a reflexão em Matemática e em Filosofia do que em qualquer época ulterior" /2/.

Nos papéis e nos livros de notas datados desse período em que ele acabara os seus estudos também encontramos muitos registos de experiências de óptica e de cálculos matemáticos. Numa dessas experiências da juventude (que Newton descreverá na Opticks, 40 anos mais tarde) olhava através de um prisma um papel brilhantemente pintado a vermelho e a azul e via as extremidades de cores diferentes da folha desalinhadas entre si: "assim, o raio azul sofre uma refração maior do que o vermelho", comentará ele. Também surgiu uma hipótese completa do seu novo método de tratamento das equações algébricas, e as suas notas de mecânica mostravam-no relacionando a lei da força centrífuga e aplicando-a no cálculo da ação da força da Terra sobre a Lua. De volta à universidade, Newton não tinha falta de ideias nem de tempo para continuar a trabalhar.

De facto, nos anos seguintes consagrou a maior parte do tempo à óptica e à matemática. Provavelmente, continuou as experiências com o prisma e as cores das lâminas delgadas, e é quase certo que já estava a fazer ^{nos cálculos} o que descreverá em matemática e da sua nova teoria das cores. Newton escreveu muito mais, por ter recebido notas de leitura a que consagrou milhares de folhas, por esboçando ideias na famosa calculo. Desde Janeiro de 1670, e durante 20 anos, seu auge sobre óptica, matemática e, mais tarde, mecânica, mas se a carga era leve, apenas 8 aulas por ano, os cursos de Newton versavam quase totalmente sobre resultados originais e por ano

frases versadas em seus livros sob diversas formas. Desde que se mudou a Barnow, a sua correspondência tornou-se intensa e, graças a um amigo de infância, John Collins (1625-83), as capacidades matemáticas de Newton logo se tornaram bastante conhecidas, tal como aconteceu à sua óptica após as cartas à Royal Society em 1672. Newton também adquiriu um profundo interesse pela química e enquanto residia em Cambridge (além dos princípios) houve uma período de amizade quase da família que instalara no pequeno jardim sob as suas janelas.

É realmente estranho que, durante este tempo do tempo que Newton passa em Cambridge, haja tão pouco traço de interesse pelo problema que viria a ser o "seu" - o problema da gravitação. Nem mesmo os seus amigos se aperceberam de que ele atribuisse mais do que um interesse ocasional à mecânica ou à astronomia e, praticamente, nenhuma das suas questões examinadas em 1666 ocure nas suas cartas*. Newton estava na cabeça durante 15 anos uma das maiores ideias científicas, aparentemente porque só a considerava como uma mera hipótese e julgava que tinha coisas mais importantes a fazer do que ocupar-se dela. Ele pensava que não seria capaz de demonstrar as suas ideias de 1666 em termos que o satisfizessem matematicamente, embora, quando retomou o problema em 1679 e em 1684-5, a solução dessas dificuldades matemáticas só lhe tivesse exigido pouco tempo de trabalho.

O problema de astronomia matemática examinado em Woolsthorpe por Newton em 1666 era uma herança de Galileu e de Descartes. Desde que Tycho suprimira as órbitas celestes sólidas, as quais Kepler chamava "abundância" e "mínimas", o sistema solar perdura a coesão e se, evidentemente, os planetas não podiam permanecer ao acaso, nada havia que os mantivesse nas suas trajetórias. Descartes fora o primeiro a perceber a necessidade de um equilíbrio de forças no céu, uma espécie de mola cósmica que impedisse os planetas de se escaparem do vácuo solar sob a ação das suas forças de rotação, e procurava atribuir esse papel ao éter, mas não fizera quaisquer cálculos e até um astrónomo babilónico teria protestado contra a liberdade das suas hipóteses. Ora já no tempo de Descartes havia algo de mais sério a ter em conta: as leis de Kepler. Se Descartes chegou a apreender essas leis no meio da confusão de conceitos mágicos que tanto lhe deveriam repugnar no livro de Kepler não lhe atribuía importância e, nesse ponto, não foi mais injusto do que praticamente todos os seus contemporâneos.

Mas ainda havia outro problema. Para a Terra em movimento, Copérnico sustinha as bases da velha teoria de "ligereza" e de "gravidade", e se os erros continuavam a sair deixava de haver qualquer explicação racional desse facto. Copérnico sugerira a explicação vaga de que os fragmentos da Terra, tal como Júpiter tinham tendência a reunir-se como as gotas de água e Gilbert, o investigador do magnetismo, relacionara essa noção do ferro com a atracção magnética que ele observava na Terra. A atracção da Terra sobre os objectos terrestres (e assim para os outros planetas) devia poder ser específica pois de outro modo, como Aristóteles ensinava, tudo há muito, toda a matéria do universo deveria ter amolecido. Galileu ultrapassou claramente a hipótese

* Newton referiu-se imediatamente em seus cálculos antigos sobre a gravidade numa carta a Huggens de 1673 mas, por razões desconhecidas, não passou em primeira mão a obra da carta escrita por Huggens. Talvez Newton tivesse sido demasiado tímido para discutir as questões de gravitação e astronomia?

faculdade usava a "ligereza" enquanto que tal coisa existisse, mas a rigor sendo intrinsecamente pesado e so acidentalmente ligeiro, mas deixou explicitamente de lado a natureza ou a causa real desse "peso" universal embora seus comentarios terem a ver que achava plausivel a tese de Gilbert.

No que se refere aos efeitos dinamicos do peso, Galileu nunca examinou o problema das suas consequencias para o conjunto do sistema solar, foi a sua concepcao de inercia circular libertava-o de tal necessidade. Foi Kepler quem começou a relacionar o problema da gravidade com o da coesao dos céus, mas fez-o a sua maneira natural. Afirmou que a materia e sempre atraida pela materia semelhante, cada fragmento movendo-se na propria ao seu corpo (massa) e, assim, em 1609 escreveu que a Terra atrairia a Lua para junto de si (conquanto da propria incoherencia uma pequena fraccao da distancia mútua) e o foi o que não estivessem retidos nas suas orbitas pelas suas proprias "forças animais ou outras equivalentes". Ele avaliou quantitativamente tal tendencia para um movimento que de facto nunca ocorre, e arrinhou a influencia da Lua sobre as marés como evidenciando a realidade da attracção mútua; mas, como mais tarde Descartes, Kepler nunca explorou dinamicamente esta ideia porque era tão cego para as consequencias microscopicas da dinamica como Galileu o foi para a importancia das leis descriptivas de Kepler, e foi-lhe dificilmente deixar de o ser quando atronou o movimento destes a virtudes, potencias e almas residentes no corpo pesado. Era uma "virtude" emitida pelo sol que se localiza a sua volta as planetas, em quais Kepler não concebia a possibilidade de escapar a essa influencia, e embora as almas in planetas interagissem com a do sol para produzir as elipses, Kepler achava-se particularmente obrigado a explica-las, e elas não aceitavam contramovimento. A Lua, unico satellite conhecido em 1609, não movendo em volta do sol levantava um problema diferente e, assim, (como para Newton em 1666) foi o sistema Terra-Lua que mais aproximou Kepler da ideia de que a Lua tinha peso em relação à Terra. Mas de nunca apreendeu essa ideia até ao fim.

As especulações de Kepler tentavam explicar as leis da ellipticidade que ele já descobrira e que, em a não sendo importante Terceira Lei* (1619) constituiriam servando as condições necessarias a qualquer hipotesis cosmologica. A Terceira lei, cuja historia entre 1619 e 1665 e bastante obscura, era a chave do problema da estabilidade do sistema solar, porque indicava como o movimento das 5 planetas eram matematicamente independentes, constituindo um sistema harmonico. A generalidade de Newton permitiu utilizar uma abordagem, por isso que uma interdependencia era a consequencia da ausencia de uma unica força.

Integrou-se que em 1605 ou 66 Newton conhece a Terceira Lei de Kepler. No acto do profundo silencio sobre a obra de Kepler entre 1620 e 1665 alguns astrónomos ingleses tinham conhecimento a sua Terceira Lei e não se mencionavam a Terceira lei. Foi provavelmente Barrow quem mostrou Newton para Kepler, foi havia exemplares de todos os seus livros importantes na biblioteca do Trinity College e, de o fez, tratou-se de um conselho essencial. Newton fez o que Descartes não fizera e, admitindo a circularidade da orbita, calculou a força com que o planeta tenderia a escapar-se-lhe**, de inicio, teve dificuldade em determinar o ratio dessa força rotacional/3/

* A lei dizia que o quadrado do quadrado do periodo era o mesmo para todos os planetas: $(T^2 \cdot r^3) = k$.

** Newton não hesitou na resolução deste problema de mecânica pura por Huygens, que publicou o seus resultados 7 ou 8 anos mais tarde no seu "Horologium Oscillatorium" de 1673, obtendo deste modo também prioridade sobre Newton na publicação.

$\frac{1}{2} a t^2$
 $\omega^2 r, t = T = \frac{2\pi}{\omega}$
 $\frac{4\pi^2 r}{T^2} = \omega^2 r = 2\pi^2 r$

mas a prova obtive um raciocínio mais simples. A fórmula está numa nota escrita talvez em finais de 1666 ou até um pouco mais cedo e define correctamente a força centrífuga como aquela que aplicada durante o período de revolução de qualquer corpo (um planeta, por exemplo) arremetido de repente para uma distância igual ao produto de π^2 pelo diâmetro do círculo (ou da órbita) / 4j. Com esta relação, Newton solucionou o problema de Galileu explicando a razão por que os corpos não são projectados pela rotação da Terra fora, quando muito, a força de rotação é 350 vezes menor que a da gravidade. Em seguida, calculou a força de rotação da Lua a qual, considerando o diâmetro da Terra um pouco superior a 6000 milhas, nem sequer attingia 1/14.000 da força da gravidade. Eisim, uma operação muito simples mostrava que as forças centrífugas agindo sobre os 5 planetas - medidas em seus corpos para permanecerem nas suas órbitas - estavam na razão inversa dos quadrados das distâncias ao Sol.

Erani resultado com uma importância inimitável pois, embora não o tivesse explicitamente, Newton sustentava que uma única força vinha do Sol e dependendo das distâncias até de bastaria para manter os planetas nas suas órbitas sendo que estas fossem superfícies circulares. Além disso, via-se que a força exigida para reter a Lua na sua trajetória seria menor ou a que $1/60^2$ da força de gravidade - e tivesse de ser mais 8.500 milhas como diâmetro terrestre que o resultado seria exactamente $1/60^2$; como a distância da Terra 60 vezes o raio desta, seguir-se-ia que a lei do inverso do quadrado se aplicava à Lua com uma força mantendo a Lua em órbita que era a força de gravidade igual à superfície da Terra. Restou bem clara a razão ao supor que a Lua caíria como uma pedra e não, por seguir pela força de sua evolução.

Tudo isto foi realizado por Newton no final de 1666, ano em que girava a pensar espectacularmente um novo capítulo da mecânica, a dinâmica dos corpos em revolução, e foi levado a considerar os planetas como corpos em movimento de um sistema dinâmico sujeito à relação que acabara de descobrir. Era esta a grande conquista de Newton e, provavelmente, correspondia ao seu objectivo inicial. Huygens avançara na mesma direcção mas sem apreender a ideia de que o Sol e os planetas sustentam um sistema dinâmico submetido a leis matemáticas e não às leis meramente mecânicas de Descartes. Foi precisamente porque nunca ultrapassou os princípios de explicação cartesianos que Huygens não pôde fazer e, para ele, os movimentos celestes eram produzidos por pessoas mecânicas do éter, isto é, não poderiam resultar de meras leis matemáticas como a do inverso do quadrado. O raciocínio newtoniano apoiava-se na lei de inércia de Descartes e na lei da acção e reacção de Galileu, emanando o mecanismo do éter cartesiano adaptado por Huygens servia para explicar a existência das órbitas planetárias pela lei da inércia quer a sua aceleração por um centro; mesmo após a publicação dos "Princípios", Huygens nunca pôde encerrar a questão nos termos puramente matemáticos de Newton. Este, pelo contrário, abandonando as aplicações mecanicistas da gravidade, limitava-se às relações matemáticas; a Terceira lei de Kepler dizia como as coisas se passavam e ele deduzia da mecânica pura quais as forças necessárias. Era levado à lei do inverso do quadrado, lei ditada pela álgebra quando as relações físicas eram expressas em termos matemáticos, e o cálculo feito para a Lua sugeriu que a força centrífuga do Sol sobre todos os seus sistemas era a mesma que a força da gravidade terrestre.

que Newton pôde até aí não era matematicamente complicado. Existia um livro de valores numéricos de raios — para o raio terrestre encontrava em talitem um número com um zero xuvível para menos — e a física dinâmica subjacente ao seu cálculo da força centrífuga provinha do espólio galileico comum; o resto, a geometria e álgebra simples. Mas para mostrar como isso podia ser feito já era necessário brilho, e para entender propriamente isso teria de fazer-se havia que ter uma grande penetração científica. E chegado tão longe, não se poderia apontar problemas matemáticos bem mais difíceis, porque os planetas movem-se segundo elipses, todos eles, seja a Terra, a Lua ou o Sol, não são os pontos materiais de que trata a mecânica mas massas reais; comportar-se-iam, de qualquer forma, como se fossem pontos! As pessoas técnicas do movimento da época eram pobres, um movimento não tão complicado que nem os astrónomos o seguiam com a mesma facilidade com a sua ideia nova da gravitação, comprometer-se-ia com a opinião que, de algum modo, a força gravitacional seria provável as irregularidades da órbita lunar, isto quando a unidade do movimento era uma órbita circular, e se pensasse no caso do satélite de júpiter então não se poderia analisar. Havia a questão dos cometas, outros movimentos grosseiramente periódicos os quais se poderiam considerar uma boa ordem matemática. E, por do que tudo, na dinâmica celeste não se poderia dar um só caso tipo — o sol é um planeta — mas um conjunto de casos em mais casos, todos dominados pelo sol, e que mesmo assim, se a hipótese da gravitação universal era correcta, apiam uns sobre os outros, cada um trazendo as respectivas órbitas em órbita. Apesar da sua capacidade, Newton nunca resolveu completamente a questão, se não a conseguiu de que todas as perturbações mútuas do conjunto se compensavam, e encerram a possibilidade de, de vez em quando, ter necessidade um milagre que compensasse as faltas causadas de perturbações da ordem dos céus.

Newton não pôde até que ponto encerrava estes problemas em um de juventude em Cambridge. O estado de transição a dinâmica planetária, quando para as matemáticas puras e a óptica, o que sugere que a consciência de algumas dessas dificuldades. Pode ser que de sobressaltar a complexidade delas quando se tem a ideia de que não eram perfeitas (e de quase não se utilizarem no livro "Principia"). De qual modo sabia que necessitava de provas matemáticas mais rigorosas que as que imaginava até então e, em certo modo, precisava de mais factos, as medições astronómicas ainda sendo irregulares. Nessa época, sem se dar conta de que o mecanismo cartésiano já se havia tornado falso, e algo que ganhava um ar mais irregular óptico por um defeito das suas velhas comunicações anti-cartesianas, já se começa a ver a ideia tentativa era a única que conduzia à verdade na ciência.

Enquanto Newton se calava, outros cavredavam sobre o assunto. J. A. Borelli, o fisiólogo mecanicista da academia del cimento, publicou neste ano de 1666 a "Teoria dos planetas mediceos", que de alguma maneira e se dá a ideia que o sistema de satélites de júpiter constituía um subterfúgio, Borelli explicou-se a todo o mundo sobre a natureza de Kepler, de imaginar que as órbitas planetárias se desviavam em certo modo e emanam do sol em rotatórias; sendo captações em espirais, sua força diminua com a distância e de lá supunha erradamente que os planetas se deslocam com velocidades proporcionais às forças que os actuam, e, proporcionais às suas distâncias ao sol. Mas Borelli apercebeu-se em demoradas que, para compensar a força da força de rotatórias, era necessário uma tensão para dentro e, portanto, não que qualquer planeta tem um desejo

galeria

ou uma tendência permanente de aproximação ao sol; para explicar a elipticidade das órbitas (foi ele o primeiro astrônomo a explicar as leis de Kepler) imaginou ainda que, como um pêndulo, o planeta oscilava lentamente em torno do seu pericélio notório. Além deste ponto, a principal diferença entre as hipóteses de Borelli e as de Descartes (ambas que até lá não estavam matematizadas) era a ideia de um força centrífuga, à qual ele não ousava chamar atração nem se ousava identificar com a gravidade, mas era todavia difícil de distinguir de uma atração.

O universo de Borelli usou, a seu modo, as leis de Kepler e Descartes, era uma máquina notoriamente robótica graças ao vigor do sol, e havia grandes dificuldades na análise matemática de um tal sistema em que as planetas tinham a ideia de liberdade. Só abandonando as teorias inócuas do éter e das emanações solares seria possível retornar a ideia física de planetas em movimento livre de rotações, agora sob a influência da conhecida de que poderiam seguir a uma curva, para dentro. Em sua mente, o suposto sempre a existência de qualquer existência torna-se claro que o movimento inercial estilneo de um planeta poderia incurvar-se de qualquer maneira livremente. Apesar à força centrífuga, a inércia "inercial" se refletiu tornando-se visível e, assim, a ideia de uma impulsão para o centro rejeita o éter material e tirava-lhe qualquer papel no processo notório no céu.

Robert Hooke entendeu parcialmente esta situação, embora não a ponto de renunciar de facto à física do éter. A sua forma de vista, resultante de uma imaginação científica viva e com experiência sólida, desenvolveu-se durante o longo ano de silêncio de Newton, apoiado em pouco mais do que a sua intuição, o recultivo do sistema cartesiano e as análises em o movimento do pêndulo simples. Embora apenas uma geometria banal, só quando era denominado tende a ser visto e até em grande entusiasmo) que o problema que abordava não era de física experimental mas de física matemática. Até o aprender com Huygens, ignorava como calcular as forças centrífugas, e as matemáticas complexas dos movimentos elípticos estavam totalmente fora do seu alcance. Enquanto a teoria de Newton crescia partindo de relações matemáticas, a de Hooke fazia-o sobre considerações qualitativas dos efeitos da gravidade.

No início da década de 60, Hooke realizou experiências físicas de deteção das variações da gravidade; na "Micrographia" (1665) conjectura que, como a Terra, a lua podia ter um princípio de gravitação, e no ano seguinte, inspirado por Borelli, supôs que "um movimento [inercial] estilneo" podia transformar-se numa curva "graças à influência atractiva do corpo situado no centro". Num parágrafo sobre o cometa de 1677 escreve: "Supondo que o poder gravítico do sol ao centro desta esfera for como este poder atrativo sobre o corpo de todos os planetas e da Terra que se movem à sua volta, o qual he apondem convenientemente." O que se segue explica que aqui Hooke não identificava o poder atrativo com a gravidade, embora o tivesse feito no outro texto publicado pouco mais tarde, onde se procurava explicar "em sistema do mundo hipotético em várias espécies em que eram sujeitos e respectando integralmente as regras comuns dos movimentos mecânicos"... e quanto estáo apoiado em três suposições. A primeira era a afirmação anterior da gravitação universal, de que todos os corpos celestes tem um poder de atração ou de gravitação para o seu centro com o qual atraem os seus próprios partes de um modo tal que se situam na sua esfera de ação. Hooke fez claramente que o sol, a lua, a Terra e os planetas influenciam os movimentos uns dos outros. A segunda suposição era a lei de inércia, com a qual

que especial se que o processo recíproco foi ser transformado em "círculo, diptere ou outra curva mais complicada" por "algum outro poder efetivo" agindo sobre o corpo em movimento. A terceira suposição era a de que o poder atractivo depende com a distância, embora Hooke acrescentasse que ainda não determinara experimentalmente (!) a respeito desse decréscimo 161. (Esta observação mostra que a via de Hooke não era matemática). Tinha que as hipóteses de Hooke foram muito significativas em relação à teoria de Newton no "Principia", não há dúvida de que os contemporâneos tiveram ficado profundamente impressionados quando da sua apresentação à Royal Society na forma de panfleto, onde elas estavam aliadas juntamente com muitas outras hipóteses, novas ideias. Ele nunca apresentou acabado o prometido sistema do mundo nem foi capaz de oferecer qualquer suporte firme, experimental ou matemático, para as hipóteses em que se apoiava. Neste aspecto, Hooke foi um grande infeliz, foi era o início mesmo da sua geração que, em termos lútos, caminhava na mesma pista que levou Newton ao seu fim, e diz-se que, imitado em ele, Newton nunca pôde sequer reconhecer esse facto.

Newton estava sobretudo ocupado com outras questões, e nada mostrando de novo nas ideias de Hooke nem sequer lhe teria atribuído importância. No mês de 1673 apresentou a formação da Royal Society recusada por Oldenburg o qual, em necessidade, suspendeu Newton do pagamento de esta e acrescentando que "terço curiosamente por as regras e inconveniências que em se outra membro da mesma companhia para ter um certo direito, e que considere que dificilmente se conseguirá no mundo qualquer companhia sem alguma espécie de disciplina. Poder-se-á sentir satisfeito de que, no seu conjunto, a companhia o utilize e aprecie..." 171

A carta de Newton não foi enviada pois declarava que "pretendia que não o solicitassem mais sobre questões de filosofia" e requeria suspensão de receber novas réplicas a "cartas filosóficas". No mês seguinte teve ordem de entregar a Royal Society a sua teoria óptica, e quando submeteu à Royal Society a última em extensas memórias sobre as suas lamínulas delgadas de novo se mencionou as ideias de Hooke de que o mundo poderia talvez tratar-se na "Micrographia", ao que Newton respondeu desabridamente. Após 1675, as suas relações com a Society foram escassas; Oldenburg, Collins e Barrow tinham falecido, e embora a amizade de Newton com Boyle permanecesse íntima, o contacto com Locke cessou. Hooke e Nehemiah Dew escreveram a secretária da Society e os "Philosophical Transactions" atravessaram uma crise.*

Em Janeiro de 1676, após o último conflito, Hooke escreveu a Newton uma carta conciliatória, expondo-lhe ao Oldenburg por fazer relações falsas, manifestando admiração por Newton e dizendo-se contente "por ver serem raras e melhoradas coisas que há muito lhe interessavam mas não tive tempo para completá-las"; em virtude disso nem celebrações, celebração uma homenagem privada em vez de disputas públicas. Newton respondeu com uma cortesia e não menor sinceridade, afirmando mesmo que "atribui demasiado valor à minha capacidade para investigar esta teoria (a teoria das cores). O que Descartes fez foi um belo trabalho, e a sua própria contribuição acrescentou muito na via do método, acrescentando ao método um novo método filosófico às cores das lamínulas delgadas. Se eu não tivesse, se tivesse em 1673 não se queira 181. (Na verdade, o primeiro se não longe porque é igual sobre o assunto de um gigante; Newton, em habilitação, simultaneamente valoriza e desvaloriza a sua obra). Mas o ramo de óptica não floria. Os dois homens tinham interesses demasiado próximos e concepções científicas demasiadamente

* mais intimamente com os "Transactions" durante um tempo. Após a interrupção, Hooke publica 4 números dos Philosophical Transactions entre 1679 e 1682. No ano seguinte, em o novo secretário Robert Plot, os "Transactions" começaram.

matos diferentes para que uma unidade fosse perdida; ambos eram extremamente susceptíveis, intelectualmente uns para os outros, e viviam nos limites de proximidade. Newton, em geral, tratou seu trabalho no reconhecimento de verdades ou experiências realizadas por outros, não tinha habitualmente cuidado em apagar a vaidade de homens menores cujas ideias (importantíssimas para eles) apenas tinham sido paralelas a suas intervenções no seu pensamento no sentido de serem de sua grandiosa concepção. A injelicidade de Hooke estava em não se satisfazer com ser o que era — o já era muito — e querer ser outro Newton o que não acontecia.

Os dois homens não se zangaram. Quando Hooke sucedeu a Oldenburg como secretário da Royal Society trocou com suas cartas certas opiniões e dois anos mais tarde, em Novembro de 1679, Hooke propôs de novo a Newton ideias mais elaboradas, incluindo-se uma carta do tipo que um secretário pode naturalmente enviar a um membro ausente e distante de sua ^{agremiação} ~~agremiação~~. Nela se havia um ponto importante, onde pedia a opinião de Newton sobre a sua própria hipótese "de como o movimento elíptico dos planetas com um movimento inerte segundo a tangente e um movimento de atracção para o corpo central". Bruscamente, a atenção de Newton foi atraída para a reivindicação e para seu impulso segundo se nota interrompidas durante todo ano e, embora na sua resposta ele se afirmasse incompetente quanto a hipótese de Hooke e confessasse que há muito o seu interesse científico estava voltado para outros temas "tanto que às vezes lamentava o tempo gasto nessas coisas sobre coisas mais úteis para a ciência", não pôde dissimular que o seu interesse fora despertado. Ele acrescentava, em jeito, "uma fantasia minha" sobre a queda de um corpo pesado para o centro da Terra, na hipótese de que haveria apenas constante durante todo o caminho para que pudesse cair.

Houve então uma mudança de cartas nas quais apareceram os "Principia". Suspeitando os seus motivos e desejo de marcar um ponto, Hooke rejeitou a trajetória em forma de espiral terminando no centro da Terra como um erro grosseiro de Newton, afirmando que a ignorância de ser o tipo voltará ao seu ponto de partida lembrando "uma espécie de elipse" (ele não sabia que a curva seria uma linha fechada) e, não contente com isto, levou à Royal Society as cartas expostas e cartas de Newton. Este pôs a questão, e acabou por demonstrar que Hooke estava em erro, calculou a trajetória da queda na hipótese de que a curva de queda era elipse entre a superfície e o centro, o resultado não era uma curva em forma de espiral de modo que nada se assemelha a um "elipse". Mas Hooke apaixonou-se de novo no assunto (a 6 de Janeiro de 1680) "que a minha hipótese era que a atracção para o centro estava sempre na recíproca da proporção dupla da distância a esse centro (isto é, como $1/d^2$) e, por consequência, que a velocidade varia na proporção sub-dupla da atracção, quer dizer, como Kepler supôs, recíproca da distância..." /10/. E prosseguia dizendo que, embora este problema fosse trivial, quando aplicado aos corpos celestes "na curva precisamente calculada, da qual se pode obter de muito tempo estes dados usamos para encontrar nas tabelas os movimentos reais dos planetas". Para Hooke, as condições hánimicas que definem — movimento periférico e atracção central segundo a lei do inverso do quadrado — seria possível calcular a verdadeira trajetória dos planetas, que se verificaria

* Ele dissimulava insistentemente ou não? Necessário, escreveu a James "Cairns a Boyle", culpava-se de química e era o paralelo de Hooke. Mas o período 1676-79 é talvez o período em que se viveu mais sobre a vida de Newton.

...e nem sempre mas não inventa as elipses e elipses assim como para os nomes. (Se de repente que as elipses de Kepler eram as verdadeiras orbitas teria obviamente utilizado acima a palavra elipse e não teria inventado que to a natureza da curva que procurava). Newton ignorava totalmente esta carta. Onze dias mais tarde, sem qualquer consciência da ofensa mortal que lhe tinha feito, Hooke dirigiu-lhe novo apelo, em termos que evocam aliás graves insuficiências nas suas ideias, para que determinasse essa curva: "Não acredito que usa o seu excelente método lembra facilmente a forma e propriedades dessa curva e sugira uma razão física dela III/. Mas Newton não era homem para se transpor ao calculado de outros e permaneceu em silêncio; o que Hooke lhe fizera lembrar permaneceu oculto durante mais quatro anos e meio.

Essa demonstração que Newton lhe recusava, Hooke nunca a pôde encontrar. Em o seu conceito de gravitação universal, quando as teorias de Huygens da força centrífuga apareceram em 1673, foi capaz de as combinar com a Terceira lei de Kepler e deduzir a lei da atracção segundo o inverso do quadrado para o movimento circular, como Newton fizera muito antes, em 1666. Ele conjecturava que essa lei provocaria no céu um movimento de tipo elíptico requerido pelas suas Primeiras leis de Kepler mas - considerando a natureza física deste e não matematicamente - admitia que tal curva deveria ser mais complicada que uma elipse geométrica e, por isso, dizia a Newton que a trajetória de um corpo em queda para o centro da Terra era um "elípticoide" (curva perto, o seu movimento das ideias de Hooke era aqui paralelo ao das de Kepler, o qual se iniciou pensando que a órbita seria ser mais complicada que uma elipse, exata). Hooke não era platonista. Desafiou Newton a definir uma curva mais complexa, mas o que até então foi uma demonstração geométrica de um movimento elíptico. Dinamicamente, a primeira e a segunda leis de Kepler eram de uma exactidão perfeita e não, como Hooke admitia, apenas aproximação, mas Newton deixou-o na ignorância desse facto.

É bem conhecida a história de como o "Principia" emergiram a ser escritos. Por volta de 1684, John de Newton e de Hooke, Halley e Wren também estavam intuitivamente convencidos da lei da gravitação segundo o inverso do quadrado, mas nenhum dos outros três se apercebeu matematicamente dessa lei as orbitas. Jovem e energético, Halley foi exponendo a Cambridge Summeter o problema as proporções matemáticas: "Qual seria a curva resultante em planetas quando se a gravidade devesse ser o quadrado da distância?" Newton respondeu logo que era uma elipse e como Halley, cheio e estupefacto, lhe perguntasse como o sabia, dirigiu-lhe que o calculava; mas quando Halley lhe pediu o cálculo não o pôde encontrar, Summetero returnou em 1701 /12/. Newton pensava secretamente o que outros pensam sempre em o seu apuro não tinham conseguido descobrir! Ao preparar o cálculo, ele próprio se apercebeu de que não podia fazer isso e que, para obter o resultado deve e obviamente, teria que introduzir variáveis, definições, proporções novas, - em suma a criação de uma nova ciência matemática ao tratamento de problemas de mecânica. Após uns dias ou umas semanas, Newton decidiu consagrar o seu curso do próximo trimestre do outono (1684) as "Movimentos em Espaço" e, logo em três meses mais tarde, em Outono, escreveu a expor um texto que, na substância, era o do Livro I do "Principia". Cumprindo a promessa feita, parte desse resultado foi enviada a Halley por ele mesmo e voltou a Cambridge para convencer Newton a apresentar o seu trabalho à Royal Society. Aceite de todo, Newton meteu-se ao trabalho de rever e ampliar o texto do curso, mas ao durante o outono uma epidemia é que o "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica" (Principia Mathematica da Filosofia Natural) adquiriram a sua expressão actual.

Quando o livro I foi apresentado à Royal Society, em 1686, Hooke e Newton tiveram a quarta e última disputa. Dela resultou a retirada virtual de Hooke da Society nos últimos anos da sua vida, o repúdio da verdade de Newton de abandonar a universidade e a ciência, enfim a sua decisão de não publicar a "Opticks" antes da morte de Hooke. De certo a acusação de plágio feita por Hooke a Newton não era mais falsa que a displicência com que este acolheu as justas reivindicações de reconhecimento de Hooke. Newton podia de facto pretender que ultrapassara largamente Hooke, tornando impossível qualquer comparação entre os seus resultados, e a contra-acusação de que nada que aparecia em Hooke, e qual nada de usá-lo, era verdadeira. Mas o extraordinário mesmo estava a ser injusto ao referir que Hooke tivesse realizado coisa alguma. Nas cartas a Halley (que se encarregara de pagar a edição dos "Principia" e a ia tanto durante a impressão) quanto nessa fase das relações entre Hooke, Newton fez uns tantos comentários não só com interesse polémico sobre os obstáculos que tivera de vencer até poder escrever os "Principia". O primeiro era, naturalmente, a demonstração de que a lei do inverso do quadrado se aplica a órbitas elípticas*; ele atribuía pouca importância à descoberta da própria lei, e qual se tornara evidente após o livro de Huygens de 1673, a dificuldade estava em demonstrá-la como matematicamente exata para as elipses astronómicas e não só para os círculos: "Há objecção tão ínter sobre a exactidão desta lei do inverso do quadrado que, sem as minhas demonstrações (das quais Hooke tinha uma intenção) nenhuma hipótese poderia ser que ela fosse exacta" (13). Newton punha a ênfase, sobretudo, na reconhecida e impossível de exactidão da lei, e que só um matemático poderia inventar a situação demonstrando, precisamente, que era perfeitamente exacta e primariamente verdadeira. Newton afirmava, bastante, que Kepler conjecturava que as órbitas planetárias eram elipses enquanto a sua demonstração provava a precisão matemática quer da lei do inverso do quadrado quer das elipses.

Em segundo lugar Newton recordava-se de que nunca explicara a lei do inverso do quadrado sobre a superfície da Terra e, esta se uma boa demonstração que encontrou no ano passado (1685) sustentava-a de não se aplicar com precisão suficiente não para baixo (14). Para Newton, era evidente imediata que se a força gravitacional é uma propriedade invariável existente nas partículas últimas da matéria; ora, vemos o caso das órbitas astronómicas vizinhas como a Lua e a Terra são tão distintas que as linhas unindo duas quaisquer partículas serão sempre sempre as mesmas paralelas e do mesmo comprimento, logo é fácil concluir que a força total é a soma das forças entre as partículas. Mas para um corpo só as actuações da superfície da Terra, isto não é mais uma hipótese, a situação era muito diferente pois, neste caso, como somar as forças das partículas e obter a resultante? Na "Principia", Newton expõe as dúvidas que tivera quanto à justificação de forma de pensar do mesmo modo: "Depois de encontrar que a força da gravidade sobre um planeta porrem e é sumada pelas forças da gravidade sobre todas as suas partes, e sobre cada parte actua na proporção inversa do quadrado da distância até ela, ainda duvidava se que tal proporção seguia o quadrado da distância verdadeira exactamente ou só aproximadamente para a força total composta de tantas forças parciais; porque podia ocorrer que uma proporção fosse exacta precisa a pequenas distâncias mas se tornasse inexacta justa à superfície do planeta

* As mais conhecidas, cônicas que nascem em secções (elipse e círculo) ou abertas (parábola).

nae as distâncias as particulares são sençais e as suas situações diferentes /15/. Essa leiida foi eliminada por um conjunto de teoremas em quais Newton integra matematicamente as forças individuais provenientes das inúmeras partículas de dois corpos sólidos e demonstra que a força resultante (ou resultante) entre elas "reside no nível na proporção da distância entre o seu centro, e a outra com a mesma lei que se aplica às próprias partículas. E este facto é notável /16/. As matemáticas se novo demonstravam a verdade de algo finamente inexpressível embora fechada, a que se age sobre qualquer corpo situado a partir do seu centro e isto vale para qualquer lei de atração; mas se se aplica a lei do inverso do quadrado no interior da esfera está, no interior dela, a atracção para o centro será proporcional à distância.

Há aqui pois ser duas situações em que se falta de plausibilidade física ou real da lei do inverso lo que não se pode ser corrigida pelo raciocínio matemático. De facto, Newton tinha razão ao pretender que o seu maior mérito não estava na concepção de uma hipótese física (contra a qual havia poucas objecções, inalteradas sobre a sua reflexão física qualitativa) mas na demonstração matemática de que o que pareciam objecções físicas era transposto por uma análise adequada em termos matemáticos decisivos a partir da validade da teoria. Por outras palavras o que tinha matemática é que a teoria da gravitação universal varia alguma coisa e só nessa perspectiva podia ser verificada pela observação e tornar-se convincente. No polo oposto, Hooke fez um comentário que provocou uma das aproximações mais finas de Newton: "Sem ter feito nada, Hooke ainda se julga não se sabe e vive-se lentamente referindo tudo quanto se refere a determinar um assunto por cálculo e observação, recusando-se de não ter realizado esse trabalho devido a outras ocupações quanto havia de usar-se pela sua incapacidade, as suas palavras tornam-se evidente que nem sabia abri-lo. Seria curioso que o matemático que se esforça, clarifica e realiza tem a tarefa de serem inventada com o papel de ser calculadora só para trabalhos físicos, enquanto o outro, o que se aplica a unir e a inventar sobre bases as coisas, tivesse direito de se apoiar-se sobre as invenções, das que surgiram antes dele como um que vieram de fora" /17/. A imaginação e a capacidade de fazer hipóteses só podem dar o começo de uma teoria física mas para avançar, para fazer algo, há que construir uma teoria matemática e submetê-la às experiências de observação.

Foi por isso que Newton intitulou o seu grande livro "Principia Mathematica de Philosophia Natural" e não se chama simplesmente, das primeiras palavras, "Sobre os Movimentos dos corpos". Para ele, as leis da natureza não eram certezas introspectivas mas consequências do raciocínio matemático, e o método de explicação in primis a partir dessas leis não estava em hipóteses engenhosas mas também no raciocínio matemático. A proclamação de fé de Galileu, tinha variado pelo mistério numérico e geométrico de sorte a atingir a física, tornou-se para Newton uma regra de procedimento clara e severa: "toda a investigação física parece consistir no seguinte: partindo dos fenómenos do movimento investigar as forças da natureza, e graças a essas forças demonstrar os outros fenómenos" /18/. Seguiu outro caminho que não o das matemáticas só tinha a natureza a natureza a física, embora o próprio Newton ainda não tivesse totalmente libertado a mente de que as matemáticas iam além da lógica, de que elas tinham em si a razão, a harmonia e a ordem, foi, em última reprodução das coisas do direito as antigas divisões da corba municipal /19/.

* "Principia", Livro I. Proposições LXX a LXXVII.

Newton e o universo da lei

O "Principia" não é um livro difícil. Seus contemporâneos de Newton eram capazes de o abandonar sistematicamente, do modo que a sua mecânica celeste tornou-se largamente conhecida em termos de obras de vulgarização como a "View of Sir Isaac Newton's Philosophy" (1728) de Henry Pemberton ou através da "tradução" dos termos na linguagem do cálculo. Como Newton queria no começo do livro III, "The system of the World", "...nem eu acho nem ninguém a estudar previamente todas as proposições do [Primeiro e Segundo] Livro porque muitas delas exigem demasiado tempo como os outros com bons conhecimentos matemáticos. Basta ler com cuidado as definições, as leis do Movimento, e as primeiras três seções do Livro I, e poder-se-á passar a este Livro..." /20/.

Viz-se que John Locke teria a impressão favorável de que as matemáticas de Newton eram de importância, visto, em o "Principia" plus suas ideias científicas que adotou; levou muitos outros a lerem o livro de modo analógico. Mas um tempo depois, surgiu uma nova dificuldade entre Newton e os seus leitores: ele tivera o azar de escrever no momento em que outras matemáticas nasciam, na época dos primeiros artigos de Leibniz sobre o cálculo, e no intervalo de uma geração a matemática continental também adotado o método leibniziano para resolver o gênero de problemas tratados no "Principia", enquanto os britânicos achem muito menos propensa à análise fluxional do próprio Newton. Ora a mecânica newtoniana estava formalizada nos demonstrações geométricas de uma geração mais antiga - Huygens, Wallis, Barrow ou Gregory; não está escrito, na última parte da obra de física-matemática muito segundo a tradição física. A sua forma representa um considerável antiquário e trabalhoso.

Mas as dificuldades não são só matemáticas. Para matemáticos de futura comparação à de Newton, como Huygens ou Leibniz, que a sua filosofia que se revelava inaceitável. A teoria da gravitação supunha que os corpos podiam atuar nos sobre o outro a distância, em conexão mecânica? Teriam o espaço e o tempo de ser tratados como Newton pretendia? Estaria de preferência a metafísica aparentemente triunfante do mecanicismo? Teria de transformar Deus, como Leibniz alegava, num sereno imperfeito, necessitando continuamente de intervenção a sua criação? Tais problemas ultrapassavam o raciocínio matemático e a decisão experimental, de modo que até nos séculos após a publicação da obra de Newton permaneceu, em parte, em suspenso.

O "Principia" abre com 25 páginas de "Definições" e "Axiomas", depois os princípios básicos da mecânica e, sob os princípios mais gerais, expunção virtualmente tudo quanto se seguiria nesta ciência até 1687. Aqui, Newton dá sua primeira vez à dinâmica fundamentos claros e concisos, que nem talita nem Huygens tinham apresentado. Define massa, quantidade de movimento, força e força centrífuga, princípios que para serem indistintamente as palavras "inércia", "impulso" e "tensão", pois serviram de forças centrífugas matematicamente, não simplesmente; em definições são equívocos do primeiro Esolito sobre o espaço e tempo que discutiam no início. Os Axiomas incluem as três leis do movimento e as leis da gravitação; a lei I é a lei da inércia, a lei II afirma a proporcionalidade da força e da aceleração²², a lei III é o princípio da igualdade da ação e da

²² Qualquer ato permanece no seu estado de repouso ou de movimento e de lugar e sempre tanto se for dirigido a qualquer o seu estado até que seja forçado a variar.
ou a variação do movimento é proporcional à força atuante e realiza-se segundo a linha e para a parte a qual a força atua.

reacção*. Os dois primeiros corolários tratam do paralelogramo de forças e da multiplicação; o terceiro e o quarto afirmam que a quantidade de movimento total e o centro de gravidade de um sistema são independentes das suas interacções, enquanto o quinto e o sexto dizem que as interacções são insensíveis ao movimento uniforme ou uniformemente acelerado. Segue-se um segundo Escolio onde Newton exemplifica a utilização dos Axiomas, obtendo resultados precisos já conhecidos por outros autores, e depois de ter essa apresentação fundamentada ele inicia os seus avanços próprios a partir daí.

O livro I do "Principia" contém a teoria matemática completa sobre que se apoia a mecânica celeste. É bastante geral embora, nas proposições iniciais, um parte material seja considerado como representando um corpo físico; Newton analisa as relações entre velocidades e forças centrais de vários tipos; o resultado mais notável é a demonstração de que se a força varia em o inverso do quadrado da distância a órbita é uma cónica em o centro atractivo situado num dos focos. A análise do movimento sobre tais órbitas são precisamente definidas, e Newton mostra como determinar a curvatura de uma órbita a partir de algumas observações de posição; na um problema com interesse prático para astrónomos, tal como o era o problema igual neste sentido do movimento em torno da órbita. Também propõe uma solução aproximada de determinação dos movimentos de três corpos em interacção, por exemplo o sol, a Terra e a lua. Depois, examina as forças atractivas de corpos esféricos ou esféricos resultantes das partículas que os compoem, onde conclui que, externamente, os corpos esféricos podem ser reduzidos em pontos materiais tratados em termos matemáticos. O livro I ainda apresenta uma secção sobre o movimento pendular (relacionado com a teoria da prima de Tona) e termina com uma discussão do movimento das partículas atraídas por corpos macroscópicos na qual Newton tirava uma conclusão que se refere especificamente à óptica.**

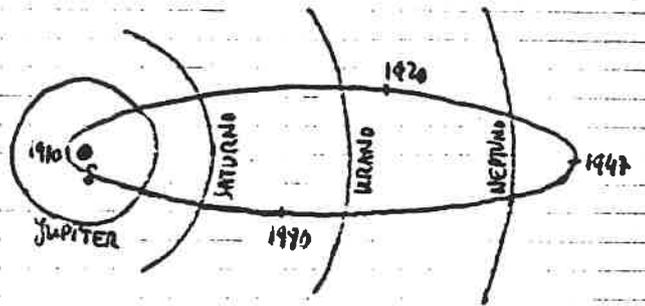
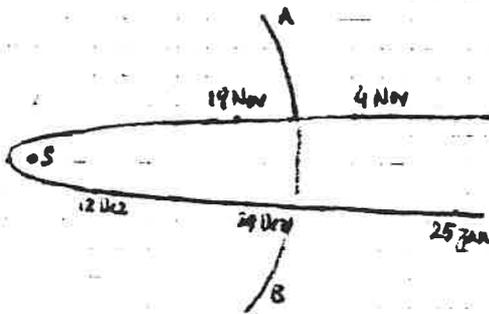
Na primavera de 1686 o livro I estava terminado e foi enviado à Royal Society; Newton já estava a trabalhar no livro II e o livro III, que estavam situados ainda longe da prima final. Inicialmente, propunha-se escrever o livro II, relacionado as aplicações astronómicas das relações estabelecidas no livro I, "em termos populares, para poder ser lido em outros, mas a grande quantidade de trabalho necessário a construir os argumentos matemáticos."** Em terceiro, o livro II que surgiria por ser curto ia-se alargando seriamente com a introdução de teoremas mais gerais; na uma introdução no argumento principal trataria dos movimentos em queda na superfície da Terra. É aí que as matemáticas do "Principia" atingem a maior complexidade e, de facto, na primeira edição, Newton admitiu uma série notável de erros matemáticos. No livro II também há demonstrações matemáticas de muitos resultados, como a demonstração de como se deduzem matematicamente as fórmulas empíricas tidas como competentes integradas na física mecânica. Antes de terminar, demonstrava imediatamente que os cálculos anteriores eram incapazes de explicar o movimento da catábola observados. No livro III, etc.

* Há sempre uma reacção igual e oposta à acção, ou a acção de um corpo em sobre o outro são sempre iguais e opostas.

** Newton tinha o cuidado de evitar que identificasse o centro material em termos de partículas em movimento; não estava "investigando" e não eram corpos em movimento - os resultados em termos de corpos que não efetivamente se deslocam do centro do sistema. Estas proposições constituem a teoria da melhor aproximação feita, em Newton o mecanicismo de espaço-tempo "quase" infinito, e parece que elas se considerava precisamente válidas.

*** É praticamente claro que a obra independente "The System of the World", citada anteriormente, no o livro III surgiu mais ou menos como um comentário e, inicialmente, Newton nunca menciona sobre o conteúdo do livro II.

mando o problema astronômico, mostra que a teoria do livro I prediz todos os fenômenos observados desde que se considerem as massas, distâncias e velocidades do Sol, dos planetas e dos satélites e se postule a existência da gravidade como força centrífuga obedecendo à lei do inverso do quadrado. Constatava especial atenção aos complexos movimentos da Lua (dos quais não conseguia preencher uma teoria completa) e também à teoria dos marés. As órbitas dos cometas eram definidas como parábolas ou como elipses muito excêntricas e calculava o cruzamento do eixo solar da Terra resultante da rotação axial desta.



Órbita do cometa de 1680 calculada em "Principia" de Newton (S = Sol, AB = eixo da Terra).

Órbita atual do cometa de 1882 (cometa de Halley)

Nenhuma obra na história da ciência iguala a "Principia" quer em originalidade e poder de convencimento quer no registro da realização. Nenhuma outra notifica tanto a estrutura da ciência, porque a "Principia" não tiveram pequenos percursos na derivação da profundidade da compreensão desta e que se possa aceitar através da física matemática. Nenhuma outra teve uma autoridade comparável na imposição da concepção mecanicista da natureza, a qual seria alargada e limitada em todos os outros ramos da ciência. Só aconteceria uma vez que a experiência e a observação, a filosofia mecanicista e as técnicas matemáticas poderiam fornecer um novo sistema mental que era em si mesma profundamente consistente e vinculada corretamente a todos os testes experimentais. Só uma vez é a que não poderia ser introduzida na física celeste. Newton quem trouxe essa ideia. O seu mundo era o da lei. Pois que tudo quanto houve neste universo e o resto do movimento, as leis fundamentais e infalíveis eram as leis do movimento definidas nos livros I. Sabia no caso dos movimentos puramente inerciais, eles eram a consequência da força e, portanto, as leis físicas que se descrevem os movimentos seriam refinadas por sua aplicação à natureza. Newton o seu guia teórico era a lei da gravidade, e por conseguinte, a "Principia" tratava dessa força e das consequências que ela tem, mas as outras leis descritivas como as de Kepler ou de Boyle não se descrevem na lei fundamental da força (embora, no caso da lei de Boyle, tal força não fosse a da gravidade*). E se tratava de leis matemáticas, melhor inseridas no âmbito da razão e da lógica do que as da realidade física, eram portanto leis governando a realidade física e é que o racionalismo científico não podia ignorar. Nada acontece por acaso, nada é arbitrário, nada é "sui generis"

* A relação da lei de Boyle por Newton se uma força repulsiva entre as partículas do gás visíveis na natureza e a distância (Livro II, Proposição XXIII) deve portanto ser considerada como um honorário processo.

tem a lei em si mesma. A filosofia por ser "Principia" quer a "Optima" consiste em que a variedade, a especificidade e a desconexão da multiplicidade infinita dos fenômenos naturais e meramente aparente porque de facto, todos eles e todas as suas propriedades são redutíveis a um pequeno conjunto de leis fundamentais da natureza, e que dessas leis tudo isso se deduz pelo raciocínio matemático desde que as leis sejam verdadeiras.

Então, Newton recua perante a rença de que tais leis são instas na natureza a qual, a sua vez, conduziria ao reino da necessidade e à desfiguração da matéria. A matéria e as propriedades da matéria não podem ser eternas e imutáveis, e a matéria e as leis da natureza são o que são porque Deus desejou que assim o fossem. Para ele, a perfeição das leis implica um legislador, como a perfeição da arquitetura do universo implica um arquiteto cósmico: "embora [os planetas e os cometas] fossem realmente permanentes nas suas órbitas graças à mera força da gravidade, não foi isso que alcançaram inicialmente em suas posições regulares nessa órbita em consequência dessas leis... e não se concebe que simples causas mecânicas pudessem ter originado tanto movimento regular, pois os cometas percorrem todas as partes dos céus com órbitas muito excentricas... e quando estão no afélio, onde se movem mais lentamente e se encontram durante mais tempo, recuam a grandes distâncias uns dos outros e sobrepujam por a perturbações mútuas das suas interações mútuas. Este belíssimo sistema do sol, dos planetas e dos cometas só pode ter sido produzido e da vontade de um Ser inteligente e poderoso. E se as estrelas fixas são os centros de outros sistemas semelhantes formados pela mesma prudente decisão, todos eles devem estar sujeitos ao domínio do Uno, nomeadamente porque a luz das estrelas fixas tem a mesma natureza que a do sol e que a luz forma de um sistema para outro; enfim, como os sistemas das estrelas fixas deveriam agir uns sobre os outros em consequência da gravidade. Ele coloca-os a distâncias inversas uns dos outros" (22). As ideias que Newton exprime no Escolio geral com o qual concluiu a 2ª edição dos "Principia" (1713) por primeira vez durante toda a sua vida foi já surgem num documento escrito na juventude, antes de 1669. Como Descartes e Boyle, Newton encarava o universo mecanicista como um argumento contra o ateísmo e não a favor dele. Mas o Deus de Newton, como afirma o próprio Newton, não era o Deus da cristão ou de qualquer outra religião. Newton atribuiu-lhe atributos que não mereciam censura: era vivo, inteligente, onipotente, eterno, onisciente e perfeito, mas era um Deus da ciência e não da teologia. O seu reino era o céu e não o coração, porque era o Deus da lei e da certeza não um Deus da incerteza e do medo, do castigo e da recompensa.

Newton, cronologia

1642 (25/12) ou 1643 (5.1) Nasce em Woolsthorpe

son 4 anos de atras

1660 - Ingressa na Universidade de Cambridge. So sabia latin e geometria elementar.

1660-62 - Estuda grego, filosofia, matematica e um pouco de frances.

1663-64 - Estuda fisica (Galileu, Kepler, Descartes, Boyle etc) e aprende matematica a fundo. Influencia de Barrow o primeiro "Lucasian Professor".

1665-66 - O "annus mirabilis" (Woolsthorpe): descoberta do binomio, do metodo directo das fluxoes (calculo diferencial), da teoria das curvas, do metodo inverso das fluxoes (calculo integral) e descoberta da lei em $1/r^2$ no caso da Lua. Mais confirmacao do resultado da lei em $1/r^2$ porque tomou o diametro da Terra = 6.000 milhas quando deveria tomar ~ 8.000 milhas para obter para a Lua uma ~~acc~~ aceleracao $\sim g/60^2$ (pois que $TL=60 RT$)

1666
Bonelli
Teoria dos
Planetas
medicinas

1667 - Fellowship em Cambridge

1669 - Sucele a Barrow como "Lucasian Professor" de matematicas (82 libras/ano)

1672 - Membro da Royal Society

1673 - Pedido (recusado) de demissao da Royal Society. Querela com Hooke sobre os problemas de optica (Hooke "Micrographia" 1665 e artigos ultteriores)

1676 - Tentativa de reconciliacao de Hooke com Newton.

1676-79 - Nova querela com Hooke. Hooke pretende que grafando a lei da inercia com a forza atractiva do sol se explica que os planetas descrevem uma especie de eliptoides (mas concave as leis de Kepler). Newton, dissimuladamente, diz-lhe que, "por fantasia", que um corpo cairia para o centro da Terra segundo uma especie de espiral. Hooke comunica o erro de N. a Royal Society insistindo na ideia do eliptoide. Newton, supondo g uniforme, calcula a trajetoria "uma curva analoga a uma folha de trevo. Hooke responde que g nel e uniforme que varia como $1/r^2$. Problema: qual a trajetoria para uma forza em $1/r^2$; apelo a Newton. Silencio

Cursos
de optica
e matematica
Interesse pela
Quimica
(e pela teologia)

1684 - Hooke, Halley, Wren (e provavelmente Huygens) pensavam numa forza em $1/r^2$. Halley foi a Cambridge perguntar a Newton qual a forma de trajetoria resultante e Newton disse: uma elipse - mas foi incapaz de encontrar a (metemora?) demonstracao. Mas redescobriu-a e enviou-a Halley que insistiu na publicacao

1684 (outono) - Newton corrigiu o seu curso a teoria dos "Movimentos dos Corpores" - o livro I dos "Principia"

1684-1686 - Escrita dos "Principia"

1687 - Publicacao dos "Principia" (editado e pagou por Halley)

1689 - Newton inspector de Casa de Moedas | Montaga, Guile de Halifax
1699 - " Director de casa de Moedas

1704 - Publicacao de "Opticks"

1727 - Morte de Newton

cia atribuído ao vácuo é um absurdo; considera que a gravitação não pode ser uma propriedade "inata, inerente e essencial" da matéria mas, enfim, pois que a astronomia prova que as forças gravitacionais existem, dei a entender que tais forças têm uma natureza que não é material. Parece difícil acusá-lo, sem má fé, de entender a gravitação como uma propriedade mecânica...

Então, põe-se a questão de saber qual a natureza da gravitação, qual a sua origem de ser. Newton, com a sua prudência ligeiramente hipócrita e tão exagerante, refugiou-se em público detrás do seu famoso aporismo, afirmando que "hypotheses non fingo". Mas o fundo do seu pensamento foi afinal explicitado pelo próprio Richard Bentley, o discípulo que Newton instruiu tão criteriosamente das "nuances" da sua filosofia, quando Bentley escreveu: "a teoria da gravitação máxime é um argumento novo e inventivo elaborado em favor da existência de Deus, sendo a prova directa e positiva de que um espírito imaterial e vivo existe na matéria inanimada, actua sobre ela e regula o curso do mundo".

Triunfo da gravitação newtoniana
destruindo as ideias aristotélicas

Quando publica o "Principia" (1687), Newton ainda era professor em Cambri-
dge, sendo só saído em 1704, e parece-nos hoje evidente que a obra foi desde logo aceita
e manifestamente a doutrina estava nos princípios. Mas não foi realmente assim. De fato,
Newton foi considerado, em vida, pelos seus contemporâneos como um homem excepcional
— aliás, e muito significativamente, tanto pelo seus trabalhos em óptica como em mecâni-
ca — mas isso não impediu que a sua obra tivesse tido pouca audiência científica. As
suas lições em Cambridge tinham um carácter utilitário (em parte, e certo, porque eram
lógicas) e a base de ensino da física mesmo em Inglaterra continuava a ser
a física aristotélica, nomeadamente o tratado de Rohault. Quando Newton morreu,
em 1727, quarenta anos depois de ter publicado a sua "opus magna", a sua mecâni-
ca exata não se tinha conseguido impor.

Não se pode dizer todavia que a newtoniana tivesse estado inactiva. A segun-
da edição do "Principia", datada de 1713, é encabeçada por um prefácio de Roger
Coates, um dos discípulos mais chegados do mestre, que é um ataque cerrado ao cate-
cismo — o termo deve ser entendido numa sentido lato — aristotélico de introdução que
ligava o ensino com a teoria dos turbilhões e, mais grave, de deixar nos lapsos da
sua espécie que negam a intervenção constante da vontade divina nos fenómenos naturais.

Este prefácio de Coates, que obviamente não foi publicado sem o benefício de Newton,
é significativo de vários pontos de vista. Ele demonstra "o contrário" que os Newtonianos pretan-

482, 481
r. p. 222

165 II, 421

em 421/2

eram pelo seu lado que eles garantissem a intervencao bastante da vontade divina. Por outro lado, deu-se o "automan" de introduzir "qualidades ocultas" em um tentativo de desviver ao adversario uma condicao que o atingia gravemente: Procurava-se um homem com o prestigio de Leibniz, por exemplo, tinham-lhe permitido escrever um "Antibarbarus physicus" - contra os finsos barbaros, a visao sendo Newton - acusaes de promoverem "a renuncia das qualidades ~~ocultas~~ escolasticas e das potencias quanticas". E, em resposta ao prefacio de Coste, comentara que "Newton diz que o espaço e o vazio de que Deus se serve para sentir as coisas, mas se Deus necessita de um meio qualquer para as sentir e que elas nos dependem inteiramente dele e nos saõ pois da sua essencia". Daqui nasceu uma famosa polemica entre outro dos discipulos de Newton, Clarke e Leibniz, que se terminara com a morte deste em 1715.

H63 II, 24

Koyne "De modo dos 224"

Anonimo de Newton-Leibniz

Em termos muito gerais, Leibniz, na linha de Descartes, sustentava a concepcao mecanica de um universo-relogio, de um mundo regido por leis necessarias com que Deus o tinha dotado de uma vez por todas e que ele podia violar, de certo, mas só na medida em que, omnipotente, lhe restava sempre a capacidade do milagre. Os newtonianos, por sua vez, tentaram a ideia de presenca e de accao constante, de Deus sobre a natureza.

Cf Koyne Op. cit. 331-33

Entretanto, simultaneamente a clarificacao nos se firmancos tractivos, e para dignificar o newtonianismo decidiu-se a recorrer a um expediente disolutivo ^{de 1723} mas provavelmente eficaz. Na edição inglesa do "Traite de Physique" de Ronchault figuravam numerosas notas que são ou citações de Newton ou, em todo o caso, referencias da propria obra para se Descartes do ponto de vista de Newton. Era a velha tarefa do curso de Tava.

Voltaire "Carte de 1759"

Por volta de 1730 começa o conflito do continente quer dizer, matricamente, a França, que era então, do ponto de vista demografico, economico e politico mas tambem cultural, a grande potencia. Ela os Países Baixos, então em relações estreitas com a Inglaterra, que vai servir de base as operacoes, nos quais participam homens de ciencia reconhecidos (como Bravenant e Murschenbroek) e em que e ubilizada a influencia da universidade de Leyden, então muito zcheis. Mas em breve começam a surgir, mesmo em França, as primeiras newtonianismos, unidos por Mairanetras (1693-1759).

H65 I 482

[Huygens tr. reticente...]

Mairanetras vai encontrar um formidavel apoio em Voltaire que, ostensivamente, se deslocou a ~~Paris~~ Londres para assistir ao funeral de Newton, traz o "Principia" nas suas bagagens e fez copias para a tradução deste, por uma admiradora e discipula sua muito proxima - talvez mesmo demarcada proxima - a marquesa de Chatelet, que com a ajuda de Clairaut, para obra sua, aliás se publicou em 1756. Entretanto o primeiro volume que foi em 1750 de se dedicar a experiancia de Finis no castelo

da margem, publicava em 1734 as famosas "Cartas filosóficas" e em 1738 o "Elementos de filosofia de Newton" em que a física newtoniana era apresentada em termos mais favoráveis e o cartesianismo criticado impecavelmente. A influência de Lavoisier, que já era então um exato conhecedor do newtonismo e um dos "filósofos" mais exatistas, fez muito para a difusão do newtonismo.

H65 II, 508

Entretanto, Maupertuis inclinou em trabalhos científicos de índole geodésica que vêm dar grande veracidade à atração newtoniana. Posteriormente que a Terra tinha a forma de um elipsóide achatado. Newton demonstrara a partir da lei de atração universal que esse achatamento devia valer $1/230$. Logo a seguir Huygens, no seu ^{II DISCURSO} ~~trabalho~~ "Discorso sobre as causas do peso" publicado em 1690 como aditamento ao famoso "Tratado de la lumière" admitira que o peso resultava há-se da atração do centro da Terra e obtinha para esta a forma de um elipsóide com um achatamento de $1/578$.

Fides II, 464
H65, II, 505

Ora, se a expedição de Jéssu Richer à Guiana, em 1671, já mostrara que o peso do pêndulo de período era ^{menor} ~~menor~~ do que em França (o que implicava um ^{menor} ~~menor~~ valor de g e, portanto, uma Terra achatada para o pólo) não era possível decidir entre os resultados de Huygens e Newton.

H65 II

Em 1735 a "Académie des Sciences de Paris" decidiu tirar o problema à clareza: uma expedição dirigida por Bouguer & La Caille foi enviada para medir o valor do arco de meridiano no Peru, enquanto no ano seguinte uma expedição à Lapônia dirigida por Maupertuis, ajudado por Clairaut (1713-65) tinha objetivos idênticos. Maupertuis acabou o seu trabalho em 1737 e esse trabalho celebrou-o, em 1744 terminaram o trabalho da expedição do Peru, que como as da expedição à Lapônia eram favoráveis à Newton contra Huygens.

Entre pontos que ajudam a favor de Newton foi a sua previsão de que o fio de prumo devia ser desviado da vertical nas observações de uma montanha. O inglês Maskelyne mostrou experimentalmente, na Escócia, em 1724, que efectivamente assim era, tendo até desfeito das suas medições que a densidade média da Terra seria da ordem de 4,7.

H65 II, 492

Um erro que é credibilidade que levou à física de Newton o próprio demonstrando formal de dinâmica bem como a sua extensão, nomeadamente à mecânica dos fluidos, não que dizer igualmente uma palavra dos problemas astronômicos. A astronomia de precisão alcançou enorme progresso durante o século XVIII, quer com a melhoria dos instrumentos (acrometrias) quer com a descoberta das aberrações (Clairaut e Le Flamant 1750-1761). Daí uma possibilidade de beneficiar do sistema solar muito

mais aperfeiçoada do que anteriormente. E uma atenção especial foi dedicada aos cometas
 que, segundo Newton, faziam parte do sistema solar. Halley, o amigo e admirador de
 Newton, tinha-se dedicado a estudar o cometa que hoje tem o seu nome durante
 a sua aparição em 1681-82 identificando-o com aqueles cometas que tinham sido
 observados

As mutações do newtonianismo e o desenvolvimento da mecânica - 1

1.

A apologetica newtoniana que tem reinado até na história da Física apresenta-nos um Newton essencialista e positivista, o Newton mítico das "hypothèses non fingo" — isto quando é hoje sabido que o grande mestre era um gnóstico e um alquimista cuja mecânica não só estava profundamente imbuída de preocupações teológicas mas, mais ainda, só adquire o seu verdadeiro significado quando lhe reconhecemos essa dimensão metafísica essencial. Além disso, nem sempre se admira que a publicação dos "Principia" não foi, nem podia ser, acolhida com uma admiração reverente que hoje naturalmente lhe concedemos. A verdade é que, até se conseguir impor, a física newtoniana teve de lutar durante várias décadas, suportando duras críticas e desconfortáveis polémicas. E a memória de um Newton triunfante que os iluministas foi colocar num pedestal já pouco tinha a ver, nas intencões ou na filosofia subjacente, com o verdadeiro Newton. A honraria que a Europa lhe atribuiu com veneração no meado do século XVIII estava longe do modelo do qual se reclamava. Ora uma tão brusca mutação não pode ser ignorada...

A concepção newtoniana da natureza estava efectivamente urdendo a afrontar obstáculos consideráveis, o primeiro dos quais era a resistência dos peripatéticos. graças a um esforço delineado ao concílio de Trento (1545-63) e paulatinamente realizado a partir da chamada Contra-Reforma, a Igreja católica reforçava seriamente as suas posições naquela boa metade da Europa que lhe permanecia fiel, e sobretudo os jesuítas tinham aí implantado um rede densa e bem organizada de estabelecimentos de ensino que desempenhava quase de um monopólio cultural. Ora essa cadeia de colegios e universidades, cuja influência sociológica era profunda, continuou a rejeitar a velha ciência, com a doutrina geocêntrica e a física das qualidades. De início, tratava-se sobretudo de rebater as teses dos copernicistas, mais tarde foi o cartesianismo que se tornou o adversário principal. Mas quando a pervasão do pensamento de Newton fez surgir uma filosofia mecanicista apoiada por uma física-matemática cada vez mais sólida, esses escolares passaram a evocar um cartesianismo cristianizado, em relação ao qual Malebranche (1638-1715), um padre naturalista com grande talento filosófico, tentava uma operação análoga à de Tomás de Aquino perante o aristotelismo.

A verdadeira oposição às concepções de Newton situou-se todavia noutra parte. Ela veio da sexta numerosa e poderosa dos cartesianos que, vendo as suas ideias frontalmente atacadas pelo que tinham de essencial, não se limitaram a por uma vez criticarem o newtonianismo, procuraram também reforçar as suas posições dando um suporte matemático à física de Descartes. E nesse combate aberto ao novo mesmo, eles encontraram um aliado incomparável no génio multifacetado de Leibniz, com quem fizeram uma frente comum contra esse propaga insuperável vinda de Inglaterra.

Quando surgiu a 2ª edição dos "Principia", em 1713, tinha à cabeça um filósofo de Roger Bacon, discípulo chegado de Newton, visivelmente encanhecado de acusar os cartesianos de introduzirem na filosofia natural a "mutilação" e "destruição" da filosofia em si mesma e substituí-la por uma filosofia de "artes e manufaturas".

com impia quanto ingenuidade a intervenção constante da vontade divina no comportamento da natureza. Este texto rejeitado devido com o benefício do mestre (que só faleceu em 1727) parece-nos muito significativo porque só podia querer significar que a física de Newton, pelo contrário, garantia uma acção permanente de Deus sobre o mundo - e no entanto, embora Newton nunca o tivesse dito com clareza, que essa acção se processava através das forças de inércia e da gravitação universal; além disso, além de "qualidades ocultas" a propósito do turbilhão, era uma tentativa para desolver as acusações uma censura feita à atracção universal newtoniana que afectava seriamente a credibilidade de toda a sua construção teórica.

De facto, e em termos um tanto simplistas, a generalidade dos físicos dessa época entendia que qualquer explicação satisfatória da natureza devia ser de índole mecanicista e, como Descartes ensinara, afigurava-se compreensível que um corpo pudesse actuar sobre outro por contacto, comunicando-lhe uma impulsão. Mas não interacção instantânea a distância, tal como pressupõe a lei da gravitação newtoniana, era considerada algo de não mecânico e, portanto, inaceitável. Atribuir aos corpos a "qualidade" de se atraírem mutuamente sem qualquer explicação razoável (quer dizer: mecanicista) dessa estranha propriedade estava obviamente excluído.

Dal que o próprio Newton, apesar de tudo homem do seu tempo, tivesse sido levado a encerrar a atracção como uma força não física. Mas não deveria dizê-lo e, para a maioria dos seus contemporâneos, uma força com tais características surgia como altamente suspeita. Leibniz, por exemplo, não se coibiu de escrever um panfleto intitulado "Antibarbarus physicus" (contra os físicos bárbaros) no qual visava Newton, acusando de preservar "a ressurreição das qualidades escolásticas e das potências ocultas". É certo que entre Newton e Leibniz existia uma velha inimizade e este aproveitava a oportunidade. Mas um homem como Huygens, espírito ponderado e cordato sem qualquer inimizade para com Newton e que nem sequer era um cartesiano ortodoxo, pensava afinal da mesma maneira. A verdade é que a própria ideia de uma acção a distância surgia nessa época, e não sem razão, como uma hipótese aberrante.

Para além disso, havia o problema do entendimento das relações de Deus com a natureza, a qual se apresentava cada vez mais claramente governada pelas suas próprias leis. Não foi por acaso que entre os primeiros defensores de Newton se contavam muitos homens de Igreja ou, mais geralmente, intelectuais com prejuízos preocupações teológicas: é que essa física-metafísica parecia oferecer respostas, pelo menos implícitas às suas preocupações, enquanto as alternativas cartesianas de Descartes ou de Leibniz se lhes afiguravam inenunciavelmente citadas de ateísmo. Tudo isto ficaria melhor esclarecido quando o próprio Leibniz decidia provocar a discussão neste terreno, confrontando as suas teses com as de Clarke, um douto teólogo anglicano que se reclamava de Newton. E como Clarke ia discutindo os seus argumentos com o próprio Newton entende-se que a polémica Leibniz-Clarke tivesse ficado famosa pois, por pouco interposta, era afinal um confronto Leibniz-Newton.

Para Newton e os newtonianos, o mundo não podia dispensar a acção constante de Deus, a qual se exprimia não só através das forças de inércia e da força da atracção gravitacional mas também pela necessidade de

Kopri, De mundo
clon p. 284

Ethel "L'île de
nature", p. 89

compensar os pequenos desvios sofridos pelas trajetórias dos planetas (pois sem tais compensações, o sistema solar não seria estável) e pelo recrutamento da quantidade de movimento fornecida inicialmente ao universo e que se supõe sofrer uma permanente dissipação. Ora, para Leibniz, tais concepções eram quase sacrilégas. Pois, ~~esta~~ ^{esta} ele, "Newton diz ser o espaço o órgão de que Deus se serve para sentir as coisas, mas se Deus necessita de um meio qualquer para as sentir e que elas não dependem inteiramente dele e não são, portanto, de sua autoria", afirmando além disso que "eu considero que quanto Deus faz milagres não é para apoiar as necessidades da natureza mas as necessidades da Graça".

Clarke, o porta-voz de Newton, recusa-se a fazer qualquer distinção absoluta entre as necessidades da natureza e as da graça: dar ao Sol um movimento regular não é para Deus mais ou menos difícil do que suspender esse movimento durante um dia, para Deus ambas as coisas são "igualmente naturais e sobrenaturais" e uma tal distinção só tem sentido na perspectiva humana. Quanto falamos em forças da natureza ou em leis da natureza, isto só significa que algo ocorre frequente e regularmente. Podemos não crer que há em Deus "duas maneiras de agir diferentes e realmente distintas?"

Leibniz considera inaceitável esta argumentação porque ela equivale a diluir os milagres na ordem natural. O milagre não é apenas o inabitual mas aquilo que ultrapassa a força das criaturas, de modo que entre o natural e o sobrenatural "há uma diferença infinita". Os newtonianos teriam de escolher entre duas maneiras de interpretar a atração: ou considerá-la um milagre ou uma qualidade oculta. Se tentarem escapar a este dilema sustentando um terceiro caminho, foi afirmar que a atração é igualmente natural (pela regularidade dos seus efeitos) e sobrenatural (por emanar de Deus) equivale a supor a ação divina imanente aos corpos e conjugar Deus com a alma do mundo.

Quando a polémica terminou em consequência do falecimento de Leibniz (1716) as suas concepções do relacionamento de Deus com a natureza estavam claramente expostas e o seu carácter inconciliável era evidente. Os newtonianos acusavam Leibniz e os cartesianos de ideias implicitamente ímpias, Leibniz via o newtonianismo cair numa espécie de panteísmo, que Espinosa suscitara defensor e lhe valera ser considerado uma espécie de teonista intelectual. Mas a questão iria mudar de feição

2

A aceitação e a difusão do newtonianismo em Inglaterra foi pouco facilitada pelo protestantismo de homens ligados à Igreja Anglicana (como Coates, Bentley ou Clarke) que estavam sobretudo interessados nas implicações teológicas dessas concepções científicas. Mas era por razões muito diferentes que John Locke (1632-1704) se tornara ^{amigo e} grande admirador de Newton. Para este grande filósofo empirista, adversário de Descartes e de Leibniz, que negava a existência de "ideias inatas" e para quem o espírito humano é à nascença "um papel branco", todo o conhecimento havia de provir da experiência, da experiência externa que é a sensação ou da experiência interna, a reflexão, "conhecimentos adquiridos pela alma das suas diversas operações". Evidentemente, o que suscitava o entusiasmo de Locke na obra de Newton não era a metafísica subjacente, à qual ele não atribuiu

nenhum valor em nenhum significado, mas as capacidades de pensar do fenômeno que a Física-matemática dos "Principia" indubitavelmente possui. Esta perspectiva, que atravessava profundamente o pensamento autêntico de Newton, acabaria frear por se impor.

Foi esse fato, mesmo em Inglaterra o newtonianismo não se impôs de imediato para o resto. Uma prova disso está no fato de Diderot ter incluído subrepticiamente na tradução inglesa do mais famoso dos textos de física cartesianiana, o famoso "Traité de Physique" de Rouhaud várias notas com pretensões explicativas que mais não eram do que citações de Newton ou referências de Descartes re. perfeição do newtonianismo. Era o velho estratagemas do círculo de Troia. Mas o ambiente ideológico do continente, largamente dominado pela cultura francesa revelou-se mais difícil. O apelo das universidades neerlandesas, sobretudo de notória e influente universidade de Leiden onde professavam homens de grande reputação como Brouwer e Musschenbroek, foi devidamente aproveitado, mas só após 1630 é que o cartesianismo francês começou a ceder. E nessa viagem teve grande influência um homem cujo nome surge um tanto inesperadamente neste contexto - Voltaire (1694-1778).

Exilado em Inglaterra entre 1726 e 1729, Voltaire regressou convertido à filosofia de Locke e, sob a influência deste, entusiasmado pela obra de Newton que, por falta de preparação científica, ele era ainda incapaz de compreender profundamente. Nas suas "Cartas filosóficas" ou "Cartas sobre os ingleses" (1734) onde exalta o liberalismo inglês são tidas as primeiras publicações e Voltaire refugiou-se no castelo de Cirey, onde encarregou a sua jovem e douta amiga, a Marquesa du Chatelet, de traduzir os "Principia" de Newton em francês. Também ele se debatia entre os estados do newtonianismo, auxiliado por uma correspondência com transportes, o primeiro físico-matemático que em França manifestaria clara simpatia pela doutrina do mestre de Cambridge ("Discurso sobre a figura dos astros 1732). Assim armado, publicou em 1738 o "Elementos sobre a Filosofia de Newton", em que com sua narração brilhante e mordaz, trouxe do que há de especulativo na doutrina cartesiana para lhe contrapor a seriedade matemática de um Newton fatalmente positivista.

A obra teve tanto mais êxito e maior influência quanto, nessa época,

Auxiliado por Clairaut

A querela das forças vivas

Descartes supôs implicitamente que o movimento se processa de forma a assegurar a conservação da grandeza mv , o "impetus" dos medievais, a que ele chamou "vis motus" e que Newton designou por "motus" ou "quantitas motus" - a quantidade de movimento. Era da conservação da "vis motus" que Descartes deduzia as leis do choque e, embora boa parte dessas leis não fossem confirmadas experimentalmente, a conservação do valor de $\sum m_k v_k$ estava, de facto, contido no postulado de Newton. Assim, no choque elástico de dois corpos A e B que, para simplificar, admitimos que se encontram frontalmente, as forças ~~responsáveis~~ responsáveis pela breve interacção correspondente ao choque devem ser tais que - princípio de igualdade de acção e reacção - $F_A = -F_B$; ora $F_A = m_A \frac{dv_A}{dt}$ e $F_B = m_B \frac{dv_B}{dt}$, de modo vem $m_A \frac{dv_A}{dt} = -m_B \frac{dv_B}{dt}$ ou $\frac{d}{dt}(m_A v_A + m_B v_B) = 0$, quer dizer $\sum m_k v_k = \text{const.}$ Entende-se que, nos fins do século XVII, não se duvidava da validade do princípio de conservação da quantidade de movimento, e que, quando em (1636) na sua

Principia 1687

"Carta de menção de um erro memorável de Descartes e outros no cálculo de forças motrices dos corpos" Leibniz pôs em causa esse resultado, a crítica tiver provocado grande celeuma. Assim começou a chamada querela das forças vivas e para a entender, importa recordar os argumentos de Leibniz.

Admitamos que um corpo de massa m_1 , ao cair da altura h_1 adquire uma velocidade que lhe permitiria regressar à altura de partida - postulado já antigo, que estava na base de tantos raciocínios de Galileu e se afigurava impossível recusar; admitamos também, segundo Leibniz, que elevar um corpo de massa m à altura h_1 equivale a elevar a esta altura dois corpos de massas $\frac{m}{2}$, ou ainda a elevar um corpo de massa $\frac{m}{2}$ a uma altura $2h_1$, ou, mais geralmente, que a "força motriz" necessária para elevar um corpo de massa m_1 à altura h_1 é igual à que se exige para elevar um corpo de massa $m_2 = \frac{m_1}{n}$ a uma altura $h_2 = nh_1$ - o que também se afigurava certo.

$$h = \frac{1}{2} g t^2$$

$$v = g t$$

$$t^2 = \frac{v^2}{g^2}$$

$$h = \frac{1}{2} g \frac{v^2}{g^2} = \frac{v^2}{2g}$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

Por isto, Leibniz lembrava que, segundo Galileu, um corpo que cai da altura h adquire uma velocidade $v = \sqrt{2gh}$, de modo que um corpo de massa m ao tombor da altura h_1 adquire uma quantidade de movimento $p_1 = m_1 \sqrt{2gh_1}$ enquanto um corpo de massa ~~igual~~ $m_2 = m_1/n$ ao tombor da altura $h_2 = nh_1$ adquire na queda uma quantidade de movimento $p_2 = m_2 \sqrt{2gh_2} = \frac{m_1}{n} \sqrt{2g n h_1} = m_1 \sqrt{\frac{2g h_1}{n}} \neq p_1$. Leibniz concluiu que, como a força motriz deve ser a mesma

nos dois casos e $t_1 \neq t_2$, a quantidade de movimento não serve como medida da "força viva". Na sua opinião, a força motriz é definida por aquilo a que ele chamava a "vis viva" — a força viva, por oposição à força "morta" — e cuja expressão analítica não seria mv mas mv^2 , o antepassado da nossa energia cinética. Com efeito, considerando a força viva teríamos no caso considerado acima

$$m_1 v_1^2 = m_1 (\sqrt{2gh_1})^2 = 2m_1 gh_1 \quad m_2 v_2^2 = \frac{m_1 (\sqrt{2gh_1})^2}{n} = \frac{m_1}{n} \cdot 2gh_1 = 2m_1 gh_1 = m_1 v_1^2$$

quer dizer $m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2$.

A discussão acima gerada, dita a "querrela das forças vivas", foi durante séculos anterior a Leibniz com uma paixão que só se vê nos seus escritos, e teve um papel importante porque contribuiu para esclarecer a forma dos princípios de conservação em mecânica clássica. Sem entrar em pormenores, vale contudo a pena lembrar que, nos meados do século XVIII, uma análise de d'Alembert veio mostrar que, afinal de contas, ambos os pontos de vista eram válidos embora com conteúdos diferentes; expôs-a-emos sob uma forma simplificada, sem recorrer ao cálculo infinitesimal.

Consideremos o problema elementar de um corpo de massa m dotado de uma velocidade v que vai ser travado por uma força constante $-F$ até ficar imóvel; vamos supor explicitamente, e só para não complicar a escrita, que essa força tem a mesma direcção que a velocidade do móvel. Ora a força $-F$ vai provocar uma aceleração $-a = -F/m$ que faz decrescer a velocidade de uma maneira uniforme do valor inicial v até ao valor 0, e isto necessitará-nos num tempo t tal que $0 = v - at$, quer dizer, teremos $a = v/t$ ou $\frac{F}{m} = \frac{v}{t}$. Vem, portanto, $Ft = mv$ e o tempo t necessário para que uma dada força $-F$ anule a velocidade v por si só pelo móvel é medido pelo valor da quantidade de movimento contida.

Podemos agora o problema de determinar o espaço percorrido pelo mesmo móvel até que a mesma dada força $-F$ anule a sua velocidade. Esse espaço l é determinado pela equação $l = vt - \frac{1}{2} at^2$ sendo t , como vimos, igual a $\frac{v}{a}$, e que amonta $l = v \cdot \frac{v}{a} - \frac{1}{2} a \frac{v^2}{a^2}$, quer dizer, $l = \frac{v^2}{2a}$; temos, portanto, $a = \frac{v^2}{2l}$ e como $a = \frac{F}{m}$, vem $\frac{F}{m} = \frac{v^2}{2l}$ ou $F l = \frac{1}{2} m v^2$: o espaço l necessário para que essa força $-F$ anule a velocidade v perdida pelo móvel é medido pelo valor da força viva leibniziana. Adicionalmente, aliás, que aqui a grandeza mv^2 surge precedida pelo factor $\frac{1}{2}$, indicio de que a "vis viva" de Leibniz veio finalmente a impor-se através da grandeza a que chamamos hoje a "energia cinética".

Ainda tardaria muito, de facto, até que o princípio de conservação da energia mecânica fosse claramente enunciado por Gustave Coriolis (1792-1843): o trabalho realizado sobre um corpo (o qual, num campo conservativo, corresponde à variação da sua energia potencial) coincide exactamente a variação da sua energia cinética. (Utterson, Forster II, 374)

Introdução

Na derida altura, assinalei-vos que a revolução científica do século XVII se fez sentir num contexto filosófico profundamente contraditório. Francis Bacon, o cham- ler britânico, profetizara o advento duma nova ciência portadora duma nova co- cepção de mundo, embora se tivesse, de facto, ^{revelado} incapaz de realizar minimamente o seu próprio programa. É sobretudo Galileu quem inventará essa física diferen- e fá-lo-á graças à introdução duma epistemologia diferente, cuja concretiza- ção é um acontecimento capital não só na história da ciência e da cultura mas na história da civilização.

Galileu não se ocupou das consequências ~~previsíveis~~ para a visão do Cosmos ~~que estavam~~ implícitas na sua obra, contentando-se com a famosa simplista & "dupla verdade", a afirmação da existência duma verdade religiosa, objecto de fé, por um lado, duma verdade filosófica e científica, objecto de razão e de experiência, por outro. ~~Devido~~ ^{Assim} a sua condenação por afirmar a mobilidade da Terra, por a pretender expulsar do centro do mundo, surge hoje quase como uma ironia julgá-lo por um peccabillo menor, quando confront- do com as temerárias ameaças para a visão medieval do Cosmos ~~que estava~~ contidas na sua física. O que a obra de Galileu prometia era a formula- ção dum outro paradigma da natureza e do homem onde a presença dum Deus pessoal e actuante seria cada vez mais difícil de sustentar.

Essa dimensão metafísica da ciência nova será claramente entendida por Descartes, no século seguinte. Sem poder ambicionar com Galileu como fim Descartes tinha outra envergadura como filósofo e, ao mesmo tempo que, de certo modo, atraçou o espírito galileiano (a rebelião de Huygens contra o cartesianismo e, num certo sentido, um regresso às fontes), Descartes va efectivamente desenvolver uma filosofia da física — ou uma física — metaf- sica — que traz em si mesma uma apreciação profunda das consequências das descobert- do mestre florentino.

Não é por acidente que Descartes enuncia a lei da inércia muito mais claramente do que Galileu. Ora a lei da inércia, ao afirmar que o movimen- rectilíneo e uniforme é um estado, algo que tende a permanecer em va- riedade da natureza das coisas, implica que a recta deve ser considerada como algo de subjacente à própria estrutura do espaço físico, o qual deve ser olhado, fo

consequência, como um espaço euclidiano. ~~Um~~ Um espaço euclidiano é, por defini-
ção, um espaço infinito e ilimitado e, logicamente, deve ser visto como contendo
todas as coisas. As relações do espaço quer com a matéria quer com Deus são-se
assim de uma forma insuperável.

Vimos que Descartes afrontou o problema das relações da matéria com o espaço
afirmando a sua identidade, quer dizer, considerando que é a extensão que cons-
titue a natureza da matéria: os corpos não estariam no espaço mas seriam o
espaço. Mas para tentar salvaguardar a existência de Deus, ~~precisava~~ ^{recessou-se} ~~necessari-~~
a considerar o espaço como infinito (a infinidade sendo inerente a Deus) ~~afir-~~
~~mando que ele é~~ ^{o mesmo o mesmo} somente indefinido e, paralelamente, negar-se-à a atribuir
uma extensão a Deus, o que é uma maneira de ~~necessariamente~~ colocar Deus fora do
espaço.

Pela voz de Henry More, o grupo dos platónicos de Cambridge — cujo expoente
mais ilustre será precisamente Newton — vai insurgir-se contra esta concepção
controversa das relações de Deus com o mundo. A contraproposta que eles defendem
consistia em ~~negar~~ diferenciar o espaço da matéria, a qual existe no espaço como
num palco sem se identificar com ele; no limite poderia mesmo dizer-se que eles
concebem a matéria sem extensão, como pontos matemáticos — pontos geométricos sem
dimensão, sem ser de massa. Em troca vêm o espaço realmente infinito e isto não
é compatível com os atributos da divindade, porque Deus é coextensivo ao espa-
ço; se assim se poderia entender, do seu ponto de vista, a acção de Deus sobre
as coisas, ~~mas~~ ^{isto que} o espírito desse tempo não concebe ações que não sejam
ações por contacto. O espaço dos neo-platónicos não é, afinal, do que a for-
ma de existência do próprio Deus.

O esquema newtoniano e as suas dificuldades

Newton retomará estas ideias, sob a influência de More e do seu mestre respec-
tado Isaac Barrow. O seu espaço absoluto, infinito e imaterial, e o seu tempo
absoluto, eterno e que "decorre uniformemente sem relação com nada de exterior"
está, de facto, confundido com Deus. É no seio de Deus — no espaço e no tempo —
que a matéria evolui e, desta forma, a presença de Deus no mundo está assegurada.
Poder-se-ia até dizer que não é Deus que está presente no mundo, mas que é
o mundo que existe em Deus.

Todavia não bastava assegurar a presença da divindade era preciso assegurar-
lhe uma capacidade de acção. Pois como entender que um Criador todo poderoso
tivesse renunciado a qualquer possibilidade de agir sobre as suas criaturas? Ora

=

e que estava implícito na obra de Galileu e que Descartes fora levado a explicitar em um universo sujeito a leis necessárias, isto é, um mundo concebido como um gigantesco maquinismo, um ^{universo} ~~cosmos~~ que mais não seria que um relógio muito complicado. Como salvaguardar a ação dum Deus pessoal — ação contingente, pelo menos para nós — neste universo aprisionado pela causalidade com que Deus o dotara? Newton, que tem clara consciência da gravidade filosófica do problema, procura responder por duas vias.

Por um lado é-lhe possível recorrer à lei da inércia. Para Descartes, que assimila matéria com extensão e que nega a existência ontológica do vazio, todo o movimento é relativo, o movimento dum corpo é definido sempre em relação a outro corpo. Daí que a lei da inércia, tal como ele a entende não seja a nossa lei de inércia e, consequentemente, no final de contas, a uma proposição contraditória na sua essência: não é possível que um corpo tenha movimento retilíneo e uniforme em relação a qualquer outro corpo. Para Newton vale em relação ao espaço absoluto e, acessoriamente, em relação às referências "galileanas", isto é, os corpos com movimento retilíneo e uniforme relativamente ao espaço absoluto. É nestas referências, e só nestas, que a lei da inércia é, em termos mais gerais, a lei da mecânica não validas, se se quer exprimir a causalidade dinâmica. num sistema não inercial há que juntar as forças ditas fincas — resultantes da ação de outros corpos — forças suplementares, as forças de inércia, que convém olhar como manifestações da ação do próprio espaço, a palavra ~~para~~ significando, sem equívocos, "espaço absoluto". Assim, as forças de inércia são manifestações da ação do espaço absoluto e como este é, pelo menos, coexistente com Deus, as forças de inércia surgem como uma manifestação da ação permanente de Deus sobre o mundo.

Para nós, hoje, as forças inerciais traduzem uma espécie de assimetria metafísica da mecânica clássica e como os critérios estéticos têm valor científico — pelo menos subjectivamente — Einstein não temeu invoca-lo para induzir a superação do princípio de Relatividade geral, em que todas as referências são consideradas à paridade em pé de igualdade. Como aceitar, de facto, que o espaço possa agir sobre a matéria sem que a matéria possa agir sobre o espaço? Há aí uma espécie de "injustiça" pouco satisfatória. Mas, para Newton, o espaço era imortal, o seu estatuto ontológico era radicalmente diferente do da matéria, e esta consequência da teoria devia afigurar-se-lhe eminentemente satisfatória.

Deus podia agir sobre o mundo sem que o mundo pudesse agir sobre Deus, o Criador tinha privilégio que não cabiam às suas criaturas.

Mas, no pensamento de Newton, há outra e espectacular manifestação da acção permanente de Deus no mundo: por estranho que pareça à primeira vista trata-se da gravitação universal. Antes de mais entende-se que ele tenha ficado muito embaraçado com a descoberta duma lei que presunha claramente que um corpo actuava sobre outro colocado a não importa que distância, isto no mesmo instante e sem necessitar da intervenção de qualquer meio material situado entre ambos. Um sólido bom senso levava a ver que as acções só se podiam processar por contiguidade e a gravitação newtoniana não satisfazia deca de essa condição. Homens com a empenhatura dum Huygens ou dum Leibniz não hesitaram em afirmar que a doutrina newtoniana da gravitação trahia

um retorno à concepção escolástica da física e acusaram-na de q não gave los crimes, o de ser uma doutrina nao mecânica.

Ora o mais curioso é que, nesse ponto, Newton estava perfeitamente de acordo com eles. O seu argumento a favor da lei da gravitação universal era a capacidade explicativa desta lei — e há que conceder que o argumento é muito forte — mas nem por isso pretendia que se tratava duma acção mecânica, antes pelo contrario. Isto está dito, muito embora com a fraseologia ambigua e prudente que é característica do seu estilo, na "Principia Mathematica", nomeadamente na passagem final do celebre tratado; foi aliás a proposta da causa das propriedades da gravidade que Newton escreveu a fraseinha pe fez correr o risco de trata de que "não fazia hipóteses". Mas há melhor.

Nas cartas que escreveu ao seu discípulo e verdadeiro porta-voz Richard Bentley, em 1692, Newton diz textualmente:

"É inconcebível que, sem a mediação de algo de outro que não seja material, a matéria bruta inanimada possa agir sobre outra matéria, affectando-a sem contacto mútuo, como seria o caso se a gravitação no sentido de Epicuro fosse inerente e essencial à própria matéria. E foi esta razão muito fortíssima que V. não me attribuiu a ideia duma gravidade inata. Que a gravidade seja inata, inerente e essencial à matéria, de modo que um corpo possa actuar sobre outro a distância e através do vácuo, sem a mediação de algo capaz de transportar essa acção de um até ao outro, é para mim um absurdo tão grande que acredito que nenhum homem, por pouco competente que seja em questões de física, poderia jamais cair num tal erro."

O texto é elucidativo. Newton considera que a acção da matéria a distân-

259

Conquistas astronómicas e paradigma mecanicista

cia através do vácuo é um enorme absurdo; considera que a gravitação não pode ser uma propriedade inata, inerente e essencial à própria matéria; e, enfim, pois que a astronomia prova que as forças de gravitação existem, dá a entender que ela resulta da intervenção de algo que não é material. É difícil acusá-lo de ver na gravitação uma propriedade mecânica...

Mas, então, de que resultaria a gravitação, qual a sua razão de ser? Newton refugia-se atrás do seu afonsismo famoso assegurando que "hypothèses non fingo". Mas o próprio Bentley, que Newton instruiu com tanto cuidado nas "matters" do seu pensamento, encarregar-se-á de o dizer: "a força da gravitação mútua é um argumento novo e invencível para a existência de Deus, sendo a prova directa e positiva de que um espírito imaterial e vivo existe na matéria inanimada, actua sobre ela e suporta o quadro do mundo."

Koyre, loc. cit. 222

Newton e o paradigma newtoniano

Em 1687, quando publica os "Principia", Newton ainda era professor de matemática em Cambridge, donde se saiu em 1704. Parece-nos hoje evidente que a obra terá sido acolhida triunfalmente e a doutrina sido icada, desde logo, a um lugar eminente. As coisas, todavia, não se passaram assim. É certo que Newton foi considerado pelos seus compatriotas um homem excepcional — tanto pelos seus trabalhos em óptica como em Mecânica, o que já é surpreendente — o que não impedia, aliás, que a física que continuou a ser ensinada em todas as universidades do continente como na Inglaterra (Cambridge incluída) fosse a física de Descartes.

A formidável capacidade de explicação e de previsão da teoria newtoniana ou, melhor, daquilo em que a viriam a transformar os sucessores de Newton, nunca estava por demonstrar, e a alienação filosófica dos "Principia" afigurava-se (e com boas razões!) altamente discutível. A grande novidade que se via na obra, a lei da gravitação universal, era embaraçosa para o próprio Newton e levantava tantas dificuldades conceptuais que, numa primeira fase, tornou-se um autêntico óbice à aceitação de toda a doutrina. A "física atractiva" não atraía, de facto, ninguém, e não fora imprudentemente que um homem com a inteligência, o prestígio e o saber de Leibniz lhe consagrou um "Anti-barbarus philosophus" — "contra o físico bárbaro" — onde é censurada "a ressurreição das qualidades escolásticas e das potências

H65 I 214

que muitos - nos séculos os séculos XVII, cartesianos, leibnizianos e newtonianos deplaciam-se sem piedade.

A física matemática de inspiração teológica defendida por Newton acabou por triunfar dessa autêntica metafísica da força que Leibniz defendia ou da teoria da matéria - extensa e das interações por turbilhão, que constituía a física cartesiana. Mas essa vitória foi lenta e foi, de certa maneira, uma vitória pírrica.

A doutrina newtoniana começou por ser aceite em Inglaterra, como é natural, mas havia razão de nacionalismo, é claro, e havia também a influência filosófica do empirismo de Locke, que foi amigo e grande admirador de ^{Newton} ~~Locke~~. E daí se estabeleceu um primeiro malentendido. Porque o que os empiristas viam na mecânica de Newton era o exemplo precepsional eficaz e a teologia baseada no segundo plano.

Da Inglaterra, a física newtoniana partiu à conquista da Europa através da Holanda, com quem a Inglaterra mantinha então estreitas relações técnicas e culturais. Os físicos holandeses - a universidade de Leyde sobretudo é um foco ~~científico~~ científico muito activo - esforçaram-se por difundir a através da Europa e, sobretudo, em França, publicando mesmo diversos livros, que quasi se poderiam considerar de propaganda, em francês. Porque convém não esquecer que, nesse tempo, economicamente, ^{cientificamente} culturalmente, era a França a potência dominante. O francês era a língua dos dotes e o famoso rei da Prússia Frederico, por exemplo, era em francês e considerava-se um discípulo dos filósofos franceses.

Louis XIV
(1661-1715)
Louis XV
+ (1715-1774)

É a França - sobretudo o mundo científico - mostrava-se receptiva à doutrina de Newton. Fontenelle, que morreu cartesiano e era secretário perpétuo da Academia das Ciências representa este espírito de resistência. O seu "Entretien sur la pluralité des mondes" que teve uma enorme influência e constituiu de facto uma apologia de mecanicismo, rejeitava o newtonianismo e permaneciam-lhe a influência da física cartesiana.

1657-1757
1686

É Voltaire quem vai fazer o necessário para difundir a física de Newton em França. Em 1727 vai assistir aos funerais de Newton ~~em Paris~~ - o que lá é significativo - e traz consigo um exemplar dos Principes. Embora não fosse físico dedica-se então à experiência de física, publica até um tratado para expor e defender a doutrina de Newton e, sob

"Elementos de filosofia de Newton" 1733

o sua influência, a sua amiga, a marquesa de Châtelet, empreende a tarefa de traduzir em francês os Principia e qual coisa só aparecerá em 1756, após a morte da tradutora.

Maupeitruis, no ano 30 é o primeiro físico francês com enviaçãõ a defender as teorias de Newtonianas, desde então a sua influência vai crescer rapidamente a ponto que, no meado do século e mesmo em França, Descartes será tratado desdenhosamente. O fenómeno só irá acentuando, e a França só assumirá de novo o cartesianismo em pleno século XIX e através do perfeito malentendido que é a influência de Victor Cousin; mas trata-se então do cartesianismo filosófico, epistemológico, e não do cartesianismo físico. No decurso do século XVIII e por extranho que pareça, Descartes sofre um autêntico eclipse.

É em França e graças aos franceses que a física de Newton a impõe e, para isso, dois factores se conjugam: a contribuição da física experimental e o aproveitamento filosófico de Newton contra Newton.

Do ponto de vista experimental, as provas da veracidade da gravitação universal acumulam-se inexoravelmente. Huygens tinha reusado a ideia da ~~atraçã~~ atração universal tal como Newton a concebera e a seu vez o fecho era uma força de atração provocada pelo centro da Terra daí que ele tivesse previsto que (sob a acção da força centrífuga) a Terra fosse um elipsoide achatado com um achatamento da ordem de $1/578$. Para Newton, ao contrário a atração é uma interacção entre dois pontos e o seu cálculo conduzia a prever um achatamento muito maior da ordem de $1/230$. A Academia das Ciências de Paris organiza em 1735 uma missão de Péruvia (dirigida pelos Académicos Bouguer e La Condamine) para medir o valor do grau de meridiano nas vizinhanças de Equador, enquanto outra (dirigida por Clairaut) irá efectuar medições semelhantes nas vizinhanças do círculo polar, na Lapónia. Os resultados mostraram claramente a exactidão do cálculo de Newton.

Este previra que a vizinhança de uma montanha exerceria uma força atractiva. Ora, efectivamente, foi possível demonstrar experimentalmente que, nas vizinhanças de uma montanha o fio de prumo era desviado da vertical ~~para~~ conforme as previsões da gravitação universal.

Por outro lado, as observações astronômicas cada vez mais precisas davam grande credibilidade à lei da atração newtoniana. O retorno do cometa de Halley na data que este previra exactamente foi um acontecimento espectacular que muito influenciou os espíritos. A análise cuidadosa dos seus períodos sucessivos (em 1758) foi uma prova da verdade da doutrina da gravitação que se tornava cada vez mais difícil por em causa.

A estes argumentos de natureza puramente física (e há que não esquecer os desenvolvimentos puramente formais, a extensão da teoria à explicação das propriedades dos fluidos por Euler e Daniel Bernoulli etc.) juntava-se a utilidade

[24^a]

A Mecânica no século XVIII - 3

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Por outras palavras, o princípio de Maupertuis assumia (como a hipótese corpuscular exigia) que a velocidade da luz fosse maior na água do que no ar. E como a hipótese da natureza corpuscular da luz era então a teoria dominante, Maupertuis achava-se em condições de afirmar que Fermat se enganara e que Deus concebera o mundo não de forma a minimizar o tempo gasto ao passar de um ponto para outro mas a minimizar a acção correspondente a um tal percurso.

Este conceito de acção, que assim surge na ~~teoria~~^{em} física ~~quanta~~ envolto numa aura ~~de natureza~~ teológica, vai ter um estranho destino. A priori, não se entende qual o seu significado: todas as grandezas que se afirmaram importantes para o desenvolvimento conceptual da dinâmica — a quantidade de movimento, o momento angular, a energia cinética, a energia potencial, o trabalho — têm algo de comum que é o de serem grandezas conservativas, grandezas cujo valor permanece constante no tempo para largas classes de fenómenos. Tal não é, porém, uma propriedade que possam atribuir à acção. Todavia, já em meados do século XIX, o grande físico-matemático inglês Hamilton demonstrara que, a partir dum princípio de extremo da acção (que se apresenta como uma espécie de generalização do princípio de Maupertuis) era possível deduzir uma das formas das equações fundamentais da Mecânica. Quase na mesma época, de facto um pouco mais tarde, trabalhos de Helmholtz e de Boltzmann para fazer uma ponte entre a Mecânica e a Termodinâmica, atribuíam um papel essencial à acção.

Quando ~~apareceu~~^{foi} a teoria quântica e se foi forçado a introduzir um elemento discreto na descrição do universo, esse elemento discreto, a chamada constante quântica ~~de~~^{foi} tornou dimensão dum acção. Na verdade a grandeza que intervem no princípio da menor acção de Maupertuis tem como dimensão

$$[S] = [p \cdot l] = [mv \cdot l] = M L^2 T^{-1} = M L^2 T^{-1}$$

enquanto a constante quântica ~~de~~^{introduziu} pela relação fundamental $E = h \nu$ tem como dimensão $[h] = [E \nu^{-1}] = [m v^2 \nu^{-1}] = M L^2 T^{-2} T = M L^2 T^{-1}$ e, por isso, a constante h é chamada, muitas vezes, o quantum de acção.

Mas a história continua. A volta de 1914, quando Ehrenfest se põe o problema fundamental da determinação das grandezas susceptíveis de serem quantificadas, dá encontro numa resposta na teoria física dos "invariantes adiabáticos" e, de

novos, o conceito de ação se afirma fundamental. Dez anos mais tarde, quando de Broglie na sua tese desenvolve a ideia fundamental de que tanto a matéria como a luz têm simultaneamente propriedades ondulatórias e corpusculares, a ação reaparece — lembre-se que um dos primeiros resultados que de Broglie demonstrou foi que, da sua nova hipótese, seguia-se a possibilidade de olhar o princípio de Fermat e o princípio de Maupertuis como duas expressões diferentes duma única lei física.

Hamilton

Invisivelmente, a ação tornou-se subjacente a todo o formalismo da actual Mecânica quântica. E a nova Termodinâmica bropliana do meio "sub-quântico" ¹⁹²⁶, nome longa medida, fundada na importância de ação, constituindo um estranho para ligar o princípio do crescimento de entropia ao princípio de Fermat e de Maupertuis. É bem misterioso que esta grandeza, a ação, que não parece merecer ser nada de análogo ao papel tão importante e é fácil projectar que lhe caberá um lugar importante, um estatuto privilegiado, na Física de amanhã.

Matemática e mecânica A Mecânica Racional

A formulação da mecânica a que costumamos chamar a mecânica clássica — para a distinguir das "novas" mecânicas designadas por relativistas e quânticas — e à qual também nos referiremos por vezes como sendo a mecânica "newtoniana" tornou-se efectivamente, no decurso do século XVIII, uma doutrina muito diferente da que era exposta nos "Principia mathematica" de Newton. E essa notável modificação processou-se, de facto, segundo dois aspectos muito diversos, ainda que não seja possível considerá-los totalmente independentes. Por um lado, o século permitia realizar, como seria de prever, grandes avanços quer no que respeita à formalização de própria teoria, que se tornou rapidamente muito mais rigorosa e muito mais acessível, quer ainda quanto ao âmbito de aplicação desse formalismo que integrou rapidamente a teoria dos fluidos e, em especial, dos líquidos. Mas, por outro lado, as próprias concepções físicas e até filosóficas subjacentes a essa estrutura formal em desenvolvimento rápido sofreram uma alteração comparável que, por ser menos previsível, é até talvez mais curiosa.

Nesta aula, vamos limitar-nos a esboçar os avanços de natureza propriamente físico-matemática, deixando para a próxima lição a análise das duas formulações conceptuais que ocorreram paralelamente. Essa análise apela, aliás, uma referência (embora, pela força das circunstâncias, breve) ao avanço de

astronomia e da cosmologia no século das luzes.

Antes de mais, uma nota liminar. Dizemos que, para escrever o "Principia", Newton tinha sido levado a criar previamente o cálculo infinitesimal, o qual foi, aliás, inventado simultaneamente por Leibniz. Mas, como não podia deixar de ser, esse cálculo infinitesimal de Newton e Leibniz, era um instrumento ainda muito rudimentar. São os homens do século XVIII que vão explorar com um maravilhoso engenho esse minúsculo filar e, cento e cinquenta anos após Newton, um grande matemático chamado Cauchy já dispõe de materiais suficientes para dar a análise clássica uma forma quasi definitiva. Ora esse enorme progresso que a análise matemática realizou no século XVIII foi um elemento indispensável para o crescimento paralelo da mecânica a qual, em troca, se revelou uma fonte quasi inesgotável de inspiração para os matemáticos. E não é de maneira alguma fruto do acaso que os grandes nomes da história da matemática se entrem coincidem com os grandes nomes da história da mecânica. O crescimento das duas disciplinas deu-se, por a par, afiadas uma na outra, obra dos mesmos homens.

Dai veio, de resto, um certo malentendido, que é fácil de perceber no ambiente da época mas cuja persistência não deixa de ser elucidativa de frisa das tradições cartesianas. Entende-se, efectivamente, que os homens do século XVIII que se ocupavam de mecânica e que eram, todos eles, também matemáticos, se tivessem acabado por interiorizar e, afinal, essa mecânica matematizada não era, ao fim de contas, um capítulo da matemática. Cerca de 1750, esse homem notável que foi d'Alembert interrogava-se sobre o problema epistemológico de saber se as verdades da mecânica são de "naturaleza imperativa" ou de "naturaleza contingente". Noutros termos, resulta a mecânica (como, por exemplo, a geometria) de princípios tão evidentes que não é razoável imaginar sequer a possibilidade de ser diferente ou, pelo contrário, esses princípios são a mera expressão de leis empíricas que nada justificam "à priori"?

D'Alembert, e a resposta é típica do tempo, afirmara o carácter evidente dos princípios da mecânica cuja verdade seriam, por isso, "imperativas". Dai, a concepção da mecânica como aplicação da matemática — concepção que foi muito em franco que parece ainda não está completamente morta. Dai, a designação de Mecânica Racional, quando nunca ninguém teve a ideia peregrina de falar num Electromagnetismo Racional ou numa Termodinâmica Racional. Evidente, o

principios de Mecânica? Haveria que concluir que Galileu e Newton limitaram-se a enunciar trivialidades e contina explicar porque surgiram, historicamente, num período tão turbulento...

Lejá como foi, e embora esteja excluído fazer uma resenha de todos os contributos à "mecânica racional" do século XVIII há que citar, pelo menos, uns tantos nomes entre os maiores.

Os mecanicistas

Os dois primeiros nomes a que haverá que fazer referência são o Bernoulli. Originário de Antuérpia, refugiado na Suíça no século XVI para escapar às perseguições religiosas, os Bernoulli constituem uma dinastia — uma dinastia de cientistas — que se manteve no primeiro plano da física e da matemática durante mais dum século; o primeiro a citar é Jacques I que nasce em 1654, o último a desapparecer é João III falecido em 1807. Entre o grande e o menor grande temos nos ritos honrosos: João, Louis Nicolaus, Louis Jacques e um Daniel.

Jacques I Bernoulli foi um dos primeiros a desenvolver o cálculo infinitesimal de Leibniz, iniciou a teoria das equações diferenciais, fez progressos no cálculo das probabilidades. É celebre na história da mecânica por ter formulado o famoso problema de, dados dois pontos, determinar a forma de curva que proporcione a descida mais rápida dum grave de um ponto ao outro (braquistóclona).

Seu irmão João I Bernoulli, além de brilhante matemático, foi um pilar da mecânica: determinação da braquistóclona, formulação explícita do principio das velocidades virtuais. Quanto a Daniel, filho de João I, que foi talvez o mais brilhante dessa floresta, bastaria o seu tratado de Hidrodinâmica (1732) para o celeberrimo; mas este homem que foi professor de anatomia e de botânica deve ser considerado como o precursor da teoria cinética da matéria: disso falaremos em formosos na terceira altura.

Pois que já fizemos de Trautmann, citemos agora Leonhard Euler, outro suíço de Basileia que foi aluno de um Bernoulli e que partilha com Daniel um curioso recorde: cada um deles ganhou três vezes o grande prémio da Academia das Ciências de Paris. Euler que viveu quasi toda a sua vida em São Petersburgo é considerado com justiça como um dos maiores criadores do século XVIII no domínio da matemática. A invenção do cálculo das variações foi obra sua — embora inspirada na problemática da braquistóclona em seus mestres; devemos-lhe o primeiro tratado de análise matemática digno desse nome "Introduction à l'Analyse des infiniment petits". Em mecânica, o seu nome está associado à primeira

(1654-1705)

(1667-1748)

(1700-24)

(1707-83)

Handwritten signature or mark at the bottom right.

obra em que a teoria do movimento é apresentada em termos puramente analíticos: é o "Traité complet de mécanique" (1738). Foi Euler quem introduziu o hábito (tão salutar!) de tratar as velocidades, as acelerações, as forças em momentos como grandezas vectoriais que se exprimem em termos das suas componentes segundo três eixos. É Euler quem aborda o estudo das cordas vibrantes e as equações fundamentais de hidrodinâmica são as equações de Euler. É curioso constatar que Leonhard Euler e Daniel Bernoulli, compatriotas, alunos do mesmo mestre, se ocuparam toda a vida de problemas analíticos e deixaram a bordo uma obra de grande vulto.

Já por duas vezes tivemos ocasião de nos referir a d'Alembert, a propósito da "querela das forças vivas" e da concepção de mecânica como um ramo das matemáticas, e é altura de falarmos dele com mais vago. Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), filho ilegítimo de uma grande dama foi recolhido pela mulher dum pobre vidreiro. Foi um matemático tão precoce que aos cinco e três anos já merecera ser eleito membro de Academia das Ciências; aos cinco e seis anos, em 1743, publica o seu famoso "Traité de dynamique" onde é exposto aquilo a que continuamos a chamar hoje o "princípio de d'Alembert"

$$\sum_i (F_i - \frac{d^2x_i}{dt^2}) \vec{dr}_i = 0$$

o qual continua a ser constantemente utilizado em mecânica analítica; occorreu-lhe igualmente de hidrodinâmica e da teoria das cordas vibrantes — a equação de hoje, para lo som ou a equação de propagação de luz é chamada a equação de d'Alembert. Cravem igualmente referir a importância que teve a sua obra filosófica: ~~admirado~~ adepto entusiasta de "filosofia das luzes" compartilhada com Diderot a honra de ter assumido a direcção de "Encyclopédie" quando se apareceu, tendo os primeiros volumes (1751) e, embora tenha resistido perante as dificuldades levantadas pela censura — e Diderot que levava a obra ao seu termo — continuou sempre a apoiar activamente o iluminismo.

Então, é indispensável referir Joseph-Louis Lagrange (1735-1813) francês nascido em Turim, que foi professor em Berlim e só se instalou em França, na cidade, em 1787. No ano seguinte publicara a sua famosa "Mécanique analytique" que é, pela forma como pelo conteúdo, o primeiro tratado moderno de mecânica analítica.

Aprofundando-se no "princípio dos deslocamentos virtuais" que já existira babilónico e ao qual Jean Bernoulli deu uma forma precisa e aproveitando plenamente

O princípio geral formulado por d'Alembert, Laplace formulara' em termos gerais e extremamente condensados as equações de evolução dum sistema dum número arbitrário de pontos materiais ligados por forças de interacção e sujeitos a forças exteriores; tais equações são, de facto, muito gerais que as equações ditas "de Newton" mas são incomparavelmente mais manuseáveis. A configuração do sistema sendo definida por um sistema de coordenadas quaisquer — falamos em coordenadas generalizadas — que é hábito representar por $q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_n$ Laplace introduz para descrever ~~o~~ fisicamente o sistema uma certa função L das coordenadas generalizadas e das suas derivadas em relação ao tempo — falamos em velocidades generalizadas e representamo-las por \dot{q}_k ; esta função dita o lagrangiano $L(q_k, \dot{q}_k, t)$ e é de facto a diferença entre a energia cinética T e a energia potencial U

$$L = T - U$$

e as celeberrimas equações de Laplace escrevem-se

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = 0$$

tantas equações de segunda ordem quantos os "graus de liberdade" do sistema. É um dos mais importantes sistemas de equações em que assenta a nossa compreensão do mundo.

A obra de Laplace é igualmente inovadora pelo seu estilo. É o próprio que reza no prefácio:

"Nesta obra não há quaisquer figuras. Os métodos que exposto aqui não requerem nem construções nem raciocínios geométricos ou mecânicos mas apenas operações algebricas sujeitas a uma marcha regular e uniforme. Aquelles que gostam da análise verão com prazer a mecânica tornar-se um dos seus prolongamentos e agradecer-me-ão em tom assim ampliado o seu domínio."

Quase exactamente um século após a publicação de "Principia" (1687-1788) a mecânica analítica está constituída. Já beneficiara ainda de acréscimos importantes — essencialmente as equações de Hamilton — mas que não serão revolucionários. A mecânica clássica atingiu quasi a perfeição.

Claro está que, antes do fim do século, Laplace dá-nos ainda algo de novo e de fundamental. Mas, de certo modo, a obra de Laplace situa-se no outro plano. De lá teremos ocasiões de falar na próxima aula.

Pierre Simon Laplace ~~foi um matemático~~ ^{foi um matemático} nasceu numa pais de origens modestas, filho de um simples camponês da Normandia. Mas ^{como} era um homem de imensa envergadura intelectual, ~~o que lhe permitiu~~ ^{o que lhe permitiu} desenvolver ~~uma~~ ^{uma} ~~ambiciosa~~ ^{ambiciosa} ~~carreira~~ ^{carreira} ~~política~~ ^{política} ~~que ocupou o primeiro~~ ^{que ocupou o primeiro} ~~posto~~ ^{posto} ~~no~~ ^{no} ~~governo~~ ^{governo} ~~francês~~ ^{francês} ~~na~~ ^{na} ~~época~~ ^{época} ~~de~~ ^{de} ~~Napoleão~~ ^{de Napoleão}, ~~o~~ ^o ~~qual~~ ^{qual} ~~recebeu~~ ^{recebeu} ~~as~~ ^{as} ~~maiores~~ ^{maiores} ~~honras~~ ^{honras} ~~mas~~ ^{mas} ~~por~~ ^{por} ~~isso~~ ^{isso} ~~deixou~~ ^{deixou} ~~de~~ ^{de} ~~aderir~~ ^{aderir} ~~aos~~ ^{aos} ~~Borbons~~ ^{Borbons} ~~quando~~ ^{quando} ~~da~~ ^{da} ~~Restauração~~ ^{Restauração}, ~~o~~ ^o ~~que~~ ^{que} ~~lhe~~ ^{lhe} ~~valeu~~ ^{valeu} ~~um~~ ^{um} ~~título~~ ^{título} ~~de~~ ^{de} ~~margrave~~ ^{margrave} ~~e~~ ^e ~~a~~ ^a ~~dignidade~~ ^{dignidade} ~~de~~ ^{de} ~~par~~ ^{par} ~~de~~ ^{de} ~~França~~ ^{de França}.

ideia de um trabalho pessoal que ocupou o primeiro posto no governo francês na época de Napoleão, o qual recebeu as maiores honras mas por isso deixou de aderir aos Borbons quando da Restauração, o que lhe valeu um título de margrave e a dignidade de par de França.

A grande obra da sua vida foi a "Mécanique céleste" em que começou a trabalhar em 1773, aos vinte e quatro anos, e só terminou quasi à hora da morte, em 1825 — mais de cinquenta anos de labor intenso dos quais resultou um tratado monumental (vol. I e II em 1799, vol. III em 1802, vol. IV em 1805, vol. V em 1825). Era um estudo teórico pormenorizado do comportamento dos muitos planetas e satélites que pertencem ao sistema solar.

Os progressos da astronomia experimental durante todo o século XVIII tinham permitido reconhecer as aparentes irregularidades no comportamento dos planetas. Não está que se tinha a ideia de que as interações mútuas dos planetas entre si perturbavam a bela geometria das elipses que resultaria se cada astro só estivesse sujeito a um único centro de forças. Mas o grave era que se sabia, porém que, além das perturbações cíclicas, periódicas, que ~~eram~~ ^{eram} consideradas injenunças, parecia que existiam outras "perturbações" ~~seculares~~ ^{seculares} cuja ação não seria periódica nas circunstâncias: nomeadamente as excentricidades orbitais variavam no tempo e agiam, ~~o~~ ^o ~~óbvio~~ ^{óbvio}, nome sobre as outras.

Laplace utilizou as ferramentas matemáticas e mecânicas em seus estudos — de um Clairaut, de um Euler, de um Lagrange e utilizou sistematicamente o conceito de potencial, o que foi uma grande novidade. Demonstrou de maneira clara que essas perturbações acumulativas que pareciam tão preocupantes eram apenas perturbações cíclicas de período muito longo — aquilo a que se veio a chamar "perturbações seculares". Demonstrou um teorema que causou o maior espanto e, segundo o qual, embora a excentricidade e as dimensões da elipse descritas por cada planeta nos fossem constantes, multiplicando a ~~seu~~ ^{seu} ~~massa~~ ^{massa} ~~de~~ ^{de} ~~cada~~ ^{de cada} ~~um~~ ^{um}, pela quadrado da excentricidade e pela raiz quadrada do eixo maior da elipse, a soma era constante.

Newton não tinha a ideia de que o sistema solar pudesse ser estável em virtude da sua própria estrutura, Laplace não vai afirmar essa estabilidade,

mas não demonstrá-la. A lei da gravitação universal basta para que o sistema solar permaneça indefinidamente estável sem qualquer intervenção exterior. Haverá variações, de período maior ou menor tempo, em relação de seu estado dinâmico num dado instante mas essas variações são todas periódicas e, ao cabo dum tempo suficientemente longo, o próprio sistema solar se encarregará de retornar a estado dinâmico primitivo e tudo recomeçará indefinidamente. O sistema solar que os cálculos de Laplace descrevem é um gigantesco relógio que não necessita que lhe dêem cordão.

Laplace (que se ocupa igualmente de espiritualidade e de astronomia, tendo ^{electromagnetismo} ^{variações da} ^{previsão de} ^{terça 1792} ^{Laplace} trabalhado bastante em colaboração com Lagrange) completa esta obra gigantesca com a apresentação duma hipótese cosmogónica quanto à forma como se teria formado o sistema solar. Haveria no início uma nebulosa em torno dum núcleo mais condensado e a alta temperatura, que rodaria em torno dum eixo central. O arrefecimento da zona exterior da nebulosa e o movimento de rotação teria originado a formação dos planetas e dos seus satélites, enquanto o núcleo central se transformava no sol ("Exposition du système du monde", 1796).

De todos os modos, com Laplace o mecanicismo atinge o apogeu. O universo é uma máquina perfeitaíssima que se comporta de acordo com as suas próprias leis sem qualquer intervenção divina. É o "deus previsor" de Keyne.

Com Laplace surge o determinismo dito laplaciano. "Se considerarmos um espírito suficientemente poderoso para conhecer num dado instante as posições e as velocidades de todos os particulares que compoem o universo, este espírito poderia ~~prever~~ ^{conhecer} infalivelmente não só o presente mas todo o passado e todo o futuro." Não é só a morte de Deus é o próprio problema da liberdade humana.

Theoria analytique des probabilités (1812)

Essai philosophique sur les probabilités 1814

Mécanique céleste (1799-1825)

Exposition du système du monde (1796)

Herschell e a astronomia estelar

1.

Os astrónomos sempre se ocuparam apenas com o estudo do sistema solar pois as estrelas, as "fixas", mantêm as mesmas posições relativas, não se afiguravam merecedoras de interesse. Curiosamente, os textos antigos e medievais contêm o facto de algumas estrelas mostrarem grandes variações de luminosidade, embora não deixe de ser relevante que a mais notável dessas estrelas, a estrela β da constelação de Perseu, fosse denominado pelo árabe "Algol", o que significa "o vampiro": o brilho de Algol varia espectacularmente com uma periodicidade de de somente 70 horas e, em 1872, o astrónomo inglês Goodricke explicava que ela girava à volta de outra estrela muito tênue sendo, pois, uma "binária com eclipse". Outro caso é o da estrela Omicron Ceti, na constelação da Baleia, já estudada em 1596 pelo alemão David Fabricius, que num período de 11 meses se transforma de um astro brilhante num ponto luminoso quase imperceptível - e, por isso, foi cegamente "Mina", a maravilhosa. E, na mesma ordem de ideias, há também que referir as chamadas "novas", as estrelas novas como aquela observada por Tycho, que surgiu bruscamente no céu, às vezes muito brilhante, para se sumirem de novo ao cabo de uns meses ou de uns anos. Sabia-se, assim, que certas estrelas variavam de brilho, em contradição com o postulado da imutabilidade dos céus.

O triunfo do heliocentrismo aumentou o interesse pela astronomia estelar. Por um lado, a doutrina de Copérnico requeria que as estrelas estivessem muito mais longe do que se pensava, e isso estimulou o interesse pela determinação experimental dessas distâncias. Por outro lado, deixava de ser necessário admitir que todas as estrelas estavam encastadas numa esfera que rodava em torno do "eixo do mundo" em 24 horas, dando lugar à tentação de explicar que certas estrelas nos surgiam muito mais brilhantes do que outras pela simples razão de que estavam muito mais perto de nós. Mas, sendo assim, a distância procurada a que se encontrava uma estrela próxima (quer fosse, uma estrela muito brilhante) deveria ser mensurável com a velha técnica da paralaxe: durante o movimento diurno de translações da Terra à volta do Sol, a estrela próxima deveria aparecer-nos alinhada com diferentes estrelas tenues, longínquas, e com a distância Terra-Sol em conhecida, bastava determinar o ângulo α para achar a distância da Terra à estrela brilhante.

Em 1718, Halley, o discípulo de Newton, constatou que as posições por ele observadas para certas estrelas (Antares, Procyon e Sirius) diferiam tanto das posições que lhes tinham sido atribuídas pelos astrónomos gregos que era inadmissível tratar-se de um erro de medição. Antares, por exemplo, deslocava-se cerca de 1° , o dobro do diâmetro aparente da Lua, em relação às coordenadas que Ptolomeu lhe atribuía. Não se podia então duvidar de que pelo menos algumas estrelas se moviam, e, embora tais movimentos só fossem sensíveis ao cabo de muitos séculos, esse facto parecia natural dada a enorme distância a que de facto se encontravam de nós. Ora se algumas estrelas se moviam, porque razão não o faziam as outras? Claro está que se elas se movessem segundo a direcção na qual as observamos, o fenómeno escapava-nos, mas uma tal hipótese não se afigurava razoável porque, estatisticamente, o deslocamento de muitas estrelas deveria ter uma componente

de importância significativa segundo a direcção normal à linha de observação.

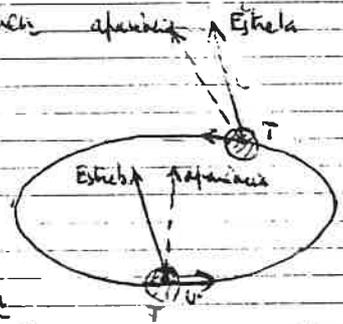
A única explicação convincente estava na aceitação da ideia de que as estrelas se encontram efectivamente a distâncias de nós muito diferentes, em média as mais brilhantes encontrando-se mais próximas de que as mais tênues. As três estrelas cujo deslocamento fora constatado por Halley figuram entre as oito mais brilhantes que observamos no céu e, por consequência, tornava-se natural supor que eram três das mais próximas de nós. Tornava-se compreensível que os seus movimentos fossem detectáveis, de maioria das outras estrelas em condições análogas situando-se demasiado longe para tornar possíveis constatações análogas.

Quase logo a seguir, em 1725, outro astrónomo inglês chamado James Bradley (1693-1762) julgou ter observado tanta paralaxe estelar. Tal como a teoria indicava, ele viu ao longo do ano a estrela descrever aparentemente uma pequena elipse em relação ao fundo tenue das estrelas longínquas. Mas Bradley depressa se apercebeu de que essa elipse não tinha o comportamento anual concordante com as previsões teóricas: a estrela não se situava numa extremidade do eixo maior do elipse em Dezembro, no solstício de inverno, mas em Março, e esse atraso de três meses mantinha-se ao longo de todo o ano.

Em 1728 Bradley conseguiu perceber que o efeito que ele observava não tinha a ver com a paralaxe estelar, a qual só seria efectivamente a ser detectada mais de um século depois, em 1830-1840, por três astrónomos ⁽¹⁷⁸⁴⁻¹⁸⁴⁶⁾ Bessel ⁽¹⁷⁹³⁻¹⁸⁴⁴⁾ Henderson e von ⁽¹⁷⁹³⁻¹⁸⁶⁴⁾ Struve ^(como alheios) que trabalhavam independentemente.

O fenómeno observado por ~~Bessel~~ correspondia a um fenómeno completamente diferente a aberração da luz, consequência do movimento da Terra através dos raios luminosos vindos da estrela com uma velocidade finita.

A direcção em que a estrela é observada é uma direcção aparente que varia no decurso do ano pois resulta da combinação do vector velocidade da luz (de módulo constante, e com a direcção praticamente constante que une a estrela à Terra) e do vector velocidade da própria Terra em torno do Sol, quase constante em valor absoluto, mas que varia muito em direcção e sentido. Daí que a direcção aparente em que se situa a estrela parece descrever uma pequena elipse. Em última análise, este fenómeno idêntico leva-nos a inclinar o guarda-chuva para diante quando nos deslocamos sob chuva que cai na vertical.



2.

No fim do século XVIII, quando estes dois grandes teóricos que foram Lagrange e Laplace demonstraram, enfim, a estabilidade do sistema solar, imcionou um acontecimento espectacular no conhecimento dos céus graças à obra de um dos maiores astrónomos de todos os tempos, William Herschell (1738-1822). Filho de um músico militar do ducado de Hanover na Alemanha, entre pertença da Sibéria britânica, Herschell adoptou desde novo a fortuna paterna mas, para escapar dos perigos da guerra dos Sete Anos, emigrou jovem para Inglaterra onde ganhava a vida como instrumentista e professor de música. Adquiriu entretanto um interesse apaixonado pela ciência e, aos 25 anos, já conseguira a astronomia fora o seu pouco tempo livre. Decidido a verificar com os seus próprios olhos tudo o que lia nos livros, viu-se obrigado, por falta de meios, a empreender a construção dos seus telescópios. Mas só em 1774, após numerosos fracassos, é

Herschell e a astronomia estelar

e que conseguia finalmente obter um instrumento razoável com o qual pôde iniciar finalmente a análise sistemática de firmamento que se propunha empreender.

Se seria contada no decurso de uma segunda análise sistemática dos céus, agora foi efectuada com um excelente telescópio reflector de 7 pés de comprimento, que Herschell viu fazer acidentalmente uma descoberta sensacional: em março de 1781, observou nas vizinhanças da constelação dos Gêmeos um objecto brilhante móvel que, de início, supôs ser um cometa, mas a determinação da trajetória desse astro realizada durante os meses seguintes demonstrou que só se podia tratar de um planeta circulando em torno do Sol a uma distância cerca de duas vezes maior que a de Saturno.

Denominado Urano após uma certa controvérsia, esse planeta era o primeiro novo satélite do Sol a ser identificado desde o começo dos tempos históricos e imagina-se facilmente o enorme interesse despertado por uma tal descoberta. Conhecido perante os meios científicos, Herschell foi nomeado astrónomo real, mas o daltónico que sofria era demasiado modesto para o dispêndio de prosseguir a fabricação de telescópios, vendidos por bom preço dada a sua excepcional qualidade. Só a partir de 1788, após o seu casamento com uma senhora rica, é que Herschell se pôde dedicar unicamente à investigação astronómica.

Convém ainda referir que não foi só para um sítio que Herschell atirou as suas invulgaris capacidades de construtor de telescópios: em 1783 já dispunha de um instrumento com um comprimento de 20 pés e um espelho de 18 polegadas e, em 1789, conseguiu enfim construir um telescópio gigante cujo tubo media mais de 20 metros, o respectivo espelho tendo um diâmetro de um metro e vinte. Tais instrumentos de observação iam muito além do que tudo quanto existia até então, e permitiam que Herschell identificasse os dois primeiros satélites de Urano e dois novos satélites de Saturno. Mas o essencial da sua obra referir-se-ia à astronomia estelar e, embora ele se a tivesse podido iniciar em 1783, quando já contava 45 anos, não felizmente dispôs ainda de quase quatro décadas de vida activa para a levar a cabo.

→ levantamento sistemático dos céus — 683 regiões padrão

O número de estrelas máximas no plano da Via Láctea, decrescendo numa direcção perpendicular

Seria que as estrelas estavam mais próximas umas das outras numa região? Herschell considerava que isso seria implausível. A sua hipótese era que as estrelas não estavam distribuídas uniformemente no espaço que ocupavam em volume de forma lenticular  o Sol situando-se sensivelmente no centro. Na direcção da Via Láctea (Galáxia, Níctos, círculo lácteo) há muitas estrelas brilhantes próximas, muitas outras menos brilhantes, mais longe e assim sucessivamente, as mais distantes provocando a luminosidade lenticular tão característica da Via Láctea. Na perpendicular, nada disso, pois a espessura ocupada era muito menor: só as estrelas próximas brilhantes e poucas mais.

Pelo número de estrelas observadas fez uma estimativa das dimensões da Galáxia e tomando como distância

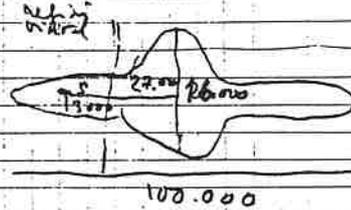
873
 Cia média entre duas estrelas a distância Terra-Júpiter (10 anos luz) isto dá uma estimativa com um comprimento de 8.000 anos luz e uma espessura de 1500 anos luz.

Kapteyn (1851-1922) retomava este trabalho com mais minúcia, tendo em conta a magnitude das estrelas que contava - e assim foi levado a aumentar as dimensões da Galáxia. Em 1923 dizia 55.000 anos e 11.000 anos luz, já lá isto.

Outra descoberta de Herschell: o Sol em movimento em relação as estrelas. Desloca-se para um ponto na constelação de Hércules (hoje sabe-se que para a constelação da leoa) a uma velocidade de 19 km/s.

Herschell também descobriu as estrelas duplas.

Hoje a Galáxia é referida por a forma 1930-34



Sol rodeia em torno do centro como $v = 220 \text{ km/s}$
 o período de rotação é 230 milhões de anos
 (centro no Sagitário)

Massa da Galáxia 100.000 vezes maior que a do Sol (90% na região central)
 Via contém umas 100.000 milhões de estrelas - Herschell 300 milhões

Núvem grande 5 a 10.000 milhões de estrelas - 150.000 anos luz
 Núvem pequena 1.000 a 2.000 milhões de estrelas - 65.000 anos luz
 1826

O paradoxo de Olbers a favor das teorias de Herschell

resposta de Olbers: núvem de poeira - mais após aquecimento e formação de lâminas

A química ponderável ou átomo e o calórico - I

1.

Só no começo do século XVIII é que a Química conseguiu erguer um esquema conceitual com seus conceitos explicativos. Essa teoria inovadora parece ter sido inspirada pela obra de Joachim Becker (1635-82), mas foi o seu discípulo Georg-Ernest Stahl (1660-1734), um médico que ensinava na universidade de Halle e também se tornou conhecido como defensor do animismo, quem a desenvolveu e estruturou de forma a despretensar-lhe uma larga difusão.

A ideia essencial consistia em admitir que em todos os corpos combustíveis se encontra presente um agente universal impalpável, o flogisto, uma espécie de "princípio do fogo" que não teria ser confundido com o fogo visível. Assim, os combustíveis corresponderiam à perda de flogisto pelas substâncias que o continham, as quais em consequência adquiriam outras propriedades. Como o carvão quase desaparece quando arde, concluiu-se que ele quase só continha flogisto, mas não deixava de se considerar que o flogisto não podia ser realmente isolado.

O que a teoria tinha de mais atraente era a ~~interpretação mais atracente da teoria estava naturalmente na interpretação dos fenômenos de oxidação e de redução. Admitindo que os diversos metais continham maiores ou menores quantidades de flogisto consoante a sua disposição para se oxidarem - e isto era, por exemplo, quase nos metais flogisto algum - encerrava-se a transformação dos metais em óxido (em "terra" ou em "cal", como então se dizia), produzida normalmente por calcinação, pelo seu aquecimento a uma temperatura suficientemente elevada, como uma mera consequência da expulsão do seu flogisto. Já se sabia então que o ar era indispensável à realização de um tal processo, mas Stahl até se mostrou capaz de interpretar esse facto no quadro mecanicista então em voga: bastava atribuir ao ar a função de transmitir as partículas do flogisto o movimento que lhes permitia libertarem-se do sítio do metal. Em contrapartida, tornava-se quase evidente que a água do carvão, flogisto quase puro, permitia que os metais deflogisticados recuperassem a sua composição original.~~

Este esquema tinha de enfrentar a desagradável constatação experimental de que a perda do flogisto era acompanhada por um aumento do peso, e chegou-se a falar nas capacidades de "levantar" desse princípio impalpável. Mais precisamente, Stahl explicou que a saída do flogisto levava consigo vapor no sítio da matéria nos quais o ar se podia introduzir tornando-a mais pesada. Talvez não fosse uma explicação totalmente convincente, pois o próprio Stahl sugeriu outras interpretações, mas isso não impediu que a teoria adquirisse um acentuado êxito em breve. Não se dispunha de qualquer alternativa de valor comparável e os conjuros do mecanicismo que então tinham leis manifestavam uma tendência favorável por essas ideias.

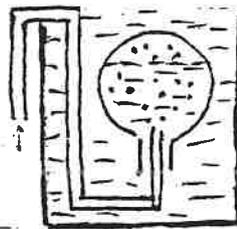
Historicamente, a teoria do flogisto teve um papel muito positivo no acentuamento do conhecimento químico. Nesse tempo já havia muita gente que se ocupava de manipulações de natureza química, normalmente para preparar medicamentos ou tentar obter medicamentos novos, e mesmo o débil foi então oferecido pela doutrina do flogisto ajudou a orientar essas investigações desordenadas, até então totalmente

empíricas. O progresso da química experimental do século XVIII foi incontestavelmente favorecido pela existência de uma fundamentação teórica mesmo tão fraca.

Outros progressos da química experimental nessa época foram realmente notáveis. Para o exemplo, ficamos minimamente lembrados que foi então ^{que} os sais alcalinos, já utilizados em medicina no século anterior, ^{se obtiveram} nos níveis elementares sódio e potássio, ditos os álcalis fixos mineral e vegetal. Da magnésia bruta era destilada nas botijas extraía-se o magnésio e o zínco, ao qual já Paracelso se referia, deixou enfim de ser chamado como a "falsa prata" para ser considerado um outro metal. Por volta de 1750 foram identificados e estudados o cobalto e o níquel, enquanto o fósforo, já conhecido no século anterior, despertava uma especial curiosidade por brilhar na obscuridade, por ser frívolente. Também se avançou significativamente no conhecimento dos ácidos e dos sais, mas não vale a pena aqui examinar em pormenor esta questão complicada.

De facto, e sem negar a importância de todas estas descobertas, os avanços decisivos vieram propriamente do estudo dos gases, da imponência progressiva da ideia de que não existia um só "ar", o ar atmosférico do velho Aristóteles, mas "aer" de natureza muito diversa cujo papel nas reacções químicas era indispensável tomar em consideração. Já Van Helmont, o criador da palavra gás, tinha falado do "espírito silvestre", substância gasosa libertada pela putrefacção nos pântanos e Boyle ainda fora mais longe: tendo verificado com a máquina pneumática que o ar era indispensável às combustões, verificara também que só uma fração desse ar intervenha nesse processo, à qual Boyle chamou o "nitro volátil" ou o "nitro aéreo"; não se sabe mais se ele considerava o "nitro aéreo" uma substância ou um princípio, mas posteriormente tentou-se a caracterizá-lo como um sal.

Foi o inglês Mayow quem inventou uma técnica simples para recolher os gases, isto fazendo-o com um tubo num balão de boca larga para baixo imerso numa tina cheia de água. As técnicas de manipulação das substâncias gasosas tinham sido aperfeiçoadas desde então, e Stephen Hales encarnegara-se de as tornar conhecidas ao expô-las num livro famoso, "Vegetable Staticks" (1727). A utilização dessas técnicas veio-se a tornar possível a Black para a realização de uma descoberta do anidrido carbónico.



C. 1641-1689

2.

Joseph Black (1728-1799), um escocês que foi professor das universidades de Glasgow e de Edimburgo, merece ser citado em qualquer história das ciências por dois contributos de natureza diferente. Antes de mais, porque na sua tese de doutoramento "Experiências sobre a magnésia, a cal e outras substâncias alcalinas" (1755) mostrou afirmar que o gás libertado pelo aquecimento dos carbonatos e ao qual ele chamava o "ar fixo" não era o ar atmosférico. Tratava-se realmente de anidrido carbónico e se muitos outros já tinham tido ocasião de o observar, por exemplo quando ele borbulha em certas fontes de água mineral, foi Black o primeiro a sustentar que o "ar fixo" era uma substância diferente do ar ordinário, única forma de entender que tivesse outras propriedades químicas: o "ar fixo" é absorvido pelas soluções alcalinas, precipita a "água de cal" e retém-lhe o seu poder cáustico.

A química ponderal, os átomos e o calórico - 2

A tese de Black originou uma longa e complicada controvérsia com todos aqueles que se recusavam a aceitar que qualquer gás não fosse o ar atmosférico contendo porventura umas tantas impurezas. Para explicar o resultados das experiências de Black, um tal Friedrich Meyer até inventou um hipotético parente do flogisto dito o "ácido puinge" (1774). Mas entretanto já Henry Cavendish (1731-1810) proclamara a existência de um ar inflamável produzido pela acção do ácido sulfúrico sobre o ferro. Discutiu-se se este ar inflamável que era combustível e podia detonar quando misturado com o ar atmosférico, era idêntico ao gás produzido na reacção do ácido clorídrico com o zinco — outra forma de libertar hidrogénio — ou era a emanacão inflamável da putrefacção pantanosa — o metano. Tudo isto acabaria por se esclarecer rapidamente e, assim, graças sobretudo a Black, reconheceram-se a existência de substâncias gaseosas essencialmente distintas do ar.

Mas Black também merece ser considerado como o verdadeiro fundador da calorimetria. Após a invenção do termómetro pelos galileus da Academia del Cimento, a doutrina do calor não progredira de forma apreciável. A nota de cada um utilizar a sua própria escala termométrica, por vezes utilizando definições inversivas da temperatura de referência, as dificuldades técnicas da construção de bons termómetros — Fahrenheit obteve para si e para sua própria escala um feliz sucesso devido sobretudo ao seu valor como construtor de termómetros —, o carácter vago e controverso do esquema teórico interpretativo dessa fenomenologia, foram dificuldades que levariam tempo a ultrapassar. Não foi fácil, nomeadamente, apreender com clareza a diferença fundamental entre o conceito de temperatura e de quantidade de calor.

> 1709

Si em 1744-47 é que Kraft e Richmann efectuaram ^{em S. Petersburgo} experiências rudimentares de calorimetria dos quais concluíram que a temperatura t da mistura das massas m_1 e m_2 da mesma substância (na ocorrência água) respectivamente às temperaturas t_1 e t_2 tinha o valor $t = (m_1 t_1 + m_2 t_2) / (m_1 + m_2)$. Mas quando Black se interessou pelo problema, a partir de 1757, o avanço foi rápido e seguro. Já se sabia bem que substâncias de naturezas diferentes apreciam com mais ou menos facilidade, mas Black vai traduzir este facto empírico em termos quantitativos: ele caracterizou o comportamento térmico de cada substância por uma constante, o calor específico c , que é a quantidade de calor necessária para fazer variar de 1 grau a unidade de massa dessa substância. Então, como as quantidades de calor eram grandezas extensivas, a capacidade calorífica C de um corpo, quer dizer, a quantidade de calor necessária para fazer variar de um grau a sua temperatura, era o mero produto da massa pelo calor específico $C = mc$. O equilíbrio térmico de um conjunto de corpos de capacidades caloríficas C_1, C_2, C_3, \dots inicialmente às temperaturas t_1, t_2, t_3, \dots verifica-se a uma temperatura t tal que

(1757-1762)

$$t = \frac{C_1 t_1 + C_2 t_2 + C_3 t_3 + \dots}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots}$$

Esta definição da temperatura de equilíbrio térmico exclua obviamente a eventualidade de se decair ao processo qualquer dos corpos ter sofrido uma mudança de fase. Mas Black foi igualmente capaz de tratar este caso mais complicado. As suas experiências mostraram-lhe que para que um corpo transitasse do estado

sólido ao estado líquido ou do estado líquido ao estado gasoso sem qualquer variação de temperatura era necessário fornecer-lhe apreciáveis quantidades de calor, as quais eram aliás completamente recuperadas se se efectuavam a transformações inversas. Referindo-se à unidade de massa da substância considerada, Black chamou a estas quantidades de calor os calores latentes da substância para as diferentes mudanças de fase, ~~cuja~~ ^{cuja} designação que ainda hoje permanece.

Se Black falava em calor latente ou mesmo em calor oculto era porque as suas experiências demonstravam que na transição do estado sólido ao estado líquido ou deste ao estado gasoso os corpos armazenavam certas quantidades de calor que nelas permaneciam "latentes" ou "ocultas", na medida em que ao passar a mudança de estado inversa essas mesmas quantidades de calor eram exactamente recuperadas. E estes dados de observação constituíam argumentos a favor da tese de que o calor era substância ~~essencial~~ ^{essencial} ~~vital~~ ^{vital}, algo como um fluido ^{ponderável} imponderável à maneira do flogisto.

Esta ideia do calor substância, cujas raízes se perdem na Grécia clássica, tinha sido retomada pelos novos atomistas que, na esteira de Demócrito, lhes tinham atribuído um estrutura corpuscular, encarando-a como formada por partículas subtis e extremamente móveis, susceptíveis de se infiltrar no vazio da matéria ordinária; no início do século XVIII, um homem com a autoridade de Boerhaave (1668-1733), o célebre professor da universidade de Leyden, tinha defendido um conceito deste tipo na qual o calor era dito a "matéria do fogo".

Em oposição, cientistas também com grande prestígio sustentavam um tese oposta, mais estritamente consistente com o mecanicismo reinante, na qual o calor era apenas uma expressão do movimento das partículas da matéria ordinária. As tentativas feitas por Daniel Bernoulli e por Leonhard Euler para esboçar uma interpretação cinética dos gases iam claramente nesse sentido. Mas esta doutrina já apontava a dificuldade de explicar a propagação do calor radiante mesmo através do vácuo - entre o Sol e a Terra ou nas câmaras das máquinas pneumáticas - onde não havia matéria ordinária capaz de assegurar qualquer transmissão do movimento. Os resultados das experiências sobre os calores latentes também pareciam justificar a ideia do calor-substância. Quando, em 1782, Lavoisier ^{e Laplace} realizaram ainda com maior precisão e generalidade experiências de calorimetria análogas às de Black (e talvez até sem ter conhecimento destas), Lavoisier não hesitou em proclamar o triunfo da teoria do calor-substância, ao qual ele chamou o calórico. A teoria do calórico reinou sobre a Física quase sem contestação até meados do século XIX, e teremos ocasiões de lembrar a fecundidade que demonstrou durante esse período.

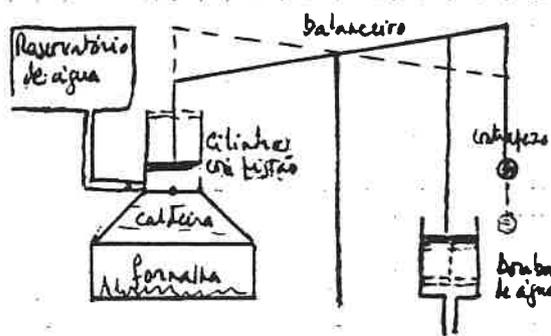
3.

O resultado obtido por Black no domínio da calorimetria, embora fosse exposto em seus cursos, tiveram fraca difusão, pois só vieram a ser publicados postumamente, em 1803, por um dos seus discípulos, numa época em que a popularidade da obra de Lavoisier lhes retirava qualquer sabor de novidade. Contudo, e por vero acidente, essas investigações de Black adquiriram uma enorme importância prática através da influência directa que tiveram sobre Watt, o homem cuja máquina a vapor tanto contribuiu para a Revolução industrial.

A química ponderável, os átomos e o carbônico-3

Assimela'mos na lenda altera que já os engenheiros de Antiguidade tinham compreendido que era possível produzir trabalho mecânico dependendo calor e que Ctesibio, nomeadamente, até construiu um dispositivo rudimentar para esse efeito. Mas se nessa época de esclarecimento uma invenção desse tipo não era encarada da senão como uma curiosidade, após o Renascimento a velha ideia foi retomada na perspectiva de sua utilização prática. Em 1663, o marquês de Worcester tentou construir uma verdadeira máquina a vapor e, em 1687, um homem com suficiente preparação científica para ter sido assistente de Huygens em Paris e de Boyle em Londres apaixonou-se pela realização desse projecto; Papin (1647-1714), cujo nome ficou ligado à invenção do autoclave, a "marmita de Papin", tentou conseguir construir um motor térmico capaz de mover um batelão, mas a máquina foi destruída pelos barqueiros do rio receosos de perderem o emprego (1707) e o inventor morreu na miséria.

Entretanto, dois artifices de Dartmouth, tinham conseguido construir um motor térmico (1705) suficientemente ruidoso para ser utilizado, nomeadamente para bombear a água das minas. Vale a pena recordar o esquema da primeira máquina a vapor de Newcomen e Cawley. A fornelha queimava combustível destinado a manter a ferver a água da caldeira que assim podia injectar vapor quente num pistão cujo peso estava compensado por um balanceteiro que fazia também actuar a bomba de sucção ou outro dispositivo útil. Normalmente, o pistão encontrava-se na parte superior do cilindro graças à acção do contrapeso, mas se se injectava no cilindro vapor de água proveniente da caldeira e, em seguida, se condensava este vapor com a água fria vindo do depósito, provocava-se uma diferença de pressão entre as duas faces do pistão que o obrigava a descer. Quando as pressões se reequilibravam por entrada de novo facto de vapor, o cilindro tornava a subir, mas nova injeção de água fria fazia-o descer, e assim indefinidamente.



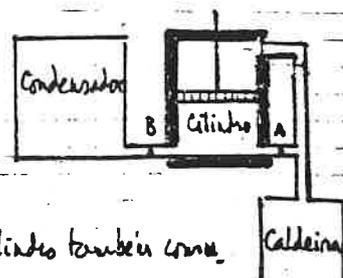
Um inventário feito em 1769 informa-nos que já então estavam a funcionar quase uma centena de grandes máquinas deste tipo, cujos cilindros tinham diâmetros verticais superiores a um metro e que, fazendo aos 15 ou 20 movimentos de vai-vem por minuto, tinham potências de ordem de 30 cavalos vapor. Embora muito rudimentares este dispositivos revelavam-se úteis, sobretudo para bombear a água que se infiltrava nas galerias das minas e se revelava tão prejudicial à sua exploração.

James Watt (1736-1819), que desempenhava as funções de reparador e construtor de instrumentos na universidade de Glasgow, teve um conhecimento directo das verdadeiras razões pelo professor Black em valores do calor específico e do calor latente de vaporização da água. Se, como Black afirmara e Watt confirmou, era preciso uma quantidade de calor mais de quatro vezes maior para vaporizar uma certa massa de água do que para elevar a sua temperatura desde 0° até 100°, então a máquina de Newcomen funcionava com certeza de um forma muito pouco económica. Com efeito, introduzindo no cilindro um facto de água fria para condensar o vapor vindo da caldeira, usava-se muito calor (e, portanto, muito combustível) na vaporização de uma fracção

calor latente 445
calorias

de um aqua e, para mais, amoleciam-se as paredes do cilindro que necessitavam em seguida de ser reaquecidas. Não seria possível eliminar tais desperdícios que, segundo as medições de Black, deviam ser altamente significativas? Watt encontrou uma solução ao inventar o "condensador", a grande inovação do seu primeiro modelo, a máquina de efeito simples. Descrevamo-la esquematicamente.

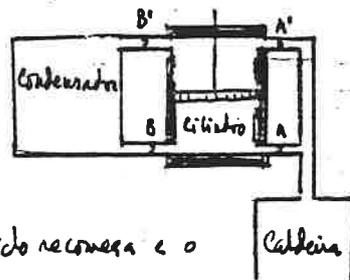
À lado do cilindro isolado por revestimento de madeira para diminuir as perdas de calor, Watt instalou o condensador, um recipiente mantido a baixa temperatura por uma circulação exterior de água fria, o qual comunicava com o cilindro por um tubo munido de uma válvula B. Simultaneamente, o cilindro também comunicava com a caldeira por dois tubos, o inferior munido de outra válvula A. Nada de novo havia no que se refere ao balanceiro que equilibrava o peso do pistão e fazia marchar a bomba aspirante.



Quando o cilindro estava cheio de vapor, o pistão mantinha-se em cima pela ação do contrapeso e propriamente suportava iguais pressões nas suas duas faces. Mas se se fechasse então a válvula A abrindo-se a válvula B, o vapor existente sob o pistão passava para o condensador (onde, justamente, se condensava) e assim surge uma diferença de pressões que obriga o pistão a descer, mas este movimento que provoca a abertura de A e o encerramento de B equilibra de novo as pressões, de forma que o contrapeso faz com que o pistão volte a subir, e o ciclo recomeça. Vê-se que com este sistema a fonte quente, a caldeira, fica separada da fonte fria, o condensador, e que o cilindro pode ser mantido sensivelmente à temperatura do vapor; deixa de se depender então da refrigeração de água do reservatório que, em seguida, iria ser evacuado. Entende-se que o rendimento da máquina de Watt fosse muito superior à de Newcomen: para o mesmo dispêndio de combustível, produzia-se umas quatro vezes mais trabalho mecânico.

Nesta época de grandes progressos técnicos em que muitos inventores foram espoliados do proveito das suas ideias, Watt teve a sorte de associar com homem de negócios de mentalidade puritana, Boulton, que obteve do novo modo grande proveito para ambos. Boulton conseguia obter ~~se~~ rapidamente um vasto mercado oferecendo aos proprietários de máquinas do tipo Newcomen a substituição gratuita por máquinas do tipo Watt só com a condição de lhes restituírem um terço das economias em combustível que vierem a fazer — uma aparente generosidade enriqueceu os dois sócios. As perspectivas comerciais ainda melhoraram com o aparecimento da nova invenção de Watt, a máquina de efeito duplo, apta capaz de produzir trabalho quer durante a subida quer durante a descida do pistão.

Se as válvulas A' e B' estão abertas enquanto A e B' estão fechadas, só a parte do cilindro acima do pistão contém vapor, e o pistão desce sob o efeito de pressões. Mas quando o pistão se aproxima do fim do seu curso inferior, A' e B' fecham-se, e abrem-se A e B': o vapor escapa-se para o condensador e passa a ser na face inferior do pistão que a pressão do vapor se exerce fazendo-o subir. O ciclo recomeça e o motor produz trabalho ininterruptamente.



Esta fonte de energia permanente que Watt fazia funcionar automaticamente (as válvulas eram abertas ou fechadas pelo próprio movimento do cilindro) e à qual foi adoptado em 1784 um dispositivo de biela - manivela que fazia circular um eixo metálico, foi aplicada nos mais variados industriais, na fixação e na fabricação de algodão, no moimento de grãos, na cura de açúcar, na nova metalurgia etc. A Revolução Industrial não foi,

A química fundamental, os átomos e o carbão - 4

como foi rezar se diz, uma consequência da máquina de Watt, ela precedeu cronologicamente o aparecimento do novo motor térmico. Mas o novo motor térmico desempenhou um papel essencial na desenvolvimento desta Revolução Industrial que, com diferentes gases, prossegue talvez há dois séculos e criou, de facto, o mundo em que vivemos. E na origem da máquina de Watt estavam, afinal, as investigações calométricas de Black.

4.

Retornemos ao problema da química dos gases, uma tomada de consciência de que existiam substâncias gasosas que não se identificavam com o ar atmosférico. A principal descoberta a fazer neste campo era, evidentemente a do oxigénio e uma concepção da historiografia das ciências hoje ultrapassada interessou-se muito pela questão de determinar a quem coube essa glória. Hoje, uma tal questão afigura-se em grande interesse e até sem grande sentido, pois a resposta depende do que se entende por "descobrir o oxigénio". Mas convém recordar o facto, em si próprio interessante.

(1735-1784)

O primeiro nome a citar é o do sueco Carl-Wilhelm Scheele (1742-86), que começou a trabalhar em 14 anos como aprendiz de boticário e que, ainda jovem, se tornou proprietário de uma farmácia da Uppsala. Graças à protecção de Bergmann, um célebre professor de química na Universidade local, teve então condições para satisfazer a sua paixão pela investigação e, embora fosse um simples auto-didacta, mereceu plenamente que Dumas viesse a dizer dele que "não podia fazer nem coisa sem fazer uma descoberta". Com efeito, e em uma tiragem muito nova, chegou-lhe o tempo para isolar o cloro (1774), para descobrir o ácido fluorídrico (sem falar nos ácidos volibédrico e tungsténico) e para identificar uma série de substâncias orgânicas, desde a glicerina até uma série de ácidos comuns (ácido, láctico, cítrico etc.). Mas a sua grande descoberta foi a do oxigénio, preparado a partir do dióxido de manganês em 1774 na altura mesmo em 1773.

Scheele reconheceu que o ar atmosférico comporta dois gases distintos "um do qual (era o azoto) não tinha justa qualquer afinidade com o flogisto" e o outro (era o oxigénio) "estava destinado a atraí-lo". Sabia identificar o oxigénio fazendo-o absorver pelo enxofre ou pelo fósforo, e estudou as propriedades deste novo gas. Mas as suas ideias teóricas eram deploráveis. No seu Tratado químico do ar e do fogo, considerava o oxigénio o "ar do fogo" porque, tal como o flogisto, ele seria um componente essencial quer do fogo quer do calor. Em suma, Scheele preparou o oxigénio mas revelou-se incapaz de tirar as devidas conclusões da sua descoberta.

Algo de semelhante aconteceu ao inglês Joseph Priestley (1733-1804). Educado por um pastor protestante que lhe ensinava teologia e teologia, permaneceu durante décadas tão obcecado pelas questões religiosas que adoptou sucessivamente quatro ou cinco confissões com um ardo intacto. O entusiasmo que manifestou pela Revolução Francesa numa Inglaterra onde ela era vista como uma ameaça triplamente grave dissipou-se, e em 1799, um notívulo populoso discretamente requisitado queimou-lhe a casa com todos os seus livros e papéis. Desesperado de ser

dia enigmas para a novel república americana, e foi lá mareu olvidado numa herde de perdida.

Embora a química só o tivesse interessado como uma espécie de passatempo, seu foi isso deixou de lhe fazer contributos importantes. As suas investigações sobre o chamado "ar vicioso", que se caracterizava apenas por ser incapaz de assegurar a combustão ou a respiração dos animais, levaram-na a identificar sucessivamente o ar ácido — o ácido clorídrico sob forma gasosa — e o ar nítrico — o novo óxido de azoto O_2N , que ele obtinha por acção do ácido nítrico sobre o mercúrio ou o enxofre. Mas foram as suas experiências relativas ao oxigénio que mais contribuíram para o celebrá-lo.

Em Agosto de 1774, Priestley observou que o aquecimento do óxido de mercúrio libertava um gás desconhecido que tinha a notável propriedade de assegurar combustões muito vivas. Pensou que se tratava do protóxido de azoto N_2O , que ele já encontrara no ano anterior e ao qual chamara aliás o ar nítrico desflorestificado. Quase logo a seguir, em Outubro, estando de visita a Paris teve ocasião de falar das suas experiências com Lavoisier o qual, muito ocupado com outros trabalhos, só teve oportunidade de confirmar a experiência de Priestley em Fevereiro de 1775. Mas, no mês seguinte, o próprio Priestley concluiu que a sua ideia inicial não era correcta, que não se tratava de ar nítrico desflorestificado mas de um gás diferente que favorecia a respiração animal e que passou a designar simplesmente por ar desflorestificado. Mas dias mais tarde, Lavoisier efectuara observações semelhantes mas para concluir que se tratava de um novo elemento químico, o oxigénio, o ar atmosférico deixando assim de ser uma substância simples tal como sempre se acreditava.

Que Lavoisier tinha razão, só iria a ser finalmente reconhecido nos tantos anos mais tarde. Em 1775, a prioridade de Priestley na descoberta do novo gás era indiscutível e Lavoisier não poderia negá-lo, mas a verdade é que se ele sustentava tratar-se de um novo elemento quando todos os outros considerariam tratar-se efectivamente de ar desflorestificado. No fundo, o que estava afinal em causa era a verdade da própria de teoria do flogisto, que Lavoisier na altura já rejeitara firmemente e a qual Priestley permaneceu apegado até ao fim da vida, mesmo quando todos os químicos de valor já tinham deixado as novas ideias. Neste contexto, a quem atribuir a descoberta do oxigénio, a Scheele, a Priestley ou a Lavoisier? Afigura-se que única resposta razoável consistirá em reconhecer que, por estes termos, a questão está mal formulada.

Denitrosou-se de químicos em 1774. Foi biólogo e químico de um lab. com Watt, continuou a trabalhar com as actividades científicas, que duraram até a cerca de 1800. Foi um dos primeiros a trabalhar em química em 1772 e por lá mareu numa herde de perdida.

5.

Antoine Laurent Lavoisier nasceu em 1733 numa família da grande burguesia parisiense e pôde assim, receber uma educação exemplar, que o conduziu a licenciarse em direito em 1754. Mas já nessa altura estava muito interessado pelas ciências, frequentando assiduamente o célebre curso de química então professado por Rouelle e começando, em seguida, a trabalhar com Berthollet, um amigo de família que foi o autor da primeira ^{Carta} geológica de França e para quem o jovem Lavoisier fez muitas análises químicas de rochas e minerais. Em 1766, graças a um excelente trabalho sobre "a melhor maneira de iluminar de noite as ruas das cidades", mas também devido às poderosas protecções de que dispunha, conseguiu ser nomeado "pensionado" da Academia das Ciências e, dois anos mais tarde, em 1768, passou à categoria de "académico adjunto" posto já com sérias responsabilidades pois implicava a elaboração de pareceres

1733-1794

A química fundamental, os átomos e o carbônico-5

sobre o valor científico das memórias, submetidas à Academia.

Nesse mesmo ano de 1788 também se tornou sócio de um dos "fermiers généraux" o qual, vindo a faltar, lhe deixou o lugar em exclusivo. A "Ferme générale" era uma associação de uns 60 (depois apenas 40) especuladores, que arrendavam ao rei de França por um tanto anual e a troca de uma soma fixa, o direito de cobrar em benefício próprio certos impostos subidos. Tratava-se de um negócio chorudo que, aos poucos de hoje, devia render a Lavoisier ou aos outros "fermiers" umas dezenas de milhares de cruzes por ano, isto naturalmente à custa de um encarecimento dos preços dos produtos e que tornava a "Ferme" extremamente impopular. Isto não impedia Lavoisier, com as suas excepcionais capacidades, de ser um dos "fermiers" mais influentes e activos sendo ele, por exemplo, que para evitar a entrada dos géneros em Paris por contrabando, sem pagamento da respectiva taxa, fez construir à volta da cidade uma muralha, aliás sumptuosa, com grande descontentamento da população que se considerava privada de ar puro. Toda a capital repetia que "le mur murant Paris rend Paris murmurant", para não referir epigramas mais duros visando, por vezes, directamente Lavoisier, que alguns até reclamavam que fosse enfurecido.

Embora trabalhasse muito, quer na Academia quer na Ferme, Lavoisier também aceitou em 1775 o posto de director dos serviços de fabricação das pólvoras, nos quais não deixou de introduzir uma série de inovações tecnológicas importantes; quando, após a Revolução, a França se viu militarmente confrontada com quase todo o resto da Europa, os seus exércitos tiveram assim a grande vantagem de dispor da melhor pólvora existente. Entretanto, Lavoisier casou-se em 1771 com uma jovem de 13 ou 14 anos, Marie-Anne Paulze, filha de um colega da Ferme, e esta união de pura conveniência foi feliz, Marie-Anne ajudando o marido como secretária e tradutora.

Não podemos deixar de nos espantar que um homem com tantas e tão aborrecidas ocupações ainda tivesse sido capaz de realizar uma obra científica de tal importância. A explicação está para além do facto de Lavoisier aliar uma enorme capacidade de trabalho a uma não menos capacidade de se organizar, junto-se a isto as facilidades materiais que lhe eram proporcionadas pela fortuna e pela posição social, e recorre-se sobretudo a uma espécie de genialidade que lhe permitia quase infalivelmente ir directo ao essencial, quase sem nunca perder tempo a seguir falsas pistas ou a ocupar-se do acessório.

Nos tempos da Revolução, Lavoisier, reconhecido como um sábio de valor excepcional, mostrou-se favorável à nova ordem política, tendo até sido eleito pela ordem da nobreza deputado suplente à Assembleia Constituinte, e sendo membro do "Clube de 1789", de orientações moderadas. Durante uns anos as suas capacidades científicas serviram o governo revolucionário — fez parte, nomeadamente, da famosa "Comissão dos pesos e medidas", à qual se deveu a introdução do sistema métrico — isto embora fosse muito atacado por Marat, que tinha grande preconceito científico aliás sem qualquer fundamento, e detestava particularmente Lavoisier. Notaria, em a progressiva radicalização política, sem o reconhecimento do valor da sua obra científica, teve o postumo; ele tinha sido "fermier général":

em 1714, a Comensal tentou a todo o custo um processo judicial. A Comissã dos Pesos e Medidas, na qual figuram honras com o prestígio científico de Coulomb ou de Laplace, ainda tentou salvá-lo, mas as acusações eram demasiado graves, e Lavoisier foi guilhotinado na praça de Revoluçã (hoje Praça de Concordia) em Maio desse ano. Foi aliã o "financ geral" e aliã o quimico que foi executado e a afirmaçã atribuída ao juiz de que "a Revoluçã não tem necessidade de sabiã" e uma pura inveraçã, pois a República aproveitou plenamente o excel científico da França de entã. Entre esse excel, a execuçã de Lavoisier foi muito lamentada, e diz-se que Lagrange afirmou que "bastou um momento para fazer cair aquela cabeça mas talvez não bastasse mil anos para produzir uma cabeça semelhante".

6.

Já nos meados da década de 60, Lavoisier começou a interessar-se seriamente pela química, lendo e meditando o que de mais importante se encontrava sobre o assunto e a sua prática analítica para os estudos geológicos de Guettard tinha-lhe facultado uma técnica laboratorial bastante aperfeiçoada. Assim, em 1768, foi capaz de obter um resultado notável sobre o problema clássico da "transformaçã da água em terra": empregando cuidadosamente a balança — um instrumento de medida de que se sabe utilizou pelos químicos mas do qual ele se serviu com um virtuosismo incomparável — verificou experimentalmente que o pequeno resíduo sólido obtido após a destilaçã da água proveniente das paredes do vaso de vidro no qual se fazia a experiecia, fosse correspondente exactamente à diminuiçã do peso desse vaso.

Data de 1772 (ou, provavelmente, de 1773) a elaboraçã por Lavoisier de uma espécie de programa de investigaçã a longo termo que deveria permitir-lhe dar à química bases muito mais seguras do que aquelas, à sua vez altamente insatisfatórias, em que ainda se apoiava. Segundo um tal programa, que agora se nos afigura quase memorável, tinha a fonte do estudo da calcinaçã dos metais e do processo de libertaçã ou de fixaçã do gás carbônico que se conseguiriam iniciar avanços decisivos. E a sua própria obra demonstraria a fecundidade dessa linha de investigaçã.

Assim, a partir de 1773, Lavoisier dedicou-se ao estudo das reacçõs dos ácidos sobre os carbonatos, com libertaçã de ácidos carbônicos, mas também às experiecias de reduçã dos óxidos, quer por calcinaçã, quer por acção do carvão, e ainda aos processos de oxidaçã por simples aquecimento ou por combustã. Começou assim a suspeitar do papel que o carbono desempenhava nos fenómenos de reduçã e da importância do ar atmosférico no processo inverso de formaçã do óxido a partir do metal. Já Priestley assumira que a calcinaçã metálica provocava uma diminuiçã do volume do ar, embora propôs uma explicaçã base facta no âmbito da teoria do flogisto: a calcinaçã, a oxidaçã, "deflogistificava" o metal, criando pores consideráveis onde o ar se fixava, mas agora Lavoisier interpretava o fenómeno sem se referir ao flogisto, considerando apenas que o havia fixaçã de uma parte do ar no metal.

Desde essa época, Lavoisier começou a utilizar lentes, "os vidros ardentes" para concentrar a radiaçã que utilizava como fonte calorífica, isto com o fim de eliminar qualquer possível influêcia do misterioso "elemento fogo". E, ainda em 1773, realizou uma das suas experiecias mais célebres e mais significativas:

A química: átomos, os átomos e o cátodo - 6

constata que o aumento de peso de um metal quando é transformado em óxido por calcinação é exatamente igual à diminuição do peso do ar contido no vaso hermeticamente selado onde se efetua a reação. Recorde-se que já Boyle tentara realizar uma experiência do mesmo teor, pensando que a substância que entra quer o vaso antes e depois da reação, mas que o peso da substância variava e não o do vaso, Boyle concluiu que esse aumento de peso resultava do aquecimento, proveniente do fogo. Com a metodologia experimental implacável de Lavoisier, o peso do gás também era considerado, assim se obtendo as respostas corretas.

Em meados de 1774 já Lavoisier estava seguro de que o processo de oxidação, por via seca ou por via húmida, implicavam sempre a fixação de uma parte do ar atmosférico. O flogisto não desempenhava, pois, qualquer papel em tais reações, mas ainda não dispunha de argumentos suficientes para negar totalmente essa teoria.

No ano seguinte retomou as experiências de Priestley sobre a libertação de um gás combustível ao aquecimento do óxido vermelho de mercúrio. Esse gás era, para Priestley, o "ar deflogistificado"; por isso para a teoria de flogisto o ar atmosférico era uma substância simples, mas Lavoisier passou a considerar um tal gás como o elemento químico, sendo portanto o ar não uma substância simples, mas uma mistura de dois gases diferentes. Mas se isto era assim, então o gás combustível de Priestley devia ser capaz de transformar os metais em óxidos (e os metais em "ácidos"), os sais resultando então de reações entre óxidos e ácidos. Tal foi a interpretação dada por Lavoisier a uma série de brilhantes experiências realizadas em 1776-77, que agora lhe pareciam justificar a negação da validade da teoria do flogisto, mas que ainda ninguém aceitava e lhe valeu duras críticas.

Em colaboração com Laplace, começaram então um notável conjunto de medições calorimétricas na sequência dos trabalhos de Black, mas alcançando agora o domínio experimental investigado e utilizando para isso métodos mais aperfeiçoados, capazes de facilmente obter valores com muito maior precisão. Os resultados obtidos com Lavoisier o proclamaram que o calor era um flúido indestrutível a que ele chamou o "calórico", e teve um cuidado de verificar a secundaridade demonstrada por esta hipótese durante mais de meio século. O calórico de Lavoisier era um elemento químico "suu generis" e, por exemplo, as componentes do gás oxigénio eram constituintes pelo menos do elemento "oxigénio" com o calórico. Em todo o caso, o calórico era absorvido ou libertado em quantidades bem determinadas experimentalmente e essas medições de calores de dissolução ou de calor de reação estavam a marcar o nascimento da Termodinâmica moderna.

A partir de 1783, a grande questão passou a ser a da composição e natureza química da água. O físico inglês Cavendish (1731-1810) acabou de mostrar que, graças a uma fusão elétrica, o oxigénio e o hidrogénio podiam unir-se em certas proporções para formar água; em o acordo de mesma natureza dos químicos, ainda apegados à teoria do flogisto, Cavendish informou dessa experiência que o "ar deflogistificado" (o oxigénio) era afinal "água deflogistificada", a qual retornava às suas propriedades habituais logo que o "ar inflamável" (o hidrogénio) lhe fosse acrescentado. Lavoisier e Laplace sustentaram desde logo a opinião contrária, de que

a água não é um corpo simples mas um composto de "air inflammable" e de "air vital". E a 1 de Março de 1785, Lavoisier defendeu a sua tese demonstrando publicamente, perante uma assistência numerosa e selecta, que a água se decompõe em oxigénio e hidrogénio, os quais, por síntese, permitiam em seguida reconstituir o líquido inicial; as medidas de volume e de peso feitas no decurso da experiência eram convincentes e, a partir de 1787, já não eram só os físicos-matemáticos ^{como Laplace e Monge} que apoiavam Lavoisier, alguns químicos como Fourcroy, Berthollet e Gayton aderiam às suas ideias.

Este Gayton, que mais tarde se intitulava Gayton de Mabeau, era um advogado no parlamento de Dijon que se interessava muito por química embora sem grande proeminência. Foi todavia o primeiro a aperceber-se das vantagens de introduzir uma nova nomenclatura química, na qual o nome de cada substância estivesse relacionado com a sua composição. De facto a terminologia então utilizada tornava-se ininteligível: ao óxido de zinco chamava-se a "la filosófica", ao acetato de cálcio o "sal de oler de Cambray", ao óxido de estanho o "líquido fumante de Libanus", ao sulfato de cobre os "cristais de Venise" e por aí fora. Mas a primeira tentativa de Gayton para eliminar esta linguagem caótica fracassara (1782), porque fora em

recebida no quadro da teoria dos flogístos. Mas tarde, em 1787, quando já aderira às ideias de Lavoisier, empreendeu com este (e a obra beneficiou da colaboração não só de Berthollet e de Fourcroy mas também de alguns físicos matemáticos do "Lincelo do Arsenal") a definição da nova nomenclatura química que, ao essencial, continua a ser a nossa. O famoso "Essai de nomenclature chimique", publicado em Agosto de 1787, eliminava enfim a fatuosa confusão da terminologia tradicional em favor de uma racionalidade onde o nome de cada composto eliminava quasi os metais ou metalóides nele presentes, fazendo sufixos para traduzir as naturezas, ou hífens propostos de respeito: por exemplo "ato oxih", para sulfato e sulfeto, "ico" ou "oso", para nítrico e nítrico, etc.

Lavoisier pôde então empreender a redacção do seu livro fundamental "Traité élémentaire de chimie, présentée dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes" que viria a ser editado em 1789 e constituiu um brilhante sintese da sua obra de investigador. Utilizando a nova terminologia aí se apresentavam nomeadamente as composições das substâncias químicas então conhecidas. Em primeiro lugar, tratava as substâncias simples que se podem considerar "elementos dos corpos" e que eram a luz, o carbono, o oxigénio, o hidrogénio e o azoto. Seguiam-se as substâncias simples não metálicas, oxidáveis e acidificáveis: enxofre, fósforo, carbono, radical muriático, radical fluorico, radical borácico. Depois as substâncias igualmente oxidáveis e acidificáveis mas metálicas, quer dizer, 17 me-
três apresentadas por ordem alfabética, a começar no antimónio e a terminar no zinco. Esgota três substâncias simples ácidas ^{salificáveis} ~~acidificáveis~~ ternárias, a bauxite, a alumina e a sílica. O próprio Lavoisier tomava cuidado a precauções metodológicas essenciais de adotar que tudo quanto dizia tratava apenas o conhecimento alcançado até então, o qual poderia de certo vir a ser modificado, e ele próprio suspeitando já que as ternas salificáveis não seriam realmente substâncias simples.

A publicação do "Traité élémentaire de chimie" contribuiu para acelerar a aceitação das teses de Lavoisier, não só em França mas em toda a Europa. Para citar apenas dois exemplos, o químico inglês Hin-
wan, celebre pela seus trabalhos no domínio da química analítica sobretudo aplicada à geologia, manifestou

A química ponderável, os átomos e o carbônico

publicamente o seu aforso em 1791 e, no mesmo ano, o velho e respeitado Joseph Black de darwin e criou uma nova carta enviada aos "Annales de Chimie". Antes de morrer tragicamente e de poder desenvolver as investigações que projectara relativas à química fisiológica, Lavoisier tivera pelo menos a satisfação de verificar que o seu génio fundara a química moderna.

7.

Até de conseguir inferir inevitavelmente, já na viragem para o século XX, o atomismo científico teve uma história complexa e confusa, que não temo possibilidade de retratar aqui em pormenor. Mas há, pelo menos, que combater a falsa simplicidade com que, tantas vezes, esse processo histórico tem sido apressado, recorrendo a alguns tópicos essenciais.

Importa assimilar desde já que as raízes históricas das transições do velho atomismo filosófico para o novo atomismo científico se inserem nesse conceito de "afinidade" que se encontra na linguagem dos químicos do século XVIII. A afinidade de duas substâncias químicas era suposto traduzir a sua tendência mútua para se unirem formando compostos estáveis, e era nessa perspectiva que, por exemplo Newton escrevia que "as partículas ácidas são violentamente atraídas pelas partículas metálicas". No quadro de uma concepção atomística da matéria, a ideia de afinidade foi acuminada pelo finis-séculares do século XVIII, com todo o prestigio de que então disfrutavam, pois se lhes afigurava em consonância com as teorias newtonianas de atracção.

Tinha sido o francês Geoffroy l'Aine o primeiro a publicar, em 1718-20, uma "tabela de afinidades", na qual os corpos simples, os ácidos e as bases conhecidas eram ordenados em colunas onde, por exemplo, para os ácidos as soluções alcalinas figuravam antes das soluções amoniacais, visto que um sal amoniacal em presença de uma solução alcalina dava azo a formação de um sal alcalino. Contudo não tardaram a surgir outras tabelas de afinidades, diferentes desta não tardaram a surgir: o problema era demasiado complicado para ser posto nestes termos e, sobretudo, ainda não se sabia "titular" as reações. Discutiu-se muito mas sem grandes resultados.

Inductamente, esta querrela sobre as afinidades acabou todavia por ter uma consequência importante, que foi a de introduzir na química uma certa problemática de índole quantitativa. Na verdade, e embora fundada em experiências muito rigorosas, a obra de Lavoisier não deixara de assumir nos seus resultados um forte carácter quantitativo, pois pretendia sobretudo identificar as substâncias simples e a sua intervenção na formação dos compostos ou na natureza das reacções. Impenitente-se tem que, para Lavoisier, fosse muito mais importante e urgente demonstrar que a água não era um elemento, como sempre se admitia, mas um composto de oxigénio e hidrogénio do que investigar quais as proporções exactas com que estes dois elementos figuravam na água. Assim, foi graças às tentativas feitas nesse mesmo época para determinar as afinidades que o problema da composição ponderal das substâncias ganhou importância e obteve paulatinamente solução.

As origens da química nova - 7

Então, indiretamente, esta querela sobre as afinidades acabou por ter uma consequência mais importante que foi a de introduzir na química uma problemática de índole quantitativa. Com efeito, e embora se tivesse fundado em experiências em que as observações quantitativas eram essenciais, a revolução fundamental da química provocada por Lavoisier era de ordem qualitativa, tentando-se a identificar os corpos simples e determinar a sua intervenção na formação dos compostos ou na natureza das reacções. Compreende-se aliás muito bem que, para Lavoisier, fosse mais importante e mais urgente demonstrar que a água não era um elemento (como sempre se admitia) mas um composto de dois elementos, oxigénio e hidrogénio, do que investigar a natureza quantitativa dessa combinação. Foi pela via das tentativas feitas nessa altura para atribuir valores numéricos às afinidades que o problema da composição ponderal das substâncias acabou por se apurar e adquirir um primeiro esboço de solução.

Assim, em 1775, no ano das experiências de Lavoisier sobre o oxigénio, o químico suéco Bayen, que professor da Universidade de Upsala que ajudou Scheele, ocupava-se a determinar os pesos dos ácidos que reagiam com uma certa quantidade de soda ou de potassa, mas como não havia qualquer meio de determinar o conteúdo exacto de ácido ou de base existente nos reagentes utilizados, esses valores tinham pouco significado. Mas a ideia em si era excelente e, logo a seguir, o celebre químico inglês Kiwan inventou um processo de ir mais além: determinou o volume de ácido clorídrico gasoso que podia ser absorvido por uma certa quantidade de água até esta ficar saturada, obtendo assim uma solução ácida que podia servir de padrão; com um padrão ácido podia definir um padrão básico e, por conseguinte, titular quer os ácidos quer as bases. Entre 1782 e 1792 conseguiu assim determinar a composição ponderal de diversos sais.

Pela mesma altura o químico alemão Wenzel começou a avaliar a força dos ácidos de outra maneira, pela comparação que eles provocavam em cilindros metálicos idênticos mergulhados nesses ácidos durante uma hora, e estas investigações levaram-no a conclusões muito importantes, mas as quais não ele próprio foi capaz de atribuir o significado devido. Richter, um especialista conhecido de análise química dos venenos, prosseguiu estes trabalhos reflectindo-os todavia na direcção que mais lhe interessava pessoalmente: tentava definir as relações numéricas entre o peso de vários elementos que faziam parte de um certo composto. E os seus resultados, publicados em 1792, tinham ser lidos dez anos mais tarde por Dalton e por Berthollet.

Dalton e os seus estudos

E' costume atribuir a glória da descoberta do atomismo científico a John Dalton, o que é, como veremos, apenas meia verdade. Sem querer depreciar a obra do grande inglês, é indispensável assinalar que se tratava de uma ideia que entãõ "caminhava no ar". Assim já em 1789, um

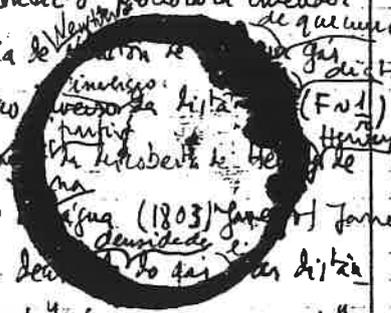
Richter (179...)
 lei das volumes
 equivalentes:
 Se fizermos duas substâncias quaisquer empinarem certos pesos que são equivalentes, a capacidade de reacção com uma terceira substância, a relação entre os pesos é a mesma que a que se dá entre as massas que se combinam.
 Cf. Forster e Dittler.

Wenzel já definiu algo de equivalente H65 II, 593

químico irlandês chamado Higgins publicara uma obra que passou despercebida ("Analyse comparative de la tenia lo flogisto e da terra contrária ao flogisto) onde afirmava que os corpos eram constituídos por átomos que se uniam em proporções simples para constituir os vários compostos; mas os átomos de Higgins ainda tinham todos o mesmo peso e, com essa hipótese, a sua concepção tinha pouca capacidade explicativa. Voltamos portanto a Dalton (1766-1844).

Dalton (1766-84)

Este professor num Colégio em Manchester, John Dalton foi um apaixonado pela meteorologia, e por essa razão interessou-se pelas propriedades dos gases. Newtoniano convicto procurava entender o comportamento do ar atmosférico (mistura de dois gases) a partir da ideia de que o ar é constituído por átomos repelindo-se entre si com uma força proporcional ao quadrado da distância e isto levou-o a supor que os átomos dos diversos gases eram diferentes. A partir de que há uma relação entre a pressão de um gás e a sua solubilidade acabou por concluir que, para cada gás, havia uma relação simples entre a densidade e a sua massa atómica. Passando aos pesos, estabeleceu uma primeira tabela de "números proporcionais" e em Setembro de 1803 escrevia nos seus cadernos de notas a primeira definição do símbolo atómico. Mas a teoria atómica só devia ter-lhe começado a surgir claramente em 1804-5.



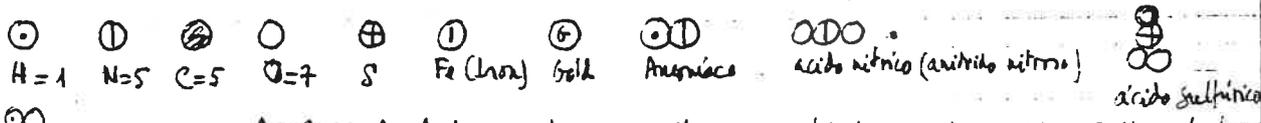
Pett
HS II 300
Henry

Manda a verdade dizer que estamos muito mal informados sobre a natureza desta grande hipótese, os testemunhos dos seus contemporâneos sendo contraditórios e indignos de grande crédito. Em todo o caso a exposição pública das suas ideias encontra-se no tratado "New System of Chemical Philosophy", cujo primeiro volume data de 1808 e o terceiro de 1827. Mas é no primeiro volume que se encontra o essencial: que das relações dos pesos dos constituintes dum composto se podem deduzir os pesos relativos dos respectivos átomos, pesos estes que se irão manifestar na composição de outros corpos. Para Dalton, quando dois elementos formam um só composto este é binário (um átomo de cada um, ou n átomos de cada um) se formam dois compostos um é binário outro é ternário (2:1), se formam três com um binário, dois são ternários (1:2 e 2:1). O que surge como mais inovador é realmente a ideia de que os átomos têm pesos diferentes.

O caderno de notas de Dalton trata de átomos de átomos e quem for um bom leitor encontrará lá a teoria atómica. Não há fotocópias...

A título de curiosidade dou alguns dos símbolos químicos de Dalton com os pesos atómicos que ele atribuía a alguns elementos (do hidrogénio assumindo o valor 1 por conveniência); também formou de alguns compostos

HS III 305



Dalton tem os pesos atómicos de 20 elementos e vários compostos
HS III 305

A ausência de distinção clara em átomos e molécula: se ela existisse, Dalton atribuía à água um peso relativo B = 7+1, isto segundo a sua fórmula.

Com as confusões teóricas que ela suportava e, para mais, em uma tabela de pesos atómicos tão imperfeita, a hipótese de Dalton tinha um poder explicativo bastante pequeno e padecia da inexistência de quaisquer bases experimentais firmes. A teoria só se conseguiu afirmar, e muito dificilmente, graças à acumulação de argumentos favoráveis vindo da obra de outros.

Para tentar respeitar uma certa ordem cronológica falaremos aqui agora de um químico francês

As origens da química nova - 8

Era farmacêutico
Fez uma das
primeiras experiências
em balões e isolou
o açúcar de uva.
Um dos fundadores
da análise química
Robert

~~Joseph-Louis~~ ^{Joseph-Louis} ~~Berthollet~~ ^{Proust} (1754-1826) que nos começa do século trabalhar em Madrid, no laboratório do rei de Espanha. A partir de 1799 empreendera a análise extremamente cuidadosa de uma série de sais e de óxidos de vários metais e verificou desse modo que um certo composto continha sempre os seus elementos em proporções bem definidas. Ora Berthollet, que fora um dos principais colaboradores de Lavoisier e tinha adquirido uma considerável reputação científica como químico, não fazia a distinção entre combinação e dissolução (a quantidade de substância dissolvida pode variar de forma contínua até que haja saturação), de forma que se opôs publicamente a Proust. A controvérsia entre os dois homens, que durou de 1801 a 1808, foi marcada por uma rara cortesia, e apesar de todo o prestígio e de todo o poder de Berthollet foi Proust quem ganhou. A sua lei, dita a lei das proporções definidas, adaptava-se admiravelmente à hipótese atômica.

Robert

Entretanto outro francês, quem em vez de ~~Lavoisier~~ ^{Joseph Louis} se chamava ~~Joseph-Louis~~ ^{Louis Joseph} Gay Lussac (1778-1850) e que já em 1802, aos 24 anos, obtivera um resultado científico importante - a lei de variações do volume dos gases ~~relacionada~~ com a temperatura, e que batera o recorde de altitude na ascensão em balão [1804 - o objectivo era verificar que a composição do ar era a mesma] ~~comparava-se ao estado das reações entre os gases e formulara, em 1808, uma lei muito interessante: os gases combinam-se entre si de acordo com relações volumétricas simples - por exemplo três volumes de gás oxigénio com um volume de gás hidrogénio para formar água - e mesmo se a reacção produz uma contracção de volume, o volume final está sempre para os volumes dos constituintes como dois números inteiros pequenos.~~

cf Robert

Gay-Lussac, que iria realizar ulteriormente uma série de investigações químicas muito interessantes, não foi capaz de entender todo o significado de lei que descobria. Mas em 1811 o conde Amedeo Avogadro, ao observar que as relações volumétricas podiam traduzir-se em termos de relações entre quantidades de substâncias e admitindo que isto significava relações entre números de moléculas concluiu com a hipótese de um certo volume de gás contida sempre o mesmo número de "moléculas integrantes" as quais seriam todas constituídas pelo mesmo número de "moléculas elementares" (átomos). Era uma distinção - moléculas integrantes e moléculas elementares - que deveria acabar a ser totalmente assimilada. Mas em 1814, Ampère, aquele que viria a ser o grande Ampère de electrodinâmica chegara independentemente e ditiu por um raciocínio diverso as mesmas conclusões. O comportamento químico dos gases também apontava para uma teoria atômica de matéria.

(1775-1836)

O tempo de Berzelius

(1779-1848)

Entre outros um cena um químico suco Jöns Jacob Berzelius que foi professor em Estocolmo cuja obra ~~era~~ influenciaria toda a evolução de química durante a primeira metade do século

XIX. Não tenho aqui oportunidade de falar dessa obra (nomeadamente dos seus trabalhos electroquímicos, de qual praticamente nada sei), tendo pelo menos que fazer referência à sua influência sobre a teoria atómica. De facto foi no seu "Essaio sobre a teoria das proporções químicas" (1817) que se tentou elaborar a primeira tabela completa de pesos atómicos tendo em conta e totalidade das informações experimentais disponíveis, quer no que se refere às experiências conduzindo à relação ponderal, quer às experiências relativas aos gases, as quais de procura conciliar.

O essencial do avanço contido na obra de Berzelius é o abandono da hipótese gratuita de Dalton de que no caso de um só composto formado por dois elementos este composto seria binário — por exemplo a fórmula de água corresponderia a OH . Tendo em conta a lei de Gay-Lussac e a sua interpretação por Avogadro e Ampère, Berzelius concluiu que sendo a combinação de 2 volumes de hidrogénio para um de oxigénio, a fórmula da água devia ser O_2H_2 . Toda uma série de conclusões deste tipo foram assim introduzidas. Berzelius publicava igualmente uma nova tabela de pesos atómicos resultante de medidas tão precisas quanto possível para a época tomando como base (como nós fazemos hoje) o peso atómico do oxigénio ao qual atribuiu o valor convencional de 100. Outra inovação importante contida neste livro era a simbologia química moderna: cada elemento era representado pela inicial do seu nome latino, seguindo quando necessário de uma segunda letra escolhida de forma a evitar confusões: assim H para o hidrogénio, mas Ag para a prata (argentum), para não se confundir, por exemplo com o alumínio Al.

Entretanto as crises continuavam depressa. No ano seguinte (1819) os franceses Dulong e Petit descobriram ~~experimentalmente~~ obtinham experimentalmente que o calor atómico de todos os elementos é idêntico, o que se traduzia, na prática, como um processo de fixar o próprio peso atómico. Ora isto levava efectivamente a dividir por dois alguns dos pesos atómicos tão laboriosamente fixados por Berzelius para ter em conta as leis ponderais e as leis volumétricas. Surgiram assim a seguinte contradição.

Quase simultaneamente o cristalógrafo russo Mitscherlich (1819) verificava que ~~os~~ ^{os} ~~mesmos~~ ^{os} ~~fosfatos~~ ^{fosfatos} e certos arsenitos ^{do mesmo metal} formavam a mesma forma cristalina, quer dizer o isomorfismo de dois reactivos por as reacções de ácidos diferentes com a mesma base; inversamente, a partir do mesmo ácido e de bases diferentes também se obtinham cristais idênticos (carbonatos de ferro, de zinco, de magnésio). Afigurava-se difícil negar a ideia de uma analogia química ~~uma~~ ^{uma} análoga para os cristais isomorfos e isto exigia novas revisões nos valores dos pesos atómicos de Berzelius.

Este bom tentou, em 1825, construir nova tabela de pesos atómicos capaz de tudo conciliar, mas esta tentativa não foi aceite por muito por ser bastante artificial: de volta, por exemplo a escrever a fórmula de água HO , passando um traço sobre o H para significar que se tratava de um átomo duplo. Os adversários da teoria atómica, que por natureza numerosos, não podiam senão repositivamente e ficaram mais apegados ao seu ceticismo.

As origens da química nova - 9

Tudo isto se baseava em grande confusão entre as noções de átomo e de molécula (que só foram a pouco foram sendo distinguidas) e mesmo quando a distinção era feita na dificuldade de compreender que certos corpos simples, gases, existem sob a forma de moléculas poliatômicas (H_2 , O_2 , N_2). Mesmo isso não bastava.

Um homem como Berzelius admitia que todo o elemento gasoso existia sob a forma de moléculas binômicas o que é muitas vezes verdade mas não sempre. Por exemplo a água é quilibiômica, o mercúrio monobiômico.

J. B. Dumas (1800 - 1884) anti-atomista, defensor dos equivalentes.

Uma boa explicação por Gerhardt (1843) ignorada.

Cannizzaro 1858 mais acertado

Muitas resistências durante muitos anos

Auguste Comte "Cours de philosophie positive" 1826

O caso de Boltzmann.

As maravilhas de electrostática

1

Tiveram ocasião de observar que durante mais de dois mil annos esse importantissimo capitulo da fisica que viria a ser o electromagnetismo não fez progressos significativos: da maneira feita por Tales de Mileto das utraqueas propriedades do amber friccional e de pedra (mas até a obra de Gilbert as diferenças não são essenciais. Não o foi sobretudo para a electricidade, porque a existência de um campo magnetico temetive relativamente intenso e a sua utilização pelo humano sempre motivaram certos avanços, mas no que respeito a electricidade Gilbert só sabia a mais do que Tales que havia outras substancias além do amber (pedras preciosas, corallo, resina etc.) electrificáveis por fricção.

No século XVIII existia uma autentica crise científica em favor da interligação da medicina e da astronomia, da qual se via nascer aliada toda a fisica moderna. Mas se não existia da fisica propriamente dita beneficiários pelo novo contexto - a optica, por exemplo, parecia espectacularmente - não foi o caso com a electricidade nem os magnetismo. Sabemos porque: o magnetismo só podia desenvolver-se profundamente como um ramo da electricidade, e esta não podia ir longe sem se saber produzir quantidades apreciáveis de carga electrica.

Assim se explica que um experimentador tão habil como Robert Boyle se tivesse interessado pela electricidade mas que não tivesse obtido resultados que o encorajassem nessa via. Foi somente de o primeiro a observar que electrizando simultaneamente dois corpos friccionalmente um contra o outro eles tendiam torçamente a repelli-^{re} um ao outro. Com o trabalho de Otto de Guericke poder-se-ia ter avançado muito: foi de o primeiro que teve a ideia de construir a primeira maquina electrostatica (a volta de 1660-1660) que é descrita no seu livro "Experimenta Nova" de 1672: um esfera de ~~caixa~~ europe "do tamanho de cabeça de um sinuca" que é fixada a um eixo em a qual é feita em rotações e que é friccionalmente com a mão. ^{luz} bruxante esférica que a sua esfera electrizada atrai toda uma série de pequenos corpos (pedras, pedras de papel ou de palha por exemplo) que uma vez ligados os outros não se repelle mais. É interessante de quem descreve a descarga por faísca. Mas as suas descobertas que eram muitas vezes quase como caricaturas, sem qualquer esforço para as interpretar tecnicamente, não promoveram ~~o~~ ^{nenhum} interesse. Tanto assim é que a maquina electrostatica parece ter sido reinventada por Stancivice, em dois artigos de Boyle, p' no mesmo do século XVIII.

2.

De modo de há data de 1730 é que o estudo em favor da electrostatica tornou seriamente e na sua origem a partir do tal proposito: um ingles Stephen Gray e um francez Charles DuRoi. Gray escreveu pela observação fortuita de que ao electrizar por fricção um tubo de vidro fechado do

nas extremidades por duas roldanas de cortiça, estas eram igualmente eletrizadas. Para ver se que fricção ia ter estranho fenómeno eptou um pauzinho numa das roldanas, e o pauzinho eletrizou-se. Foi experimentado com pau cada vez mais fino, depois com fio metálico, e o fenómeno permanecia. A esta altura começou a utilizar cordas e cordões. Instalando-se no telhado da casa, podia deixar pendur um cordel com 40 metros — e a extremidade do cordel continuava a exibir propriedades attractivas.

Para verificar se a estranha transmissão de "virtude eléctrica" podia alcançar grandes distâncias decide recorrerem com um cordel de uns 100 metros, que agora era preciso suspender na ~~parte~~ horizontal e para o suspender utilizo fio de seda (só pela boa razão de que sendo muito fininho não devesse facilitar que a misteriosa "virtude" se escapasse por desl.). A experiência resultou bem como esta suspensão era muito frágil, Bray e o seu amigo Kleeler substituíram o fio de seda por crames muito finos que tinham mais resistência, mas entã a corda pendia todavia as virtudes attractivas. Eles perceberam que o importante não era o fio serem mais ou menos grossos mas da sua natureza física e em falar em condutores ou isoladores, desfrutavam de coberto afinal a condição da electricidade, que só se podia verificar através de ~~esta~~ corpos de esta natureza. Bray aliã não tenta explicar o fenómeno.

Bray tambem descobria a electricização por influencia: suspendem do teto um bloco de chumbo (isolado) e aproximam dele um tubo de vidro eletrizado e o chumbo adquirem propriedades electricas, atraindo a si mesmo. Ele concluiu que a virtude electrica podia ser transmitida sem contacto, em linha de ^{manipulação} ~~manipulação~~ ^{e influencia da corda} ~~manipulação~~.

Experiências analogas ^{eram realizadas} por Dufay que publicou o seu trabalho em 1733. Dufay suava por assimilar que nem todos os corpos são eletrizáveis por fricção — Gilbert chama a isto o corpo "electric per se" — mas que todos podem ser eletrizados por influencia de um que estejam convenientemente isolados.

17 e 24 julho

Tales - minerais magnéticos, ámbros friccionados, atraem pequenos objectos

Bússula - China, conhecida da nossa era, navegada. Difunde-se no Ocidente no fim do século XII. Pierre de Maricourt (Petrus Peregrinus) em 1269 faz um balança: reconhecimento de dois polos ("norte" e "sul"). Divisão dum íman em dois. Especulações.

Acumulação lenta de conhecimentos no século seguinte. Polos do mesmo nome atraem-se, de nomes diferentes repelem-se; magnetização fugaz, por contacto, dum pedaço de ferro. Columbo na 1ª viagem à América (1492) descobre a declinação magnética; a inclinação magnética descoberta pelo alemão Hartmann (1544) ou pelo inglês Norman (1580)

Gilbert (William Gilbert 1540-1603) um grande do "jornal dos precursores".

"De Magnete magneticisque corporibus" (1600) diz, na dedicatória:

"Foi sempre para vós, o que sabeis realmente filosofar, homens sem ideias preconcebidas que não procurais a ciência somente nos livros mas nas próprias coisas, que eu escrevi estes princípios do magnetismo resultantes dum nova maneira de praticar a filosofia."

Gilbert vai separar experimentalmente os factos das especulações: as verdades enunciadas acima ficam bem presentes. Demonstra que a magnetização dum corpo não ocorre a sua massa. Hipótese de que a orientação da bússula resulta do próprio Terra ser um íman gigantesco. Verifica, o que é essencial, que não é só o ámbros que se electriza por fricção em muitas outras substâncias (lapis, opala, rubi, vidro enxofre, resina, sal gemma etc) Constrói o primeiro electroscópio - um apêndice metálica que roda em torno dum eixo vertical.

Guericke (à volta de 1600-1670) constrói o primeira máquina electrostática (uma esfera de enxofre que roda sobre um eixo e no qual se atrio um pano de lã ou de seda). É ele quem descobre a descarga por faíscas e insiste no facto curioso que um corpo atraído logo que chega ao contacto é repellido.

Stephen Gray em [1729] descobre a transmissão da electricidade (tubo de vidro com duas roldas de cortiça, friccionando o tubo as roldas electrizam-se). A seguir Gray aplica um pau de uns 15cm namo das roldas - o pau electriza-se. Com a ajuda de Wheeler instalou ao longo do corredor da casa um cordão de cántamo com m^m metros - e o fenómeno mantém-se na extremidade do cordão. Quando um fio de seda se quebrou e foi substituído por um fio de latão, o cabo perdeu as suas propriedades. Entenderam que isto significava que havia certos condutores e isoladores. Como isoladores identificaram o vidro, a resina, o diamante, o óleo; mas como condutores os metais, as soluções ácidas e alcalinas, a água, os corpos dos animais etc. São os isolantes que se electrizam por fricção. Começa da electricidade recreativa em Gray: uma criança suspensa por cordão de seda, aproxima-se do corpo dum objecto electrizado, e por adquirirem propriedades atractivas.

Descoberta da
electricidade
recreativa

Pelo mesmo altura o francês Du Fay mostra que todos os corpos se eletrizam por fricção, sendo que ativorem isolado. Foi ele o inventor da terra há duas classes de electricidade - a vítrea e a resinosa, e descobriu que electricidades da mesma classe repeliam-se de classes diferentes atraiam-se. (Amis; e Nollet)

o inverso multiplica da electricidade. Yesse-Antoine Nollet (1700-70). Exemplos: um jovem suspenso ao tecto por cordões de seda tem o pé encostado a um mecanismo electrostático. em movimentos: uma menina fica a mão do jovem enquanto atende a outra mão sobre um prato cheio de pedacinhos de polvilho que, espectacularmente, sobe e dança no ar sob a acção do fluido electrico; um grave cantor, de pé sobre um bloco de resina, segura um feno que fica numa máquina electrostática em marcha enquanto com a outra mão segura uma espada que coloca por cima duma colher cheia de álcool que lhe apresenta uma peçola de cera - e o álcool inflama-se por acção do fluido; um furro!

Carta de Franklin em 1773:

"Vamos incendiar o álcool do mesmo tempo nas duas margens do rio Skaykill graças a uma faísca enviada duma margem para a outra através do ar, experiência que já realizámos com grande espanto do público. Para o fantar, misturaremos um pouco com um choque eléctrico, que será arado num espectáculo eléctrico num fogo aluminado com a "torrafa eléctrica", e beberemos à saúde de todos os grandes electricistas... por razão electricizada, ao som de artilharia duma bateria eléctrica."

Esta "torrafa eléctrica" é o primeiro condensador, o que Nollet irá chamar a parte de Leyden, descoberta talvez por Maasschenbroek em 1746. Nessa altura já havia excelentes máquinas eléctricas: um eixo em cilindro de vidro, com todo um sistema de correias, alavancas e roldanas para o fazer rodar, almofadas de couro - o suficiente para obter chispas com mais de meio metro. Isto mais a garrafa de Leyden - no início uma verdadeira torrafa revestida exteriormente até 3/4 da altura por papel de estanho, e contendo ao interior papel de estanho ligado ao exterior por um fio de ferro terminado por uma bola.

atenuar

Nollet melteur-en-scène. An brichas. Os 240 guardas. Os três milómotos de fatura cubista. Mas sério: terá que o efeito se propaga instantaneamente?

A analogia entre a física eléctrica e a física da trovoadas: ^{travine} Wall em meados do século XVII, Aprii, brey, defris Nollet: ideia duhija. De Ronan e Franklin.

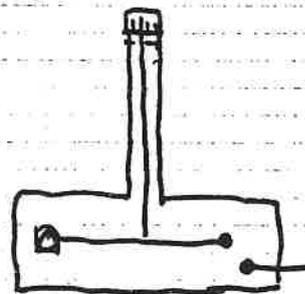
Benjamin Franklin (1706-90) anti-filacta de origem modesta, um dos chefes da rebelião dos colonos na "Estatos Unidos", coautor da "Declaração de Independência", o principal diplomata da nova república interenou-se pela electricidade desde 1647 (intrinse de Collinson da Royal Society para Filadélfia). An cartas a Collinson de B. F.

o condensador não se descarta duma só vez: Franklin afirma que a "carga" se situa

Detecció quantitativa dos cossos e das cargas. O arcómetro inicial: fluctuador com um eixo ligado a um pedo metálico; aproximando um corpo eletrizado o arcómetro enrije e a força é medida pelo pedo necessário a fazer-lhe voltar a posição primitiva. O electrometro de folhas inventado por Volta em 1781.

Charles Coulomb (1736-1806), engenheiro militar, ~~representante~~ fundador da teoria da resistência dos materiais, trabalhos importantes // as leis do atrito, realiza em 1780 a balança de torção com a qual determinará a lei de interacção entre as cargas eléctricas.

Fio vertical elástico fixado a uma barra ~~vertical~~ horizontal tendo numa extremidade uma pequena carga eléctrica na outra na outra (servindo de travão para amortecer as oscilações) introduzindo na gaiola uma outra carga podemos medir com precisão as forças graças à torção do fio $C\theta = fl$



Precisão 10^{-6} g. força

Possibilidade de definição da carga e das forças entre cargas. Lei de Coulomb $F = e \frac{q q'}{r^2}$, analógica com a lei da gravitação. Satisfação intelectual.

A história de electricidade e do magnetismo parecei chegado ao fim. Mas já entretanto Cavendish tinha provocado a formação de água pela passagem de faíscas numa mistura de hidr. gases — o ar sem flogisto (o oxigénio) e o ar inflamável (hidrogénio). Dois holandeses tinham descoberto água fazendo-a atravessar pelas duas cargas dum baterias de jarra de Leyden (1789). Em 1791 Galvani observou as contrações musculares numa coxa de rã. É uma nova história que vai começar e levar muito longe...

Teoria do flocos ácidos de Lavoisier 1786, completado por Laplace em 1789

(a particular da voltagem, voltagem produzida por flocos de electrificação de partículas)

Alcibiades Symon (1791) Teoria dos dois planetas

Henry Cavendish (1731-1810) medições de 1741-45 sobre a gravidade

Descobriu (no caso de um lei com $\frac{1}{r^2}$) que $n=3$ depois $n=2$ e depois que no interior de uma esfera com as suas cargas

mais tarde (imaginação pública) — e ao fim em $\frac{1}{r^2}$ uma experiência com a voltagem

A Óptica no século XVIII

- Constatamos que nos tempos de Descartes, Huygens e Newton a ciência da luz fez enormes progressos, quer com a descoberta dos principais fenómenos ópticos, quer com o advento de duas teorias explicativas inconciliáveis entre si, a teoria ondulatória e a teoria corpuscular ou da emissão. De facto, o segundo ponto de vista acabou por se impor e, nas décadas seguintes, a luz foi considerada como um substância e não como um acidente, aliar uma substância de natureza atomística ao contrário do calor, da electricidade ou do magnetismo vistos como fluidos.

Todavia, neste capítulo da física como em tantos outros, a contribuição do século XVIII não pode ser comparada à do século precedente. Foram, de certo modo, tempos de apropriação e de assimilação dos sucessos já alcançados. Não que o interesse pela óptica tivesse esmorecido, mas o centro de interesse era a óptica geométrica e o aproveitamento das suas potencialidades concretas. Assim, aperfeiçoou-se paulatinamente a construção de instrumentos ópticos cada vez mais perfectos, em particular melhores microscópios e melhores telescópios, com grande proveito para outros ramos de saber como a biologia ou a astronomia. Entende-se que os dois factores mais interessantes para a história da óptica ocorridos no século XVIII estejam relacionados, embora de maneiras diferentes, com a óptica instrumental.

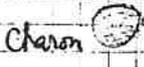
Faber, 1740

Bern, 1746

O primeiro foi o aparecimento de lentes acromáticas, cujo invento parece dever-se a um amador inglês chamado Chester Hall. Sabre-se que uma lente é apenas um meio óptico transparente destinado a reflectir numa certa maneira o trajecto dos "raios luminosos" graças a uma combinação adequada da sua forma com o seu índice de refração. Ora o índice de refração da lente varia com o comprimento de onda, o que é ~~o~~ o mesmo que dizer que as lentes são meios dispersivos. Por consequência, as radiações de diferentes comprimentos de onda que constituem a luz branca terão percursos ligeiramente diferentes na travessia da lente, com prejuizo da nitidez da imagem formada, e diz-se que a lente provoca uma aberração cromática [do grego "chroma" cor]. O que Chester Hall compreendeu foi que se podia atenuar a aberração cromática dum instrumento óptico combinando lentes de materiais diferentes (e cujo lei de dispersão é, portanto, diferente), por exemplo, quartzo e cristal. Far-se-ão grandes progressos empíricos e técnicos, nesta via com grande benefício para a construção de instrumentos ópticos.

O segundo facto a que quero referir-me tem uma estreita ligação com a oposição de

telexomia, a qual progrediu muito no "século das luzes" nomeadamente graças à obra de
 se grande homem que foi músico antes de ser astrónomo e se chamava William Herschell
chell (1738-1822). O trabalho de Herschell, que foi o melhor construtor de telescó-
 pio do seu tempo, que descobriu o planeta Urano e que foi o grande iniciador
 da exploração da nossa Galáxia mereceriam larga referência. Mas não é de Herschell
 que vos vou falar mas dum outro astrónomo inglês chamado James Bradley (1693-
 1762).



Bradley, como muitos dos seus contemporâneos, procurava determinar ~~exatamente~~ pela
 observação a paralaxe duma estrela. Uma vez que se deixara de ver na materialida-
 de do firmamento, havia razão para crer que as estrelas se encontravam a distâncias muito
 diferentes da Terra sendo, naturalmente, em média as mais próximas as de maior magni-
 tude aparente, quer dizer, as mais brilhantes. Mas, se assim era, no decurso do movimento
 anual da Terra, uma certa estrela "próxima" deveria ser
 observada como alinhada com diferentes estrelas "distantes"
 e, medindo o ângulo correspondente a esta paralaxe estelar
 tornar-se-ia possível calcular, por triangulação a distân-
 cia de nós a que se encontra essa estrela próxima.

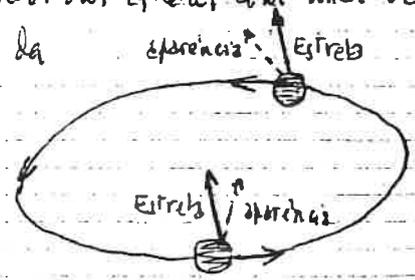


É fácil concluir que, na sequência do movimento elip-
 tico da Terra em torno do Sol, as estrelas próximas pareciam
 deslizar, durante um ano terrestre, pequenas elipses no céu.
 Era esse o efeito que se procurava e Bradley observou-o, efe-
 tivamente em 1725. O estranho era que essa pequena elipse descrita pela estrela não
 tinha a vibração anual que se previa: assim a estrela não se situava na extremidade
 do eixo maior da elipse em Dezembro mas em Março, e esse atraso de 3 meses mantinha-
 -se ao longo de todo o ano.



Asimov, 55

Em 1727 conseguiu demonstrar que o efeito que ele observara nada a tinha a ver
 com a paralaxe estelar (que se viu a ser detectada 110 anos mais tarde, em 1830-40
 por três astrónomos que trabalhavam independentemente: Bessel, Henrierson e von Struve)
 mas correspondia a um fenómeno completamente diferente a aberração da luz, consequên-
 cia de movimento da Terra através dos raios luminosos vindo das estrelas com uma veloci-
 dade finita. A paragem em que estrela é aparente resulta da
 composição de dois vectores velocidades, a velocidade da
 luz se movendo c e a velocidade própria da Terra
 que muda constantemente mas se de ordens absolutas (poucas)
 mas de direcção e ~~de sentido~~ de sentido. Teremos ocasião
 de voltar a falar na aberração a propósito dos problemas da estrutura do éter.



ibidem, 60/61

Baymann, 22

220

106

A história da óptica até aos tempos de Newton

Historicamente, a contribuição essencial da física do século XVII traduziu-se pela elaboração de uma nova mecânica, uma doutrina do movimento válida à terra como no céu. Mas a sua obra foi igualmente fecunda noutros domínios da física, nomeadamente em óptica, e só a tempo ou tempo para não perder o fio à meada. Chegou a ocasião de suprir essa lacuna

Retrospectiva

Se a falta de documentos nos impede de conjecturar o que os homens da Idade do Bronze pensavam da luz, sabemos que os filósofos naturalistas gregos a imaginavam como uma substância de existência análoga à do fogo, ideia natural quando se recorre que o fogo era a única fonte luminosa que podiam controlar; foi nesta perspectiva que Anaximandro considerou o fogo como um dos quatro Elementos, e Heráclito até o tomou como o princípio de todas as coisas.

Nessa época, a luz era primordialmente aquilo que permitia ver, de modo que se confundiam dois problemas distintos, o das propriedades da luz e dos mecanismos da visão. Distinção-se se esses "raios" que lipavam os objectos ao olho eram emitidos por aqueles na direcção do olho, ou pelo próprio olho na direcção dos objectos ou, enfim, se resultavam do encontro no espaço de duas emissões concorrentes.

A constatação, muito antiga, da propagação rectilínea dos raios luminosos foi expressamente ensinada pelo grande géometra Euclides e uma verdade já estava bem oriente quando os brâhmanes alexandrinos fundaram na teoria das sombras a determinação das dimensões relativas da Terra e da Lua. Entretanto, os epicuristas popularizaram a ideia de que a superfície das coisas emite constantemente corpúsculos rápidos que transportavam uma espécie de simulação dessas coisas, a visão sendo originada pela penetração no olho desses "simulacros" — concepção fantasista mas que tinha o mérito de considerar o olho como um mero receptor.

Platão emite pelo olho. leis de reflexão.

Reflexão. Tabel
Reflexão. atomb

Pouco mais de mil anos antes da invenção da luneta começaram a fazer-se progressos significativos, nomeadamente graças a Ibn-al-Haitam, o Alhazen do cristandade; realizou ~~uma~~ ^{algumas} experiências que permitiram-lhe introduzir importantes novidades: a luz seria um fenómeno exterior ao olho que se propaga em linha recta, se reflecte nos espelhos, se refracta ao atravessar meios transparentes e que, ao penetrar no olho, provoca a formação de uma imagem que nada tem a ver com os simulacros dos epicuristas; foi se formam fora ^{epicuristas} fora ^{epicuristas} no interior do globo ocular. De certo modo, com Alhazen começa-se a saber alguma coisa de óptica.

É todavia provável que já então se conhecesse fabricar lentes, talvez descobertas como uma consequência fortuita da actividade dos vidreiros; já como foi, aqueles que na Europa

do século XIII trabalhavam quotidianamente com objectos de pequenas dimensões (o joalheiro, por exemplo) serviam-se de lupas, e o uso dos óculos começa então a generalizar-se. É curioso observar que, de início, se ligavam os óculos à ponta de um chapéu, porque só mais tarde apareceu a ideia cómoda de os adaptar directamente ao rosto.

A pesar da sua importância prática, as lentes não mereceram qualquer estudo científico até ao século XVI e, a esse propósito, há que citar o napolitano Luca Porta. Era um espírito próximo e tão confuso que não receava explicar seriamente como utilizar o limão para comprovar a fidelidade feminina, mas a segunda edição da sua "Magia naturalis", em 1589, contém a primeira descrição de uma luneta. Tinha sido a partir daí que se ibia se aprimorando, e no começo do século seguinte os oculistas holandeses construíam lunetas encastrando as lentes em tubos de cartão que deslizavam uns sobre os outros.

A invenção do microscópio foi mais tardia e, embora já houvesse microscópios em 1595, as lentes não eram suficientemente boas para permitir a obtenção de imagens nítidas; Descartes teve um desses microscópios que, de facto, para nada lhe serviu. Só a partir de 1660, no tempo de Robert Hooke e da sua "Micrographia" (1665) é que os microscópios se tornaram realmente operacionais, inflando sobretudo na história da biologia.

A obra de Kepler

Cronologicamente, o primeiro dos grandes nomes a citar na história da óptica no século XVII é o do nosso velho conhecido Johann Kepler. Já em 1604 comprou de astronomia um tratado velhissimo "Ad Vitellionem Paralipomena", e após as descobertas espectaculares que Galileu fez com a luneta, retomou-o num livro de discussões mais modestas, o "Dioptrica" (1611). No conjunto das duas obras encontram-se várias resultados interessantes, nomeadamente a lei fundamental da fotometria, quer dizer, a afirmação de que a intensidade total de iluminação de uma superfície é directamente proporcional à sua área e inversamente proporcional ao quadrado da distância da superfície à fonte. Ali aparece também a primeira teoria dos instrumentos ópticos.

A análise Kepleriana dos instrumentos ópticos era evidentemente imperfeita — e teria só atingido uma forma satisfatória no século XIX — e tanto mais imperfeita quanto a lei da refração não estava descoberta. Mas como Kepler se limitou a considerar ângulos de desvio relativamente a' normal com pequenos valores (que são aproximadamente proporcionais aos senos respectivos), a hipótese simples da existência de uma proporcionalidade entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração permitiu-lhe obter um tratamento racional da óptica experimental.

Por outro lado, a observação cuidadosa da passagem de um raio luminoso do ar para o vidro permitiu-lhe constatar que neste caso, quando o ângulo de incidência cresce de

22
102

A história da luz até ao tempo de Newton - 2

é inversamente proporcional ao quadrado da distância da superfície iluminada à fonte, bem como a primeira teoria dos instrumentos ópticos.

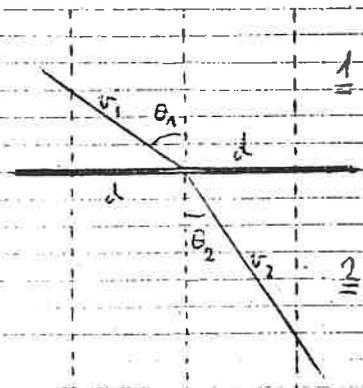
O estudo dos instrumentos ópticos realizado por Kepler e, naturalmente, imperfeito — a teoria só alcançará uma forma satisfatória no século XIX — tanto mais imperfeita que Kepler desconhece a lei fundamental da refração. Mas como ele se limita a considerar essencialmente ângulos com pequenos valores (que são, como uma boa aproximação, proporcionais aos respectivos senos), a hipótese da proporcionalidade do ângulo de refração ao ângulo de incidência basta para lhe assegurar um tratamento razoável da óptica instrumental.

A observação curiosa da passagem dum raio luminoso do ar para o vidro mostra-lhe a água renfiar que, neste caso, quando o ângulo de incidência cresce de 0 até 90° o ângulo de refração só aumenta de 0 até 42° ; a experiência inversa, da passagem da luz do vidro para o ar, servirá então para lhe confirmar a ideia (Lavoisier do princípio da reversibilidade dos caminhos ópticos) de que, para um ângulo de incidência superior a 42° , a refração deixa de se produzir, sendo a luz totalmente reflectida. Foi assim que, ignorando a lei da refração, Kepler descobriu o fenómeno da reflexão total.

A lei da refração seria descoberta em 1525 (pelo neerlandês Snell van Royen, dito Snellius), um professor da universidade de Leyden, mas esse resultado só veio a ser largamente divulgado com a "Dioptrica" de Descartes, num dos seus trabalhos científicos incluídos no "Discurso do Método" (1637). Admite-se que Descartes não conheceu o trabalho de Snellius e, se qualquer coisa, a justificação da lei que ele apresenta e, bem a sua maneira, um argumento puramente teórico.

Para Descartes, a passagem do raio luminoso do meio óptico 1 para o meio óptico 2 é imitada a intervenção duma "força" que, em modificar a componente da velocidade no plano de separação dos dois meios, ^{altera} a componente desta velocidade na direcção normal a esse plano, ^{alterando} uma mudança na direcção e no valor da velocidade do próprio raio. Desta ideia base resulta que, se se tirarmos os planos de separação a mesma distância d dos dois lados da parte de incidência, como a componente transversal da velocidade não se altera, temos no meio 1 $d = C v_1 \sin \theta_1$ e, no meio 2, $d = C v_2 \sin \theta_2$, donde se tira

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1}{v_2} \sin \theta_2$$



Como as velocidades v_1 e v_2 são características dos dois meios ópticos, este resultado mostra que o cociente do seno do ângulo de incidência pelo seno do ângulo de refração depende somente de duas constantes, digamos n_1 e n_2 , atribuídas respectivamente ao meio 1 e ao meio 2. E, se pretendemos respeitar a convenção usual de que a um meio mais "denso" corresponde um valor de n mais elevado, haverá que escrever

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

de forma a que, por exemplo, na passagem do ar ($n_1 = 1$) para a água ($n_2 = 4/3$) seja $n_2 > n_1$, e, portanto, $\theta_1 > \theta_2$, levando a prever que o raio refractado se aproxima da normal ao plano de separação.

Orá, das duas relações precedentes vem

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

De 13^o significa que o argumento cartesiano conduz a afirmar que a velocidade de propagação da luz num meio material é directamente proporcional ao respectivo índice de refração. Esta ~~relação~~ ^{relação} parecia natural a Descartes, que assemelhava o índice de refração a uma espécie de "coeficiente de dureza", e tinha observado que um bala penetra mais profundamente num ~~material~~ ^{meio} duro, como um pedaço de madeira, do que num ~~material~~ ^{meio} plástico, como um calceirão de Fez.

Mas este ~~argumento~~ ^{argumento} que satisfazia Descartes afigurava-se inaceitável ao seu contemporâneo Pierre Fermat (1601-1665), ~~que~~ ^{o qual} utilizava o caso proporcional de ~~seus~~ ^{suas} transições e magistrado para dar provas de um autêntico génio matemático; foi ~~ele~~ ^{o referimo} ~~ele~~ ^{ele} como um dos fundadores (com Huygens e Pascal) do cálculo das probabilidades e, embora disputar a Descartes a glória de ter criado a geometria

A.55 II. 223, 225-5

Precursores do cálculo diferencial

analítica, é reconhecido celebre pelos seus trabalhos sobre a teoria dos números. Ora, em 1657, Fermat inventara a primeira regra de que se dispôs para a determinação das raízes racionais de funções algébricas, e aplicou-a nomeadamente para se determinar as leis da óptica geométrica, e da reflexão e da refração, dum único princípio em o princípio de tempo mínimo. Mas o mais curioso é que as duas regras levaram a uma abstrusa polémica entre Fermat e Descartes sobre um ponto em particular.

Id. 330

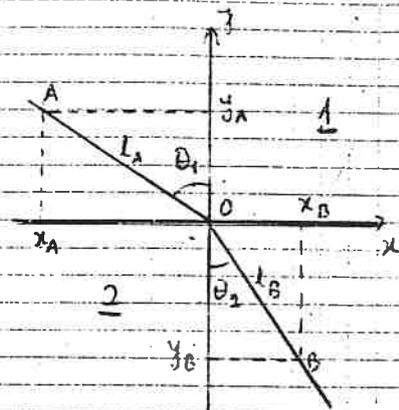
O problema de Fermat é hoje fácil de demonstrar. Sejam dois meios ópticos 1 e 2, e suporíamos um raio de luz que, por hipótese, passa pelo ponto A de 1 e pelo ponto B de 2; aqui, antes de considerarmos a lei de refração, mas o raciocínio vale para a lei da reflexão de considerarmos os pontos A e B situados ambos no meio 1. O problema é que o raio vai propagar-se de A até B dependendo o menor tempo possível, e, em consequência, esse tempo t deve ser tal que $\delta t = 0$; esta exigência

221
103

A história da luz até ao tempo de Newton - 3

vai bastar para derivarmos as leis da refração e da reflexão.

Introduzimos um sistema de eixos rectangulares para simplificar a escrita, situamos a origem no ponto O em que o raio luminoso incide no plano de separação (coincidente com o eixo dos x). O tempo que luz require para ir de A a B será a soma do tempo t_1 , necessário para ir de A a O , com o tempo t_2 , gasto para ir de O a B . Portanto, se v_1 e v_2 serem as velocidades nos dois meios, temos



$$t = t_1 + t_2 = \frac{l_A}{v_1} + \frac{l_B}{v_2} \quad dt = \frac{dl_A}{v_1} + \frac{dl_B}{v_2}$$

e de acordo com o princípio do tempo mínimo, deve ser $\frac{dl_A}{v_1} + \frac{dl_B}{v_2} = 0$

Ora $l_A = \sqrt{x_A^2 + y_A^2}$, de forma que $dl_A = \frac{1}{2}(x_A^2 + y_A^2)^{-1/2} \cdot 2x_A dx_A = \frac{x_A}{l_A} dx_A$ e é constante, porque o ponto de incidência tem que permanecer no plano de separação dos dois meios — isto é, $dl_A = \frac{x_A}{l_A} dx_A$; análogamente $dl_B = \frac{x_B}{l_B} dx_B$, e é óbvio que temos necessariamente $dx_B = -dx_A$, o que leva a impor

$$\frac{1}{v_1} \frac{x_A}{l_A} = \frac{1}{v_2} \frac{x_B}{l_B}$$

dividindo ambos os lados

$$\text{Como } \frac{x_A}{l_A} = \sin \theta_1 \quad \text{e} \quad \frac{x_B}{l_B} = \sin \theta_2 \quad \text{conclui-se que}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad \text{que é a lei da refração}$$

e, se A e B se encontrarem no mesmo meio, então $v_1 = v_2$, logo $\theta_1 = \theta_2$, o que é a lei da reflexão.

Observe-se também que esta é a mesma relação do índice de refração, Fermat e o Teorema de Descartes que

$$n_1 v_1 = n_2 v_2$$

e que significa que a velocidade da luz num meio material é inversamente proporcional ao respectivo índice de refração. A constância em a tese contempânea é bastante e a controversia provavelmente inextinguível.

Os debates acerca da natureza da luz até ao século XVIII

Esta questão sobre a proporcionalidade directa ou inversa da velocidade da luz com o índice de refração, que vai durar quase dois séculos, presta-se e trata-se, em princípio, a ser sanada por tais experimentais. E vai se tratar, como veremos, duas problemas de longa duração, mas de uma importância secundária para o

Respostas
e o princípio
de Newton

proprio fundamentos da óptica. Mas o facto é que o valor elevadissimo dessas velocidades constitua um obstáculo muito sério a realização das medidas necessarias.

Fizeau, 1849

Já Galileu tentara realizar uma tal medida mas sem obter qualques resultados. Descartes interpretou a fracasso correctamente e, com o proposito de não deixar a dificuldade, propôs que se tentasse alcançar esse fim através de observações astronómicas, em que as grandes distancias em jogo viriam compensar a velocidade enorme da que se suscitava; assim Descartes afirmou (e muito bem) que o valor finito da velocidade da luz deveria afectar com que eram observados os eclipses da Lua mas como uma análise atenta nada permitiu detectar, ei-lo que conclui que, na ausencia de "matéria", a velocidade da luz era infinita. Não parece que lhe tenha ocorrido que a Lua ainda estivesse, portanto, demasiado próxima...

Esta ideia foi, a sua ideia acartonada por ser utilizada, em 1675 para ser usada a primeira medida da velocidade da luz. O astrónomo dinamarquês Ole Rømer (1644-1710), que então trabalhava no grande observatorio de Paris fundado por Colbert, notou anomalias estranhas na periodicidade dos eclipses dos satélites de Júpiter, cujo comportamento regular era bem conhecido desde que Galileu os descobriu. Apoiado por Cassini, o reputado director do Observatorio, Rømer acabou por perceber exactamente porque é que o tempo entre dois eclipses sucessivos do mesmo satélite aumentava regularmente quando a Terra se afastava de Júpiter e diminuia regularmente quando se aproximava de Júpiter. É uma consequência imediata da velocidade finita da propagação da luz. Assim, tendo constatado que o eclipse de Io ocorria, em média, 995 segundos depois cada quando a Terra e Júpiter está em conjunção (isto é, para calcular a velocidade da luz a vacuo

valor actual 1000

327.000 km/s



a partir somente do conhecimento da velocidade da Terra em torno do sol. Já em 1849 é que Fizeau mediu esse valor por um método laboratorial.

(nota de leitura)

Foi durante um baile de máscara de Veneza, na Itália, onde era professor de matemática, Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) descobriu aquilo que nos chamamos a chamação ou efeito de difracção da luz. Fazendo passar um feixe de luz numa abertura muito estreita, observou sobre um ecrã uma mancha luminosa maior do que devia de poder ser visto a luz de propagação rectilínea. Tendo colocado no seu eixo de luz objectos de muitas maneiras constatou que a luz branca era mais ou menos composta de cores diferentes...

Supp. 57 Forbes 245 Kircher 144

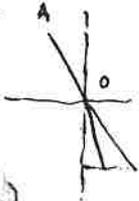
12/2/11

107

A história da óptica até ao tempo de Newton

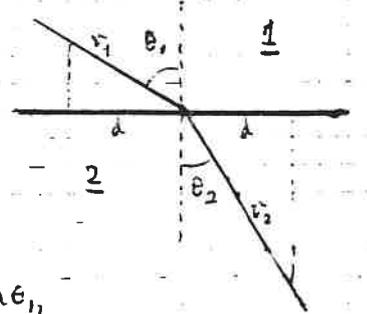
0° até 90°, o ângulo de refração só cresce de 0° até 42°. Assim, a experiência inversa em que se provoca a passagem do raio luminoso do vidro para o ar, confirmou-o na ideia (devido ao princípio da reversibilidade de linhas ópticas) de que, para um ângulo de incidência superior a 42°, a refração deixa de se produzir e a luz é totalmente reflectida. Deste modo, e antes de ter sido descoberta a lei da refração, a existência do fenómeno da reflexão total foi assumido por Kepler.

Descartes, a óptica geométrica e a ^{velocidade de} propagação da luz



Se a lei da reflexão já eram conhecida de há muito, a da refração só foram descobertas em 1625 pelo neerlandês Snell van Royen, dito Snellius, um professor da universidade de Leyden. Mas esse resultado só veio a ser largamente divulgado com a publicação da "Dióptrica" de Descartes, um ensaio científico incluído no famoso "Discurso do Método" (1637). Admite-se, em geral, que Descartes não conhecia o trabalho de Snellius mas, de qualquer modo, o mais interessante é a justificação da lei que ele propõe procurando-a, não de sua maneira, num argumento de índole teórica.

Para Descartes, a passagem do raio luminoso do meio óptico 1 para o meio óptico 2 provoca a intervenção de uma "força" que, sem alterar a componente da velocidade no plano de separação dos dois meios, altera contudo a componente da velocidade na direcção normal a tal plano, implicando assim uma mudança na direcção e no módulo da velocidade do raio luminoso.



Como, por hipótese, a componente transversal da velocidade não se altera, se medirmos no plano de separação o mesmo distância d em dois lados do ponto de incidência, temos no meio 1 $d \sin \theta_1$, e no meio 2 $d \sin \theta_2$, donde se tira

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_2}{v_1}$$
 Isto mostra que na passagem de um meio mais "denso" (p.ex. vidro) para um meio 2 mais "denso" (p.ex. a água), $\theta_2 \sin \theta_1 < \theta_1 \sin \theta_2$ $v_2 > v_1$

A diferença de velocidade entre os meios ópticos é o que é chamado de índice de refração $n = c/v$

Dado que as velocidades v_1 e v_2 são características dos dois meios ópticos, este resultado pode interpretar-se dizendo que o seno do ângulo de incidência ^{em O} feito seno do ângulo de refração depende somente de duas constantes n_1 e n_2 , atribuídas respectivamente ao meio 1 e ao meio 2. Se restarmos a convenção usual de que o meio mais "denso" corresponde um v_2 em n mais elevado, haverá que escrever

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

de forma a que, por exemplo, na passagem do ar ($n_1 = 1$) para a água ($n_2 = \frac{4}{3}$), seja $n_2 > n_1$, se conclua que $\theta_2 < \theta_1$, provendo que o raio luminoso se aproxima do normal ao plano de separação.

então

Era, das duas relações precedentes deduz-se que

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

quer dizer, o argumento carteziano conduz a afirmar que a velocidade de propagação da luz num meio material é directamente proporcional ao respectivo índice de refração. Este resultado pareceu muito natural a Descartes, que entendia o índice de refração a uma espécie de "coeficiente de dureza" e observara que um projectil penetra mais profundamente num meio duro como um pedaço de madeira do que num meio plástico como o peixe.

Fermat e o princípio do tempo mínimo

insuperáveis. Verificou-se em seguida que a maior parte das substâncias cristalinas transparentes (há um excepção das que apresentam simetria cúbica) produzem essa dupla refração ou, como também se diz, são birrefringentes, e antes do fim do século XVIII por via a mesma primeira explicação do fenómeno. (Huygens, sem polarização)



Brachet 292
Brn. 624
Parsi, Hooke

A teoria oscilatória de Huygens

oscilação das ondas em um meio elástico

Traité de la Lumière 1690
HGS II 318
e seq.

Para Descartes havia no espaço uma matéria subtil formada de pequenas esferas contiguas que se tocam como 2 linellas bem apertadas. Por fustos mais raras (e mais divinos escapam-se do sol e das outras fontes luminosas, comprimem esta matéria e exercem sobre ela forças "comme tremblantes" e fazem tremor esta matéria. Quando a solidão não é porosa assim se verifica reflexões ou reflexas. Assim, para Descartes a luz não é um movimento mas uma "tendência ao movimento" um "constante movimento". Há portanto em Descartes uma teoria do éter, embora um éter descontínuo. A propagação é instantânea e está ligada ao choque da corpa. A grande dificuldade foi a descoberta de velocidade finita de propagação.

Entretanto as novas descobertas experimentais (velocidade de luz, difracção, experiências sobre as cores, dupla refração) que vão inspirar Newton levam a uma reformulação da teoria cartesiana, que foi sobretudo obra de Malebranche (1638-1715). Luz como movimento periódico, num éter já não sólido mas elástico. Nos seus finais de sua vida (1712) ligou entre a periodicidade e a cor e velocidade finita de propagação.

Depois temo brunelli. Analogia luz-som, produzido pelo agitar rítmica de uma substância (o éter). Vibrações luminosas dadas por de forma não precisa - o éter como um fluido.

Por outro lado Hooke a luz como uma propagação oscilatória de um éter elástico (sem corpusculos), pulsos uniformes perpendiculares à direcção de propagação. Propagação instantânea. Explicação da dupla refração porque um raio luminoso tem duas faces simétricas - o que dá duas cores fundamentais.

Huygens: analogia com o som, propagação de movimentos vibratórios num meio material elástico, constituído de partículas raras e elásticas (com um segundo éter que precede as intersticiais). Cada partícula é a fonte de uma nova vibração etc (princípio de Huygens). Demonstra leis de reflexão, de refração, da dupla refração mas sem vibrações transversais.)

Newton, teoria das cores. Pensava-se que a cor resultava da acção do vidro. Newton demonstra a relação íntima de refração-cores. Cor como qualidade logo luz substancial (não pode haver qualidade de uma qualidade). A luz como um corpo. Por outro lado as interferências (como) o que o leva a formular teoria das acções. Éter porque há acção do éter na reflexão e na refração.

Princípio de Huygens
Emissão
intersticial de
abstração do éter

Francisco Simões (1513-55) pit. de astronomia em solo da Alemanha a difração da luz (com a falange) para descrever a inflexão sofrida por um raio de luz ao passar nasante ao bordo de um objecto opaco. Objecto no core de luz obtido na câmara escura, sombra física maior que a sombra geométrica, com franjas claras e escuras, as sombras claras afuniladas no meio, avel de um lado venedido do outro. Efeito cibernético com objecto n.º final como uma espulha ou um fio de arado. Descreve o fenómeno em um tratado inter-história

Em 1669 o médico dinamarquês Erasmus Bartolinus (1625-1698) publica as suas invariantes sobre o espalhamento de luz em um cristal romboédrico em que se observam pela 1ª vez o fenómeno de dupla refração: o raio luminoso ao penetrar no cristal divide-se em dois, o raio ordinário que obedece à lei fundamental de refração e o raio extraordinário que segue outro caminho. Bartolinus mostrou-se incapaz de explicar o fenómeno.

1675

O seu discípulo Oleaf Romer (1644-1710) que trabalhava em Paris onde acabava de ter fundado o Observatório real sob a direcção do italiano Cassini faz uma enorme obra com estatísticas ainda mais interessantes. O satélite de Júpiter sofria um eclipse com uma tal regularidade que funcionavam como um autêntico relógio astronómico. Os Romer observou irregularidades na periodicidade desta eclipses que se atribuíam na se achavam na se achavam. Ajudado por Cassini, Romer concluiu que havia atrasos quando a Terra e Júpiter se encontravam mais afastados, havia avanços quando se encontravam mais próximos. Romer atribuiu tais diferenças ao caminho que a luz devia percorrer desde Júpiter até à Terra, isto atribuindo à luz uma velocidade finita. No caso limite 1080 segundos de diferença entre o ponto de conjunção e de oposição Terra Júpiter $\frac{T}{x}$ $\frac{T}{x}$. 1ª medida da velocidade da luz com um erro de 10%.

Huygens "Traité de la lumière" (1690) - Teoria de ondas. Principal dificuldade, explicações da propagação rectilínea. Principal êxito: teoria de dupla refração. Pouco lido

Newton: experiências de decomposição e recomposição de luz branca (1666). Publicado em carta à Royal Society em 1672. Polémica com Hooke. Só publica o seu tratado em 1704 "Optica". O "aviso de Newton", o 1º fenómeno de interferência nas unidas complicadas explicação conceptualmente. "Dispersão" favorece a reflexão e na a transmissão (periodicidade) explicação vales, Newton mede os valores dos intervalos de ordem de 1188.734 de uma polegada (mais comprimentos de onda). Natureza corpuscular de luz - propagação rectilínea e analogia com o conceito de foto material e com a introdução de forças atractivas. Ideia para a difracção

leitura XVIII - o paradigma corpuscular de Newton, novos propostos teóricos, sobretudo propostos no domínio de construtores de aparelhos (microscópio, telescópio).

1771-1821

Tudo reconstruído no século XIX graças a Young. Menino prodígio (sobria ler aos 2 anos), aos 14 escrevia comestemente em latim e grego, sobria francês e italiano, depois hebraico, persa, árabe etc. Ainda adolescente lia os Principia de Newton o tratado de Química de Lavoisier. Mas também estudou toda forma a grande matemática e mecânica com Euler e o Bernoulli, L'Alembert.

Filho de uma família rica de banqueiros e fabricantes de tintas, muito bem acolhido na alta sociedade estudou medicina na Alemanha e depois em Cambridge. Estudou sobre a anatomia e fisiologia do olho. Mas sobretudo se interessou de óptica pura (o interferómetro de Young) a luz sendo interpretada por ondas, analogia as ondas comunicação à Royal Society em 1802

Young interessou-se por muitos temas que vão de dinâmicas do fluido à capilaridade, de construção avulsa à decifração da hieróglifos, dos reflexos de vidro à própria medicina (Enciclopédia Britânica) Director do Almanaque Náutico de 1818. Um dilectante de génio.

As ideias ondulatórias de Young combatidas e derrotadas pelos corpuscularistas (Laplace, Bragg, Poisson) em Inglaterra.

Augustin Fresnel (1788-1827). Escola Politécnica, engenheiro de pontes e estudos de trabalhos na província. Para se distinguir concorreu em 1814 a obtenção a natureza da luz. Em 1817, quando Napoleão regressou da ilha de Elba, Fresnel que se lhe opunha foi despedido e exilado em ~~Angelo~~ na Alemanha. Desenvolveu uma teoria matemática da difração. Apoio de Arago. Resultados já parcialmente obtidos por Young. Depois o estado da luz em lâminas finas.

Em 1818 prémio da Academia para um estudo teórico e experimental de difração. Juri de referência (Laplace, Bragg, Poisson) e dois outros simpáticos (Gay-Lussac e Arago). Poisson: o ponto brilhante no centro de sombra de um disco: impossível. A experiência fez-o Arago e o ponto estava lá.

A polarização da luz é a razão emitida pelo calcite via interferência. Malus (1775-1812) polarização por reflexão (o lux-emburgo)

Teoria de Fresnel de polarização: a transversalidade das vibrações. A vitória. Importantes trabalhos sobre os faróis.

Introdução

Quando um condensador carregado é ligado à terra por um fio condutor, provoca-se a passagem de cargas eléctricas através do fio até que o condensador se descarregue, e os físicos já sabiam interpretar correctamente o fenómeno no último quartel do século XVIII. Mas a corrente assim gerada não se é de curtíssima duração como tem, em geral, uma intensidade muito fraca — da ordem do milésimo ou do milionésimo de ampère — isto quando uma simples pilha das nossas lâmpadas de bolso fornece cerca de 1/4 de ampère e uma bateria de automóvel deve debitar, para permitir o arranque do carro, uns 300 ampères. Nestas condições, considerava-se que a corrente originada pelas descargas dos condensadores era um fenómeno secundário, um processo secundário que só interessava porque consistia de um estado estacionário a outro. Pensava-se que dizendo que o "fluido eléctrico" se escoa rapidamente ao longo do fio estava tudo dito, e ninguém tinha ideia da possibilidade de construir dispositivos capazes de produzir correntes eléctricas permanentes nem imaginava o grande interesse que essas correntes eléctricas poderiam ter.

No contexto sócio-cultural da Europa de então, parece seguro que mais cedo ou mais tarde essa descoberta viria a ser feita, mas que o primeiro gerador de corrente eléctrica — a pilha de Volta — já existisse na viragem do século foi numa longa medida fruto do acaso. Pode dizer-se que o nascimento da electrodinâmica foi fortuitamente prematuro e, porque o foi, veio acelerar o ritmo das grandes transformações técnicas e sociais já em curso: a difusão da energia eléctrica ainda no século XIX e o nascimento dos sintomas da entrada numa nova era em que a história da ciência e, imediatamente, a história da física, se transformava num factor condicionante da marcha da própria história humana.

Ars. rai de Galvani(em 1773)
mili

Luigi Galvani (1737-1792), professor de medicina na universidade de Bolonha, consagra-se ao estudo da fisiologia da rã, e foi assim que numa tarde de 1780 esta história começou. Galvani e os seus assistentes procediam à viviseção de uma rã eufórica e as suas patas trazeiras pretendiam desnudar quando constatarem, acidentalmente, que um toque com um bastão metálico sobre nervos provocava uma forte contração muscular. Alguém assinalou que o invisível fenómeno se ocorria quando, simultaneamente, saltava uma físcula de uma máquina electrostática que, por acaso, um amigo de Galvani estava a funcionar na mesma sala. Na mesma época, a "electricidade animal" estava na moda,

devido à descoberta de seres curiosos animais (como certas enguias ou o "peixe torpedo") cu-
jo instrumento de combate é a produção de descargas eléctricas. Naturalista de formação,
Galvani considerou que obtivera uma bela pista para a investigação da "electricidade
animal" e foi com esta ideia preconcebida que iniciou os seus estudos.

O segundo episódio desta história conta que, após ter colocado as suas mãos unidas
na base dum para-raios e de ter constatado assim que as nuvens electrizadas pro-
duziam as famosas contrações musculares, Galvani dedicou-se a suspender os pobres
animais por um gancho de cobre numa varanda de ferro até que um dia, de novo
por mero acaso, observou que o intrigante espasmo se produzia quando se fechava o
circuito constituído pelo ferro, o cobre e a mão. Os resultados das investigações de Galva-
ni levaram-no finalmente a elaborar uma teoria que expôs num livro "De viri-
bus electricitatis in motu musculari commentarius" (Comentários sobre as forças eléc-
tricas no movimento muscular) publicado em 1791 e reeditado muitas vezes.

Em resumo, Galvani sustentava que a fenómeno que observara deviam ser atri-
buido essencialmente à "electricidade animal": os animais produzem uma forma espe-
cial de electricidade, gerada no cérebro e propagando-se através dos nervos, que pode
carregar os músculos e transformá-los numa espécie de jarraja de Leyden, com o interior
carregado positivamente e o exterior negativamente; as contrações observadas resultariam
da descarga provocada pelo estabelecimento de um contacto entre essas partes interiores e
exteriores.

A pilha de Volta

O fenómeno do "galvanismo", como então se dizia, despertaram grande curiosidade
e as ideias de Galvani receberam uma larga aceitação. Entre muitos que se interessaram
pelo assunto estava Alessandro Volta (1745-1827), professor na universidade de Pavia
e já electricista conceituado graças à invenção do electróforo, uma maquinagem versátil de
electroscópio extremamente sensível. Ao iniciar os seus trabalhos, em 1792, Volta parte
do facto consignado na obra de Galvani, sem quaisquer preconceitos, mas as suas expe-
riências vão levá-lo em breve a opor-se frontalmente ao Galvanismo.

Assim, Volta não consegue entender como é que a teoria de Galvani permite interpre-
tar a sua antiga observação de que, tocando com metais diferentes unidos entre si
fontes análogas das suas fontes de uma mão, se provocam convulsões. Começa aliás a in-
terrogar-se sobre se a intervenção de dois metais de naturezas diversas não seria essencial
para, colocando sobre a língua uma moeda de prata e tocando com a ponta da língua numa
moeda de ~~ouro~~ ^{estanho} de outro metal, que se torna necessário quando investe as pontas
dos dois metais.

Então,
nunca há
contração
de se faz int
vir um cont
to formado
por um so
metal
HGS 11, 204

38

A corrente eléctrica, desde Volta até Faraday

147

parecia ser essencial para a produção do fenómeno. Verificou, por outro lado, que ao colocar sobre a língua uma moeda de prata o tique da ponta da língua numa folha de estanho produz-se um sabor ácido que se torna acre, alcalino, quando inverte as posições dos metais; ora ele constata que esses mesmos sabores resultavam se contactos e antetoros da língua com uma máquina electrostática com carga positiva ou negativa, respectivamente.

Não era sequer uma ideia nova. Já nos livros em geral do século XVIII havia quem já tivesse notado a inversão entre os sabores. 489 III 205

Outra experiência curiosa foi a percepção dum "relâmpago" quando encostou, no escuro, um pedaço de metal ao olho e outro, de natureza diferente, ao mucoso da boca ou do nariz. Em fins de 1792, na sua "Memória terza sull' elettricità animale", Volta já está em condições de recusar a teoria galvânica, negando a existência de electricidade animal e afirmando que a corrente provem do contacto de metais diferentes.

- a raiz do sentimento como um electroscope muito sensível. A polémica com os galvanistas que Volta é obrigado a sustentar por um instante não o impede de fazer, enquanto sustenta uma dada polémica com os galvanistas, importantes, de terminar Volta por em conclusão uma série de factos essenciais. Instrumentos arcos metálicos com variados elementos, observa que a forma e comprimento das peças são indiferentes, e que a acção provocada só depende da identidade dos metais colocados nas extremidades; desde que a natureza desses elementos permanece a mesma, ^{existe entre eles} ~~é a mesma~~ sempre, ^{a mesma distância de separação} ~~em~~ no mesmo sentido. Assim, pode estabelecer a "escala" em que as substâncias se ordenam deste ponto de vista: zinco, estanho, ferro, ~~cobre~~ bronze, cobre, e por aí fora até ao carvão, que nunca se carrega por excesso. E, em 1795, Volta afirma claramente que se o contacto das substâncias A e B produz uma "tensão" AB e o das substâncias B e C uma "tensão" BC, então, o contacto de A e C produzirá a "tensão" AC que é a soma algébrica de AB com BC.

É Volta quem introduz a ideia de "tensão" e a de "potencial" em 1795. [E, 14 54]

Entretanto, Volta também descobriu que além do que se designa por condutores de "primeira classe" (como os metais ou o carvão) existem outros, os condutores de "segunda classe" ou condutores "úmidos" que são soluções químicas ou outros corpos já mencionados. Mesclando num condutor "úmido" dois condutores de "primeira classe" e ligando os entre si, directamente ou por meio dum fio, verifica que o fluido eléctrico circula permanentemente do metal situado mais alto na "escala" para o outro, e que esse movimento do fluido mantém-se até se abrisse o circuito. Era o primeiro gerador de corrente, o primeiro "electromotor" como ele disse.

Directo era o movimento de um corpo de primeira classe em relação ao líquido. 185 III, 206

Este magnífico dispositivo padecia contudo do defeito de gerar correntes muito fracas, e nos anos seguintes o essencial do trabalho de Volta tenderá a superar essa limitação. Enfim, numa carta escrita em Março de 1800 ao presidente da Royal Society para ser lida perante a dita associação, pode anunciar o nascimento daquilo a que chama —

por analogia com o "orgão eléctrico natural" do peixe torpedo — o "orgão eléctrico artificial" mas que, de facto, não a ser conhecido como a "pilha voltaica". Eis alguns paragrafos dessa famosa carta.

"Utilizo umas dezenas de pequenas placas ou discos de cobre, latão ou, melhor ainda, de prata, com cerca duma polegada de diametro (por exemplo, moedas) e um numero igual de placas de estanho ou, o que e muito melhor, de zinco com a mesma forma e tamanho aproximadamente; e digo aproximadamente porque não se requer precisão e, em geral, a grandezza e forma das peças metálicas e arbitraria, interessando somente que se possam colocar facilmente umas sobre as outras em forma de columna. Por outro lado, prepara um gran de numero de rodetas de cortão, felt ou outra materia esponjosa, capazes de reter bastante agua ou "humor", em que se deve embetê-las bem para que a experiencia resulte; tira no delas, a que chamarei discos molhados, faço-as um pouco menores que os discos metálicos a fim de que os não ultrapassem quando são intercalados entre eles como vou explicar.

O problema das fontes de energia não se resolveu por um principio de conservação de energia. Hobs III 208

Com todas estas peças em bom estado, quer dizer, os discos metálicos limpos e secos, os não metálicos embetidos em agua simples ou, o que e muito melhor, em agua salgada, e ligeiramente escurtidos para que não goteje o "humor", só me resta ordená-las convenientemente o que e simples e facil.

Assim, coloco horizontalmente sobre uma mesa ou outro suporte um dos discos metálicos, por exemplo de prata, e sobre ele adapto um de zinco; em cima deste segundo coloco um dos discos molhados, depois outro de prata equivo logo de outro de zinco do qual sobreponho outro disco molhado continuo sette mais, acabando um disco de prata com um de zinco sempre no mesmo sentido, isto e, a prata por baixo e o zinco por cima ou vice-versa, consoante a ordem por que conheci, e intercalo entre dois desses peças um disco molhado; continuo por a formar por estes outros uma columna tão alta quanto possível sem que ela se desmorone.

A corrente eléctrica.

Volta novamente voltou, coberto de honrarias e títulos, feito conde e condequão. A sua descoberta provocara em toda a Europa um interesse enorme, tanto maior quanto se acreditava que se despinha, enfim, duma meio para curar as molestias nervosas, de dar a vista aos cegos ou o curar os surdos. Mas não eram estas as maravilhas que a corrente eléctrica prometia.

Logo em 1800, dois ingleses chamados Michaelson e Carlisle Farham utilizaram uma pilha voltaica para estudar a passagem da corrente através da agua e mostrando que assim se produz o aparecimento de oxigenio e de hidrogenio; a mesma descoberta foi, aliás, feita simultaneamente pelo alemão Ritter.

Em 1802, Humphrey Davy (1778-1829), que os contemporâneos consideram o

A corrente eléctrica, desde Volta até Faraday

1304

148

maior químico britânico de então, consegue recolher totalmente os produtos da electrolise da água verificando que o volume de hidrogénio é sempre duplo do do oxigénio; em 1808 realiza a electrolise da potassa caustica, obtendo oxigénio e potassa metálica, e essa técnica permitiu-lhe, em seguida, isolar outros metais como o bário, o cálcio e o magnésio.

Entretanto, processava-se uma autêntica corrida ao gigantismo na construção de pilhas voltaicas. Bonaparte, que não só dominava a França mas a Itália do norte, interessou-se pelos trabalhos de Volta e até o convidou a vir a Paris mostrar-lhe os seus resultados; e por ordem do Primeiro Consul, instalou-se aí na Escola Politécnica (que ele próprio fundara) uma pilha de seiscentos pares, cada um com nove decímetros quadrados de área — um "electromotor" capaz de fornecer uma corrente de mais de 10 ampère sob uma "tensão" de 500 volt. Mas a Inglaterra encarregou-se de bater esse recorde: Wollaston projectou uma "pilha" segundo outro dos modelos de Volta, com dois mil pares metálicos mergulhados num líquido contido em mil recipientes de porcelana, e este aparelho (pago por uma subscrição pública) foi comprado a Davy pela Royal Society em 1810.

Davy vai utilizá-lo quer obter efeitos espectaculares quer para realizar experiências interessantes. Assim, estuda a elevação de temperatura das barras metálicas percorridas por correntes eléctricas, introduzindo a tal propósito o conceito de condutibilidade eléctrica e verificando, em particular, que a prata é o melhor dos condutores metálicos. Simultaneamente, descobre aquilo que foi chamado o "arco eléctrico", essa espécie de chama ardente que se estabelece entre dois electrodos de carbono ligados aos polos da sua monstruosa pilha; como Davy não tinha os electrodos horizontais, a chama era inclinada pela corrente ascendente do ar aquecido e daí veio, aliás, a denominação de "arco".

A potência da pilha era tal que Davy foi capaz de fundir todos os metais, liquefazer o quartzo e volatilizar o diamante, efeitos tanto mais grandiosos quanto se continuava a avançar na doutrina do calorico. Mas sem dúvida um dos grandes méritos matemáticos que enriqueceram as grandes descobertas e não foi Davy quem deu afinal um grande passo em frente na história da electricidade mas um modesto professor de física da universidade de Copenhague chamado Christian Oersted ao realizar a primeira experiência que mostrou a conexão íntima entre magnetismo e electricidade.

Oersted e os começos do electromagnetismo

Uma tradição injusta e tenaz pretende que a descoberta de Oersted foi mero fruto do acaso quando a verdade é que, desde que se observara no século XVIII que a faísca magnetiza o ferro se discutiram várias relações entre fenómenos eléctricos e magnéticos, e Oersted tratava

Sete de 1812

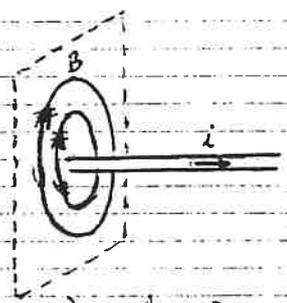
Revelouse em 1812 de que modo a matéria elétrica a qual tinha de ser conduzida em uma corrente elétrica de um elemento elétrico + e de um -

Impressão elétrica 1812 da Universidade de Copenhague

H65 III, 268

va há muito anos para a por em evidência. Só em 1820, quando demonstrava nos seus alunos os efeitos catódicos da corrente, levando à incidência um fio de platina, e que observou que uma bússola situada nas proximidades deixava de apontar para o Norte sempre que a corrente passava no fio.

A descoberta de Oersted tinha sido dificultada primeiro por ele não ter disposto durante vários anos senão de pilhas muito fracas, depois por ele procurar detectar uma interacção colocando a agulha magnética ~~paralela~~ ^{perpendicular} ao fio condutor. Da a interacção foi observada com a agulha paralela ao fio, e Oersted constatou logo que o desvio da agulha se processava no sentido contrário quando se invertia o sentido da corrente. Mas serão outros que tiraram as devidas consequências desta grande descoberta, fazendo com que o conhecimento da electricidade e do magnetismo avance mais nos vinte anos seguintes, que nos vinte séculos precedentes.



Regra da mão direita
 polegar - força
 indicador - campo
 médio - corrente

A descoberta de Oersted publicada (em latim!) em julho de 1820 provocou, no início, um certo ceticismo pois parecia estranha ao paradigma newtoniano e, nomeadamente, ao princípio da igualdade da acção e reacção: não "devia" a força exercida pela corrente sobre o ímã ^{ímã} ser exercida segundo a recta que os une e não perpendicular ao plano de ambos? Mas esta dúvida era fácil de dissipar experimentalmente e o novo fenómeno vai ser imediatamente investigado a fundo.

Para começar, é necessário dizer uma palavra de François Arago (1786-1853) de quem se falou na propósito da óptica, que estava presente nesse verão numa reunião científica realizada na Suíça onde foi exibido o resultado de Oersted. Embora ~~professor~~ astrónomo, Arago interessou-se pelo assunto e, de regresso a Paris, demonstrou que a corrente eléctrica não só desvia o ímã mas uma simples agulha de aço e, sobretudo, que o efeito produzido se amplia muito se o condutor da corrente eléctrica for enrolado à volta duma barra de ferro. De facto, o que Arago expunha à Académie des Sciences em Setembro de 1820 era o princípio do electro-ímã, cuja importância prática será muito grande.

No mês seguinte (Outubro de 1820) outro físico parisiense chamado Jean-Baptiste Biot aliado ajudado por um jovem médico seu amigo Félix Savart, determina, graças à duração das oscilações provocadas numa agulha magnética, as características do campo produzido nos vizinhos de um arame rectilíneo percorrido por uma corrente: o campo descreve círculos concêntricos em torno do arame [regra do polegar e do dedo da mão direita] e a sua intensidade é directamente proporcional à intensidade da corrente e inversamente proporcional à distância ao fio.

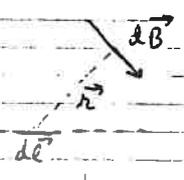
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Gay-Lussac colaborou (Págg 134)
 O galvanómetro inventado nos anos por Schweigger: uma agulha magnetizada era colocada no interior de um quadro de uma bobina chata que girava a partir da pág 134 214
 PSSC 580
 lb. 561

30^o
149

A corrente eléctrica desde Volta até Faraday

Este resultado foi logo generalizado, de modo a exprimir a contribuição $d\vec{B}$ ao valor do campo magnético dado pela corrente de intensidade i que percorre o elemento $d\vec{\ell}$ em função do vector \vec{r} que vai de $d\vec{\ell}$ ao ponto do espaço considerado, pela fórmula $d\vec{B} = i d\vec{\ell} \wedge \vec{r} / r^3$ (s. un. de Gauss) e, por integração, vê-se facilmente que, no caso do fio rectilíneo, se a corrente é perpendicular a \vec{r} . Habitua-se por a chamar-lhe a lei de Biot e Savart, ainda que ela tenha realmente sido deduzida por Laplace das experiências de seus contemporâneos.



Parece ter sido Oersted quem afirmou que, se uma corrente eléctrica actua sobre um íman, este deveria actuar sobre uma corrente e, normalmente, sobre um "arco eléctrico". Davy verificou, em 1821, que assim acontece de facto, a força exercida sendo aliás perpendicular à que sofria o polo de outro íman. Hoje escrevemos $d\vec{F} = i d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$ (leixo a regra da mão esquerda), fórmula comumente atribuída a Laplace mas que deve ter sido descoberta por Ampère. É aliás mais do que tempo de falar de Ampère, o primeiro dos grandes nomes da história do electromagnetismo.

Ampère e a electrodinâmica

Anne-Marie Ampère (1775-1836) teve uma vida infeliz. Adolescente, viu o pai ser executado na guilhotina; adulto, perdeu jovem a primeira mulher, com quem se entendia bem, e fez um segundo casamento que foi uma catástrofe. Com talento literário - a sua obra poética anunciava o que viria a ser o romantismo - cedo se afirmou como um génio e, sobretudo, um matemático de valor (teoria das probabilidades, minimização de integrais, análise da "cadeia" suspensa), de modo que antes dos 40 anos ocupou na Académie des Sciences a cadeira deixada vaga pela morte de Lagrange (1813). Mas foram os seus trabalhos de electrodinâmica que o imortalizaram: a sua "Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience", datada de 1827, é um dos livros clássicos da história da física e Maxwell, que sabia do que falava, devia mais tarde que ele fazer o "Newton da electricidade".

Mesmo sem analisar em pormenor a obra de Ampère, há que citar pelo menos três pontos essenciais, aliás relacionados entre si, e que são o cerne das interações entre correntes eléctricas e o desenvolvimento da ideia de que, na sua essência, o magnetismo é reductível à electricidade.

Oersted e os seus émulo tinham verificado que a corrente exerce forças sobre um polo magnético e, inversamente, que os polos magnéticos actuam sobre as correntes.

- e, como assimilarámos, fôra até o próprio Ampère que determinara a forma desta lei de interações. Assim, Ampère foi levado a pensar que algo deve haver em comum entre correntes eléctricas e substâncias magnéticas, e como estas interagem entre si, perguntou-se se duas correntes eléctricas também não exercem forças uma sobre a outra.

A resposta era evidentemente afirmativa, e Ampère constatou que duas correntes paralelas e do mesmo sentido se atraem enquanto as de sentido contrario se repelem; verificou que a força de interações também depende do ângulo formado pelo dois condutores. Após um trabalho faciente em que experiência e teoria se afundaram mutuamente acabou por determinar a lei fundamental dessa interações cuja forma é complicada porque nela intervêm três ângulos: o ângulo θ e θ' que os elementos orientados $d\vec{s}$ (tomado pela corrente i) e $d\vec{s}'$ (tomado pela corrente i') fazem com o raio vector \vec{r} que os une, e ainda o ângulo φ que fazem entre si as direcções de $d\vec{s}$ e de $d\vec{s}'$. Apesar de tudo, Ampère soube escrever a expressâo de uma tal força sob a forma clara e sucinta $dF = \frac{i i' d\vec{s} d\vec{s}'}{r^2} (\cos \varphi - \frac{3}{2} \cos \theta \cos \theta')$ a qual se deduzem por integraçâo todas as casos particulares.

O mais interessante é que Ampère tentou inclinar nesta sua lei geral também as suas acçõs mútuas entre os ímãs ou entre os ímãs e as correntes, partindo da ideia de que um ímã é somente um meio onde existem permanentemente correntes eléctricas no plano perpendicular ao seu eixo (direcção Norte-Sul). No início, concebeu essas correntes como macroscópicas - clara illustraçâo de que o principio de conservaçâo da energia ainda não fôra apreendido - e honra-o não ter hesitado em se ferir que fôra o seu amigo Fresnel quem lhe suggerira a necessidade de considerar tais correntes como microscópicas, como correntes moleculares. De qualquer modo foi Ampère quem demonstrou rigorosamente que, dada a lei de força entre correntes eléctricas que ele próprio conhecera, era possível deduzir as propriedades das substâncias magnéticas da hipótese da existencia de correntes moleculares. Em particular, explicou que as substâncias magnetizáveis como o ferro ou o níquel são a sede de correntes moleculares orientadas no eixo, o processo de magnetizaçâo consistindo na orientaçâo regular dessas micro-correntes, e mostrou que uma bobine percorrida por uma corrente, um solenoide, tem as propriedades dum ímã natural.

Grças a Ampère, não foram apenas os fenômenos de interações entre correntes eléctricas que ficaram identificados e esclarecidos, obteve-se sobretudo a integraçâo dos fenômenos magnéticos na teoria da electricidade. Apesar dos progressos ultimos, nomeadamente as correcçõs introduzidas pela física quântica, as ideias de Ampère permanecem na base da interpretaçâo dos fenômenos magnéticos.

A termo-pilha e as leis dos circuitos eléctricos

Em 1821, logo após a famosa experiência de Cuvier, o alemão Thomas Seebeck descobriu o efeito que seria chamado termo-eléctrico. Para verificar a ideia de Volta de que a corrente da pilha era uma mera consequência do contacto de metais diferentes, ligou um disco de cobre a um de bismuto tentando detectar qualquer corrente, mesmo fraca, assim produzida. Mas se não observou corrente alguma encontrou algo de inesperado: havia realmente um débil fluxo eléctrico mas somente quando apertava com a mão uma das soldaduras dos metais. Seebeck acabou por demonstrar que um anel condutor formado por dois metais diferentes se torna um gerador de corrente desde que as junções dos metais sejam mantidas a temperaturas diferentes.

Um ano mais tarde, em 1834, um relojoeiro francês amador de física, Peltier, foi em evidência o efeito recíproco, isto é, que numa cadeia de metais diferentes percorrida por uma corrente eléctrica se verifica um arrefecimento (em vez dum aquecimento) naquelas zonas em que a produção do efeito Seebeck requer a manutenção de temperaturas mais baixas. O efeito Peltier permitiu que Lenz congelasse a água pela passagem de uma corrente e, embora a sua interpretação com o efeito Seebeck só fosse feita nos meados do século por Lord Kelvin, já então o fenómeno tivera consequências de maior importância.

De facto, em contraste com a pilha voltaica que depende da polarização, a termo-pilha mostrava-se capaz de fornecer corrente com uma "força electrodinâmica" quasi constante. Foi ela que permitiu ao alemão Georg Ohm determinar experimentalmente a lei que hoje tem o seu nome: a "força electrodinâmica" \mathcal{E} , dependente do número de elementos geradores colocados em série ($\mathcal{E} = n\mathcal{E}_0$), é proporcional à intensidade I da corrente que percorre um circuito, e o coeficiente de proporcionalidade resulta da soma de duas parcelas, uma R que também cresce com o número de geradores ($R = nR_0$) e corresponde à própria "resistência" dos geradores, outra r que é a "resistência" do circuito exterior.

$$\mathcal{E} = (R + r)I$$

Além do conceito de resistência, Ohm também introduziu o de resistividade ou resistência específica e, na prática, aclarou completamente o comportamento dos circuitos eléctricos, que procurou interpretar por analogia com os fenómenos de propagação do calor já então estudados por Fourier. Mas só em 1847 é que Hirchhoff demonstrou que essa "força electrodinâmica" de que Ohm falava era apenas o potencial eléctrico, introduzido por Poisson e Green na teoria da electricidade a partir de métodos analíticos.

Faraday e a indução eléctrica

Para finalizar este capítulo resta-nos referir a contribuições de Michael Faraday, encontro grande homem de quem já falamos a propósito da electroquímica e de quem voltaremos a falar na próxima ~~parte~~ lição, quando nos referirmos ao aspecto inventivo mais importante da sua obra, a introdução do conceito de campo. Mas, por ora, ocupar-nos-emos apenas da sua descoberta do fenómeno da indução eléctrica, isto é, a possibilidade de transformar energia mecânica em Energia eléctrica.

Como um pedaço de ferro ~~foi~~ colocado numa bobine percorrida por uma corrente se magnetiza, parecia então natural procurar o fenómeno inverso e ver se um íman permanente não poderia provocar o aparecimento de uma corrente num fio. Hoje qualquer físico teria tendência a responder negativamente, pois donde vinha a energia ~~de~~ de perpetuar a corrente mas, nessa época, o princípio de conservação da energia ainda não fora formulado, e muitos tentaram observá-lo sem sucesso. Até se conta a história de um escrupuloso físico suíço que, para evitar que a presença do íman influenciase o galvanómetro ligado à bobine e destinado a detectar a corrente colocara este aparelho de medida na sala vizinha; introduzia o íman na bobine e "ia ver" se o galvanómetro acusava uma corrente, mas a sua persistência não foi recompensada, o galvanómetro nunca deu sinais de vida.

Faraday teve menos escrupulos ou mais intuições, pôs o galvanómetro bem na sua frente e constatou que realmente "passava corrente" ainda que somente em breves intervalos em que introduzia ou retirava o íman da bobina. As suas correntes, ~~eram~~ tinham de sentido inverso não eram produzidas, como ele dirá mais tarde, pela presença de um campo magnético mas pela variação do fluxo desse campo. ~~Uma~~ Com esta descoberta da possibilidade de produzir corrente eléctrica por meio de trabalho mecânico, implícita na descoberta de Faraday, encerrava-se o ciclo das grandes descobertas do electromagnetismo e, simultaneamente, abria-se a possibilidade de dar à corrente eléctrica aplicações práticas imagináveis até então.

Mas se Faraday conseguiu produzir (a 24 de Novembro de 1831) produzir correntes eléctricas permanentes por indução e se Pixii, Clarke e outros tentaram logo a seguir a construção de máquinas eléctricas baseadas na sua lei, só em 1871 é que o belga Zenobe Gramme construiu o primeiro dinamo. Foi uma grande data na história da técnica porque, entretanto, o conhecimento científico da electricidade de já tinha avançado muito.

A partir de 1829 Devaux, 78 ↓

Amfite e de la Rive tinham observado o fenómeno em 1822 sem lhe atribuir particular importância

Les Papp 197

Papp 198

~~dependência~~ do número de elementos colocados em série ($E = nE_0$), é proporcional à corrente que percorre um dado circuito, ~~o~~ ^é coeficiente de proporcionalidade ^{representa de} ~~entre a~~ soma de duas parcelas; uma, R , ~~que~~ também cresce com o número de pilhas ($R = nR_0$), ^{corresponde à} resistência dos próprios pilhas, a outra r é a resistência total do circuito exterior.

$$E = (R+r)I$$

Ohm não se introduziu o conceito de resistência mas também o de resistência específica ou resistividade e, na prática, acabou completamente o comportamento dos circuitos eléctricos, ~~procurando~~ ^{obtenido} um fundamento teórico desse comportamento por analogia com o fenómeno de propagação do calor já então estudado por Fourier. Mas só nos meados do século (1845) é que Rohrbaugh ~~vai~~ ^{vai} demonstrar que ~~essa~~ "força electrodinâmica" de que Ohm falava é apenas o potencial eléctrico que Poisson e Green tinham introduzido ~~anteriormente~~ nas teorias da gravitação e de electricidade a partir de Mecânica analítica de d'Alembert e de Lagrange.

Faraday e a indução eléctrica

Falamos agora de ~~esta~~ ~~me~~ ~~da~~ ~~algumas~~ ~~palavras~~ de Michael Faraday (1791-1867), ~~um~~ ~~dos~~ ~~maiores~~ ~~maestros~~ ~~da~~ ~~história~~ ~~da~~ ~~física~~. De origem modesta, filho dum ferreiro, ~~não~~ ~~tendo~~ ~~nenhuma~~ ~~possibilidade~~ ~~de~~ ~~prosseguir~~ ~~estudos~~ ~~além~~ da escola primária, ~~ele~~ ~~começou~~ a ganhar a vida como aprendiz de encadernador, preferiu que lhe deu ocasião de se instruir lendo à noite a livros que lhe eram cedidos. Leituras ocasionais de livros de física despertaram-lhe um enorme interesse pela ciência e após outras tentativas infrutíferas conseguiu empregar-se em 1813 no laboratório de Davy embora com um estatuto que era quasi o de um criado. Mas a sua capacidade de trabalho igualava o seu entusiasmo e, meia dúzia de anos mais tarde, já é reconhecido como o mais importante dos assistentes de Davy.

Nesta primeira fase, e como competia a um colaborador de Davy, os seus trabalhos dirigem-se sobretudo para a química - deveras-lhe nomeadamente, a descoberta do benzeno - mas também se ocupa de questões de química-física realizando uma obra de precursor no domínio da liquefação dos gases. Mas, após a experiência de Oersted, os fenómenos eléctricos apaixonaram-no cada vez mais e aí que ele dará a sua medida: há que citar, pelo menos, as suas investigações fundamentais respeitantes à electrólise, a sua descoberta fundamental da indução eléctrica e, enfim, as suas concepções revolucionárias sobre o campo.

Nada tivemos da sua obra de electroquímico,

Introdução

A descoberta por Volta, em 1800, de um gerador de corrente eléctrica, a "pilha" deu ao que em 1820 Oersted evidenciara o primeiro efeito que liga a electricidade ao magnetismo, o desvio duma agulha magnetica pela acção duma corrente eléctrica, e esse efeito recebeu logo uma expressão quantitativa graças a Biot e Savart e a Laplace.

Na sequência de uma sugestão de Oersted, também foi verificado que, simetricamente, o magnetismo actua sobre a corrente eléctrica, e a determinação do valor dessa força (atribuída em geral a Laplace) deve-se a Ampère. Mas a grande obra de Ampère, ainda ~~em~~ ^{em} 1820, uniu a descoberta de interacção entre as próprias correntes eléctricas e, a partir daí, a concepção dos corpos magneticos como sendo apenas a sede permanente de micro-correntes, de correntes moleculares, convenientemente orientadas; com a "electrodinamica" de Ampère deixava de haver qualquer necessidade de admitir a existência dessas estranhas "cargas magneticas" impossiveis de isolar, e fundiam-se as doutrinas do magnetismo e da electricidade.

~~Em 1831, Faraday descobriu este ciclo de grandes descobertas~~ ^{foi enunciado por Faraday em 1831} ~~no momento da indução~~ Este ciclo de grandes descobertas ~~no momento da indução~~ ^{com a descoberta de} ~~o~~ ^o fenómeno da indução: um campo magnetico variavel e susceptivel de produzir uma corrente eléctrica. Para entender um caso muito simples, imaginemos um fio condutor fechado, digamos um anel feito de arame, e qualaproximamos rapidamente ~~de~~ ^{de} um imã, ~~então~~ o arame será percorrido por uma corrente que durará enquanto durar o movimento do imã. O efeito também se obtém colocando na vizinhança do anel metalico um fio percorrido por uma corrente eléctrica; quando esta corrente for interrompida ou restabelecida (o que corresponde, afinal, a anular ou criar bruscamente o respectivo campo magnetico, quer dizer, a variar a intensidade desse campo) o anel será percorrido por uma corrente induzida.

E neste fenomeno de indução que se fundam essencialmente os motores eléctricos modernos. Dispensando trabalho, produzido por exemplo pela água que sai duma baragem, pode-se fazer variar constantemente o campo magnetico que penetra num circuito fechado e produzir nele uma corrente induzida, conseguindo assim transformar energia mecanica em energia eléctrica. Dado que a economia da nossa civilização é baseada no dispêndio e até no desperdício de energia, e que a energia eléctrica desempenha um papel fundamental neste processo, seria difícil exagerar a importância das consequências praticas da descoberta da indução. Todavia, e de outro aspecto da obra de Faraday, que se voltará afinal ainda mais importante, que hoje vou ~~me~~ ^{me} falar: a

introdução de ideias que conduzirão ao conceito físico de campo e, no entanto dentro o paradigma mecanicista, contribuirá de um modo decisivo para a eclosão da física moderna.

Faraday e as linhas de força

As concepções físicas de Faraday, autodidacta exemplar, eram tão pouco convencionais como a sua própria vida, que o transformara de aprendiz de encadernador e de moço de recados de Davy num dos pilares da venerável Royal Institution: excepção entre os seus contemporâneos, Faraday não estava profundamente marcado pelo mecanicismo reinante. Experimentador muito hábil, ~~fazia variar~~^{variava} incansavelmente as condições de observação dos fenómenos, acumulando assim os dados empíricos, ~~mas não~~^{e como foi} ao mesmo tempo igualmente dotado de um bem inapreciável que é uma poderosa imaginação criadora, os dados empíricos serviam-lhe para estimular essa imaginação, levando-o a esboçar hipóteses capazes de explicar de forma simples tudo quanto tinha observado. Como tais hipóteses não eram entravadas pela ideologia dominante, o mecanicismo, percebeu que elas tinham sido levadas a desenvolver concepções duma heterodoxia fecunda. Ao nível dum Faraday, quando se constata a frescura e a originalidade com que ele aborda os problemas, quasi se é tentado a proceder a um "elogio da ignorância".

1791-86

Ao investigar os fenómenos electrolíticos, e de acordo com a técnica de examinar todas as variantes das condições experimentais, Faraday foi levado a considerar o que ocorria quando os electrodos eram mergulhados num líquido não condutor, como é o caso de muitas substâncias orgânicas (petróleo, por exemplo). É claro que tais líquidos não se decompunham, como as soluções ácidas ou alcalinas, e todavia influenciavam os electrodos que adquiriam assim cargas diferentes consoante a natureza do líquido.

Faraday deu-se conta da importância do fenómeno e, por generalização, foi levado a considerar experimentalmente que ele afectava ^{tantos} dos condutores como qualquer. Assim, se entre duas placas metálicas planas e paralelas, carregadas electricamente, for colocado um isolador, por exemplo uma placa de vidro, a força atractiva ou repulsiva entre as placas diminui, e essa diminuição é característica da natureza física do isolador. Constatou-se um fenómeno análogo para as interacções entre pólos magnéticos, embora a constante específica de cada substância seja neste caso diferente da do caso anterior.

Analicamente, a situação é fácil de decifrar em electrostática como em magnetostática, por lá basta dar as leis de Coulomb as formas mais gerais

$$F = \frac{1}{\epsilon} \frac{qq'}{r^2} \qquad F = \frac{\mu}{4\pi} \frac{qq'}{r^2}$$

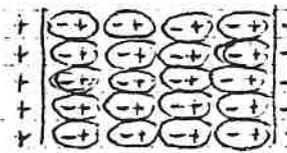
onde ϵ é a constante dieléctrica e μ a permeabilidade magnética do meio onde se situam as cargas eléctricas ou os pólos magnéticos. Para o vácuo, $\epsilon = 1$ e $\mu = 1$ e para

o ar tais valores permanecem praticamente com um valor igual à unidade; mas já para os outros dieléctricos temos $\epsilon > 1$ (e, em geral, $\mu > 1$) estes valores, dependendo da natureza do dieléctrico, de maneira que as fórmulas exprimam sempre o valor exacto da intensidade da força. O problema revela-se interessante é quando se trata de entender as razões físicas duma tal variação de intensidade.

Não foi difícil conceber um modelo capaz de explicar este comportamento. O dieléctrico é constituído por ~~dipolos~~ moléculas, que ou são dipolos ou se tornam dipolos sob a acção do campo electrostático, capaz de provocar no interior duma molécula a separação de quantidades iguais de electricidades de sinais contrários. Assim, no isolador que está situado entre as duas armaduras planas dum condensador com

gado formam-se iam portanto autênticas cadeias de dipolos

moleculares, cujas cargas se concentram exactamente em

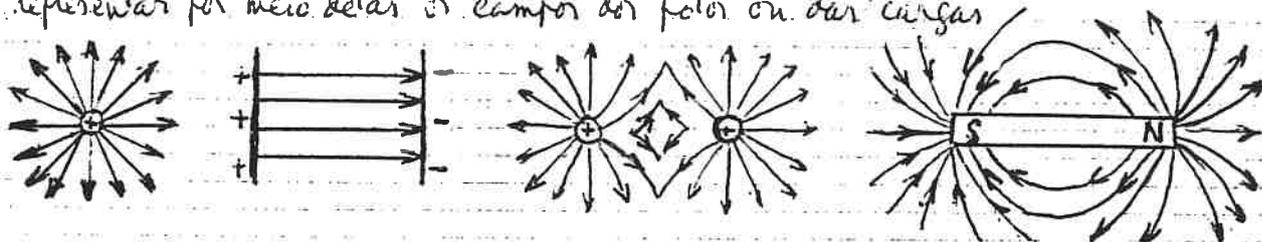


todos os pontos situados nas vizinhanças imediatas das próprias armaduras, onde as cargas de "polarização" do dieléctrico têm compensar parcialmente as próprias cargas das armaduras. Compreende-se bem, com este modelo, as propriedades do condensador: para assegurar um certa diferença de potencial entre as armaduras do condensador será necessária uma carga eléctrica suplementar quando entre essas armaduras se coloca um dieléctrico, o que é uma maneira de dizer que a presença do dieléctrico aumenta a capacidade do condensador.

Este modelo que era aceite por Faraday como pelo seus contemporâneos valia, "mutatis mutandis" para o magnetismo. Onde a heterodoxia das ideias de Faraday se começou a manifestar era quando se tratava de entender a situação na ausência de dieléctrico. De acordo com o paradigma mecanicista, a acção das cargas dos condutores sobre um corpo de prova quer dizer, uma pequena carga eléctrica era menor quando havia um dieléctrico porque este, estando já polarizado, enfraquecia essa acção das cargas dos condutores mas, de qualquer modo, tratava-se duma acção instantânea à distância; e, na ausência de dieléctrico, o espaço encontrava-se livre e nu, era realmente um vazio que se limitava a receber forças com velocidade infinita. Ora Faraday tendia a raciocinar como se o vazio fosse um dieléctrico como os outros, susceptível de ser imaginado como uma cadeia de dipolos de éter; no seu espírito, a introdução dum dieléctrico vinha reforçar uma situação pré-existente e não ~~destruía~~ impor a existência de algo radicalmente novo pois, em todos os casos, cargas e correntes o que produzem é um certo estado de tensão do espaço o qual se manifesta através das forças que actuam sobre os corpos de prova.

Para descrever tais estados de tensão do espaço, que não traduzimos pelas expressões campo eléctrico e campo magnético e que se considera cada vez mais claramente como

realidades físicas, Faraday vai servir-se do conceito intuitivo de linhas de força, que são em cada ponto as linhas tangentes ao campo. Espalhando limacha de ferro sobre uma folha de papel colocada sobre um ímã, tornava visíveis as linhas de força do campo magnetostático. Mas a teoria do potencial, introduzida por Laplace (1772) como um artifício matemático para simplificar os cálculos e desenvolvida por outros como Poisson (1813) e Green (1828), permitia calcular as linhas de força e representá-las por meio delas os campos dos polos ou das cargas.



No pensamento de Faraday, as linhas de força que traduzem as tensões existentes no espaço ou, como nos dinamos hoje, as características dos campos tornaram-se paulatinamente não só uma realidade física mas a realidade física essencial. Os condutores surgiam-lhe como uma espécie de buracos no campo e as cargas como uma espécie de fixação introduzida para individualizar os pontos onde comecam ou acabam as linhas de força. Daí conclui, nomeadamente, que nos condutores em equilíbrio só pode haver cargas à superfície e, para o verificar, encerra-se numa grande caixa metálica (a "gaiola" de Faraday) na qual são produzidas fortes descargas eléctricas sem que os instrumentos sensíveis de medida que levava consigo dêem qualquer sinal disso.

Linhas de força e indução

No domínio da electrostática, a teoria da acção a distância e as brilhantes ideias de Faraday sobre a realidade essencial das linhas de força convergiam às mesmas ideias e, portanto, a teoria remanece não se sentia abalada com tais especulações. Mas quando se abordavam os fenómenos electromagnéticos, Faraday marcava alguns pontos em bruto sem obter uma visão insosligável. Importa ver, contudo, em que termos ele interpretava os fenómenos electromagnéticos. Graças à sua concepção das linhas de força, ele será capaz de interpretar a indução como um efeito simétrico do fenómeno de Oersted e os seus argumentos acabaram por levar muito longe.

A imagem das linhas de força não só permite exprimir a direcção e o sentido do campo mas também a sua intensidade, assim, se a intensidade do campo num ponto do espaço for multiplicada por um factor k , só haverá que daí multiplicar por k o número de linhas de força que convencionalmente o representam. Por outro lado, se considerarmos com Faraday que — numa substância magnética ou dieléctrica ou, mais

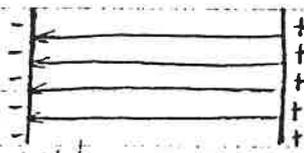
32-1

153

O campo electrodinâmico e a síntese maxwelliana

simplesmente, no vácuo — um campo traduz sempre um certo estado de "tensão" do espaço, eventualmente acompanhado duma polarização eléctrica ou magnética da matéria, torna-se evidente que uma variação do campo, um acréscimo ou diminuição do número de linhas de força, corresponde sempre a uma certa corrente de deslocamento, eléctrica ou magnética. Vale a pena analisar mais de perto este ponto essencial.

Consideremos, para tomar um caso simples, o espaço compreendido entre as armaduras planas dum condensador, e pouco nos importa especificar se aí se encontra um dieléctrico material ou apenas o vácuo pois, segundo Faraday, não há diferença de fundo entre as duas situações. Com as armaduras descarregadas, não há qualquer tensão no espaço que as separa que, por consequência, não se encontra polarizado. Mas se carregarmos as armaduras com cargas $+q$ e $-q$ cria-se um campo eléctrico, passa a existir uma tensão nesse espaço que pode ser interpretada pela formação de dipolos (no éter, ou no éter e no dieléctrico). Assim, se for a armadura da direita que recebe uma carga positiva, o aparecimento do campo entre as armaduras vai traduzir-se pelo aparecimento em cada elemento de volume desse espaço duma pequena carga positiva que se desloca ligeiramente para a esquerda e duma pequena carga ^{negativa} ~~positiva~~ que se desloca ligeiramente para a direita.



Este conjunto de cargas positivas que se deslocam todas (e em todos os elementos de volume) ligeiramente para a esquerda dá, de facto, a uma corrente eléctrica da direita para a esquerda, e, com as mesmas convenções, o deslocamento homólogo de cargas negativas da esquerda para a direita equivale também a uma corrente análoga da direita para a esquerda. O aparecimento de linhas de força, expressão da criação dum estado de tensão no espaço, traduziu-se afinal pelo aparecimento duma breve corrente de deslocamento, dirigida segundo as próprias linhas de força e proporcional à sua variação. Se aumentarmos a carga das armaduras, a intensidade do campo aumenta, aumenta o estado de "tensão" do espaço, o momento dos dipolos cresce correlativamente e, dessa variação, resulta uma nova corrente de deslocamento; pelo contrário, se as armaduras forem descarregadas, o estado de "tensão" desaparece, o campo tende para zero, e a corrente de deslocamento processa-se agora da esquerda para a direita até que a polarização pré-existente se anule. Estas considerações permanecem fundamentalmente idênticas se, ao lugar de um campo eléctrico, considerarmos um campo magnético, e a conclusão é clara: a variação instantânea dum campo eléctrico ou magnético corresponde uma corrente de deslocamento que lhe é proporcional.

Encaremos nesta perspectiva o fenómeno de indução. Numa região do espaço a qual corresponde uma permeabilidade magnética μ encontra-se um fio condutor fechado que limita uma área S e cujo contorno é atravessado por um campo magnético de intensidade \vec{H} ; para não complicar, suponhamos o campo perpendicular ao plano do condutor. Se no intervalo de tempo infinitesimal dt a intensidade do campo variar de $\mu d\vec{H}$, produzirá em consequência uma corrente de deslocamento cuja densidade \vec{j} tem em cada ponto o valor $\vec{j} = \mu \partial \vec{H} / \partial t$ e, portanto, a corrente de deslocamento que atravessa a área limitada pelo fio condutor será $\vec{J} = \mu S \partial \vec{H} / \partial t$.



A ideia de Faraday, que não temia levar até ao fim as consequências das suas próprias hipóteses, é que esta corrente de deslocamento magnética deve engendrar a sua volta um campo eléctrico, do mesmo modo que (conforme a experiência de Ørsted) uma corrente eléctrica engendra a sua volta um campo magnético. Que uma fosse uma autêntica corrente eléctrica, a outra uma mera corrente de deslocamento parecia-lhe tão pouco essencial que, a saber, o campo eléctrico produzido por uma corrente de deslocamento magnética devia ter a mesma expressão em função do campo magnético produzido pela corrente eléctrica (lei de Biot e Savart ou de Laplace). É o maravilhoso da história é que, nestes termos, obtinha-se efectivamente a descrição quantitativa correcta do fenómeno de indução. Não seria pois de crer que, por muito intrínsecas que parecessem, as ideias de Faraday eram algo mais que uma pura especulação mental?

Faraday definiu força e campo, fisicamente, logo em 1858

Maxwell e a teoria matemática do campo electromagnético

É para citar, de passagem o nome de Weber, professor em Göttingen e colaborador de Gauss, que se dedicou com uma paciência evangélica à determinação das unidades eléctricas e à construção de aparelhagem necessária às medições correspondentes. No âmbito destas actividades, Weber trocou com a constatação curiosa de que a constante c que figura, por exemplo, na lei de Biot e Savart e na lei de indução de Faraday não se trata de um número puro mas tem as dimensões físicas de uma velocidade, conseguiu mesmo determinar o valor desta "velocidade" e compará-la a medidas eléctricas e verificou que era da ordem de grandeza da velocidade da luz. Naturalmente, Weber e outros suspeitaram que não se tratava de mera coincidência, mas ~~Weber~~ todos permaneceram apegados às concepções da época a distância, de forma que embora Weber tivesse desenvolvido muito trabalho de teoria electrodinâmica os seus trabalhos estavam totalmente a cair num total esquecimento. É pois só Maxwell, o filho espiritual de Faraday e que viveu capaz de perceber

1319

154

O campo eletromagnético e a síntese maxwelliana

(4)

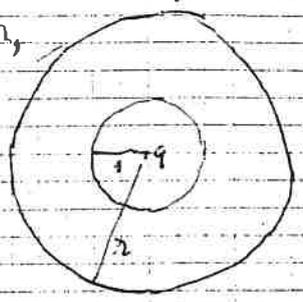
James Clerk Maxwell (1831-1879) era um menino prodígio escocês, que entrou na universidade aos treze anos e começou a produzir trabalho científico aos quinze. Homem simples e bondoso, cristão fervente mas cheio de irreverência e de sentido de humor, foi professor em Aberdeen e em Londres, e morreu novo, deixando-nos uma obra fundamental quer no domínio da física estatística — tendo tido a oportunidade de voltar a citar — quer no domínio do Electromagnetismo e da Óptica. Considerado geralmente como o maior físico teórico dos dois séculos que mediam entre Newton e Einstein, é nomeadamente o autor do famoso "Tratado de Electricidade e Magnetismo" (1873) a qual, sem menospesar a obra dos seus continuadores em que figuraram homens com a estatura de um Heitz ou de um Lorentz, constitui a expressão quasi definitiva do Electromagnetismo e da Óptica clássicos, que Maxwell funde num sistema grandioso.

Com uma imaginação criadora tão grande como a de Faraday mas com uma preparação e dotes matemáticos incomparavelmente maiores, Maxwell vai dar uma forma analítica precisa às intuições de que se fez proximidade e, completando as leis de origem experimental com um termo novo de inspiração puramente teórica, dá-nos através um sistema de equações, as f. celeberrimas equações de Maxwell que, com o apoio de algumas relações adicionais, permitem puser a totalidade das fenómenos não só da Electricidade e do Magnetismo mas também da Óptica. É claro que não podemos pretender aqui examinar com precisão as equações de Maxwell, que possuem excertos matemáticos já relativamente elaborados, mas vamos tentar, com a praxe da casa, falar uns minutos sobre elas.

A primeira das equações de Maxwell não é mais do que uma forma local de exprimir o conteúdo da lei de Coulomb. A lei de Coulomb na electrostática, $\vec{F} = \frac{1}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$, numa vez que se adoptam as concepções de Faraday de que o espaço está num estado de "tensão" mesmo na ausência de qualquer corpo de prova, dá realmente expressão à sob a forma de duas leis $\vec{F} = q_1 \vec{E}$ e $\vec{E} = \frac{1}{\epsilon} \frac{q}{r^2} \hat{r}$, em que a segunda define, em cada ponto, o valor do campo eléctrico \vec{E} criado pela carga pontual q . Todavia, e sob esta forma, a lei está escrita como uma lei de acción à distância, enquanto segundo Faraday, quer exprimir o valor de campo em cada ponto em função de suas próprias condições nesse mesmo ponto.

Para Maxwell, a lei de Coulomb traduz, de este modo, a insubsistância da carga eléctrica, a sua indistribuíbilidade. Se num ponto do espaço colocarmos uma carga q isto originará segundo Faraday e Maxwell um corrente de deslocamento para o exterior

(no sentido das linhas de força) de modo a que a quantidade de electricidade contida num volume qualquer que inclua o ponto onde situamos a carga permaneca constante. Para Maxwell a quantidade de electricidade que, na sequencia da corrente de deslocamento atravessa a esfera de ^{raio q} ~~raio unidade~~ ^{raio unidade} centrada em $+q$ mede o valor do campo sob a forma $q = \epsilon E$. Uma esfera de raio r , concentrica a primeira sera atravessada pela mesma quantidade de electricidade e, como a sua superficie e' r^2 vezes maior, na esfera de raio r decora' apenas um campo r^2 vezes menor.



$$r^2 \epsilon E = q \quad \text{ou} \quad E = \frac{q}{\epsilon r^2}$$

Localmente, o deslocamento de electricidade para o exterior dum volume infinitesimal sera dado por um certo operador diferencial. Isto e' $\text{div } \epsilon \vec{E}$ e teremos

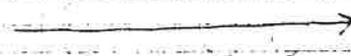
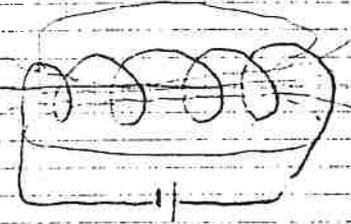
(1)
$$\text{div } \epsilon \vec{E} = 4\pi p \quad (p \text{ densidade de carga})$$

Apesar da analogia formal entre as leis de força da electrostatica e da magnetostatica, a equação correspondente a esta para o campo magnetico escreve-se

(2)
$$\text{div } \mu \vec{H} = 0$$

e exprime afinal o facto essencial que o magnetismo existe sempre sobre a forma de dipolos magneticos, que não ha' cargas magneticas reais, que um polo magnetico positivo esta sempre acompanhado com um polo magnetico negativo. A imagem das linhas de força de imã e' enganadora porque, de facto, não ha' linhas de força magneticas num certo orden ou comeco a distancia finita, ou se fecha sobre si mesma ou se perde no infinito. A boa imagem d'uma fonte de campo magnetico

não e' um imã e' um solenoide e a razão por isso q' se, em termos gerais, qualquer campo \vec{F} tal que $\text{div } \vec{F} = 0$ e' de tipo solenoide.



As nossas duas últimas lições foram consagradas, respectivamente, à evolução da óptica até aos trabalhos de Fresnel e à evolução da electricidade até aos tempos de Faraday.

Na primeira, lembramos essa longa luta que se desenvolveu durante quasi dois séculos entre as concepções corpuscular e ondulatória da luz para explicar um conjunto de fenómenos cada vez vez mais vasto e que, graças à obra de Fresnel, acabou por conduzir ao triunfo da doutrina ondulatória. Em meados do século XIX, não parecia licito duvidar que a luz era um processo ondulatório, correspondendo a ondas transversais propagando-se num meio elástico e subtil, o éter luminoso, que preenchia todo o espaço e penetrava todos os corpos.

Quanto à história do magnetismo e da electricidade, vimos na segunda lição os pacíficos esforços que a compreensão da electrostática exigiu aos homens do século XVIII. A descoberta da corrente eléctrica por Volta permitiu descobrir a existência de ligações íntimas entre magnetismo e electricidade e reduzir, finalmente, os fenómenos magneticos a efeitos globais de micro fenómenos ~~magnéticos~~ eléctricos. Foram sobretudo Oersted e Ampère que desenvolveram o electromagnetismo, culminado com a obra de Faraday em cujo pensamento intuitivo surge o conceito fundamental de campo electromagnético quer dizer, a ideia de que a energia eléctrica não se localizaria nos condutores onde circulam as cargas mas nos dieléctricos que os separam, o mais simples dos quais é próprio espaço.

Deste modo, e na mesma época em que se impunha a concepção fresneliana da existência dum éter luminoso, Faraday era conduzido a propor a aceitação da existência dum éter electromagnético, sede da existência dessa distribuição de energia do campo electromagnético visualizada pelas linhas de força. E, assim, o espaço de Huto de Newton, extenso imortal e vazio que se destinava a servir de palco às evoluções da matéria no decurso do tempo absoluto, viu-se invadido quasi ao mesmo tempo por duas estranhas substâncias, ambas com pretensões de o preencherem completamente — o éter luminoso e o éter electromagnético. Do vazio, transitava-se buscammente para uma dupla plenitude, a qual era tanto mais inquietante que qual quer desses éteres parecia exigir que se lhe atribuíssem propriedades mecânicas realmente paradoxais.

Retomaremos abiante o problema das propriedades mecânicas dos éteres ou, melhor do éter, porque entretanto compreendeu-se que o éter luminoso não era distinto do éter electromagnético, na medida em que a óptica devia considerar-se como um simples capítulo da teoria electromagnética. Fenómenos eléctricos, magneticos e luminosos podiam-

numa vasta síntese, que é uma das mais belas conquistas de toda a história do pensamento humano. E essa síntese foi obra de um homem que é um dos nomes maiores de toda a história da Física - Maxwell.

James Clerk Maxwell era um escocês, nascido em Edimburgo em 1831, que durante toda a sua vida se mostrou um homem simples e bondoso, pleno de invenção e de sentido de humor, cristão fervoroso, apreciador das artes e poeta nas horas vagas. Morreu prematuramente aos 48 anos, e viveu nas universidades de Aberdeen, de Londres e de Cambridge, embora tivesse passado muitos anos na pequena propriedade agrícola que herdara de seu pai. É considerado geralmente como o maior físico teórico entre Newton e Einstein e o seu magnífico espírito criador não só nasceu descrevendo a doutrina electromagnética mas também a teoria cinética da matéria. Teremos, assim, ocasiões de voltar a falar de Maxwell mas, por ora, examinaremos apenas a sua obra no capítulo do electromagnetismo.

Influenciado pelo trabalho e pelas concepções de Faraday, que foi intelectualmente o seu grande mestre, Maxwell ~~pretendia~~^{testara} assentar em bases sólidas a teoria do campo. Como teórico, vai procurar uma estrutura matemática capaz de unificar as leis dos fenómenos eléctricos e magnéticos então conhecidos, guiando-se nessa pesquisa pela concepção intuitiva de campo que Faraday formulara de uma maneira intuitiva. O próprio Maxwell era um espírito de natureza intuitiva e, desde muito cedo, visualiza a corrente eléctrica como um fluido; mas se assim é, como entender o comportamento dos dieléctricos? Como uma barreira no seio de um rio?

Consideremos o exemplo clássico tratado por Maxwell do fenómeno da carga de um condensador. Se ligarmos cada um dos polos de uma bateria a uma das armaduras dum condensador, a corrente fluirá através dos fios entre a bateria e as armaduras. Mas será, como afirmavam os seus contemporâneos, que nada se passa no dieléctrico que separa as duas armaduras e que se verifica simplesmente uma acumulação de cargas à superfície destas? Maxwell afirmará que a corrente passará também através do dieléctrico de forma a "fechar o circuito"; simplesmente, a corrente no seio do dieléctrico é de natureza diferente porque neste (e isso, a seu ver, que caracteriza os dieléctricos) reina uma força de "elasticidade eléctrica" que se opõe ao deslocamento das cargas e as faz retroceder à posição inicial quando desaparece a força electromotriz. Assim o fluir da corrente será interrompido e estabelecer-se-á um estado de equilíbrio em que o dieléctrico desempenha um papel essencial. Mas durante o processo que conduz a este estado de equilíbrio o dieléctrico é ~~realmente~~ realmente atravessado por uma autêntica corrente eléctrica - a que Maxwell chama a corrente de deslocamento - de tal modo que mesmo num

329

As equações de Maxwell-2

circuito em que está intercalado um condensador há sempre conservada a corrente total.

- Esta ideia da corrente de deslocamento foi, de facto, uma ideia que merece ser chamada genérica que, como o próprio Maxwell o viria a constatar, tinha consequências da maior importância. De facto, a sequência das suas investigações permitiu a Maxwell resumir a totalidade das leis do Electromagnetismo num único sistema de equações diferenciais, que é das mais importantes de toda a física e a que chamamos justamente as equações de Maxwell. A título decorativo vou escrevê-las em linguagem moderna e no caso mais simples em que os condutores se encontram no vácuo

$$\begin{aligned} D &= \epsilon E \\ B &= \mu H \\ j &= \sigma E \end{aligned}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

$$\text{div } \vec{E} = 4\pi \rho$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

$$\text{div } \vec{B} = 4\pi \rho$$

$$\text{div } \vec{E} = 0$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{const. dieléctrica}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{permeabilidade magnética}$$

$$j = \sigma \vec{E} \quad \text{(condutividade)}$$

Como devemos "ler" estas equações? Sem entrar em complicações matemáticas podemos dizer que elas descrevem o comportamento do campo ~~electromagnético~~ ^{electromagnético} em termos de ~~dois~~ ^{quatro} vectores — o vector campo eléctrico \vec{E} e o vector campo magnético \vec{H} . Estes vectores estão ^{as respectivas "indicações"} ^{D e B} portanto relacionados entre si e com aquilo a que podemos chamar as "fontes" do campo e que são a "densidade de carga" ρ (quantidade de carga por unidade de volume) e a "densidade de corrente" $\vec{j} = \rho \vec{v}$ que é o produto da densidade de carga pela velocidade da carga no ponto considerado. Quanto aos símbolos "rot" e "div" são simplesmente abreviaturas para certas combinações das derivadas das componentes dos respectivos vectores. Por exemplo,

$$\text{div } \vec{E} \quad \text{significa} \quad \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

tal como

$$\text{div } \vec{H} \quad \text{significa} \quad \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z}$$

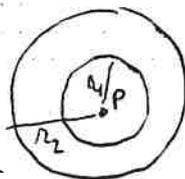
e uma definição do mesmo tipo embora mais complicada vale para o operador rotacional. Enfim, a constante c que figura nas equações traduz simplesmente uma relação entre as unidades em que são medidas grandezas eléctricas e magnéticas.

As equações de Maxwell permitem, em princípio, calcular o campo eléctrico \vec{E} e o campo magnético \vec{H} sempre que forem dadas as grandezas densidade de carga e densidade de corrente, quer dizer, uma vez conhecidas ~~as densidades~~ em cada ponto

do espaço e em cada instante a densidade de carga $\rho(x, y, z, t)$ e densidade de corrente $\vec{j}(x, y, z, t)$, as equações permitem calcular, em cada ponto do espaço e em cada instante, o valor do campo eléctrico $\vec{E}(x, y, z, t)$ e o valor do campo magnético $\vec{H}(x, y, z, t)$. É conveniente assinalar desde logo que são autênticas equações de campo: não exprimem interações entre cargas e correntes, mas descrevem o que se passa e o que existe em cada ponto do espaço e em cada instante, que aí se situem ou não cargas ou correntes. Cargas e correntes são apenas "fontes" do campo eléctrico e magnético, o qual existe através de todo o espaço como a realidade física essencial: o "vazio" do espaço newtoniano está agora, quando se olham as equações de Maxwell, perfeitamente "cheio" — cheio de campo eléctrico e de campo magnético.

Se olharmos agora uma ~~vez~~ uma as quatro equações de Maxwell (elas são, de facto, oito, pois que as equações em que figuram os rotacionais são equações vectoriais e correspondem, portanto, a três equações escalares cada uma) verificamos que elas exprimem, de facto, as leis fundamentais do electromagnetismo. Simplesmente, exprimem-nas sob uma forma local, como é necessário numa teoria de campo, e é por isso que a sua compreensão não é imediata.

Assim a equação $\text{div } \vec{E} = 4\pi\rho$ é apenas a expressão sob uma forma diferencial do essencial da lei de Coulomb: uma carga eléctrica produz um campo eléctrico que é inversamente proporcional ao quadrado da distância do ponto a essa carga. Em suma, muito intuitivamente, que se tivermos uma carga num ponto e se considerarmos em torno desse ponto duas pequenas esferas concêntricas de raios r_1 e r_2 , a equação diz que o fluxo de campo é o mesmo através das duas esferas.



Ora, como a superfície das esferas cresce proporcionalmente ao quadrado do raio, para que isto seja assim é necessário que a intensidade do campo diminua proporcionalmente ao quadrado do raio — o que é a lei de Coulomb.

Na mesma ordem de ideias a equação $\text{div } \vec{H} = 0$ traduz que o fluxo do campo magnético através de uma superfície fechada é sempre nulo — o que significa que não há cargas magnéticas verdadeiras, que na vizinhança de um polo magnético positivo se encontra sempre um polo magnético negativo. É a expressão local do fenómeno fundamental de que toda a divisão de um íman resultam sempre dois ímanes, pelo aparecimento de um novo polo positivo e de um novo polo negativo.

A equação $\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ é apenas a expressão local da experiência fundamental de Faraday: quando um campo magnético varia no tempo, dá lugar

329

As equações de Maxwell-3

o aparecimento de um campo eléctrico, o qual, no caso de agir sobre um condutor irá provocar uma corrente eléctrica. É o fenómeno de indução.

Entim, a equação $\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}$ é particularmente rica porque compreende duas parcelas no segundo membro. O termo em $\frac{4\pi}{c} \vec{j}$ é de origem experimental e traduz os resultados fundamentais de Oersted e de Ampère, respeitantes à criação de um campo magnético pela passagem de uma corrente eléctrica; quanto ao termo em $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ de exprime a famosa corrente de deslocamento de Maxwell, que aparece aliás com propriedades análogas à do corrente usual (expressa pelo vector \vec{j}) nomeadamente no que respeita ao aparecimento de um campo magnético.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

meio não magnético e não condutor

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

logo com $v = \frac{c}{n}$

$$\begin{cases} n = \sqrt{\epsilon} \\ \text{ou } \epsilon = n^2 \end{cases}$$

Tratado de Electricidade e Magnetismo (1873)

Hertz (1857-1894)

Boltzman verificou 1873



Helmholtz apoiou

discos curvados

Rowland demonstrou em 1876 que um disco de vidro em rotação desvia a agulha magnética

Experiências de Hertz 1887

Aluno de Helmholtz 1857-1894

Oscilador e ressonador
Dois bobinas eléctricas que ~~se comunicam~~ com uma corrente vindo de uma bobina



Linhas de reflexão, polarização
velocidade de propagação $\sim c$
comprimento de onda

1899 - Ligação kabiana França - Inglaterra
Branly, Popoff, Marconi

Lorentz

1. O éter como um meio

Após o triunfo da doutrina ondulatória da luz resultante da obra de Fresnel e a exploração intuitiva de Faraday dos fenômenos electromagnéticos, Maxwell pudera realizar uma esplêndida síntese que fundia a Electricidade, o Magnetismo e a Óptica numa única teoria, a doutrina electromagnética. Em termos muito gerais, havia aí um único sistema de equações capaz de prever correctamente uma quantidade imensa de fenômenos, desde raios até às ondas de naturezas diversas.

A capacidade explicativa desta nova teoria (que Hertz, Lorentz e outros confirmaram e aperfeiçoaram) só podia implicar um estímulo suplementar para tentar entender as propriedades desse meio hipotético que era definido como o suporte do próprio campo electromagnético: o éter. E entender as propriedades de um meio significava, então de acordo com a filosofia reinante, descrever essas propriedades em termos mecânicos. Quasi ninguém usava as propriedades mecânicas do éter? Enorme quantidade de trabalho e de esforço foram empregados durante o século XIX no estudo desta questão e, do grande físico da época foi provavelmente William Thomson - Lord Kelvin, - quem mais se ocupou do problema. Muitas teorias extremamente engenhosas foram elaboradas, criticadas e confirmadas, o problema revestiu-se de uma dificuldade extrema. O resultado deste enorme esforço foi a procura do resultado de um certo tipo de experiência, resultado que afinal se revelou contraditório com a procura qualitativa. Daí acabaria por nascer a Relatividade. Mas importa tentar definir melhor o problema, o que vamos fazer aqui.

Um primeiro ponto a examinar é a ^{em a definição das} ~~questão de saber se~~ ~~que medida se podia esperar de~~ ~~finir as~~ propriedades mecânicas do éter, ^{em} ~~meio~~ ~~que~~ ~~conceitual~~ ~~mente~~ ~~necessário~~ ~~à~~ ~~coerência~~ ~~do~~ ~~electromagnetismo~~ ~~sobre~~ ~~o~~ ~~qual~~ ~~não~~ ~~parecia~~ ~~haver~~ ~~possibilidade~~ ~~de~~ ~~realizar~~ ~~qualquer~~ ~~experiência~~ ~~directa~~. ^{Natureza, como} ~~A~~ ~~questão~~ ~~de~~ ~~se~~ ~~as~~ ~~propriedades~~ ~~do~~ ~~próprio~~ ~~campo~~ ~~electromagnético~~ ~~eram~~ ~~bem~~ ~~conhecidas~~ ~~←~~ ~~que,~~ ~~por~~ ~~consequência,~~ ~~se~~ ~~disputava~~ ~~afinal~~ ~~de~~ ~~muita~~ ~~informação~~ ~~para~~ ~~determinar~~ ~~as~~ ~~propriedades~~ ~~mecânicas~~ ~~do~~ ~~éter~~ ~~o~~ ~~qual,~~ ~~por~~ ~~definição~~ ~~devia~~ ~~ser~~ ~~tal~~ ~~que~~ ~~explicasse~~ ~~esse~~ ~~comportamento~~ ~~do~~ ~~campo~~ ~~electromagnético~~.

Assim, se o éter é concebido como o suporte do campo electromagnético o qual ~~existe~~ ~~em~~ ~~qualquer~~ ~~parte~~ ~~do~~ ~~espaço~~, torna-se evidente que o éter deve ser concebido como um meio material contínuo que preenche todo o espaço. Por outro lado, o campo electromagnético pode propagar-se sob a forma de ondas (ondas electromagnéticas, que incluem a luz visível), de forma que esse meio material contínuo tem que ser considerado como assegurando a propagação de ondas, quer fôr, tem que ser elástico. Temos por isso uma primeira conclusão - o éter é um meio material contínuo e elástico - conclusão que

trai veir.

Uma conclusão a tirar era por exemplo que se devia tratar de um meio sólido. No fluido há propagação ondulatória mas só sempre puramente ^{longitudinal} ~~transversal~~ (o som, por exemplo) e só no sólido é que há igualmente vibrações transversais. Ora a transversalidade de las ondas luminosas, que já se revelava indispensável na teoria ferenética da polarização, era, para mais, uma consequência ineluctável das equações de Maxwell. Logo o éter tinha que ser não só um meio elástico mas um sólido elástico e desde logo começavam as dificuldades.

Em geral, num sólido elástico há vibrações transversais mas que só sempre acompanhadas por uma vibração longitudinal e esta nunca era detectada nas ondas electromagnéticas; aliás a sua existência, conduzia a graves dificuldades teóricas e experimentais, o que inclinava ser o éter um outro sólido elástico. Para tomar outro aspecto, sabemos que a velocidade de propagação das ondas em sólidos elásticos depende de duas constantes características do meio, a massa específica ρ e o módulo de elasticidade P (definido pela força necessária para produzir uma deformação unitária) sob a forma $v = \sqrt{P/\rho}$. Ora, para as ondas que se propagam no éter, as ondas electromagnéticas $v = 3 \cdot 10^8$ m/s, o que implicava ou um elevadíssimo valor de P , ou um baixíssimo valor de ρ ou uma conjugação de ambos os factos. Mas um valor de ρ muito pequeno parecia incompatível com o ideia que temos de um sólido: o éter seria então uma espécie de gás, e deixar-se-ia de entender a existência de vibrações transversais. A outra hipótese, P muito elevado, corresponderia a atribuir ao éter uma enorme rigidez. Ora sendo o éter, por hipótese, um meio que preenche todo o espaço, como explicar que essa rigidez não entrasse em movimento por corpos materiais? Não seria então de prever, por exemplo, que os planetas sofressem nos seus movimentos circulares uma espécie de atrito que diminuísse a sua velocidade, o que era de todo contrário as observações astronómicas?

As dificuldades aliás eram inúmeras. Sendo a velocidade da luz menor no meio material do que no vácuo - no éter - significava isto que a presença da matéria ^{alterava} ~~diminuía~~ a massa específica ou diminuía a rigidez? E o éter ~~em~~ meio material tem massa e toda a massa está sujeita à lei de gravitação universal de Newton e tais forças devem deformar a própria homogeneidade do éter - o que devia implicar inhomogeneidades e ~~esta~~ ^{estas} variações nas propriedades do éter como veículo das ondas luminosas.

O engenho humano é grande. Ultrapassando uma dificuldade para esbarrar com outra foi-a pensosamente construindo variados modelos de éter que tinham em comum apenas o éter as características já muito diferentes das por si só. Era o éter como um "pseudosólido rígido" tão recheado de hipóteses ad-hoc que não parecia muito verossímil. Nunca foi possível conceber um modelo mecânico de éter realmente convincente.

relação ao espaço absoluto. Vir-á-ia, por exemplo, que para referenciar a velocidade de Terra em relação ao espaço absoluto bastaria medir a velocidade da luz na Terra; obtendo-se um valor desta velocidade c' diferente de c , concluir-se-ia imediatamente que a Terra tinha em relação ao espaço absoluto uma velocidade $|c'-c|$. Mas o problema é realmente muito mais complicado porque nesse valor da velocidade c' que medimos intervêm (ou podem intervir) diversos factores.

Quem nos diz, por exemplo, que a velocidade de propagação da luz é independente da velocidade da fonte que a emite? Sendo essa velocidade determinada por um certo observador, estaremos autorizados a supor que a velocidade desse observador (velocidade em relação ao éter) não intervém? Não será aceitável admitir que o éter presente no interior de um corpo vai ser total ou parcialmente arrastado pelo movimento desse próprio corpo (neste caso a Terra) o que terá como consequência que a velocidade da luz assim determinada não seja a sua velocidade em relação ao espaço absoluto? As respostas que damos a tais perguntas afectarão inevitavelmente a conclusão que poderemos tirar quanto ao valor da velocidade da Terra em relação ao espaço absoluto a partir do valor da velocidade da luz na Terra. Foram problemas que os físicos do século XIX examinaram muito cuidadosamente e, se pretendemos aqui tratá-los resumidamente diremos o que de mais importante se concluiu então sobre cada um de eles.

Quanto à influência do movimento absoluto da fonte luminosa, sobre a velocidade de propagação da luz, no contexto de uma teoria corpuscular ela seria de certo fundamental: se um canhão lança um projectil com uma velocidade v e se colocarmos o canhão sobre um comboio que avança relativamente ao solo com uma velocidade v' , a bala alinhar-se em relação ao solo com uma velocidade $v+v'$. Mas uma tal resposta não se afigura adequada numa teoria ondulatória e, aliás, as observações experimentais contradizem inequivocamente a hipótese de uma influência da velocidade da fonte sobre a velocidade de propagação da luz.

Com efeito consideremos um desses sistemas a que os astrónomos chamam uma estrela dupla e que mais não é do que um conjunto de duas estrelas rodando uma em torno da outra (ou, mais exactamente, rodando ambas em torno do centro de massa do conjunto) em consequência da atracção gravítica que as une, e executando assim um movimento periódico de período bem conhecido. Durante esse período haverá épocas em que uma das estrelas tem uma velocidade que a aproxima de nós (Terra) enquanto a da velocidade da outra tende justamente a afastá-la de nós; numa época ulterior a situação de ambas elas estará totalmente invertida.

Se a velocidade da luz emitida dependesse do facto de a estrela se estar aproximando ou afastando de nós (hipótese de influên-



Os movimentos do éter e a experiência de Michelson - 3

cia da velocidade da fonte emissora ou movimentos relativos das duas estrelas seria ine-
 ribivelmente distinta para a a nossa observação; haveria mesmo caso em que veria-
 mos no céu "estrelas fantasmas", várias imagens simultâneas da mesma estrela. Ora
 nada disso é realmente observado. Como até conhecemos as distâncias a que essas
 estrelas se encontram da Terra e a grandeza das suas velocidades, ~~elas~~ podemos estar
 certos de que se tais efeitos existissem não ~~podemos~~ poderíamos adaptar a observação. A
 conclusão inevitável é que o movimento da fonte emissora não afecta a velocidade
 de propagação da luz.

1842

Diz-se-a que a luz, concebida como um fenómeno ondulatório e, portanto, periódico,
 não se caracteriza apenas pela sua velocidade mas também pela sua frequên-
 cia ou, em termos mais simples, pela sua cor. Ora o físico austríaco Christian
 Doppler (1803-53) descobriu em 1842 que a "altura" de um som, a sua frequên-
 cia observada, depende da velocidade relativa da fonte e do observador. Este "efeito
 Doppler" é uma consequência directa do próprio modelo ondulatório e entende-se
 muito bem que uma vibração de frequência própria (ritmo de emissão) v seja
 observada com uma frequência maior v' quando a fonte e o observador se estão
 aproximando com uma velocidade u $v' = v(1 + \frac{u}{c})$ e diminui para um
 valor v'' quando eles se estão afastando com a mesma velocidade $v'' = v(1 - \frac{u}{c})$.
 É esta a explicação de que o apito de um comboio nos parece mais agudo enquanto
 ele se aproxima de nós e se torna mais grave logo que ele se começa a afastar.

O efeito Doppler também se observa com as ondas luminosas e até fornece um meio como
 de particular a velocidade radial com que as estrelas se distanciam progressivamen-
 te da Terra. Mas as fórmulas precedentes, que permanecem válidas, só fazem intervir a
 velocidade relativa da fonte e do observador, não figura nela nem a velocidade da
 fonte nem a do observador em relação ao meio de propagação da própria onda que,
 no caso da luz é o éter. Por outras palavras, o efeito Doppler não permite medir velo-
 cidades de propagação em relação ao éter, o que ^{seria} nesta perspectiva o mais interes-
 sante. De facto, uma teoria mais fina mostra que o movimento do observador em rela-
 ção ao éter sempre intervem mas intervem de uma forma muito tênue: enquanto o
 movimento relativo fonte-observador faz intervir um factor da ordem de u/c , o
 movimento do observador em relação ao éter corresponde a um factor da ordem de $(u/c)^2$.
 Diz-se que o efeito em $\frac{u}{c}$ é um efeito de primeira ordem, o efeito em $\frac{u^2}{c^2}$ é um efeito de
segunda ordem e não a pena tentar entender o que isto significa.

A velocidade da Terra em torno do Sol varia pelo 30 km/s, quer dizer, 3×10^4 m/s
 e durante o ano a Terra possui tais velocidades em sentido oposto nas várias direcções

no espaço. Logo a velocidade da Terra em relação ao éter será, pelo menos, da ordem de $3 \cdot 10^4$ m/s - será mesmo porventura muito maior mas não estamos em condições de o garantir. Isto significa que $v/c \approx 3 \cdot 10^4 / 3 \cdot 10^8$ será ^{quanto mais} ~~pequeno~~ da ordem de 10^{-4} e v^2/c^2 da ordem de 10^{-8} : os efeitos lito de primeira ordem ainda serão relativamente importantes (da ordem do décimo milésimo) mas os de segunda ordem já revelam muitíssimo pouco (da ordem do centésimo de milionésimo), de detecção tão difícil que estava além da precisão experimental. Sendo o efeito Doppler de segunda ordem que fazia interferir o movimento do observador em relação ao éter, tal efeito era praticamente inobservável e não parecia que por aqui se chegasse a alguma conclusão interessante.

O movimento da Terra em torno do Sol é observado

Abordemos então a questão de saber se o éter é ou não arrastado pelo movimento dos corpos materiais (nomeadamente a Terra). Vê-se desde logo que uma resposta afirmativa acarreta grandes dificuldades de princípio. Por exemplo, quando a luz passa de um corpo para outro que se encontra em movimento relativamente ao primeiro, se o éter é arrastado pelo movimento do corpo, a luz que tinha uma velocidade c em relação ao primeiro passaria a ter essa mesma velocidade c em relação ao segundo, o que quer dizer que na passagem de um para outro a velocidade sofreria uma variação brusca à qual corresponderia uma aceleração de valor infinito. Por outro lado, quando a luz penetra num meio rarefeito a sua velocidade variaria; mas o que aconteceria quando o meio se tornar mais e mais rarefeito, tão rarefeito que se aproxima continuamente daquilo a que chamamos o vácuo. Quando, a partir de que ponto, se deixaria de verificar o arrastamento do éter e a supressão na variação da velocidade da luz?

Um outro problema do mesmo tipo é levantado pelo fenómeno da aberração descrito nos começos do século XVIII por James Bradley: as estrelas parecem descrever no céu, durante o ano terrestre, pequenas elipses, efeito puramente aparente e que é, de facto, uma consequência do movimento da Terra em torno do Sol. De facto, a posição da estrela observada no céu pelo telescópio não é a sua posição real, o telescópio tem de estar ligeiramente desviado da direcção definida pela recta que une a Terra a essa estrela em consequência da luz ter uma velocidade finita e da Terra estar em movimento. É fácil verificar que as dimensões das elipses descritas no céu pelo movimento aparente das estrelas são definidas pelo tangente trigonométrica de v/c , o que é bem verificado pela experiência. ($v/c \approx 10^{-4}$; $\tan 10^{-4} \approx 20''$; eixo maior da elipse, observado, $40''$) Se se houvesse arrastamento completo do éter pela Terra não se devia observar nada que correspondesse ao fenómeno de aberração.

Quereria isto dizer que o movimento dos corpos materiais não tem qualquer efeito sobre o movimento do éter, quer dizer, sobre a velocidade de propagação da luz? Para responder a esta pergunta temos de recordar as célebres experiências efectuadas por

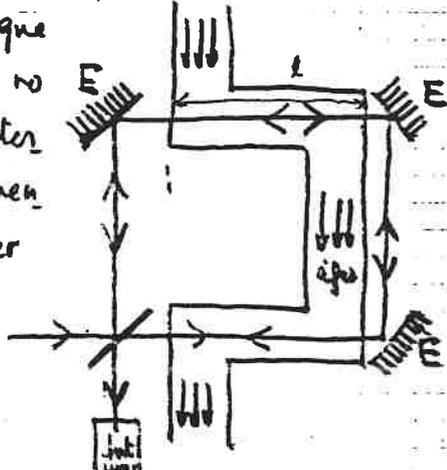
Os problemas do éter e a experiência de Michelson-V

1851

Detalhes
numeração
Papp 325

Fizem no seu laboratório em 1859. Hypolite Fizeau (1819-1896) foi o primeiro a medir a velocidade da luz sem recorrer à observação astronômica: ⁽¹⁸⁵⁹⁾ fez passar a luz de uma fonte entre os dentes de uma roda dentada, a qual ia incidir sobre um espelho colocado a 8 ou 9 quilômetros para voltar a passar pelo mesmo orifício e ser observada com uma luneta (a roda estava parada). Mas se a roda começava a girar com certa velocidade, a luz deixava de ser observada pelo luneta, sendo então detida pela presença de um dente onde outrora se encontrava o orifício. Para uma velocidade ligeiramente maior passava-se de novo a observar a luz, que tornava a desfazer-se para uma velocidade 2v, 3v etc.

Em 1859 Fizeau empreendeu experiências mais finas para determinar experimentalmente a velocidade da luz num meio em movimento, utilizando as técnicas mais refinadas que até então Foucault (1819-1868) desenvolvera. ~~Para~~ Contribuindo duas fontes secundárias fez passar a luz de cada uma delas por um ramo de um tubo em U onde circulava água com velocidade conhecida v, que para um dos ramos se sobrepunha ao movimento de luz, no outro ramo o contrário; a observação das franjas de interferência permitia concluir algo sobre os efeitos do movimento da água. Uma teoria de arrastamento total do éter implicaria que ~~na água fosse respectivamente~~ ^{tapa a dois feixes} a velocidade da luz fosse ~~respectivamente~~



~~v_1 = c/n~~ e $v_1 = \frac{c}{n} - v$ $v_2 = \frac{c}{n} + v$

Da esta fórmula não dava conta das observações. ^{acabaram por implicar} Mas esta ~~implicação~~, apesar de tudo, um certo arrastamento parcial do éter pelo corpo em movimento, arrastamento parcial que aliás se comportava perfeitamente com uma fórmula - que Fresnel

Cf. M. Tammlet "Hist. Princ. Relat." p. 33

tinha sido levado por considerações de natureza teórica e que se escreve

$$v_1 = \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad v_2 = \frac{c}{n} - v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

onde n é o índice de refração do meio. Por exemplo, na água $n \approx \frac{4}{3}$, $n^2 = \frac{16}{9}$, $\frac{1}{n^2} = \frac{9}{16}$ e $1 - \frac{1}{n^2} = \frac{7}{16}$ o que dá $v_1 = \frac{3c}{4} + \frac{7}{16}v$ $v_2 = \frac{3c}{4} - \frac{7}{16}v$ e as franjas de Fizeau

isto é a expressão das velocidades em relação ao éter. Cf. Tammlet Hist. Princ. Relat. p. 33

$$t_1 = \frac{2l}{v_1} = \frac{2l}{c \left(\frac{3}{4} + \frac{7}{16} \frac{v}{c}\right)}$$

$$t_2 = \frac{2l}{v_2} = \frac{2l}{c \left(\frac{3}{4} - \frac{7}{16} \frac{v}{c}\right)}$$

tinham uma posição diferente da que com a água imóvel no tubo em U. Mas se, por exemplo, se ar (n=1) teríamos $v_1 = v_2$ e tudo se passava como se não houvesse arrastamento. Para voltar os dificuldades mencionadas acima, entendia-se porque havia aberração e o que mantinha num meio cada vez mais rarefeito.

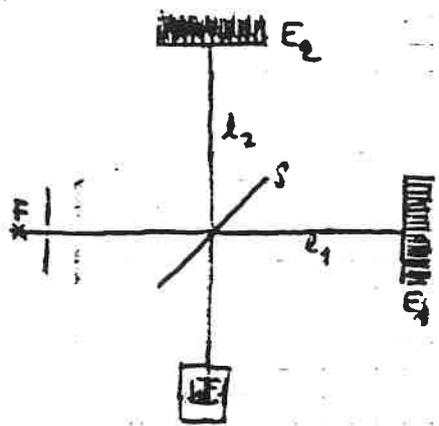
Com esta teoria incontestavelmente parâmetro de Fresnel e admitindo que a velocidade da fonte não tinha qualquer influência na velocidade de propagação da luz, todos os problemas de primeira ordem tornavam-se perfeitamente compreensíveis. É certo que nenhum deles permitia afinal, por esta ou aquela razão, determinar o movimento da Terra em relação ao espaço absoluto, mas a teoria também dava conta dessa circunstância. Em troca essa mesma teoria, a única que permanecia possível, levava a prever a existência de todo um conjunto de efeitos de segunda ordem - efeitos em v^2/c^2 - em que o movimento da Terra através do éter, a presença do chamado "vento de éter" não deixaria, não poderia deixar, de ser posto em evidência. A dificuldade estava agora num plano meramente técnico: tratava-se de conceber e de realizar uma experiência com suficiente precisão para detectar um efeito de segunda ordem, uma variação da ordem de 10^{-8} .

A experiência de Michelson

Pedir uma experiência com uma precisão de 10^{-8} era pedir muito, pois nunca, até então, uma experiência de física alcançara uma precisão de tal ordem. O problema inerente era todavia suficientemente importante e significativo para que valesse a pena suspender o esforço no sentido à obtenção de um tal objetivo. Em 1881 o físico americano Michelson mediu pela primeira vez um efeito de segunda ordem e o resultado, confirmado pela experiência que ele realizou em 1887 em colaboração com Morley, é hoje considerado como não oferecendo qualquer dúvida. Dezenas de experiências diversas, feitas por métodos muito variados e com precisões cada vez maiores tornaram-se indiscutíveis as conclusões tiradas por Michelson de uma das observações laboratoriais mais justamente famosas em toda a história da física. Recordemos, pelo menos, os fundamentos desse "experimentum crucis".

Albert Michelson
(1852-1931)
Exp. Michelson
1881
Michelson-Morley
1887

A luz emitida pela fonte F é dividida em dois feixes pelo espelho semi-transparente S; o primeiro percorre duas vezes a distância l_1 , para ir até ao espelho E_1 e voltar a S, onde é semi-refletido e enviado para o interferômetro I; o segundo é enviado de S até E_2 , volta (percorre assim a distância $2l_2$) e é igualmente enviado em I onde interfere com o outro feixe. Todo o aparelho flutuava num recipiente com mercúrio, de modo a poder rodá-lo de 90° : primeiro as franjas em I são observadas com FE_1 praticamente paralelo ao movimento de translação da Terra (logo IE_2 perpendicular a este movimento), depois as franjas são observadas com IE_2 paralelo ao movimento (portanto FE_1 perpendicular a este movimento). O propósito é observar a deslocação das franjas resultante desta rotação de 90° , o qual resulta da diferença das velocidades de propagação dos dois raios luminosos entre e depois da rotação.

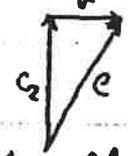


A experiência de Michelson - 1

Os percursos que vão de F a S e de S a I são comuns aos dois raios e, portanto não interessam o que conta são as idas e voltas de S a E₁ e de S a E₂. Consideremos o caso inicial com FE₁ paralelo ao movimento de translação da Terra de velocidade v. A experiência sendo feita na altura logo $1 - 1/n^2 = 0$ e a velocidade da luz em relação ao éter no percurso S E₁ e' e' em relação à Terra (terrena da adição de velocidades) a velocidade no percurso S E₁ será c+v no percurso E₁ S será c-v de forma que o tempo t₁ para ir de S a E₁ e voltar será

$$t_1 = \frac{l_1}{c+v} + \frac{l_1}{c-v} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{1-\beta^2}$$

com $\beta = \frac{v}{c}$. No percurso S E₂ e em relação à Terra, a velocidade



de propagação da luz c' será tal que $c_2^2 = c^2 - v^2$ ou $c_2 = c\sqrt{1-\beta^2}$ de forma que o tempo t₂ necessário para ir de S a E₂ e voltar e'

$$t_2 = \frac{2l_2}{c\sqrt{1-\beta^2}}$$

e a diferença dos tempos $\Delta t = t_2 - t_1$, escreve-se $\Delta t = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{2l_1}{c} \frac{1}{1-\beta^2} =$

$= \frac{2}{c} \left(\frac{l_2}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{l_1}{1-\beta^2} \right)$. Se rodarmos o aparelho de 90° o que provocamos afinal é uma troca dos papéis dos dois braços do interferômetro. Em vez de t₂ para o percurso S E₂ ter na agora t'₂ = $\frac{2l_2}{c} \frac{1}{1-\beta^2}$ e em vez de t₁ para o percurso S E₁ virá t'₁ = $\frac{2l_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ com a diferença $\Delta t'$ que se escreve $\Delta t' = \frac{2}{c} \left(\frac{l_2}{1-\beta^2} - \frac{l_1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$. Ao fazerem no interferômetro duas vezes deslocar-se de uma distância correspondente à diferença das diferenças dos tempos de percurso dos dois feixes antes e depois da rotação isto é ao tempo

$$\Delta T = \Delta t' - \Delta t = \frac{2}{c} \left(\frac{l_2}{1-\beta^2} - \frac{l_1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) - \frac{2}{c} \left(\frac{l_2}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{l_1}{1-\beta^2} \right) = \frac{2(l_1+l_2)}{c} \left(\frac{1}{1-\beta^2} - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

Ora β^2 é uma grandeza muito pequena, de ordem de 10⁻⁸. Com uma aproximação da ordem de β^4 isto 10⁻¹⁶ podemos escrever $\frac{1}{1-\beta^2} \approx 1 + \beta^2$ e $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1 + \frac{\beta^2}{2}$ dando assim

$$\Delta T = \frac{2(l_1+l_2)}{c} \left[1 + \beta^2 - \left(1 + \frac{\beta^2}{2} \right) \right] = \frac{l_1+l_2}{c} \beta^2 = \frac{l_1+l_2}{c^3} v^2$$

Este valor ΔT sendo proporcional ao deslocamento das franjas, desse deslocamento deveria a velocidade v da Terra em relação ao éter. Ora o resultado observado foi uma enorme surpresa, um autêntico luche selado: não havia qualquer deslocamento das franjas logo não havia vento de éter, tudo se passava como se a direção do movimento não tivesse qualquer influência na velocidade da luz. Brevemente, décadas de trabalho paciente foram conciliar a teoria eletromagnética com as concepções fundamentais de espaço e de tempo estavam reduzidas à nada. O resultado negativo da experiência de Michelson era incompreensível.

A Física clássica viu-se assim confrontada com uma crise profunda. Algo estava errado mas o quê? E o efeito de segunda ordem não davam os resultados previstos pela teoria e explicação fornecida por essa mesma teoria para o efeito de primeira ordem também deixava de merecer grande crédito. Então?

Para salvar o que estava por aí sobre o éter, mais simplesmente, quem
 imaginou em uma estranha hipótese: todo o corpo com um movimento retilíneo e uniforme
 sofreria uma contração que seria com que o seu comprimento deixasse de ser l_0 para
 passar a $l = l_0 \sqrt{1-\beta^2}$, e essa contração sendo concebida como um fenómeno físico de
 via dar lugar a um certo número de efeitos físicos. Da estes efeitos físicos revelaram-se
 por sua vez (observáveis) o que originou a Lorentz a introdução de uma nova hipó-
 tese "ad-hoc": o postulado de que a massa cresce com a velocidade, um corpo que
 imóvel tem a massa m_0 passa a ter, quando adquire a velocidade v , uma massa
 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$. Lorentz, que era um teórico de grande envergadura, acabou por concluir
 que não que tudo isto fosse minimamente coerente tornava-se igualmente necessário admitir
 que o movimento em relação ao éter retardava a marcha da relógio.

Todo este trabalho do grande mestre holandês era infinitamente hábil mas ele sabia
 melhor do que ninguém que estava construindo num solo de areia. Eram demasiadas hipóteses
 "ad-hoc" para explicar algo de fundamental que, pela sua própria natureza, requeria
 uma abordagem muito mais fundamental. A explicação surgiu em 1905 e chamou-se
 a teoria da relatividade restrita.

Os problemas do éter e a experiência de Michelson - 2

2. O éter, o espaço e o tempo. Efeitos de primeira ordem.

- Mas a hipótese da existência de um éter mecânico levantava outro tipo de problemas mais directamente relacionados com a experiência, e que lidam respeito às concepções clássicas do espaço e do tempo.

Se o éter concebido como um meio material que preenche todo o espaço (quer o intervalo entre os corpos, quer o próprio corpo) a esse meio material devem aplicar-se as equações da Dinâmica Newtoniana. Ora, nesta perspectiva, parece evidente que o leve um consideramos imóvel num sistema inercial porque, se admitíssemos uma aceleração em bloco do éter relativamente ao espaço absoluto, haveria que introduzir uma força física de valor constante em toda a parte do espaço, e não se vê de todo qual poderia ser a origem de tal força. Em alternativa, a hipótese de que as partes regionais do éter no vácuo estivessem em movimento relativamente a outras provocaria variações da sua densidade e da sua elasticidade, detectáveis pelos observadores da luz que não chega das estrelas e que nunca ninguém observou. Em resumo, parece necessário (e natural) admitir a imobilidade do éter num sistema inercial.

Ora, para a teoria electromagnética, os diversos sistemas de inércia não são (como o são para a Mecânica) equivalentes: o princípio da relatividade clássico não vale para o electromagnetismo. Isto pode ser olhado como consequência do facto das equações da Dinâmica conterem segundas derivadas em ordem ao tempo, enquanto nas equações de Maxwell só figuram primeiras derivadas. Mas a conclusão torna-se clara em termos ainda mais simples. As equações de Maxwell prevêem que as ondas electromagnéticas no vácuo têm uma velocidade c bem determinada (3×10^{10} m/s) e este valor só pode valer, evidentemente, no referencial de inércia em que foram formuladas as próprias equações de Maxwell; noutro referencial de inércia unido em relação a este de uma velocidade v , a luz deverá propagar-se com uma velocidade $c \pm v$, o que implica dizer que neste outro referencial as equações de Maxwell terão de conter termos suplementares. Em suma, o electromagnetismo singulariza entre todos os sistemas de inércia aquele em que as equações de Maxwell são válidas e onde o éter é suposto imóvel. Torna-se então natural situar este referencial galileano privilegiado como correspondendo ao próprio espaço absoluto. Ao contrário das leis da Mecânica, as leis do Electromagnetismo (porque não se sujeitam ao princípio da relatividade clássico) permitem identificar o espaço absoluto, definido como aquele dos referenciais de inércia onde são formuladas as equações de Maxwell ou, por outras palavras, onde o éter se encontra imóvel.

A luz não se encontra imóvel no espaço absoluto...

Esta lição é de algum modo um epítolo — o epítolo tem período em que a Física clássi-
ca não tem nem contestação o qual termina, historicamente, no começo deste século. E como con-
vém a um epítolo refere-se a uma problemática que, no essencial, a Física clássica se revelou
incapaz de tratar convenientemente, isto porque estava para além do seu domínio conceptual.
Sob este título de "A estrutura da matéria em Física clássica" vamos aqui referir um certo
número de descobertas feitas pelos físicos do século XIX que todas apontavam para a definição
de uma certa estrutura interna dos átomos que, classicamente, se revelam incorruptíveis.

A espectroscopia.

Costuma atribuir-se a Joseph von Fraunhofer (1787-1826) a glória de ter descoberto a
espectroscopia — isto embora haja precedentes como o químico inglês Wollaston que em 1802
observara sete riscas escuras na luz solar. Mas, de facto, o papel de Fraunhofer parece ter sido
muito importante; de família muito pobre, ficou orfão aos 14 anos salvando-se quase miraculosa-
mente de um desastre que lhe vitimou a família e esta catástrofe valeu-lhe a benevolência do electo-
r da Baviera que lhe permitiu tornar-se num dos mais hábéis artesãos de instrumentos ópticos de
Europa. Na sua curta vida (morreu tuberculoso aos 39 anos) construiu alguns dos melhores teles-
cópios existentes no primeiro quartel do século XIX.

O que iria costado celebrar o seu nome seria a descoberta das riscas espectrais. Observan-
do a luz solar que atravessava um prisma antes de penetrar no telescópio, Fraunhofer verificou
que o espectro colorido era atravessado por umas tantas riscas negras cuja posição se mantinha cons-
tante, isto quer se tratasse da luz do sol observada directamente quer reflectida pela lua ou
pelos outros planetas. Todavia, quando se observava a luz emanada das estrelas, se continuava
a haver riscas negras a sua posição no espectro já era diferente (1814)

Foi Fraunhofer quem baptizou essas riscas com as letras do alfabeto. Mais ainda, foi
ele o primeiro a dar-se conta que a famosa linha negra D qual ele chamava D no espectro
solar aparecia igualmente (com o mesmo comprimento de onda) sob a forma de uma linha
brilhante no espectro emitido por um bloco de sódio. Todavia não foi capaz de entender
o significado desta observação.

As observações de Fraunhofer não foram esquecidas e até despertaram certa curiosidade.
Durante as décadas seguintes, variados autores fizeram variadas descobertas, algumas interessantes,
neste domínio, relacionando nomeadamente as substituições químicas com as riscas de Fraunhofer
que elas emitem. Mas será preciso aguardar a segunda metade do século XIX para que, enfim,
graças a Bunsen e a Kirchhoff, a espectroscopia se torne algo de coerente.

Robert Bunsen (1811-1899) e Gustav Kirchhoff (1824-1887) constituem uma das mais

Medida da
com uma rede
de difracção

tipos e reputadas universidades alemãs, e embora Bunsen fosse sobretudo um químico engenhoso e imaginativo enquanto Kirchhoff se celebrava como físico teórico, estabeleceram entre si uma colaboração estreita fundada numa sólida amizade que durou ^{mais de} 25 anos, até à morte de Kirchhoff. Esta harmoniosa colaboração entre dois homens tão diferentes deu, em todo o caso, uma contribuição fundamental ao desenvolvimento da espectroscopia.

Kirchhoff
e o caso
negro

Tudo parece ter começado com a esperança de Bunsen para utilizar as riscas de Fraunhofer como um meio de identificar as substâncias químicas — foi para isso, para obter chamas realmente puras que ele inventou o tão celebrado bico de Bunsen. Com o conselho do seu insuperável amigo, Bunsen acabou por reconhecer (1859) que as riscas brilhantes emitidas pelas velas incandescentes são independentes da temperatura, independentes do composto químico em que um certo elemento participava, de forma que essas riscas brilhantes surgiam como um meio infalível de detectar um certo elemento químico. Meio preciso, como se pensa e verificaria, não só pela simplicidade intrínseca do processo analítico como pelo facto de permitir detectar elementos que se encontravam presentes em quantidades infinitesimais: uma milionésima de grama de sódio, por exemplo, era mais do que suficiente para identificar a presença do sódio, e isto quer se tratasse de sódio puro quer se tratasse de um composto de sódio, digamos cloreto de sódio ou clorato de sódio.

Fundada assim a espectroscopia de emissão Kirchhoff com a ajuda de Bunsen ~~em~~ irá dar-se-lhe para a espectroscopia de absorção, demonstrando experimentalmente que a famosa riscas duplas, amarelas, emitida pelo sódio, se convertia numa dupla riscas negras, com exactamente o mesmo comprimento de onda, desde que a fixassemos atravessarmos uma solução de sais de sódio. E esta constatação, válida para os outros elementos químicos, Kirchhoff interpretava-a muito simplesmente admitindo que a mesma substância capaz de emitir determinadas riscas brilhantes, tinha também a propriedade de absorver esses mesmos comprimentos de onda.

Isto levou Kirchhoff a uma outra descoberta realmente sensacional: que a famosa riscas D ~~do~~ já observada por Fraunhofer no espectro solar era simplesmente a riscas de absorção do sódio, quer dizer, que havia sódio na atmosfera do Sol. Para se apreciar o escândalo provocado por esta afirmação convém lembrar que nos tempos mais duros o célebre filósofo Auguste Comte apresentara o conhecimento da composição química das estrelas como um exemplo de algo que estava para sempre vedado aos homens conhecer. Eis que Kirchhoff vinha firmemente desmentir essa profecia e ele próprio conta que, tendo ^{lido} um professor de filosofia da sua universidade contado, por acaso, que havia um louco que ~~parece~~ parecia ter identificado o sódio no Sol, ele não resistiu à tentação de o informar de que esse louco era ele. A nível da história da ciência o significado de descoberta de Kirchhoff era grande: após Newton, havia boas razões para acreditar que todo o universo era regido pelas mesmas leis, agora podia-se ir mais longe e saber que todo ele era constituído pelas

mesmos elementos químicos.

Esta conclusão foi ainda absoluta durante um ano. A análise espectroscópica não só permitia identificar os elementos químicos conhecidos como identificar elementos químicos novos — e Bunsen deu a prova disso descobrindo espectroscopicamente dois novos metais alcalinos, o rubídio e o céscio (1860). Mas ao final da década foi descoberto um novo elemento desconhecido graças à observação espectroscópica da luz do Sol o qual, por essa razão, foi chamado o hélio. Existiria hélio na Terra? Em breve se obteve uma resposta afirmativa e a tranquilidade voltou.

Devido à formidável importância prática da espectroscopia como técnica de análise química, as últimas décadas do século XIX viram equíparos de físicos (principalmente nos países de língua alemã) consagrarem-se à elaboração de substituições matemáticas das linhas espectrais, que até então se referiam apenas em espectros observáveis no domínio da luz visível mas igualmente no domínio do ultra-violeta e do infra-vermelho. Recorde-se que o infra-vermelho foi descoberto graças aos seus efeitos calóricos pelo grande astrônomo Herschell cerca de 1800, a descoberta do ultra violeta feita pelo alemão Ritter datando de mesma época.

Esse fecundo trabalho experimental permanecia contudo sem contrapartida teórica. Se um dado espectro de linhas caracteriza cada elemento químico e se um elemento químico é constituído por átomos todos iguais, tal espectro tem de ser uma propriedade específica de cada um desses átomos. Mas porque razão um certo tipo de átomo emite ou absorve preferencialmente a radiação eletromagnética segundo determinados comprimentos de onda, disso não se tinha a menor ideia.

Mais modestamente, nem sequer parecia possível obter fórmulas empíricas capazes de ligarem os comprimentos de onda relativos aos vários espectros atômicos. Muitas tentativas feitas por muitos físicos acabaram sempre, até que a infatigável paciência do russo Balmer acabou por obter um primeiro triunfo em 1885. Balmer verificou que as quatro linhas principais do espectro do mais leve de todos os átomos, o hidrogénio, situadas na zona visível do espectro eram todas dadas pela fórmula simples

$$\lambda = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{2^2} \right) \quad \text{com } n = 3, 4, 5, 6$$

ou, em termos de frequência

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{com } n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

sendo R dita a constante de Rydberg. A generalização desta fórmula

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad m \text{ e } n \text{ inteiros } m < n$$

das todas as outras séries espectrais do hidrogénio (Lyman 1906, Paschen 1908, Brackett, 1922, Pfund, 1924) mas o grande passo em frente foi obtido por Ritz em 1908 ao demonstrar

(1825-98)

empíricamente que era possível definir, para cada elemento químico uma série de termos espectrais T_n tais que todas as riscas do espectro desse elemento eram dadas pela diferença de dois desses termos espectrais

$$\nu = T_n - T_{n'}$$

O significado teórico deste "princípio de combinação de Ritz", notável pela sua generalidade e pela sua simplicidade não permaneceu durante anos inteiramente inconspicuo.

A classificação dos elementos

O número de elementos químicos conhecidos, que não chegava a 35 no tempo de Berzelius, ^{em 1813} atingia 64 em 1870 e, naturalmente, o interesse de uma classificação desses elementos segundo as suas propriedades. Já em 1830, por exemplo, o celebre geólogo Baptiste Dumas classificara os metais em famílias e a ideia foi retomada por muitos outros. Contudo, e apesar de certos historiadores da ciência terem procurado valorizar o papel desempenhado por Lothar Meyer, parece hoje indiscutível que o grande nome neste domínio foi o químico russo Dimitri Mendeleiev (1834-1907).

Em 1869 ele apresentou uma primeira versão da sua classificação periódica à qual, dois anos mais tarde, atribuía uma disposição que não difere significativamente daquela adoptada hoje. Diferente assim os elementos segundo os seus pesos atômicos ou centes, passando de uma linha à linha seguinte de forma a que os elementos com propriedades químicas análogas fiquem na mesma coluna. Mas nem tudo era tão simples como pode parecer: em certos casos, para que um elemento figurasse na "casa certa" era obrigado a admitir que a determinação do seu peso atômico estava errada (e a experiência veio, mais tarde, dar-lhe razão), noutros casos deixava uma casa por preencher afirmando que se figuraria um elemento ainda desconhecido cujas propriedades era capaz de prever até certos pontos — e esses elementos com tais propriedades vieram a ser descobertos.

Mais tarde, em 1894, o químico inglês Ramsay descobriu na atmosfera a chamados gases raros (neon, cripton, xenon etc), todos caracterizados por um grande inércia química, mas des inseriram-se naturalmente no quadro de Mendeleiev ao qual bastou juntar duas colunas suplementares.

Enfim, a descoberta dos elementos radioactivos, da qual falarei mais adiante, também se inseriu naturalmente neste "quadro de Mendeleiev", ao qual foi bem friso atribuir um significado profundo. Que tal significado profundo estivesse relacionado com a estrutura interna dos próprios átomos afigurava-se evidente. Mas qual seria essa estrutura que fazia com que um átomo de potássio se comportasse de maneira análoga ao de um átomo de sódio, e um átomo de ouro como um átomo de bronze, eis um mistério que durante décadas permaneceu insolvível.

As descargas eléctricas nos tubos a baixa pressão

Outro tipo de experiências que se revelam pleno de ensinamentos incompreendidos foi o das descargas eléctricas "no vácuo", fenómeno que já tinha despertado a curiosidade de Michael Faraday mas cujo estudo só foi seriamente empreendido em meados do século, quando um hábil construtor de instrumentos científicos Weinstr (1814-79) conseguiu produzir tubos de vidro nos quais reinavam pressões baixíssimas, que chegavam a atingir 10^{-5} mm Hg. [Fundamental a invenção de bombas de mercúrio]

Toda uma série de físicos como Plucker, Hittorf, Crookes realizaram investigações sobre esse curioso fenómeno e, paulatinamente, foi-se percebendo mais ou menos o que ocorria. Plucker, que era de formação um matemático, observou que o fio era análogo ao electrodo negativo que era responsável pelos fenómenos luminosos observados e que a mancha ^{fluorescente} provocada por esse alho no vidro via a sua posição alterada pela presença de um íman. Hittorf, aluno de Plucker, observou que aquilo que saía do cátodo e da lugar à mancha, se é interceptado por um objecto sólido dá lugar a uma sombra geométrica, o que implica uma propagação rectilínea (1869). Crookes, um inglês, repetiu muitas das experiências de Plucker, Hittorf e outros com grande habilidade mas inventa uma teoria altamente fantástica que só tinha de verdadeiros a hipótese do carácter corpuscular da radiação.

Verá afinal o grande J. J. Thomson (1856-1940) quem delimitará essa medida na sequência de uma série de experiências que muito fortemente o celebraram e deram ao laboratório Cavendish, onde trabalhava e do qual foi director, uma grande reputação. Com a ajuda de um espelho giratório mediu a velocidade do fluxo catódico (10.000 km/s) o que mostrava que não eram moléculas nem radiação electromagnética [Hertz supusera que era uma radiação electromagnética, Crookes que eram moléculas] Thomson intuiu que o feixe era constituído por corpúsculos carregados negativamente, o que Perrin verificou formalmente introduzindo um cilindro metálico no tubo e constatando que ele se carregava negativamente.

Tudo isto culminou com as famosas experiências em que Sir J. J. Thomson, submetendo o feixe catódico à acção de campos magnéticos e eléctricos de intensidades bem determinadas, pode calcular, graças à variação da trajectória resultante desses campos, determinar o valor do cociente e/m . O valor de e , a carga eléctrica elementar, era sugerido pelas experiências de electroquímica (bem como pela interpretação das experiências de Zeeman pela teoria da electrónica de Lorentz) e assim se calculou o valor de m , quase 2.000 vezes menor que o do átomo de hidrogénio. Assim foi descoberto o electrão (1897).

Heinrich
Geissler

Lab. Cavendish
isto em
Cambridge
em 1870.

A feixe atravessa
a uma fina
placa electrica
o que parecia
demonstrar a
sua natureza
de corpuscular

Esta lição constitui, de certo modo, um epílogo — o epílogo da Física clássica. Na verdade, após termos discutido a revolução científica do século XVIII simbolizada pela figura de Galileu, analisámos sucessivamente a evolução da Mecânica, a constituição como ciências da Óptica e do Electromagnetismo (que viriam a permitir a Maxwell uma poderosa síntese entre as duas teorias), e, enfim, o desenvolvimento paralelo da Termodinâmica e da Física estatística, sobretudo no curso do século XIX. Estes são, de facto, os três grandes pilares da concepção da Física hoje dita clássica. Temos quase totalmente esboçado o quadro da concepção de mundo reinante nos começos deste século, a qual vai sofrer duas grandes revoluções associadas ao nascimento da teoria da Relatividade por um lado, da teoria quântica por outro. E se digo que esse quadro está quase totalmente esboçado é porque ainda não me referi a um aspecto significativo da concepção clássica do mundo material: a informação que foi adquirida sobre a estrutura íntima da matéria ao longo do século XIX.

De facto, tivemos ocasião de analisar as contradições entre as concepções clássicas de espaço e de tempo e a doutrina electromagnética expressa pelas equações de Maxwell. Procurei mostrar-vos que, nesse contexto, o ~~resultado~~ resultado negativo da experiência de Michelson era incompreensível e exigia, afinal, a introdução de algo de radicalmente novo — e esse novo foi a Relatividade. Mas, como o que dissemos até agora, a revolução paralela que conduziu à teoria dos quanta permanece incompreensível. A razão é que nada dissemos ainda sobre os progressos feitos pela física teórica no conhecimento da estrutura da matéria. É essa lacuna que procuraremos preencher hoje. E, para isso, tratare-mos essencialmente dos temas, a espectroscopia e as descargas eléctricas no vácuo.

No domínio da espectroscopia, o verdadeiro precursor ^{foi} um alemão chamado Fraunhofer (1787-1826). De família muito pobre, Fraunhofer ficou orfão aos 14 anos, salvando-se miraculosamente de um desastre que vitimou os seus e lhe valeu a misericórdia do elector da Baviera que o ajudou financeiramente de forma a permitir-lhe tornar-se um hábil fabricante de espelhos e talha de vidro. Na sua curta vida (morte de tuberculose aos 39 anos) Fraunhofer construiu alguns dos melhores telescópios de que a Europa dispõe nos começos do século XIX. Mas o que imortalizará o seu nome é a descoberta das riscas espectrais.

numerosas linhas, Fraunhofer atribuiu-lhes a existência puzmas com o qual observa a decomposição da luz do espectro solar. E é no decurso dessas observações que a sua atenção é atraída pela existência, ao longo do espectro, de numerosas riscas negras — aquilo a que hoje chamamos hoje um espectro de riscas de absorção. Ele não foi, de facto, o primeiro a observá-las (outra o tinham feito ocasionalmente) mas foi o primeiro a atribuir-lhes importância e a procurar determinar as suas propriedades.

Fraunhofer verificara que essas riscas se encontravam igualmente na luz emitida por outros corpos celestes (a Lua, Vénus) e que era possível obter no laboratório algo de semelhante. Assim, colocando um sal de sódio numa chama, observava-se no espectroscópio um par de riscas amarelas brilhantes — aquilo a que hoje chamamos hoje um espectro de emissão.

Fraunhofer tinha sido capaz de perceber que a posição ~~das riscas~~ de cada risca no espectro era algo de fixo e, utilizando redes de difracção, foi capaz de atribuir a cada risca um certo comprimento de onda. As riscas mais importantes foram baptizadas por ele com as letras do alfabeto, e foi capaz de recontecer que a intensa risca dupla amarela do espectro do sódio — continuamos hoje a chamá-lhe a risca D — aparecia igualmente no espectro solar sob a forma dum par de riscas negras. Mas Fraunhofer foi incapaz de perceber o significado desta coincidência.

Nas décadas seguintes numerosos investigadores interessaram-se por estas riscas de Fraunhofer sem que todavia se tenham alcançado progressos sensíveis. A espectroscopia ia, efectivamente, tornar-se algo de muito vivo no meado do século graças à intervenção de uma família muito célebre na história da Física: o duo Bunsen-Kirchhoff.

Robert Bunsen (1811-1899) e Gustav Kirchhoff (1824-1887) eram ambos professores na Universidade de Heidelberg, uma das mais antigas e reputadas universidades alemãs. Bunsen era um experimentador engenhoso e imaginativo, Kirchhoff um brilhante teórico. Durante mais de 25 anos, até à morte de Kirchhoff trabalharam em conjunto, tendo-se sempre entendido muito bem, e a complementaridade das suas aptidões serviu-os afinal a ambos. Esta harmoniosa colaboração fará da espectroscopia uma ciência.

Para começar, apoiado nos conselhos e sugestões do seu amigo Kirchhoff, Bunsen verifica experimentalmente que as ~~riscas~~ riscas brilhantes emitidas pelos elementos químicos não variam com a temperatura e permanecem as

mesmas quer se trate de um elemento puro, quer se este elemento estiver integrado numa molécula. Assim, o sódio puro e o sódio quando ligado ao cloro para formar cloreto de sódio emitem exactamente as mesmas riscas — o que significa que a presença dessas riscas no espectro é um meio infalível de identificar a presença do sódio na substância emissora. Mas não só um meio infalível como prodigiosamente eficaz: as riscas características de um elemento continuam a ser detectáveis mesmo se esse elemento está presente em quantidades infinitesimais, muito para além daquilo que está ao alcance da química analítica usual. Digamos, para fixar uma noção de grandezas, que um milionésimo de um grama é muito mais do que suficiente para atestar a presença de um elemento químico — e a partir dos trabalhos de Bunsen a importância prática da espectroscopia de emissão deixou de oferecer quaisquer dúvidas. Isto bastaria para justificar o imenso trabalho realizado na segunda metade do século passado por inumeros físicos e químicos no sentido de identificar exactamente as riscas que correspondem aos diversos elementos.

Mas tudo isto valia, em princípio, para as riscas coloridas correspondentes ao espectro dito de emissão. Mas como entender que riscas com os mesmos comprimentos de onda que as desse espectro aparecessem por exemplo no luz solar sob a forma de riscas negras? Kirchhoff e Bunsen mostraram que se a luz emitida por uma fonte luminosa intensa qualquer fosse obrigada a atravessar uma solução de um dado elemento, as riscas características desse elemento apareciam no espectro sob a forma de riscas escuras. Por outras palavras. A explicação era quasi evidente: significava que se um elemento era capaz de emitir ~~com~~ com grande intensidade radiação com certos comprimentos de onda (espectro de emissão) esse mesmo elemento também tinha a propriedade de absorver selectivamente as radiações com esses mesmos comprimentos de onda (espectro de absorção). Os espectros de absorção caracterizam a matéria absorvente tal como os espectros de emissão caracterizam a matéria emissora.

Tudo isto ia ter grandes consequências de vários pontos de vista. Com a espectroscopia, tornava-se possível identificar um elemento químico pelo simples exame da luz que ele emite; isto é válido mesmo se esse elemento ainda não tiver sido identificado quimicamente. Por volta de 1860, o próprio Bunsen identificou dois novos elementos químicos — o rubídio e o cézio, dois metais

alcázar — através das suas riscas espectrais. Mas ~~1859~~ anos antes Kirchhoff tinha feito algo de mais espectacular. Tirando partido do facto, já observado por Fraunhofer, de que a bela risca dupla do sódio se encontra, sob a forma de um par de linhas negras no espectro solar, Kirchhoff concluiu que nas camadas superficiais do Sol deve existir sódio, cuja presença seria responsável por esta risca de absorção.

Esta conclusão de Kirchhoff (1859) foi um belo escândalo. Pois não tinha Auguste Comte apresentado, como um exemplo de algo que seria inacessível aos homens para sempre, a composição química das estrelas? Kirchhoff concluiu exactamente o contrário e, ao afirmar a presença de sódio no Sol, sugeria ~~que~~ que todo o universo não só era regido pelas mesmas leis, como ensinara Newton, mas constituído provavelmente pelos mesmos materiais. Dez anos mais tarde um elemento ~~descoberto~~ ^{descoberto} foi identificado directamente no Sol (por isso foi chamado o hélio) e só no fim do século é que a sua presença seria recetecida na atmosfera terrestre.

Nada vos direi, pelo menos hoje, dos importantes trabalhos de Kirchhoff sobre a teoria do corpo negro. O essencial a reter é que, após Brunsen e Kirchhoff, a espectroscopia despertou imenso interesse. Ficou na ordem do dia a identificação dos espectros dos diversos elementos, aliás não só no domínio do visível como no do infra-vermelho e do ultra-violeta (a existência de radiações aquém e além do visível tinha sido verificada em 1800-1801 pelo astrónomo inglês Herschel e pelo alemão Ritter). Constituíram-se autênticos atlas das intensidades e comprimentos de onda dos espectros de riscas dos vários elementos.

Este fecundo trabalho experimental permanecia todavia sem qualquer contrapartida teórica. Se um espectro de riscas caracteriza um elemento químico e se um elemento químico é constituído por átomos todos iguais, a conclusão é que o espectro é uma propriedade do átomo. Mas porque razão cada átomo emite ou absorve a luz preferencialmente segundo determinados comprimentos de onda? Disso não se tinha a menor ideia. Mais modestamente, nem sequer se conseguia obter fórmulas empíricas capazes de descrever este ou aquele espectro. Todas as numerosas tentativas feitas nesse sentido foram baldadas até que a infinita paciência de um suíço, Balmer, alcançou em 1885 um primeiro êxito. Balmer demonstrou que uma fórmula simples dava conta das riscas (quatro riscas principais) do espectro visível do mais simples dos átomos. A fórmula é $v = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$

17
 Rydberg (1889)
 Lyman (1906)
 Paschen (1908)
 Brackett (1922)
 Pfund (1924)
 $R = 109677 \text{ cm}^{-1}$

onde R é dita a constante de Rydberg (um sueco). Ritz, um alemão, demonstraria em 1908 que todas as séries de ríscas se podem escrever sob a forma

$$\nu = T_n - T_m \quad n \text{ e } m \text{ inteiros}$$

resultado que é conhecido pelo "princípio de combinação" e se revelará fundamental para o desenvolvimento da física quântica.

Entretanto, e desde muito cedo, outras razões indirectas havia para atribuir aos átomos uma estrutura complexa. Várias observações tinham estabelecido analogias entre as propriedades de determinados elementos simples e diversas combinações empíricas foram tentadas de forma a ordená-los tendo em evidência essas analogias. Esses trabalhos culminariam, como se sabe, com a obra do russo Mendeleiev que, por volta de 1870, dispôs os elementos segundo pesos atômicos crescentes, mas de forma a reagrupar ~~em~~ ^{em} uma mesma coluna aqueles elementos com propriedades análogas; na essa tentativa exigiu que no seu "Quadro Periódico" Mendeleiev deixasse vazias um certo número de casas — o que só podia explicar-se pela existência de elementos ainda desconhecidos cujas propriedades era até possível prever. A ~~descoberta~~ descoberta de alguns desses elementos e, para mais, com as propriedades previstas, veio mostrar que o "Quadro Periódico" traduzia certamente uma realidade profunda, e começou-se a suspeitar que os átomos eram, de facto, edifícios complexos cujas propriedades tinham algo de comum quando ocorria um certo aumento de complexidade — embora, bem entendido, ninguém suspeitasse qual a natureza desses edifícios ou a razão de ser de tal periodicidade.

Mas, para além do progresso da espectroscopia ou dos insolúveis mistérios subjacentes ao quadro de Mendeleiev, outro tipo de experiências veio trazer alguma luz sobre os fenómenos microfísicos, as experiências com as descargas eléctricas no vácuo. Já o grande Faraday observara com curiosidade o estranho fenómeno de radiação que acompanhava as descargas eléctricas no vácuo mas o estudo do fenómeno só foi seriamente empreendido após o meado do século, graças sobretudo à construção de tubos em que reinavam baixíssimas pressões (da ordem de 10^{-6} mm Hg) pelo hábil operador alemão Geissler (1814-79).

Com as investigações de uma série de físicos, ^{nomeadamente} Plücker, Hittorf, Crookes, veio a perceber-se mais ou menos o que ocorria nos "tubos de Geissler": uma

movimentos, actuando umas para presença de campos eléctricos e magnéticos, parte do cátodo para a região do ânodo. — sem que haja ainda acordo sobre se se trata de radiações electromagnéticas ou de corpúsculos. Seria Sir J. J. Thomson que com uma série de experiências justamente célebres em que submete o "feixe catódico" à acção de campos eléctrico e magnético bem determinados e, ~~pelos~~ graças à variação da trajectória assim obtida, ~~estabelece~~ determina o valor numérico do cociente entre a carga (relativa) e a massa dessas partículas. Conhecido e/m e atribuído a e o valor da carga eléctrica elementar que era superior pelas experiências de electroquímica (e pela experiência de Zeemann interpretada por Lorentz), Thomson podia calcular o valor de m que era quasi duas mil vezes inferior à massa do hidrogénio. Assim foi descoberto o electrão. (1897)

Entretanto Röntgen observou que do choque dos raios catódicos com a matéria nascem radiações com propriedades estranhas (1895) que, por essa razão, ele designou como raios X. As propriedades dos raios de Röntgen ou raios X (nomeadamente as aplicações médicas à radiografia) suscitaram imenso interesse e, desde logo, se suspeitou que se tratava de ondas electromagnéticas de altíssima frequência — o que só seria confirmado por Laue, Friedrich e Knipping em 1912 (difracção pelos cristais).

Mas essa era, na verdade uma época, em que a Física em marcha acelerava o passo. No ano de 1895 em que Röntgen descobre o raio X Henri Becquerel observa em Paris as estranhas propriedades de certos minerais de emitirem radiações e, em 1898, Pierre e Marie Curie isolam o rádio. O facto de átomos emitirem espontaneamente raios de radiações electromagnéticas (raio γ) mas também electrões (raio β) e átomos de hélio ionizados (raio α) vinha dissipar as últimas hesitações quanto à necessidade de olhar os átomos não como algo de indivisível mas como construções complexas de que o electrão seria certamente uma das peças.

Deste modo, e com o fim do século, o ~~antigo~~ problema de conceber a estrutura dos edificios atómicos estava claramente posto. Haveria que pedir a essa estrutura que explicasse o espectro de riscas, bem como as propriedades químicas e físicas dos elementos, para não falar já da periodicidade de Mendeleiev. Um tal programa recobria-se para além das forças da física clássica.

12/11

131

Introdução

Tivemos ocasião de estudar, numa lição anterior, a obra dos físicos do século XVII no domínio da termometria bem como os progressos que então se fizeram na compreensão dos fenómenos em que intervem a pressão e, em particular, a pressão atmosférica; no tempo de Newton, graças a Torricelli, Guericke, Pascal, Boyle e vários outros, o célebre problema da possibilidade (ou impossibilidade) da existência do "vazio" estava totalmente esclarecido.

O século seguinte continuará essa obra e criará as condições necessárias para que, bastante mais tarde, a descoberta fundamental dos princípios da termodinâmica se torne possível. Mas, de facto, a contribuição dos homens do século XVIII revelou-se mais importante do ponto de vista prático, numa perspectiva técnica do que do ponto de vista científico. Nesse tempo, a máquina a vapor não se é inventada mas utilizada em larga escala sem uma compreensão correcta das bases teóricas do seu funcionamento. Apesar das suas graves limitações a teoria do "calórico", então reinante, bastou para permitir a construção de motores térmicos já bastante eficazes — e essa história curiosa e instructiva que será o tema da nossa lição de hoje.

O "calórico" e a calorimetria

O termómetro foi uma invenção do século XVII, e o mesmo se pode dizer das escalas termométricas muito embora a adopção duma escala termométrica universal tivesse tardado muito, com todos os inconvenientes que daí advinham: em 1780 ainda eram utilizadas 19 escalas termométricas diferentes, as mais populares sendo a escala centigrada e a Fahrenheit. Apesar de certas observações discordantes que já os homens da "Academia dei Lincei" tinham feito, pensou-se durante muito tempo que o grau — unidade de temperatura — podia servir igualmente de unidade de calor. Aliás esse era o tempo em que a tendência era para considerar imaginárias substâncias sem peso, responsáveis pelos vários tipos de fenómenos: havia um fluido eléctrico, um fluido magnético, uma espécie de fluido químico (o "flogisto", alije como o anti-oxigénico) e, naturalmente, um fluido calórico (o sítio o calórico, que passava dos corpos quentes para os corpos frios, sem ser criado nem perdido).

A doutrina do calórico só foi definitivamente destruída cerca de 1850 e, durante

Desde esse momento a ciência da física passou a ser considerada uma ciência experimental. O calor é considerado uma forma de energia e não mais uma substância.

Guernica-Laboratório, 33.

o novo calor o eu que já tinha mais incertezas quanto a natureza de calorimetria então realizada e que caracterizam esta época pareciam confirmá-la plenamente. Assimlarei mais adiante duas vezes — duas grandes vezes — discordantes mas que não foram entendidas.

Os primeiros trabalhos importantes de calorimetria estão ligados ao nome de um russo chamado Richmann que, antes do mesmo século, demonstrou que se juntar mas duas quantidades de massas m_1 e m_2 duma substância homogênea, que se encontram a temperaturas t_1 e t_2 , estabelece-se entre elas um equilíbrio térmico a uma temperatura t intermédia entre t_1 e t_2 e que é tal que

$$(m_1 + m_2)t = m_1 t_1 + m_2 t_2.$$

Mas o grande homem da calorimetria foi incontestavelmente Joseph Black (1727-95) Médico, químico e físico, professor nas universidades de Glasgow e de Edimburgo — Black interessou-se em 1755 pelo estranho fenómeno

que corresponde a permanência durante o verão de massas de neve transformada em gelo, as quais fundem muito lentamente; do mesmo modo, teve a capacidade de se admirar com o facto (que tanto tinham observado antes dele!) de que seja necessário tanto tempo para que a água a ferver e dixisse sob a forma de vapor. A explicação que lhe parecia natural era a de admitir que para transformar o gelo em água ou a água em vapor eram necessárias grandes quantidades de "calor" e, como este era considerado inextinguível, havia que supor que ele continuava a existir combinado com as partículas da substância, tomando pois a forma de "calor oculto" ou "calor latente". Esta curiosa designação de calor "latente" continua hoje ainda a ser utilizada.

Mas Black não se limitou a teorizar e tratou de realizar as medições necessárias para dar prova a sua ideia. Experimentador muito hábil, ~~mas~~ verificou que, em princípio, era necessária uma mesma quantidade de calor para elevar de um grau uma certa massa de água; se nos referirmos a um grama de água essa quantidade de calor é aquilo a que chamamos hoje a caloria. Mas isso não era assim quando ao processo intervinha uma mudança de estado. misturando massas iguais de água a 79° e de gelo a 0°, não obtinha (como poderia sugerir a fórmula de Richmann) uma massa total de água a 39,5 mas sim água a 0°. O resultado era realmente surpreendente mas as ideias de Black permitiam-lhe interpretá-lo sem dificuldade: significava apenas que, para passar do estado sólido ao estado líquido, uma certa massa de água necessita de armazenar um calor "oculto" 79 vezes maior do que o necessário para elevar de 1° a temperatura do líquido. Não se trata hoje que o calor se funde do gelo — de 79,7 calorias por grama.

Massa electrizada

água = neve + vapor do fogão

Black verificou que ocorre um fenómeno análogo na vaporização da água e demonstrou experimentalmente que para vaporizar uma massa de água a 100°C é necessária uma quantidade de calor 445 maior que a que requerera a elevação de 1° da temperatura dessa massa de água. Mais ainda, num caso como no outro a hipótese do calor latente mostrava-se satisfatória pois ao sofrer a mudança de estado inversa (de líquido a sólido ou de vapor a líquido) a substância restituía exactamente a mesma quantidade de calor que fora necessário fornecer-lhe. Como não acreditar que o calor era, de facto, um fluido indestrutível?

Princípios

Por outro lado devemos a Black a verificação experimental de que a quantidade de calor necessária para elevar dum grau a massa de uma substância dependia da natureza dessa substância e era aliás, característica dela. Era a noção de calor específico que assim se afirmava. Se tivermos uma massa m_A de uma substância A de calor específico c_A e que se encontra à temperatura t_A , e uma massa m_B de uma substância B cujo calor específico é c_B e se encontra à temperatura t_B , o equilíbrio térmico entre elas estabelecer-se-á a uma temperatura comum t . Suponhamos, por exemplo, $t_A > t_B$. Então o corpo A perde uma quantidade de calor $m_A c_A (t_A - t)$ e o corpo B ganha uma quantidade de calor $m_B c_B (t - t_B)$ e como estas quantidades devem ser iguais vem

$$m_A c_A (t_A - t) = m_B c_B (t - t_B)$$

$$t = \frac{m_A c_A t_A + m_B c_B t_B}{m_A c_A + m_B c_B}$$

que é a generalização da fórmula de Richmann.

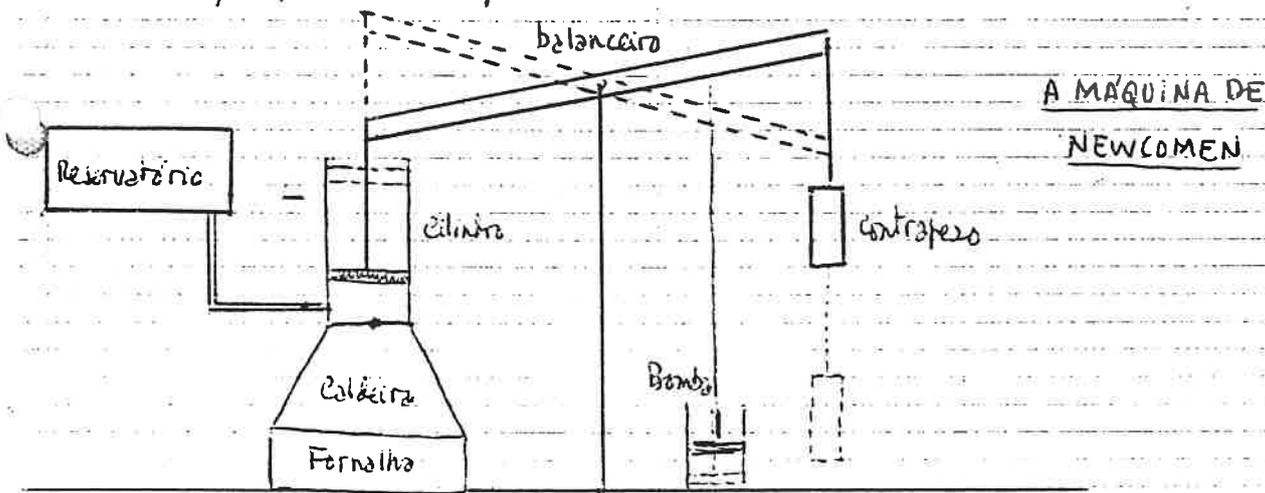
James Watt e a máquina a vapor

O cunho desta história é que, embora ~~Black~~ Black nunca se tivesse interessado pelas aplicações eminentemente práticas que podiam resultar dos seus trabalhos, estes tiveram influências de forma decisiva a história da máquina a vapor e, através dela, contribuir para acelerar uma revolução industrial que já se anunciava numa forma tímida. Mas para apreciar convenientemente a situação há que voltar um pouco atrás.

Dixemos na brevida altura que os Helenistas (e, nomeadamente Ctesibius) tinham concebido que era possível produzir trabalho gastando calor e, com esse fim, imaginaram mesmo um dispositivo rudimentar. Mas nessa época de escravismo uma tal invenção não tinha qualquer interesse prático e não foi convenientemente aproveitada. ~~Até~~ Já no século XVII homens como o marquês de Worcester (em 1663) e o

James Watt (em 1767) tentaram construir máquinas a vapor. Papin, que foi assistente de Huygens em Paris e de Boyle em Londres e cujo nome ficou ligado à invenção do autoclave, tenta mesmo realizar uma máquina destinada a mover um batelão, a qual foi logo destruída pelos barqueiros do rio temerosos de perderem o seu ganha-pão (1707); Papin morreu na miséria em 1714.

Entretanto (e sem esquecer o inglês Savory que tentou construir uma máquina a vapor para accionar as bombas que esgotavam a água das minas) das operações de Dartmouth, Newcomen e Cawley tinham construído em 1705 o primeiro motor térmico suficientemente robusto para ser utilizado. Vale a pena recordar o esquema de funcionamento desta espécie de todas as máquinas a vapor para entender o que fez Watt a partir dos trabalhos de Black.



A máquina de Newcomen consumia combustível numa fornalha destinada a manter o ferver água numa caldeira, capaz de injectar vapor num cilindro munido dum pistão. O cilindro tinha o seu peso bem compensado por um balancete (do qual estava suspenso um contrapeso adequado) que fazia funcionar a bomba ou outro dispositivo útil. Em condições normais, o pistão encontrava-se na parte superior do cilindro, graças à acção do contrapeso. Mas se se injectava vapor de água (proveniente da caldeira) no cilindro e, em seguida, se fazia penetrar no cilindro água fria vindo do reservatório, esta condensava o vapor e provocava uma diferença de pressão entre as duas faces do cilindro que o fazia descer. Quando as pressões se equilibravam (por entrada dum novo facto de vapor), o cilindro tornava a subir, nova introdução de água fria fazia-o descer, e assim indefinidamente.

Em 1759, Smeaton enumerou quarenta e cinco grandes máquinas funcionadas segundo este sistema rudimentar, com cilindros cujo diâmetro médio e superior a um metro, e que fazia uma fornecendo uma potência média da ordem de uns 30 cavalos-vapor; o cilindro fazia algo como uns 15 ou 20 movimentos de vai-vem por minuto. Embora muito primitivas, estas máquinas produziam serviços impor-

Mormier
Labrousse, 126

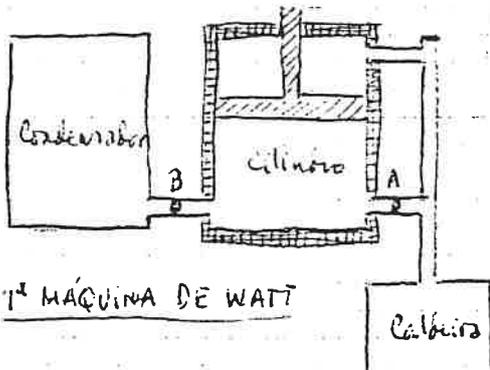
Asher, 125

Asher, 190

tantes, sobretudo na bombagem da água, tão prejudicial à boa exploração das minas; eram um fonte de potência muito inferior a tudo quanto se conhecia até então.

James Watt, que era mecânico de ferrosaria e trabalhava como uma espécie de reparador na universidade de Glasgow, onde Black era professor, deu-se conta que a demonstração de Black de que o elevado calor de vaporização da água significava que a máquina de Newcomen podia ser seriamente aperfeiçoada. Com efeito, ao introduzir ~~no cilindro~~ um jacto de água fria no cilindro da máquina para condensar o vapor, não se forçava ^{muito} a vaporizar uma parte desta água como se aqueciam as paredes do cilindro que necessitavam, em seguida, de ser reaquecidas; assim, ~~para~~ o pistão exigia para o seu movimento muito mais calor (e, portanto, muito mais combustível) do que seria necessário. Watt remediou estes inconvenientes no seu primeiro modelo a máquina com efeito simples cuja grande invenção foi o condensador. Vamos representá-la esquematicamente.

(1781)



No lado do cilindro (isolado por um revestimento de madeira para diminuir as perdas de calor) Watt instalou um recipiente, mantido a baixa temperatura por uma circulação de água fria, e que comunicava com o cilindro por um tubo munido como a válvula B. Simultaneamente, o cilindro comunicava com a caldeira por dois tubos

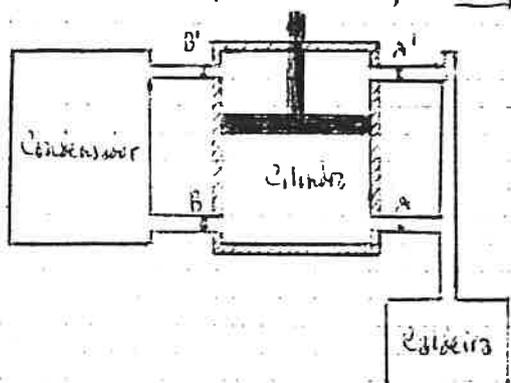
e inferior estando igualmente munido sobre a válvula A. Enfim o balanceiro, ligado à bomba aspirante e munido dum contrapeso equilibrava o peso do pistão.

Superado o cilindro cheio de vapor, o pistão mantém-se em cima por ação do vácuo e porque se exercem iguais forças nas duas faces. Se fecharmos a válvula A e abrimos B, o vapor existente na parte inferior passa para o condensador (onde se condensa integralmente) e a diferença de pressões nas faces do pistão faz-o descer. Este movimento fecha a válvula B e abre a válvula A, de modo que o vapor nas duas faces do pistão equilibra-se e o contrapeso faz subir o pistão. O ciclo pode recomeçar.

Com este sistema, Watt separa claramente a fonte quente da fonte fria. O cilindro não se deixa de ser continuamente aquecido como se procura mantê-lo à temperatura do vapor da caldeira; deixa de se dissipar energia a vaporizar parte da água vinda do reservatório e que leva elevada em seguida. Estende-se que o rendimento da máquina de Watt fosse muito superior à de Newcomen: para o mesmo dispêndio de combustíveis o ^{trabalho produzido} ~~consumo~~ era cerca de quatro vezes maior.

Nessa época de grandes progressos técnicos a maior parte dos inventores foram mais ou menos explorados por homens de negócios sem escrúpulos. James Watt teve a sorte de se ter associado com um industrial de mentalidade puritana, Boulton, que soube tirar partido das ideias de Watt para benefício de ambos. Boulton conseguiu difundir rapidamente o novo modelo propondo aos proprietários de máquinas de Newcomen substituí-las gratuitamente por máquinas de Watt com a condição de lhe restituírem um terço dos benefícios que vissem a ser feitos com a diminuição de consumo de combustível - e essa aparentemente generosidade revelou-se muito rendosa. Conta-se que os proprietários de três máquinas em Eghamwater reclamavam aterrorizados por terem que pagar anualmente a Boulton e Watt o equivalente a 60.000 francos-ouro esquecendo-se que, nesse negócio, eles próprios ganhavam o dobro dessa quantia.

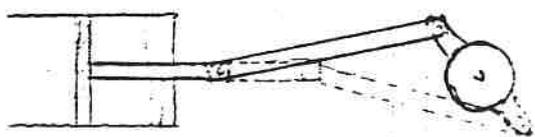
A máquina de Watt, apesar do grande progresso que representava, só era capaz de produzir trabalho durante a fase correspondente à descida do pistão e se esse efeito intermitente coincidia perfeitamente ao funcionamento das bombas, foi dificultava a utilização do aparelho em diversas indústrias. Daí o interesse da nova invenção de Watt, a máquina de efeito duplo.



Se as válvulas A' e B estão abertas enquanto A e B estão fechadas, a parte do cilindro superior ao pistão está cheia de vapor enquanto a parte inferior não o está e o cilindro desce sob o efeito da pressão. Quando o cilindro se aproxima do fim do seu curso inferior, as válvulas A' e B fecham-se enquanto se abrem A e B; o vapor

contido na parte superior escapa-se para o condensador e, simultaneamente, a parte inferior enche-se de vapor que faz subir o cilindro realizando trabalho. O ciclo recomeça ininterruptamente e a potência da máquina mantém um valor permanente.

A este aperfeiçoamento importante Watt acrescentaria em 1784 um segundo que continua a ser de utilização corrente, a biela e manivela, capazes de transformar o movimento de vai-vem do pistão do cilindro no movimento de rotações uniforme dum disco. Graças ao motor de efeito duplo e à biela e manivela a energia térmica pode ser aplicada a uma infinidade de máquinas, desde as máquinas a fiar ou a tecer o



algodão até aos moinhos de grão ou de cana de açúcar até aos dispositivos da metalurgia nova. Graças a James Watt, a revolução industrial em curso dispôs

J. Forster
422
para Watt
Nº 1
de um efeito

Regulador
de bolas
Volante

Watt aperfeiçoado
em Warrington

das fontes energéticas potentes e baratas que lhe eram indispensáveis. Num número crescente de fábricas, cada vez de maiores dimensões, todas as máquinas passaram a funcionar à custa de um único motor térmico de Watt.

A revolução industrial e a máquina a vapor

Embora em poucos minutos se possa aforar um tema cuja complexidade se vem afirmando à medida que vai sendo mais bem estudado, devo aproveitar a oportunidade para fazer um breve referencial à revolução industrial, que começa justamente no século XVIII para prosseguir até aos nossos dias, constituindo um dos acontecimentos cimeiros de toda a história humana. Os que desajazem entre os melhores um assunto de tal importância poderão reconhecer, por exemplo, ao exceto o livro de J. P. Rioux "La révolution industrielle", Senil, 1971, do qual existe uma tradução portuguesa (Dom Quixote, col. "Universidade moderna").

Antes de mais, convém assinalar que o hábito de considerar a máquina a vapor como responsável pelo advento da revolução industrial corresponde a uma perspectiva que não é somente simplista mas radicalmente falsa. Tanto assim é que, após terem fixado os contornos da revolução industrial inglesa — a primeira no tempo — em 1750, os historiadores também hoje a situam em 1770; ora o protótipo de Watt dum motor com efeitos simples data de 1781 e, apesar da sua difusão interna ter sido particularmente rápida, no fim do século só havia ainda umas 500 máquinas "Watt and Boulton" em funcionamento.

Quer isto dizer que a revolução industrial precede cronologicamente a invenção dum motor térmico eficaz, invenção que se vem inserir num processo de transformações já em marcha o qual, de certa forma, deve ser considerado como motorizador dessa invenção. A máquina a vapor teria sido, portanto, um fruto da revolução industrial muito mais do que a sua semente; foi um contexto pré-existente que mostrou a Watt a importância prática de aperfeiçoar o dispositivo primário de Newcomen e, subsequentemente, assegurou a aceitação do seu novo motor térmico por um número crescente de indústrias.

De facto, se não foi a máquina a vapor que desencadeou a revolução industrial, nem por isso é menos verdade que esta requeria, para efetivar as suas potencialidades, algo de semelhante à máquina a vapor. A invenção que devemos a Watt tornara-se, nessa fase, uma condição necessária ao prosseguimento do processo em curso, pois o capitalismo fabril exigia grandes quantidades de

imagina a pura base para fazer funcionar as novas máquinas. Mas é evidente que a exigência por que existiam essas novas indústrias, porque a tecnologia necessária ao seu funcionamento fora adquirida antes dos trabalhos de Watt.

Essa tecnologia inovadora resultou, em boa parte, duma acumulação de pequenas invenções que se processaram desde cedo, se multiplicaram sobretudo após o fim da Idade Média e acabaram por desembocar, no século XVIII sobre possibilidades qualitativamente diferentes. É nomeadamente na indústria de tecelagem, ~~que~~ desde o século a de maior importância económica, que tais novidades se fazem sentir.

Costuma atribuir-se a um pároco britânico chamado William Lee a invenção, em 1589, dum tear para fazer malha bastante aperfeiçoado, e é desse tempo o aparecimento dum tear equivalente para fazer fitas, que começa a ^{ser utilizada} ~~utilizada~~ na Holanda à volta de 1620. As décadas seguintes assistem à defloração das velhas máquinas nas quais hábeis artesões introduzem pequenas aperfeiçoamentos. Cerca de 1730 John Kay inventa a lacadeira móvel, que não só multiplica a produtividade por três ou quatro mas permitia fabricar peças de tecido mais largas que a distância entre as extremidades dos braços do operário. Este, doravante, converte-se essencialmente numa mera fonte de energia (accionando os pedais) tendo como missão abitar as fia que se quebram. Entende-se que o capitalista sonhava com uma fonte de energia barata que permitisse fazer funcionar várias máquinas com o trabalho dum só operário.

Nessa altura é inventada uma máquina automática de fiar, que não tem qualquer necessidade de ser não corresponder a uma necessidade. Mas, poucos anos mais tarde, as técnicas de produção de fio textil revelam-se incapazes de corresponder às novas capacidades de tecelagem desse fio: quatro operários de fiar não conseguem fornecer material suficiente para assegurar o trabalho dum só operário tecelão. Assim, quando em 1765 Hargreaves inventa a famosa "spinning-jenny", permitindo que um homem fizesse funcionar simultaneamente diversos fusos, o sucesso foi imediato. Doravante, a roca tradicional deixa de ter qualquer possibilidade de competir com um maquinismo que multiplica por dez a produtividade do trabalho.

Não é intencional minha refazer, embora em termos sumários, a história das novidades técnicas correlativa à revolução industrial: mesmo que me limitasse ao sector gineceiro do têxtil, se o essencial da exigência mais tempo e saber do que aguentar de que dispondo. Ora o que se passou no têxtil passou-se à "mutatis mutandis" umas décadas mais tarde com a indústria metalúrgica, com a exploração mineira, com a fabricação de maquinaria, com o advento

Usher
II, 94/seq.

Roux, 63

da química industrial etc etc. Aliás é evidente que os progressos alcançados num domí-
 nio vão repercutir-se favoravelmente em diversos outros, desencadeando um processo
 cumulativo cada vez mais rápido.

- Os interessados podem documentar-se devidamente e complementar o livro de
 livros já citados com obras específicas sobre a evolução das técnicas, por exemplo
 a clássica "História das invenções mecânicas" de A. P. Usher (de que há tradu-
 ção na Grama) e ainda "A Short History of Technology" de Derry and Williams
 reeditada em 1970 pela Oxford University Press, e não quero resistir à tentação
 de referir, numa perspectiva mais lata, esse livro ímpar dum mestre da historiogra-
 fia que é "Civilisation matérielle et capitalisme" de F. Braudel (Collin 1967),
 do qual a Grama também promoveu a tradução. Aqui, devo contentar-me com
 alguns comentários muito gerais e mais directamente relacionados com as nossas
 preocupações específicas.

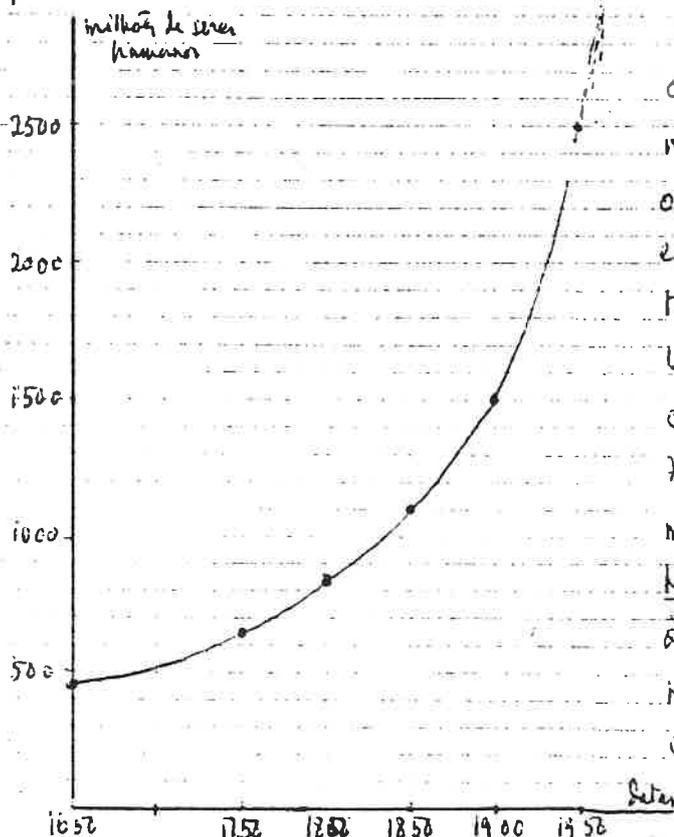
Todos sabem que, no fim do século passado, a máquina técnica começou
 paulatinamente a perder a sua indiscutível supremacia e a ser suplantada
 por outras fontes de energia que foram o motor de explosão e a electricidade.
 Por isso, fala-se muitas vezes dum "segunda revolução industrial", e até já
 procuram lançar o conceito (muito mais discutível ainda) dum "terceira
 revolução industrial" actualmente em curso, fundada na energia nuclear e
 na informática. Ora esta terminologia pressupõe que o essencial da revolução
 industrial é a inovação tecnológica, ideia restritiva que falseia radicalmen-
 te a compreensão do fenómeno histórico.

A revolução industrial necessitava dum tecnologia nova para se processar,
 mas uma condição necessária não bastaria para desencadear se não existissem
 condições socio-culturais capazes de tirar proveito das potencialidades assim
 oferecidas. Em termos muito breves, o fundamental foi a existência na primeira
 metade do século XVIII dum capitalismo suficientemente evoluído para tirar proveito
 prático dessas inovações técnicas disponíveis e, ao referir a palavra capitalismo,
 não a considerar uma classe social que não só dispunha dos capitais necessários
 ao lançamento dessas indústrias mas tinha a mentalidade adequada para ser ten-
 tado a fazê-lo. Em uma classe capitalista arcaica, a inovação tecnológica
 ter-se-ia provavelmente extinguido por falta de estímulo e não teria havido nem
 revolução industrial nem revolução tecnológica. Devido, foram os progressos técnico-
 científicos que permitiram a revolução industrial, mas não foram eles que a

monstrarão, e daí que o seu estudo ultrapasse o âmbito da história ou ciência ou da técnica para se enquadrar na história económico-social.

Uma segunda observação de ordem geral diz respeito ao tipo de homens que mais contribuíram para o advento dessa nova tecnologia. Importa saber que, durante cerca dum século, tais homens foram sobretudo artesãos, operários especializados, pequenos industriais ou simples amadores de ciência aplicada. É verdade de que todos eles, mais ou menos conscientemente, tiveram proveito das grandes progressos científicos já feitos até então, mas a intervenção directa dos ~~pequenos~~ cientistas profissionais não foi realmente significativa.

Dá a situação muda no meado do século XIX. A partir daí, são homens de ciência profissionais, universitários ou engenheiros. Quer do ponto de vista da física fundamental, quer do ponto de vista das aplicações, os problemas começam a atingir um grau de complexidade demasiado grande para que simples amadores consigam intervir eficientemente. É claro que, aqui ou além, simples autodidactas com capacidades excepcionais ainda se conseguem afirmar: basta recordar o exemplo célebre de Edison que na década de 70 inventará o fonógrafo e a lâmpada de incandescência. Mas uma andorinha não faz a primavera e o facto é que, desde então, a ciência e a tecnologia passaram a ser apanágio de profissionais. A revolução industrial demonstrava entre outras coisas, que o investimento numa possibilidade de acréscimo do saber era socialmente muito rentável. O homem de ciência, no sentido moderno da palavra é um produto da revolução industrial.



Então, para mostrar incontestavelmente as consequências que teve para a espécie humana a revolução industrial nada será mais objectivo e esclarecedor do que um gráfico da evolução da população mundial nos últimos três séculos. A um ritmo de acréscimo muito lento sucedeu bruscamente uma exponencial característica. Há dois séculos havia uns 700 milhões de homens, hoje somos uns 4.000 milhões, dentro dum século e na melhor das hipóteses, segundo os especialistas do Comité das Populações da ONU ~~teremos~~ mais de 15.000 milhões. É a própria sobrevivência da espécie que se encontra em causa...

* Cinhismo materialista.

* Clanger e hiperactividade Nº 2

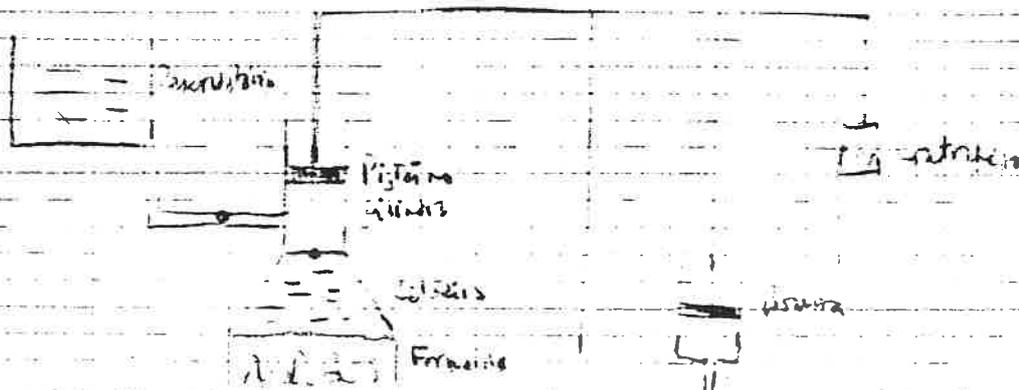
A máquina a vapor

Quando se falou da obra de Joseph Black disse-se que a sua obra, só publicada postumamente, tinha tido uma influência cientificamente diminuta no seu tempo. Não há que estranhar que da adquiriu desde logo, e graças a uma circunstância fortuita uma grande importância prática, pelo papel que desempenhou na história da máquina a vapor. Para apreciar devidamente a situação há que voltar um tanto atrás.

Já os Helenistas, e nomeadamente Ctesibius, tinham conseguido produzir trabalho mecânico a partir do vapor, embora com disposição muito rudimentar. De que forma, nessa sociedade escravagista tais disposições não pareciam ter que interesse prático e pouco ou nada se fez para as desenvolver.

Tais ideias voltaram a ser conhecidas desde o Renascimento, mas só no fim do século XVII é que se tornou possível pensar para construir máquinas a vapor desde que se utilizasse prática. Um inglês, o marquês de Worcester concebeu uma hipótese no livro publicado em 1603, e a ideia foi retomada em 1637 pelo francês Denis Papin, que foi assistente de Huygens em Paris e de Boyle em Londres e cujo nome ficou ligado à invenção da autoclave. Papin chegou realmente a construir uma máquina a vapor destinada a mover um batido, mas o aparelho foi destruído pelo barão de Turin, tendo-se perdido o seu plano - pois 1687) e o inventor morreu na miséria pouco tempo depois.

Entretanto, e seguindo-se ao avanço do seu computador Savary, que tentou construir uma máquina a vapor para accionar as bombas que exigiam a água das minas, dois operários britânicos, Newcomen e Cawley, tinham efectivamente construído nos primeiros anos trinta do século XVIII um aparelho suficiente para a utilização. É necessário lembrar o que se fez já no momento da máquina de Newcomen para entender a melhoria feita que Watt se introduziu a partir da descoberta de Black

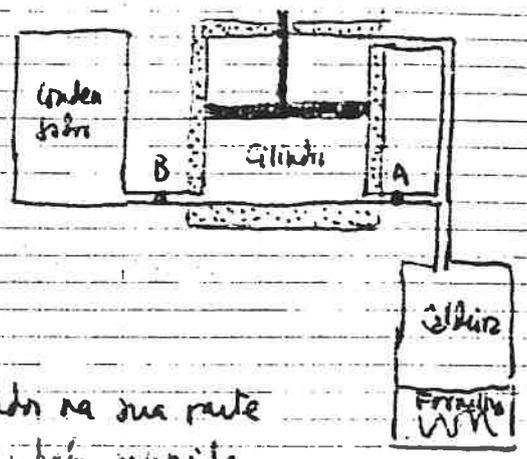


A máquina de Newcomen possuía um pistão de madeira, a qual servia para manter a água a ferver na caldeira, a qual era injetado vapor num cilindro munido de um pistão; o pistão tinha o seu peso compensado, através de um balanceiro com um contrapeso adequado e que aliás accionava a bomba ou qualquer outro dispositivo útil que se pretendia accionar. Em condições normais, o pistão, sob a acção do contrapeso, achava-se na parte inferior do cilindro; mas se se injectava no cilindro o vapor de água proveniente da caldeira e se, bruscamente, se condensava este vapor para introduzir a água fria de um reservatório, estabelecia-se uma diferença de pressão entre as duas faces do pistão e este descia no cilindro injectando novo vapor de vapor, as pressões equilibravam-se e o pistão retornava a sua posição inicial, e o ciclo podia repetir-se.

Em 1781, smetton enumerou quase uma centena de fontes máquinas a vapor funcionando neste modo, máquinas cujo cilindro tinha um diâmetro médio superior a um metro, e cada uma das quais produzia uma potência média de cerca de 10 cavalos vapor, o pistão fazendo em 15 a 20 movimentos de si-para por minuto. Embora fosse muito primitiva, tal invenção revolucionou a indústria mineira muito antes, sobretudo na sondagem de água, tal preferência à vaporização (as minas) pois, numa fonte de potência muito superior a tudo quanto se conhecia até então.

James Watt (1736-1819), que tinha uma profunda compreensão de mecânica e desejava salvar o papel de uma rede de reparação na universidade de Glasgow, estava por ele já conhecido através de estudos científicos obtidos por Joseph Black, professor de na mesma universidade. Encorajado em 1763 de reparar um modelo mecânico de uma máquina de Newcomen e Lindley, apercebeu-se de que esta podia ser melhorada se fosse aumentar significativamente o seu rendimento. Com efeito, Black tinha demonstrado experimentalmente que o calor de vaporização de água era extremamente elevado, da ordem de 450 calorias por grama. Na o sistema de Newcomen, se introduzia constantemente água fria no cilindro de máquina para provocar a condensação do vapor, mas só servia para aborrecer e desperdiçar inutilmente uma parte da água que era, em grande quantidade, sendo provocava assim um desperdício de vapor de vapor que necessitava um novo reacendimento. Tudo isto implicava um desperdício de calor e, portanto, um desperdício de substância, que motivava directamente o aumento de máquina. O grande génio de Watt para vencer as dificuldades através da sua famosa "máquina de dois cilindros" que em que introduzia uma invenção radical: o condensador. Devo representar experimentalmente esse primeiro modelo de Watt, substituindo o sistema o balanceiro e o sistema de vapor por dois cilindros.

Watt isolava o cilindro por um revestimento de madeira, destinado a atenuar as perdas de calor através das paredes. Mas o essencial era a instalação do tubo do cilindro, e sua comunicação com este através de um tubo munido de uma válvula B se um recipiente mantido a baixa temperatura pela circulação exterior de água fria. O cilindro comunicava também com a caldeira por dois tubos, situados na sua parte superior e na sua parte inferior, este também munido de uma válvula A.



Suponhamos que graças à abertura da válvula A (a válvula B estando fechada) o vapor produzido pela caldeira pôde penetrar livremente na caldeira: nos dois lados do pistão exercem-se as pressões iguais, e o pistão coloca-se à na parte superior do cilindro devido à ação do contrapeso. Imaginemos agora que se fecha a válvula A e se abre a válvula B: o vapor existente no cilindro expande-se no seu volume (onde se vai efetivamente enfiando, pois este está a baixa temperatura) e cria-se uma diferença de pressão entre as duas faces do pistão que o faz descer no cilindro. Da um dispositivo mecânico adequado, faz-se um movimento de recuo da válvula B e abrimos a válvula A, exercendo assim a igualdade de pressões nos dois lados do pistão e provocando a sua subida, isto tem por efeito, abrir a válvula B e fechar a válvula A, e o cilindro torna a descer, e assim sucede sucessivamente.

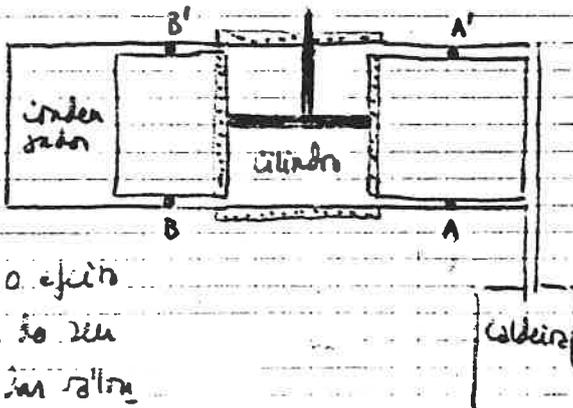
Com este dispositivo, Watt separa claramente a fonte quente (a caldeira) da fonte fria (o condensador). Procura-se manter as paredes do cilindro à temperatura do vapor da caldeira e evita-se a dissipação de energia, mas a desvantagem na máquina de Newcomen, a vaporizar água que era rapidamente condensada. Parece evidente que o verdadeiro mérito de Watt reside no fato de ser muito superior ao do modelo precedente e, na verdade, para o mesmo fim de substituir o trabalho produzido era uma de gastos e de custo.

Nesta época de grande progresso técnico, a maioria dos inventores foram impiedosamente explorados por homens de negócio sem qualificação. Watt teve a sorte de encontrar um associado que em um capitalista se neutralizava por natureza e em um ato moral Matthew Boulton, que soube explorar a invenção em proveito de ambos. Boulton conseguiu

alguma maneira a máquina de Watt propriamente dita propriamente a máquina de Newcomen substituí-la gratuitamente por máquinas de Watt com o cuidado de lhes restituírem um terço da despesa que incidem a ser feita com a diminuição do consumo de combustível, proposta aluciante mas que se veio a revelar muito rentável. Conta-se que os proprietários de três máquinas a vapor funcionando em Charneston protestaram diferentemente por terem de pagar anualmente a Boulton e Watt o equivalente a 60.000 francos-anos, esquecendo-se que entretanto eles próprios embolavam o livro dessa indústria.

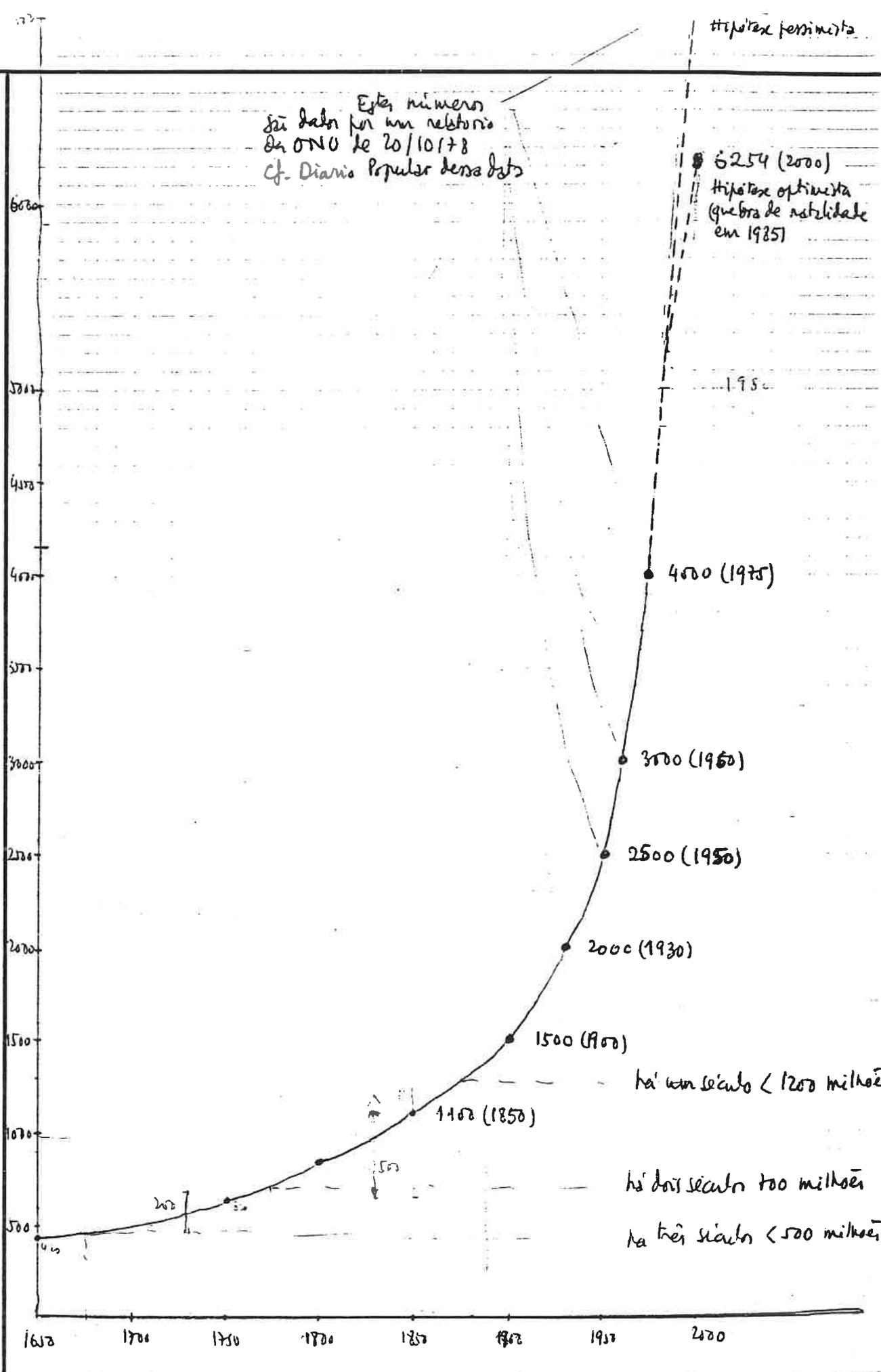
A máquina de Watt correspondia a um inverso progresso, só era todavia capaz de produzir trabalho durante a fase correspondente à descida da pistão, e esse efeito intermitente que consistia no funcionamento das bombas dificultava a utilização de nova fonte de energia em outros sectores. Daí o interesse da nova invenção de Watt, a máquina de vapor Dupin.

Se os cilindros A' e B' estão abertos enquanto A e B' estão fechados, a parte do cilindro acima da pistão está cheia de vapor e que não acontece à parte inferior, e o cilindro desce sobre o efeito da pressão. Mas, ao aproximar-se do fim do seu curso, a pistão provoca a encerramento das válvulas A' e B' e a abertura das válvulas B' e A, de modo a que a vapor saia da parte inferior e vá para o condensador e, simultaneamente, o vapor penetre na zona inferior da pistão: a pressão será agora maior na parte inferior da pistão, que voltará a subir, e o ciclo reinicia-se, a máquina produzindo portanto trabalho.



James Watt era um espírito inventivo de primeira ordem. Deveria-lhe toda uma série de outras inovações importantes, das quais se limitarei a citar o regulador de vapor, o primeiro em um sistema primitivo de auto-regulação mecânica, que corrigia automaticamente as irregularidades na produção de vapor, e o volante, um perfeito dispositivo mecânico contribuiu para uniformizar o movimento da máquina.

James Watt era um espírito inventivo de primeira ordem. Deveria-lhe toda uma série de outras inovações importantes, das quais se limitarei a citar o regulador de vapor, o primeiro em um sistema primitivo de auto-regulação mecânica, que corrigia automaticamente as irregularidades na produção de vapor, e o volante, um perfeito dispositivo mecânico contribuiu para uniformizar o movimento da máquina.



↔ Sadi Carnot (1796-1832), oficial do exército francês, filho de Lazare Carnot (le grand Carnot ou l'organisateur de la victoire) morto prematuramente em consequência de uma epidemia de cólera, publica em 1824 um pequeno livro "Reflexions sur la puissance motrice du feu".

Partindo da doutrina do calórico, e analogizando como fizera Fourier, a passagem do calor de uma fonte à temperatura t_1 a outra fonte à temperatura $t_2 < t_1$ ao fluir de um líquido de um nível mais alto a um nível mais baixo, Carnot é o primeiro a afirmar que um motor térmico exige sempre a existência de duas fontes a temperaturas diferentes, uma fonte quente que cede calor, uma fonte fria que recebe calor, sendo esta passagem do calor da fonte quente à fonte fria que permite a realização de trabalho mecânico. Para Carnot, que raciocina em termos de calórico, o calor recebido pela fonte ~~fria~~ ^{fria} deveria ser igual ao calor ~~recebido~~ ^{cedido} pela fonte ~~fria~~ ^{quente} se o motor térmico fosse perfeito (nenhuma ideia de que o calor cedido por t_1 é maior que o recebido por t_2 , a diferença sendo o trabalho realizado) mas, como os motores não são perfeitos, parte do calor cedido por t_1 é perdido por efeitos de dissipação de calor por atrito, por condução etc. Se tais efeitos pudessem ser eliminados, ~~a mesma quantidade de trabalho mecânico~~ o ciclo tornaria-se reversível, e o fornecimento de igual quantidade de trabalho mecânico permitiria elevar a mesma quantidade de calor da fonte ~~fria~~ ^{fria} à fonte quente.

Assim, Carnot afirma que, deixando de lado essas inevitáveis perdas de calor correspondentes às imperfeições da máquina, as quais impedem que um ciclo seja considerado como irreversível, o factor essencial que interveem na determinação do rendimento de uma máquina térmica são as temperaturas das duas fontes. A questão que surge imediatamente é a de saber se outros factores não desempenham um papel determinante, por exemplo a natureza da substância material que veicula o calor da fonte quente para a fonte fria; Carnot responde que não, que é necessário que todos os motores reversíveis funcionando entre fontes a temperaturas t_1 e t_2 iguais tenham ter o mesmo rendimento. Na verdade, argumenta ele, suponhamos dois ciclos reversíveis que ambos extraíam da fonte quente a mesma quantidade de calor Q e que produzissem diferentes quantidades de trabalho mecânico, w' e w'' ; digamos, para fixar as ideias que $w' > w''$. Então, fazemos funcionar o segundo destes motores

de forma a que, em cada ciclo, ele faça ascender a quantidade de calor Q da fonte quente à fonte fria, haveria que dispensar um trabalho mecânico W'' , mas paralelamente o segundo motor graças à passagem da mesma quantidade de calor Q da fonte quente à fonte fria produziria um trabalho mecânico $W' > W''$ (por hipótese), de forma que as fontes permaneceriam perpetuamente idênticas e si mesmas com criações de trabalho mecânico. Nestas condições, admitir que dois ciclos reversíveis funcionando entre as mesmas temperaturas podem ter rendimentos diferentes, corresponde a possibilidade de obter energia mecânica a partir de nada — algo que já desde os tempos da Renascença surgiu como absurdo e que Galileu admitia (no seu estudo sobre os movimentos ao longo do plano inclinado) ser impossível. Baseado na impossibilidade de construir o chamado "perpetuum mobile", Carnot afirma claramente que o rendimento de um motor térmico depende apenas das temperaturas das fontes.

É curioso observar que este brilhante raciocínio de Carnot em que se encontra virtualmente expresso aquilo a que chamamos hoje o segundo princípio da Termodinâmica resultaram da teoria do calórico, que ignora a equivalência entre calor e trabalho mecânico. Torna este que leva a profundas reflexões de natureza epistemológica. Como foi possível que Carnot não tivesse percebido que, no ciclo reversível, o calor absorvido pela fonte fria é sempre menor que aquele cedido pela fonte quente, essa diferença sendo justamente o trabalho mecânico realizado pelo motor térmico? A verdade é que, após a publicação do seu epísculo, Carnot acabou por compreender que a doutrina do calórico era insustentável e que o motor térmico serve justamente para transformar em trabalho mecânico uma fracção do calor cedido pela fonte quente. Quinzi cinquenta anos mais tarde, quando foram estudadas as notas em que trabalhava quando a morte o levou, verificou-se que nessas notas se encontravam as primeiras tentativas para determinar o equivalente mecânico do calórico. Pode dizer-se que o desaparecimento prematuro teve puro génio que foi Sadi Carnot atrasou de um tanto anos a descoberta dos princípios da Termodinâmica.

Esse atraso não foi, nem poderia ser, realmente sensível porque mesmo os génios vivem e trabalham num quadro cultural que os condiciona fortemente. O período de gestação da Termodinâmica em princípios chegara, de facto, ao seu termo histórico e a prova é que, talvez anos após a morte de Carnot, o primeiro princípio, o princípio de conservação da energia era proclamado

quasi ao mesmo tempo por três investigadores de nacionalidades diferentes e que não se conheciam entre si: o alemão Mayer, o inglês Joule, o dinamarquês Celsius.

Julius Robert Mayer (1814-78) era um médico alemão interessado por física. Em 1840, embarcado como médico de bordo num veleiro com destino a Java, ocupa os longos meses de travessia a reflectir numa série de problemas que o intrigavam — nomeadamente as origens do calor animal que, como Lavoisier demonstrara, resultava da combustão fisiológica dos alimentos. A pequena história conta que foi uma observação accidental e aparentemente anódina — a verificação de que, nos trópicos, o sangue venoso era muito mais vermelho que na sua Holanda natal — que o levou à ideia de que o trabalho mecânico e o calor se podem transformar um no outro. De fora desta ideia de base, apercebe-se rapidamente de numerosas consequências que dela resultam e, de regresso à Europa, envia uma memória sobre este problema ao director da então famosa revista "Annals de Física e Química" ⁽¹⁸⁴²⁾. cujo director, o físico Poggenhoff, não só não publicou o artigo como nem sequer lhe respondeu uma palavra. Novas tentativas no mesmo sentido dão resultados idênticos até que Mayer consegue publicar um ^{outro} artigo na revista ⁽¹⁸⁴⁵⁾ "Annals de Química e Farmácia" onde expunha as suas ideias e afirmava que "a queda de um peso de altura de 305 metros equivale à elevação de 1° e na temperatura desse mesmo peso de água". As ideias de Mayer não encontraram eco e, desesperado com a ideia de que encontrara algo de muito importante a que ninguém dava ouvidos, Mayer tenta suicidar-se em 1850. Alarmada com essa tentativa, a sua família considera-o louco e interna-o num manicóquio, donde sai para continuar a trabalhar para se fazer ouvir. Em 1858, Mayer publica novo trabalho onde distingue cinco formas de energia: energia potencial, energia cinética, energia electromagnética, energia química e calor, e dá numerosos exemplos de fenômenos físicos que correspondem à transformação duma forma de energia noutra. Entretanto, a ideia do princípio de conservação de energia começa a ser aceite mas a importância e prioridade do trabalho de Mayer negada. Só no fim da sua amargurada vida vê alguns proclamarem o valor da sua contribuição e, entre estes, há que citar Dühring, o filósofo que ficou na história da filosofia graças à obra que Engels escreveu para atacá-lo.

Nos mesmos anos ~~em~~ que Mayer, o inglês James Prescott Joule (1818-1879) desenvolveria ideias idênticas, ao qual chegara aliás por via muito diferente. Joule fabricava e vendia cerveja e fazia física como amador, o que não o impedia de levar a palma aos profissionais. O seu ponto de partida foi o estudo dos efeitos caloríficos da corrente eléctrica — a que hoje chamamos o efeito Joule — que, a seu ver, só poderia resultar das reacções químicas provocadas na bateria. Compreende-se muito bem que, a partir daí, Joule tenha chegado rapidamente ao conceito de energia, que se poderia manifestar ou armazenar sob diversas formas (química, eléctrica, calorífica, mecânica etc.) Algo de muito importante e significativo na sua obra foi a multiplicidade de experiências que imaginou e realizou para determinar o equivalente mecânico da caloria — o valor de 4,15 cal/Joule a que chegou correspondendo a um erro de ordem de 1% em relação ao valor exacto.

O terceiro dos nomes associado à descoberta do princípio de conservação da energia, e isto enfentem-se kinamarquei Colbiap que enuncia a lei em termos gerais cerca de 1843, tenta igualmente determinar o equivalente mecânico da caloria mas se ocupa sobretudo em fundar toda uma especulação metafísica sobre essa descoberta. A sua obra é menos interessante do que a de Mayer ou a de Joule.

O facto importante é que, por volta de 1850, e apesar da resistência dos partidários do calórico, o princípio de conservação da energia integra-se na doutrina física. E, de forte dessa grande verdade, a obra de Carnot vai poder ser desenvolvida conduzindo rapidamente à formulação inequívoca do segundo princípio da Termodinâmica. Será sobretudo a obra do grande teórico alemão Rudolf Clausius (1822-88) que foi professor das universidades de Berlim e de Bonn.

O trabalho de Clausius, cujo essencial se situa no ano cinquenta, conduz à descoberta fundamental de uma função termodinâmica de natureza profundamente abstracta a que ele chamou entropia (do grego entropia, "voltar para trás"). A própria etimologia da palavra é reveladora do significado da grandeza — a entropia vai traduzir a existência de um sentido privilegiado da evolução nos fenómenos caloríficos.

Consideremos com efeito a evolução irreversível que se produz quando temos em contacto dois corpos a temperaturas diferentes. Para simplificar, suponhamos que não há produção de trabalho e que o sistema está termicamente isolado, no sentido

em que não haverá perca de calor. Como se sabe, o calor flui da corpo mais quente para o mais frio sendo impossível, como Clausius afirmará sem ambiguidade, que o processo inverso se realize espontaneamente. Nas condições consideradas, o primeiro princípio da Termodinâmica traduzir-se-á pela afirmação de que a quantidade de calor cedida pelo corpo quente — denotemo-la por $-Q$ — conterá exactamente a quantidade de calor — que será $+Q$ — recebida pelo corpo frio, de modo a termos $-Q + Q = 0$. Mas como vamos exprimir o segundo princípio da Termodinâmica, que implica aqui que o corpo quente perde necessariamente calor? Clausius ensinou-nos que, para tal, basta considerar a grandeza que responde a dividir a quantidade de calor cedida ou recebida por cada uma das fontes pela respectiva temperatura — que é aquilo a que ele chamou justamente entropia: então a entropia do ~~do~~ corpo quente diminui da grandeza $-\frac{Q}{T_1}$, enquanto a entropia do corpo a temperatura mais baixa aumenta da quantidade $+\frac{Q}{T_2}$. A variação da entropia do sistema isolado (conjunto dos dois corpos) será portanto $S = -\frac{Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2}$ e como $T_1 > T_2$, por hipótese a entropia do sistema aumentará; por exemplo, se $T_1 = 3T_2$ então $S = -\frac{Q}{3T_2} + \frac{Q}{T_2} = \frac{2Q}{3T_2} > 0$. A exigência de que o calor passe do corpo quente para o corpo frio traduzir-se-á assim pela exigência de um acréscimo da entropia do sistema, pois que um fluxo de calor no sentido inverso implicaria uma diminuição da entropia. Assim, Clausius traduz a irreversibilidade dos processos termodinâmicos em sistemas isolados pelo crescimento necessário do valor de entropia, que servirá aliás para definir o sentido em que um processo espontâneo se realiza.

Nesta perspectiva, a distinção introduzida por Carnot entre ciclos reversíveis e irreversíveis pode exprimir-se quantitativamente: Um ciclo ^{ou} será reversível quando se processa sem acréscimo de entropia, no caso contrário a sua inversão espontânea não será possível e haverá que olhar-lo como irreversível. Que implica, nesse caso, a reversibilidade? Se a fonte quente à temperatura T_1 cede a quantidade de calor $-Q_1$ e a fonte fria à temperatura T_2 recebe a quantidade de calor Q_2 , o acréscimo de ~~temperatura~~ entropia será

$$S = -\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}$$

e para que o ciclo seja reversível devemos ter $S = 0$, quer dizer

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

No caso dum motor térmico que, no decurso de um ciclo produz o trabalho mecânico W , o primeiro princípio implica que

$$W = Q_1 - Q_2$$

Parece lógico definir o rendimento sob a forma

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad \text{quer dizer} \quad \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

e, no caso mais favorável, em que o ciclo é reversível, podemos ainda escrever

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

o que é a tradução precisa do velho resultado de Carnot — o rendimento de um motor térmico reversível depende apenas da temperatura das duas fontes.

Isto vale, é claro, no caso ideal de ciclos reversíveis, que nunca pode ser realizado na prática porque é impossível suprimir totalmente os atritos, as perdas de calor por difusão etc. As motrizes térmicas reais correspondem sempre a processos irreversíveis isto é tais que a entropia aumenta. Teremos portanto,

$$-\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} > 0 \quad \text{quer dizer} \quad \frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1}$$

ou ainda $\frac{Q_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1}$ e, portanto

$$\eta < 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

o que significa simplesmente que o rendimento dum motor real (ciclo irreversível) será sempre inferior ao dum motor ideal (ciclo reversível) funcionando com fontes às mesmas temperaturas.

Consideremos, todavia, o caso ideal dum motor térmico ideal, funcionando segundo um ciclo reversível. O rendimento dum tal motor só seria ~~igual à unidade de~~ ~~seria~~ ~~igual~~ ~~à~~ ~~unidade~~ ~~de~~ ~~seria~~ ~~nulo~~ se $T_2 \neq T_1$ pois para $T_2 = T_1$ o rendimento seria nulo: é a conclusão a que chegou Carnot de que um motor térmico sofre a presença de duas fontes a temperaturas diferentes. Por outro lado T_2/T_1 nunca pode ser nulo, o que arrasta $\eta \leq 1$ e, por consequência, que a produção de trabalho mecânico implica sempre a passagem de uma certa quantidade de calor duma temperatura mais alta a uma temperatura mais baixa.

De facto, em tudo o que acaba de ser dito, algo ficou por definir: que entendemos nós por essas temperaturas T_1, T_2 etc que intervêm na definição da entropia? É óbvio que só por milagre seriam as temperaturas centígradas, definidas de forma puramente convencional, a partir do ponto de fusão e de ebulição numa substância determinada a água. A entropia, grandesa eminentemente abstracta, bem como o rendimento das máquinas térmicas nada têm que ver com as propriedades desta ou daquela substância. Num certo sentido

30ª

A Termodinâmica

encontramo-nos aqui numa situação análoga à que enfrentara ^{Newton} ~~bulhões~~ quando procurava definir o espaço absoluto e foi obrigado a recorrer à própria lei de inércia para o fazer. Aqui, pode dizer-se que é o próprio motor térmico ideal que servirá para definir a escala física de temperaturas, embora, na prática, tenhamos recourse às propriedades dos chamados gases perfeitos. A equação dos gases perfeitos escreve-se

$$pV = b(1 + \alpha t) \quad \text{Gay Lussac}$$

com $\alpha \approx \frac{1}{273}$. Se considerarmos uma nova escala de temperaturas T tal que $T = t + \frac{1}{\alpha}$, quer dizer $T = t + 273$. (portanto o ponto de fusão do gelo = 273°K a temperatura de ebulição da água igual a 373°K etc) vem $t = T - \frac{1}{\alpha}$ e substituindo temos

$$pV = cT$$

esta escala sendo dita a escala de temperaturas absolutas e a sua unidade é o Kelvin. Então para $T = 0$ viria $p = 0$ ou $V = 0$, o que significa que $T = 0$ ($t = -273^\circ \text{C}$) é algo como uma temperatura limite.

A escala dos gases perfeitos coincide praticamente com a escala termodinâmica ideal (é aliás indispensável que assim seja) e a sua introdução deve-se a esse grande talento polifacetado que foi William Thomson, dito Lord Kelvin (1824-1907) que foi professor em Glasgow. Kelvin foi, após Carnot e Clausius, quem deu o maior contributo ao desenvolvimento do segundo princípio da Termodinâmica. Em particular deve-se-lhe a ideia de que o crescimento ineliminável da entropia corresponde a uma depleção progressiva da energia que acabará por provocar a morte térmica do universo, ideia que provocou inúmeras controvérsias.

→ Ovariação nos fins do século XIX a Termodinâmica principia ainda não estava completamente assimilada e os trabalhos de Planck, por exemplo, foram importantes

→ As leis da Termodinâmica como as leis mais gerais que possuíamos, as únicas que resistiram à revolução do século XX

→ O tempo e o segundo princípio,

Kelvin e Clausius (O 2º Princípio)

Kelvin
(1824-1907)

cf. Sb. Gravit
Vivera 33 anos

Clapeyron
(1799-1864)
"la force des
force de la
chaleur"
1834

30 anos

William Thomson, que ficaria conhecido na história da Física sob o nome de Lord Kelvin, nasceu numa família escocesa rica em Belfast ⁽¹⁸²⁴⁾, filho de um homem bom e cultivado que chegou a ser professor universitário de matemática. Recebeu uma educação esmerada e revelou desde cedo dons excepcionais. Entrou para a Universidade de Glasgow aos 11 ou 12 anos e quando se graduou em Física, (Cambridge, 1845) já tinha publicado uma dúzia de trabalhos científicos de grande valor, sobretudo sobre o eletromagnetismo (teoria das imagens elétricas, por exemplo) e sobre matemática aplicada. Era algo tão fora do comum que o jovem estudante foi levado a publicar esses resultados com um pseudônimo, o que não impediu que ele se fosse considerado uma espécie de gênio.

Seu pai ambicionava vê-lo ocupar uma cátedra de Física que ia ficar vaga na Universidade de Glasgow e, como tais funções exigiam conhecimentos de Física experimental, enviou-o passar uns meses a Paris para aprender francês laboratorial. Ali frequentou o laboratório de Regnault, o qual então se dedicava a realizar, por conta do governo francês, medições delicadas de constantes físicas, por exemplo, o coeficiente de dilatação dos gases com a temperatura e pontos de ebulição. Mas essa estadia em França foi sobretudo importante para Thomson porque lhe deu oportunidade de trabalhar diretamente com a obra de Clapeyron.

O engenheiro francês Benoit-Paul-Émile Clapeyron publicara em 1834 no "Journal de l'École Polytechnique" uma interessante "Memória sobre a potência motriz do fogo" na qual retomava as ideias de integração. Sadi-Carnot, ao qual juntava ideias excelentes consideradas de sua linha como a introdução das isotérmicas e das adiabáticas. Tais ideias influenciaram vivamente Thomson que se esforçou muito por obter um exemplar do próprio trabalho de Carnot, o que se viu a conseguir em 1848.

De regresso a Inglaterra, Thomson encontrou Faraday — um homem 21 anos, o outro 54) e de lá o interesse comum pelo fenômeno eletromagnético operou-se de modo que se puderam estabelecer boas colaborações entre ambos. Mas se as relações humanas entre ambos pareceram corretas, não se entenderam cientificamente. Podemos imaginar que, com as suas capacidades matemáticas, Thomson passou de lágo de que seria de a obra fundamental de Maxwell.

Foi professor
53 anos

Entretanto, e em consequência das suas grandes capacidades (mas também de uma campanha habitualmente organizada), Thomson obteve em 1846, aos 22 anos, uma cátedra de Física na Universidade de Glasgow, situação de destaque e que era quase inimaginável que fosse confiada a uma ciência tão jovem. Sem abandonar uma intensa atividade como investigador (os seus temas de então eram o termo de luz e, como anteriormente, o eletromagnetismo e as matemáticas aplicadas) Thomson vai desenvolver uma notável carreira como professor. É de

colocar objetos que for um blesso que corria, graças a Thomson, o primeiro laboratório onde os estudantes universitários faziam experiências de física. An chamadas "aulas práticas", ir-se iam de um lado rapidamente mas parece terem conecado.

~~Estabelecido~~ Em 1847, numa reunião científica, Thomson encontrou Joule e os dois homens entenderam-se bem. Joule (29 anos) nel era muito mais velho do que Thomson (23 anos) e nel tinham a demorada distância (Manchester - Glasgow - 300 km) de prima que um contacto amigável pode manter-se — isto embora Thomson tivesse levado algum tempo a aceitar as teorias de Joule sobre a conservação de energia, tal era a influência que sobre elez tinha feito o raciocínio de Clapeyron (e Carnot) fundado na doutrina de calorico.

Foi em 1848 que Thomson publica o seu famoso trabalho sobre a escala absoluta de temperatura. Era um assunto muito importante pois a definição da temperatura por meio de termómetros, como até então se fazia, era tecnicamente inaceitável. Com efeito, se se consideram dois termómetros com substâncias termométricas diferentes, obtêm-se definições diferentes das diversas temperaturas, embora a frequência de dilatações volumétricas com a temperatura variar de uma substância para outra. Ora, do ponto de vista dos princípios de física, não há qualquer argumento para privilegiar esta ou aquela substância. Para ultrapassar esta dificuldade de base, Thomson vai-se recorrer da obra de Carnot que lhe permite definir a temperatura sem fazer referência a qualquer substância bem determinada.

Na obra de Carnot tinha demonstrado que o rendimento de uma máquina térmica ideal η só podia depender da temperatura T_1 da fonte quente e da temperatura T_2 da fonte fria, sem qualquer intervenção da substância utilizada para veicular o calor entre as duas fontes. Kelvin vai então propor que se utilize o valor do rendimento η para definir a relação entre as temperaturas (ditas absolutas) das duas fontes. Em linguagem moderna

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Como $\eta \leq 1$ T_2 e T_1 tem que ser positivos, ou seja, positivos. Logo há um zero absoluto

Estava-se ao reino dos princípios foi o motor térmico ideal de Carnot (como o movimento do sistema de Galileu) existe há-se a nível conceptual. Mesmo assim, mesmo admitindo que se pode conhecer η esta equação só permite fixar uma relação entre T_1 e T_2 . Era necessário algo mais — por exemplo fixar arbitrariamente a temperatura a qual ocorre um determinado fenómeno físico. Mas Thomson compreendeu os perigos inconvenientes de uma tal hipótese, a qual equivaleria a fixar arbitrariamente o zero da escala termométrica, definindo com ela qualquer arbitrariamente todas as outras temperaturas.

Thomson ultrapassou esta nova dificuldade impondo há-se que a diferença de temperatura entre o ponto de fusão do gelo e o ponto de ebulição da água ~~seja~~ tenha valor 100° , e que era afinado a uma definição de graus, e que permitia fixar os valores de T_1 e T_2 sem mais a fazer mais em o ponto zero.

Kelvin e Clausius (o 2º Princípio)

Assim, designamos por T_0 a temperatura de fusão do gelo na escala Kelvin e a temperatura de ebulição da água term. o valor $T_0 + 100$, e o rendimento η^1 de um motor ideal de Carnot em curso entre estas temperaturas. Calcula-se-a

$$\eta^1 = 1 - \frac{T_0}{T_0 + 100}$$

o que permite determinar T_0 a partir de η^1 e, acidentalmente, conhecer o zero da escala absoluta. Conhecido T_0 ($T_0 = 273,16^\circ K$), qualquer outra temperatura será determinável por este "termómetro" ideal que é o motor reversível. Por exemplo, para determinar a temperatura de fusão de níquel T_n faz-se funcionar uma máquina térmica entre uma fonte quente à temperatura T_n e uma fonte fria à temperatura $T_0 = 273$, e o respectivo rendimento η^2

$$\eta^2 = 1 - \frac{273}{T_n}$$

determina o valor de T_n

o facto é como é bem sabido, as temperaturas absolutas são definidas na prática a partir das propriedades dos gases perfeitos (outro conceito teórico - o gás perfeito é um modelo teórico embora, em certas condições certos gases reais se aproximem do comportamento dos gases perfeitos) e a equação dos gases perfeitos surge numa segunda importante menção de Clapeyron de 1843. De resto, para chegar a esse valor basta, em primeira aproximação considerar a lei da variação do volume de um gás com a temperatura a pressão constante.

$$v = v_0 (1 + \alpha T)$$

onde T é a temperatura centígrada e v_0 o volume do gás a $0^\circ C$. É convicção que para $T = -1/\alpha$ $v = 0$ o que define uma limite inferior de temperatura; com $\alpha = 1/273$, $T_{lim} = -273^\circ C = 0^\circ K$.

Esta expressão é perfeitamente acumulada e integrada do nível teórico.

A entropia de Clausius

Entra agora nesta história Rudolf Clausius (1822-88) que era filho de um médico alemão e que cedo ascendeu ao lugar de professor na Escola Politécnica de Berlim, antes de vir a ocupar uma cátedra na universidade em qual lhe haveria de suceder um outro grande nome da física, Heinrich Hertz.

Clausius interessava-se muito mais pelos problemas de Termodinâmica, que na década de 40 do século passado estavam em um de transformações rápidas. Repetiu essencialmente o princípio de conservação da energia, como teve a sorte de se familiarizar com os trabalhos juntamente com de Carnot e do seu discípulo notável Clapeyron. Foi Clausius quem compreendeu que o essencial do famoso argumento de Carnot não implicava a teoria do calórico, do calor como fluido inextinguível, mas que o calor Q_1 cedido pela fonte quente sendo maior do que o

Clausius um dos 107 físicos mais ditosos entre físicos e experimentadores a partir de 24 meses do século XIX.

Memórias entre 1857 e 1858

calor ~~calor~~ Q_2 cedido à fonte fria, a diferença $Q_1 - Q_2$ convertida (isto é, em virtude do fato de T de Mayer e Joule, o equivalente mecânico do calor) ao trabalho produzido. Por outras palavras, o primeiro princípio da Termodinâmica

$$Q_1 = Q_2 + W$$

neste tipo de máquina com o "funcionamento de Carnot"

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

ou, com a definição das temperaturas absolutas de Kelvin

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

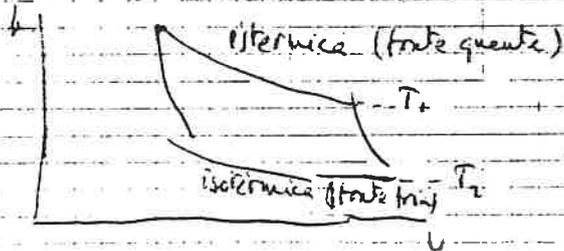
para dizer, considerando como positivas as quantidades de calor recebidas e como negativas as quantidades de calor cedidas, temos

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

isto para o motor ideal de Carnot cujo ciclo são duas isotermias e duas adiabáticas.

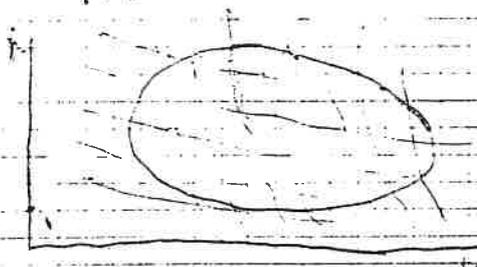
No diagrama de Clapeyron, p vs V

Podemos considerar, com Clausius, processos cíclicos mais complicados, em que há troca de calor com várias fontes, às temperaturas T_1, T_2, \dots, T_n , e esse processo podem ser concebidos como a sucessão de ~~de~~ vários ciclos elementares de Carnot e teremos, nesse caso,



$$\int \frac{dQ}{T} = 0$$

isto é o que significa que em qualquer



processo cíclico reversível esta grandeza é

conservada. Isto quer dizer que, se partarmos de estado termodinâmico A e os estados termodinâmicos B por dois caminhos reversíveis quaisquer a grandeza S definida sob a forma $dS = \frac{dQ}{T}$ sofre sempre a mesma variação. Isto significa que S será uma função de estado e Clausius mostrou

que devemos utilizar as línguas antigas para fixar os nomes das grandezas científicas importantes, de modo a que lhes seja dada a mesma significação em todas as línguas vivas. Assim propôs que S seja chamada a entropia de um corpo, segundo a palavra grega "transformação". Fabricamos intencionalmente a palavra entropia para que se assemelhasse à energia, porque estas duas grandezas têm significação física tão análoga que ~~o~~ ~~se~~ ~~relacionam~~ nas designações não parece útil.

Cf. Gillette 1939

Como Clausius mostrou, a energia e a entropia são as duas funções de estado fundamentais da Termodinâmica, uma através ligada ao 1º princípio, a outra ao

Função de estado - algo que depende do estado do sistema e não da sua história

Keirín e Clausius (o 2º Princípio)

segundo princípio. Mas as diferenças não são muito significativas, porque para um sistema ~~fechado~~ a energia cresce e enquanto a entropia terá tendência a crescer, os processos físicos não são todos reversíveis. De uma forma geral teremos
$$dS \geq 0$$

e aqui encontramos a manifestação de irreversibilidade essencial dos processos físicos.

Crescimento da entropia, irreversibilidade e estados crescentes

Que o crescimento da entropia caracteriza a evolução "natural" dos processos físicos é fácil de verificar com um exemplo muito simples, o de evolução para o equilíbrio térmico de dois corpos a temperaturas diferentes postos em contacto de forma a constituírem juntos um sistema isolado. Consideremos, em efeito, um corpo a uma temperatura $T_1 =$ digamos $70^\circ C$ posto em contacto térmico com outro corpo a uma temperatura $T_2 =$ digamos $30^\circ C$, supondo para simplificar que não só o conjunto está isolado como que não há produção de trabalho. Nestas condições, os corpos só podem trocar energia térmica e o 1º princípio diz apenas que se a energia ^{interna} primeira variar de ΔQ_1 , a energia interna do segundo variará de $-\Delta Q_1$ sem input de forma alguma que seja o corpo quente que esfriar (ΔQ negativo) ou se o corpo frio que vai receber calor (ΔQ positivo).

Calculamos agora as variações de entropia. Tere-mos para o corpo quente $\Delta S_1 = \frac{\Delta Q_1}{T_1}$ e para o corpo frio $\Delta S_2 = \frac{\Delta Q_2}{T_2}$, de forma que a variação total de entropia do conjunto será

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} = \frac{30 \Delta Q_1 + 70 \Delta Q_2}{210}$$

Para que ΔS seja ≥ 0 é necessário que $3\Delta Q_1 + 7\Delta Q_2 > 0$ e como (1º princípio) $\Delta Q_2 = -\Delta Q_1$ vem $7\Delta Q_1 - 3\Delta Q_1 > 0 \Rightarrow 4\Delta Q_1 > 0$ ou $\Delta Q_1 > 0$ o que significa que é o corpo frio que deve receber calor para que a entropia aumente. A evolução natural dar-se-á no sentido da igualização de temperaturas.

Assim o segundo princípio define um sentido privilegiado na evolução dos ~~sistemas~~ sistemas, introduzindo uma assimetria entre o que foi e o que será ou se se quiser, entre o passado e o futuro. Colec que foi Edington quem chamou ao 2º princípio de Termodinâmica o princípio de "Flecha do Tempo" e não tem efectivamente a conseqüência que tanto grande lei natural se encontra a razão de ser da irreversibilidade do tempo. É a possibilidade de se assumir a aproximação ao conceito de espaço e de tempo, com uma ser muito próxima na extensão desta analogia por bastar o facto de um deles ser reversível e não o outro para assumir o mesmo finis de analogia.

Em outro aspecto muito interessante desta problemática

Kelvin - Sistema S.G.S. Cabo submarino, unido diatemas, unido lomas. Facano (justo)
Ponca abertura, traca perversa, loma organizas, loma intuíci

Alumini - Teria mecânica do calor

Introdução

O primeiro princípio da termodinâmica, de que falamos na última aula, é um mero princípio de conservação, pois contenta-se em afirmar que todos os fenômenos físicos se processam de modo a conservar o valor da energia interna U de qualquer sistema isolado. A variação ΔU da energia de um sistema pode resultar de trocas de trabalho δW ou de trocas de calor δQ .

$$\Delta U = \delta W + \delta Q$$

mas realiza-se sempre à custa de uma variação correspondente $-\Delta U$ da energia dos sistemas com que ele esteve em interação e trocou calor e trabalho.

O segundo princípio da termodinâmica, do qual nos ocuparemos hoje, é um princípio de evolução. Se um corpo A, à temperatura θ_1 , for posto em contacto com um corpo B, à temperatura $\theta_2 < \theta_1$, e isolarmos o conjunto A+B, o primeiro princípio só permite garantir que a variação ΔU_A da energia interna de A será exactamente igual e oposta à variação ΔU_B da energia interna de B, de maneira a que $\Delta U_A + \Delta U_B = 0$. Uma esta afirmação incuestionavelmente exacta revela-se insuficiente, dado que a experiência mostra que é sempre o corpo mais quente que vai ceder energia ao corpo mais frio (e nunca o contrário) e faz-lo até se atingir um estado de equilíbrio definido pela igualização das temperaturas de A e de B. Este resultado experimental que ultrapassa por completo ao primeiro princípio é preenchido sem ambiguidade pelo segundo.

Há que não concluir apressadamente do que acabo de dizer que é impossível estabelecer uma interação entre o corpo A à temperatura θ_1 e o corpo B à temperatura $\theta_2 < \theta_1$ se forsem a conseguir um abrandamento da temperatura de B (com decréscimo da sua energia interna) e uma elevação da temperatura de A (com aumento da sua energia interna). Basta recordar a existência de aparelhos chamados "frigoríficos" dispostos, entre outros, da água do rio em virtude de transformá-la em água de gelo a água morna do Verão. Mas eu reforo-me acima a sistemas isolados (um sistema isolado, no sentido termodinâmico da palavra, é, por exemplo, um garrafa "termos") enquanto um frigorífico nunca pode ser um sistema isolado e só actua na estrita medida em que lhe fornecer energia mecânica. O segundo princípio da termodinâmica consegue explicar igualmente bem o funcionamento de frigoríficos (que não são, em termos conceptuais, do que uma máquina térmica agindo "ao inverso") e permite calcular as condições de rendimento óptimo de um motor termodinâmico quaisquer.

Sujeitando-me aos riscos implícitos nas analogias, agravados aqui pelo dicionismo, insanei sugestões, de Panayam, que o segundo princípio confere à Termodinâmica uma feição aristotélica. Tal como Aristóteles classificava os movimentos em "naturais" e "violentos", também os processos evolutivos da Termodinâmica têm algo ou de "naturais" — o fenômeno espontâneo para a igualização das temperaturas dos corpos que constituem um sistema isolado — ou de "violentos" — o funcionamento da máquina frigorífica; os movimentos "naturais" dos peripatéticos resultavam da própria natureza das coisas, sem exigir qualquer intervenção exterior, e o mesmo acontece à evolução "natural" dos sistemas termodinâmicos para o equilíbrio térmico, enquanto os movimentos "violentos" requerem a intervenção de forças exteriores, tal como a máquina frigorífica exige despesa de trabalho. A analogia tem severos limites, qualitativos e quantitativos, mas não é somente um puro jogo de espírito.

Enfim, para terminar esta introdução, insistirei na amplitude e na diversidade de suas conclusões, que resultam dos dois princípios da Termodinâmica. Que duas leis tão simples e tão gerais possam levar-nos tão longe, em tantas direções diferentes e anteriormente tantas vezes pensadas, tão precisas, e para um espírito atento uma razão constante de encanto e de admiração. E na grandezca da Termodinâmica, o valor do primeiro princípio não se sobrepõe ao do segundo. Razões suplementares para por em relevo que, apesar do carácter abstracto e delicado da formulação do segundo princípio, só intervieram nela essencialmente três nomes: Sadi Carnot, Rudolf Clausius e William Thomson, mais conhecido por Lord Kelvin.

Sadi Carnot e o motor térmico

Já tenho ocasião de citar em génio prematuramente desaparecido que foi Sadi Carnot (1796-1832) e se nos referimos ao seu episódio de 1828 "Reflexions sur la puissance motrice du feu, et les moyens propres à la développer". É aqui a altura de resumir as ideias que aí se exprimem sobre o funcionamento dos motores térmicos, ideias que anunciam precisamente o segundo princípio.

Carnot, que então ainda encarava o calor como um fluido indestrutível, considerava que uma máquina térmica é comparável a uma azenha: assim como a azenha, ao passar de um nível mais alto para outro mais baixo, é capaz de produzir trabalho mecânico, assim o fluido-calor, ao passar de uma temperatura mais alta para uma mais baixa, produzirá trabalho mecânico. Entende-se aliás que, partindo destas ideias, Carnot tenha não levado a néctar a concepção do calor, identificando-o a alguma coisa mais a consumir no processo de queda.

As ideias visíveis de Sadi Carnot, as 2 fontes, são indispensáveis.

Problemas, 31

1. Definições de gás perfeito

Consideremos ~~um~~ gás ideal que, por hipótese satisfaz as seguintes três leis:

a) A temperatura constante o volume V varia na razão inversa da pressão (Boyle)

① $pV = \text{const}$ (para θ constante)

b) A pressão constante, o coeficiente de dilatação média $\bar{\alpha}$ é ^{independente} do intervalo de temperatura e o mesmo para todos os gases (Gay-Lussac)

② $\frac{1}{V_0} \frac{V - V_0}{\theta - \theta_0} = \bar{\alpha} = \text{const}$ (para p constante)

c) A mesma pressão, volume e temperatura, todos os gases contêm o mesmo número n de mols, isto é, sendo m a massa do gás e M a sua massa molar (Avogadro)

③ $n = \frac{m}{M} = f(p, V, \theta)$

2. Equação de um gás perfeito

Consideremos um gás perfeito que ocupa a 0°C um volume V_0 com uma pressão p_0 . Efetuamos uma transformação isobárica que o leva ~~do~~ à temperatura θ , passando o seu volume a ser V' e, em seguida, uma transformação isotérmica que o leva a ocupar o volume V com a pressão p

$V_0, p_0, 0^\circ\text{C} \Rightarrow V', p_0, \theta \Rightarrow V, p, \theta$

Para a primeira transformação vale a lei de Gay-Lussac

~~resolvido~~ $\bar{\alpha} = \frac{1}{V_0} \frac{V' - V_0}{\theta} \Rightarrow$ ~~resulta~~ $V - V_0 = V_0 \bar{\alpha} \theta \Rightarrow V' = V_0 (1 + \bar{\alpha} \theta)$

enquanto para a segunda vale a lei de Boyle

$p_0 V' = p V$

e eliminando V' $\frac{V p}{p_0} = V_0 (1 + \bar{\alpha} \theta)$ ou $V p = V_0 p_0 (1 + \bar{\alpha} \theta)$

3. Escala dos gases perfeitos

Se conservarmos a mesma unidade de temperatura mas referirmos o zero da escala de temperaturas T de forma que $T = \theta + \frac{1}{\alpha}$ vem

$V p = V_0 p_0 \left[1 + \bar{\alpha} \left(T - \frac{1}{\alpha} \right) \right] = V_0 p_0 [1 + \bar{\alpha} T - 1] = V_0 p_0 \bar{\alpha} T$

$V p = V_0 p_0 \bar{\alpha} T$

Designando por v_0 o ~~normalizado~~ volume específico do gás à pressão p_0 e a 0°C e sabendo que a massa do gás é m temos ainda

$V p = m v_0 p_0 \bar{\alpha} T = \frac{m}{M} \cdot M p_0 p_0 \bar{\alpha} T$

quer dizer $n = \frac{m}{M} = \frac{V p}{M p_0 \bar{\alpha} T}$

e a lei de Avogadro impõe que $M p_0 v_0 \bar{\alpha}$ seja independente do gás considerado (repare-se que $\bar{\alpha}$ é a mesma para todos os gases e $p_0 v_0$ é constante para T constante, mas não exigimos que $p_0 v_0$ tenha o mesmo valor para todos os gases).

Escrevemos $M p_0 v_0 \bar{\alpha} = R$ constante universal

onde m é a massa molar, v_0 o volume específico à pressão p_0 e $\bar{\alpha}$ o coeficiente de dilatação médio, constante universal

$R = 8,31$ Joules por mole, segundo e grau centígrado

Temos portanto

$$n = \frac{pV}{RT}$$

$$\text{ou } pV = nRT$$

Esta é a definição histórica da lei dos gases perfeitos ?

Versão moderna

Definição de gás perfeito

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial \theta} \right)_p$$

$$\beta = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial \theta} \right)_V$$

são independentes da natureza do gás e iguais entre si. Vem daí

$$[a \ p = \text{const}] \Rightarrow \alpha d\theta = \frac{dV}{V}$$

$$\beta d\theta = \frac{dp}{p} \leftarrow [a \ V = \text{const.}]$$

e introduzindo uma nova escala de gases perfeitos $dT = d\theta$ $\frac{1}{T} = \alpha = \beta$ vem

$$[a \ p = \text{const}] \frac{dT}{T} = \frac{dV}{V} \Rightarrow V = a(p) T$$

$$[a \ V = \text{const}] \frac{dT}{T} = \frac{dp}{p} \Rightarrow p = b(V) T$$

Mas como segundo Boyle e Mariotte $pV = \text{const}$ (para $T = \text{const}$)

$$\frac{V}{a(p)} = T = \text{const} = \frac{p}{b(V)}$$

$$\text{ou } p b(V) = a(p)$$

Segue-se $a(p) = \frac{c}{p}$ $b(V) = \frac{c}{V}$ e as duas leis anteriores conduzem ao

resultado

$$pV = cT$$

Vimos, numa lição precedente, que durante o século XIX a Termodinâmica fenomenológica, chamada igualmente a "Termodinâmica dos Principios" se constituiu como uma poderosa doutrina, matematicamente rigorosa e logicamente coerente, que previa uma enorme e variada quantidade de fenómenos a partir da ideia de que o calor era uma forma de energia embora de natureza particular, na medida em que se revelava incapaz de se transformar integralmente noutra forma de energia. Resultava daí uma tendência espontânea da energia a "degradar-se" sob a forma de calor, a qual resultava aliás do postulado de Clausius do crescimento inevitável de uma certa função termodinâmica abstracta — a entropia.

Essas formidáveis capacidades de previsão da Termodinâmica não eram todavia acompanhadas por qualquer compreensão dos fenómenos subjacentes, capaz de explicar o significado dos processos macroscópicos de que a Termodinâmica dava conta. Seria que o facto de, a temperatura constante, a pressão de uma massa de gás variar na razão inversa da sua volume não poderia ser entendido a partir de hipóteses simples sobre a constituição do próprio gás? A temperatura seria uma pura variável termodinâmica — o número resultante da medida efectuada por meio de um termómetro — ou revelava-se possível atribuir-lhe um significado físico, interpretando-a, nomeadamente, em termos da estrutura da própria matéria? E essa misteriosa entropia de Clausius, cuja irreversibilidade marca o sentido de evolução dos fenómenos físicos, não terá efectivamente um sentido físico simples e profundo?

E a estas questões e outras da mesma natureza que a Física estatística se esforçará, com um êxito cada vez maior, de dar resposta? Mas se ela permite uma "leitura" física das leis termodinâmicas, isso não lhe bastou para adquirir desde logo, no quadro da física teórica, o lugar a que tinha incontestavelmente direito. Uma escola influente e poderosa, claramente inspirada pelas doutrinas filosóficas do positivismo, rejeitava todo o valor às investigações na linha da interpretação estatística dos fenómenos físicos com o argumento de que tais investigações eram de natureza metafísica. Para homens como Mach, Ostwald ou Duhem, o propósito da ciência era apenas ordenar e integrar num esquema lógico os resultados das observações, tudo o que estivesse para além deste propósito devendo ser rejeitado por princípio pois que, sendo irreversível experimentalmente, não correspondia a um conhecimento de natureza

científica e caía no campo de mera especulação gratuita. Os princípios da Termodinâmica, rigorosos e bem definidos, mostravam-se aptos a descrever os fenômenos, os resultados das medidas; tal deveria bastar-nos e procurar ir mais além era, pelo próprio facto de que tais tentativas se apoiavam em hipóteses inverificáveis experimentalmente, contrário à própria metodologia científica.

Assim, o desenvolvimento da Física estatística no curso do século XIX foi obra de homens que, para além das suas capacidades científicas originais, tiveram que dar mostras de autêntica coragem intelectual, aceitando a inconveniência de serem ignorados ou contestados os resultados do seu próprio trabalho. De certa maneira, a Física estatística cresceu contra a vontade dos termodinâmicos da época, mais exactamente, da maioria dos caciques da Termodinâmica, graças à teimosia e ao desabrocho de alguns a cujas memórias-cumprir prestar uma homenagem muito especial.

Sabe-se, já tivemos ocasião de o relembrar, que o precursor nesta direcção foi um homem da primeira metade do século XVIII, Daniel Bernoulli, que na sua "Hidrodinâmica" propôs uma interpretação da pressão dum gás como resultado dos inumeráveis choques das ~~moleculas~~ partículas que constituíam o gás contra as paredes do recipiente.

31ª

A Física estatística

2

O precursor Daniel Bernoulli (1700-1782) que na sua "Hidrodinâmica" (1732) interpreta a pressão de um gás como a resultante dos choques das moléculas contra as paredes. Em termos modernos esse resultado pode escrever-se

$$Vp = \frac{2}{3} N \cdot \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{2}{3} vL \frac{m\bar{v}^2}{2}$$

e compararmos com a equação fenomenológica de um gás

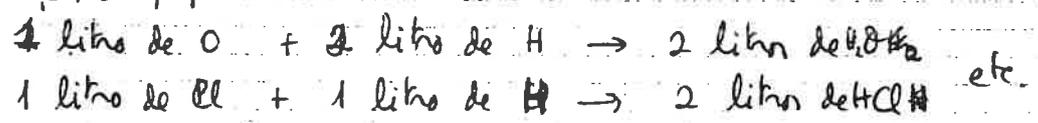
$$Vp = RT \quad \text{ou ainda} \quad Vp = vLKT \quad \text{com} \quad K = \frac{R}{L}$$

vem $K T = \frac{2}{3} \frac{m\bar{v}^2}{2} \quad \text{ou} \quad RT = \frac{2}{3} (L \cdot \frac{m\bar{v}^2}{2})$

Dalton (1766-1844) no seu "Sistema de Filosofia Química" (1808) dá uma base científica à hipótese atômica. Por exemplo em diversos compostos de O e N obtém para n lezn

O	4	8	12	16	20
N e O	11	15	19	23	27

Gay-Lussac (1778-1850) determina (1805-1808) demonstrou que, em iguais condições de pressão e temperatura, os volumes de dois gases que se combinam estão entre si em proporções simples



Estas relações volumétricas e qualitativas interpretam-se de forma mto simples atribuindo ao "quanto" de cada elemento uma determinada "massa atômica" e supondo que ~~1~~ uma dose "massa atômica" (16 de O ou 35 de Cl) ocupa nas mesmas condições de pressão e temperatura sempre o mesmo volume. Daí, honestamente, a possibilidade de representar as reações químicas por fórmulas químicas simples e precisas.

Logo em seguida o italiano Amedeo Avogadro (1776-1850) interpreta as relações de Gay-Lussac admitindo que volumes iguais de gases diferentes nas mesmas condições de p e T contem o mesmo número de moléculas - e' o número dito de Avogadro mas que só foi calculado por Loschmidt

$$L = 6 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$$

John Herapath
1790-1859
(126)

John James Waterston
1811-1883
1843

Foi preciso um longo trabalho e mto paciência para determinar as massas atômicas e dar uma base experimental sólida às ideias de Dalton.

Em meados do século a teoria cinética avança ^{de forma notável} ~~in~~paravelmente. O primeiro grande passo em frente é a determinação por Youle da velocidade das moléculas. Na verdade, se

$V_p = \sqrt{RT}$ $V_p = \frac{2}{3} N m \overline{v^2}$ então $p = \frac{1}{3} n m \overline{v^2}$ Kronig diffundida (1856)

com n número médio de moléculas por unidade de volume. Tem ainda, pois ^{de fato} ~~que~~ $n m = \rho$ (massa específica), pode calcular-se $\overline{v^2}$ e portanto $\sqrt{\overline{v^2}}$, ordem de grandeza média das velocidades das moléculas. Youle determinou, para as moléculas do ar à temperatura ambiente $v \sim 1500$ a 1800 km/h, o que foi considerado absurdo. (1851) Mas o resultado foi confirmado, ^{independente} ~~independente~~ por Clausius (4 meses mais tarde para o hidrogénio) 400 a 500 m/s [também o alemão Kronig e Clausius]

Estes valores levantavam ainda um problema físico: como se explicava, por exemplo, que a velocidade de condução do calor ~~pelos gases~~ fosse tão lenta? A resposta foi dada por Maxwell e por Clausius. A explicação era que o movimento das partículas muito embora fosse rectilíneo entre dois choques sucessivos na realidade a uma difusão rápida. Maxwell invertiu o problema e da velocidade de difusão pode calcular o número de choques por segundo — número astronómico, da ordem de ^{bilhões} ~~bilhões~~. Assim uma molécula, embora se desloque com um velocidade da ordem de 500 m/s. sofre em média, antes de percorrer um centímetro ^{6,08} ~~102 mil~~ choques.

A partir daí, ^{de consequência} ~~era possível~~ uma estimativa das dimensões das moléculas, e isso foi obra de Loschmidt, cerca de 1855.

Mas o mais importante é que Loschmidt foi o primeiro a determinar o número de moléculas por mole $\sim 6,06 \times 10^{23}$

Maxwell - conceito de equilíbrio estatístico
Maxwell - lei de distribuição das velocidades (1860) $\frac{1}{2} m \overline{v^2} = KT$

Maxwell (1831-1879)

L. Boltzmann (1844-1905)

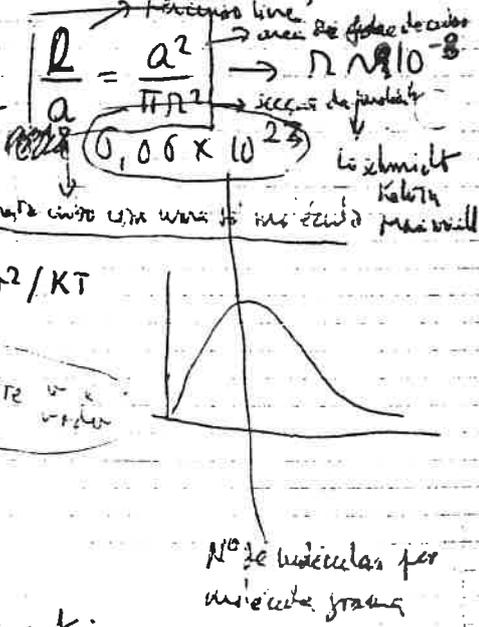
$S = K \log P$

W. Gibbs (1839-1903)

Perrin (1870-1942) → Einstein, Smoluchowski

1876-77 Loschmidt (1824-95) — inverso do movimento

Poincaré (1870) teoria da recorrencia Zernike (assistente de Planck) (1896)



As antígas teorias quânticas

① A Relatividade aparece como uma espécie de coroamento da Fis. clássica: o seu ponto de partida é o reconhecimento das contradições ~~entre~~ entre as concepções tradicionais de espaço e de tempo (o grupo de Galileu) e as concepções de espaço-tempo subjacentes à teoria do campo electromagnético cuja ~~in~~ invariância para os diversos sistemas de inércia estava contida no resultado negativo da experiência de Michelson.

Por isso a Relatividade restrita altera a Física clássica mas não a modifica essencialmente: a Fis. clássica e, nomeadamente, a teoria do campo electromagnético adquire outra coerência e outra beleza no quadro relativista. Foi recebido, é certo com confiança, mas essa atitude dissipou-se rapidamente e a Relatividade integrou-se ~~no~~ no corpo de saber já constituido. A sua necessidade conceptual e experimental era óbvia.

A teoria quântica, ao contrário, surge da tentativa de solução de um problema muito particular. Claro que ao nível da estrutura da matéria a Fis. clássica tinha encontrado dificuldades de várias ordens mas não era (nem podia ser) evidente que no expediente introduzido para melhorar o tema do corpo negro estava a chave dessas dificuldades ou, pelo menos, um elemento essencial para as apreender na sua autêntica dimensão e na sua unidade profunda.

② Chama-se um corpo negro um sistema cujo poder absorvente (coeficiente da energia radiante emitida pela energia radiante incidente) é igual a 1: toda a radiação incidente é absorvida. Exemplo: um orifício com uma pequena abertura, um forno. Se considerarmos uma cavidade cujas paredes são constituídas por substâncias de natureza perfeita e que se encontra a uma temperatura T bem determinada, é fácil verificar que a composição da radiação em equilíbrio que nela se estabelece só pode depender da temperatura — se assim não fosse o equilíbrio seria impossível. A composição da radiação negra — $E(\nu)$ — só é função de T e este resultado demonstrado por Kirchhoff em 1859 confere universalidade de a lei da radiação negra, independentemente da natureza física da matéria.

Um ano mais tarde ~~em~~ (1879) outro alemão Stefan demonstrou terrivelmente que a ~~total~~ energia total emitida por um corpo negro varia com T^4 — quanto mais elevada a temperatura maior o corpo radia. E quasi no fim do século (1893) Wien deduziu um novo resultado essencial que informa sobre a repartição espectral da radiação negra

$$u_\nu = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad F \text{ é dada a Termodinâmica.}$$

É fácil ver que o resultado de Wien contém o de Stefan. Com efeito a energia total será

$$E_T = \int_0^\infty u_\nu d\nu = \int_0^\infty \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right) d\nu$$

é introduzirmos em vez da variável ν a nova variável $x = \nu/T$ com

$$\nu^3 = x^3 T^3 \quad d\nu = T dx \quad e, \text{ portanto}$$

$$E_T = \int_0^{\infty} x^3 T^3 F(x) T dx = T^4 \int_0^{\infty} x^3 F(x) dx \quad \text{que é a lei de Stefan.}$$

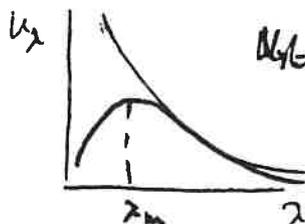
A lei de Wien é correntemente chamada a lei do deslocamento, porque dela se deduz que o comprimento de onda λ_m que corresponde um máximo de intensidade λ_m é inversamente proporcional à temperatura

$$\lambda_m T = \text{const}$$

Assim observando num espectrómetro a curva das intensidades da radiação emitida por um corpo negro pode determinar-se a temperatura desse corpo — quando T cresce λ_m diminui, quer dizer maiores temperaturas significa um máximo que se desloca para os pequenos comprimentos de onda. Assim se vêem as temperaturas das estrelas exteriores do universo (sol 5000°K)

Tudo isto era verificado pela experiência mas a Termodinâmica não permitia ir mais longe. Induzia o impedimento não era intrinsecamente porque o facto do raciocínio de Kirchhoff demonstrar que as propriedades do corpo negro era independentes da natureza da substância permitia considerar um modelo de matéria simples e geral capaz de determinar a forma da função F deixada indeterminada pela lei do deslocamento. Isto foi feito no fim do século por Lord Rayleigh e sustinado criticamente por James Jeans. O resultado era insatisfatório: a física clássica previa para a distribuição espectral do corpo negro

$$u_\nu = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$$



Catástrofe ultravioleta

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Lei de Rayleigh - Jeans

Ora a curva experimental era muito diferente

$$F\left(\frac{\nu}{T}\right) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{1}{\left(\frac{\nu}{T}\right)}$$

Além disso a lei era terrivelmente absurda pois que $\int_0^{\infty} u_\nu d\nu = \infty$

Isto era insuportável.

↳ Catástrofe ultravioleta.

Então Planck obteve uma boa lei teórica em 1900

$$u_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

que para $h\nu/kT \ll 1$ equivalia a Rayleigh-Jeans e para $\frac{h\nu}{kT} \gg 1$ se esboçava

$$u_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} e^{-h\nu/kT}$$

O mal era o h , a hipótese da absorção e emissão de energia por pacotes finitos de valor $E = h\nu$. Expediente provisório

As antigas teorias justísticas

③ O h só começou a ser tomado a sério em 1905 com a teoria do efeito foto-eléctrico de Einstein

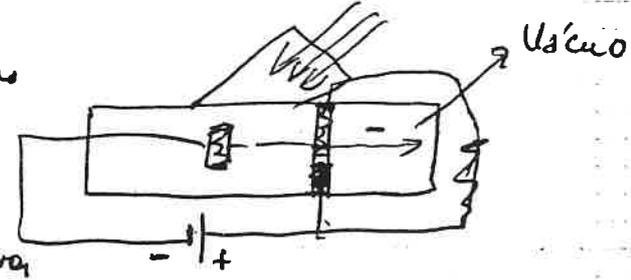
luz visível sobre uma placa de zinco

- Efeito foto-eléctrico descoberto por Hertz em 1887 e estudado por Hallwachs, Elster e Geitel

Ultra violeta sobre um metal alcalino

Frequência mínima de radiação

Intensidade proporcional ao número de electrões.



Einstein

$E = h\nu - A \rightarrow$ energia da foto-eléctrica \rightarrow energia de arranque

Intensidade proporcional ao número de fótons. Verificação tardia

- Duán fantasma Experiências de Taylor. Experiências de Joffé e da (1925) e de Lawrence e Beams (1928)

④ Einstein (1907) teoria dos calores específicos. Dulong e Petit calor específico por mole ≈ 6 cal/grau. $u = 3RT$ $R = 2$ cal/grau

$\frac{du}{dT} = 3R$

Excepções para o corpo duro: diamante 1 cal/grau.

$u = 3RT \frac{h\nu/KT}{e^{h\nu/KT} - 1} = 3RT + \dots$ Tudo depende de ν

Para o diamante $h\nu/KT \approx 1$

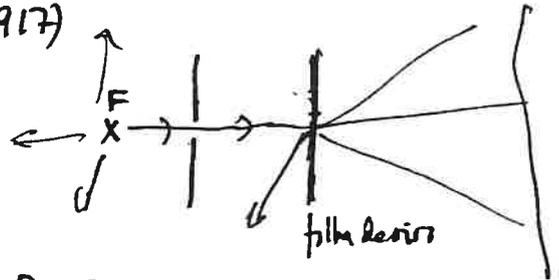
⑤ O átomo planetário - Perrin, Rutherford experiência (1911) - desvio dos α quando atravessam uma lâmina fina

Bohr - o modelo teórico (1913)

Wilson e Sommerfeld - generalização (1917)

relatividade estrutura fina

elipses



ECran de sulfureto de zinco

$h\nu_{\alpha} = E_m - E_n$
 $\gamma = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$

$$V_{un} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3}$$

A relatividade restrita - 1

1. A revolução científica do século XX. Einstein

- Tivemos ocasião de assinalar em duas lições anteriores que esse edifício magnífico que era — e continua a ser — a física clássica se afrontava no final do século XIX com dois grupos de problemas que pareciam desafiar seriamente as suas capacidades expl. ctivas: um deles dizia respeito a questões relacionadas com a estrutura interna da matéria, nomeadamente nas suas interações com o radiamento electromagnético e, de algum modo, cristalizou no problema do corpo negro e nessa obscura e inevitável fórmula dita de Rayleigh-Jeans; o outro grupo estava relacionado com as propriedades do éter electromagnético, sobretudo nas suas relações com as concepções do espaço e do tempo clássicas, e exprimiu-se pelo resultado negativo da experiência de Michelson.

— Um primeiro passo na via da resolução do mistério do corpo negro foi dado por Planck em 1900, graças à introdução de uma constante universal, a constante h , a qual Planck era o primeiro a não duvidar qualquer futuro: só se começará a ver mais claro um bom tempo depois, na equação de uma história ocidental, que terei ocasião de relembros, história essa de que um dos principais protagonistas vai ser Einstein. Quanto ao mistério do resultado negativo da experiência de Michelson será completamente esclarecido e de uma vez por todas em 1905 com a teoria da Relatividade de Einstein.

Tive ocasião de vos dizer que no final do século XIX os grandes mestres da física consideravam esta ciência como virtualmente acabada. De facto, as primeiras três ou quatro décadas do nosso século foram do tempo mais fecundo e mais inovador da história desta ciência e, ao dizer isto, está implicitamente a afirmar que surgiram entre alguns dos vultos maiores que a física conheceu nessa caminhada triunfal iniciada um trezentos anos ^{antes} atrás. Foi realmente uma pleiade magnífica de grandes mestres mas entre eles, Einstein ocupa um lugar incomparável. Foi um dos maiores génios criadores que a humanidade jamais conheceu e, ~~tal~~ à medida que o tempo passa, — de já desapareceu há 25 anos, apercebemo-nos cada vez mais claramente do valor imenso da sua obra. Alguns viveram recentemente, quase em uma espécie de estulto, que afinal foi de o autor de quase tudo o que de muito importante se fez. Alguns dos seus contornos foram feitos muito grandes — e é em relação a estes muito grandes que nos devemos considerar que de foi muito grande.

A sua biografia é tão conhecida — esse homem simples e modesto tornou-se um dos vultos do mundo moderno — que me hipunerei de recordá-lo aqui. Esqueceram-se aliás muitas coisas e seu percurso que, para por a parábola no fim, seria necessário demorados

Tempo, mais do que aquele de que disponha. Falamos por aí porque a teoria da relatividade restrita que Einstein criou em 1905

2. Velocidade da luz e simultaneidade.

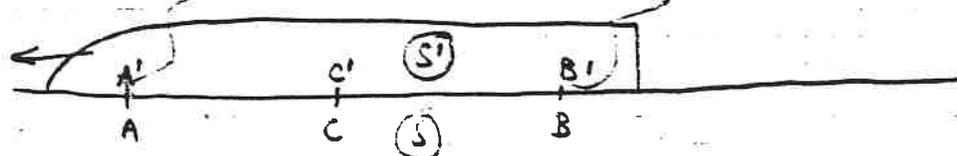
A teoria da relatividade restrita baseia-se em duas ideias claras, simples e precisas. A primeira delas é o velho princípio da equivalência de todos os referenciais de inércia. Era a expressão do facto de que aquele tensor referencial que podia reivindicar um estatuto privilegiado, quer dizer, o Espaço Absoluto, era incapaz de manifestar a sua existência; não a manifestava, pela própria força da coisa, no quadro da mecânica, e a experiência mostrava — a experiência de Michelson — que também o não fazia (como se afiguraria natural) no quadro do Electromagnetismo. Einstein concluiu, assim, que o conceito de Espaço Absoluto, na medida em que se revelava incapaz de revelar experimentalmente a sua existência, não merecia que lhe fosse atribuída qualquer realidade física. Quando se foi a ideia de referencial galileiano — ou seja, foram ~~de~~ origem a ideia de não ter a qualquer, as forças inerciais — mas todos eles perfeitamente equivalentes do ponto de vista conceptual.

Por si só, esta primeira ideia (este primeiro postulado da Relatividade Restrita) seria de algum modo inconsistente. Pois não sabemos não justamente que, ao contrário das equações da mecânica clássica, as equações do electromagnetismo não podem ser insensíveis à passagem de um referencial de inércia para outro? Todavia, por exemplo, uma consequência fundamental das equações de Maxwell, que a radiação electromagnética se propaga com uma velocidade finita $c = 3 \times 10^8$ m/s; é evidentemente que se a luz tem este valor num dos referenciais de inércia, não se poderá ter em qualquer outro. O que Einstein fez foi justamente postular que a velocidade da luz tem o mesmo valor $c = 3 \times 10^8$ m/s em todos os referenciais de inércia.

Com este segundo postulado Einstein obteve uma explicação muito simples do — a mais simples possível — do resultado negativo da experiência de Michelson. Mas não é menos evidente que contraria frontalmente a afirmação venerável da Mecânica clássica, nomeadamente a terceira lei da adição das velocidades. Mas é que se o primeiro postulado — a equivalência física de todos os referenciais de inércia — era uma excelente posição de princípio, a partir daí era preciso escolher: ou a Mecânica ou o Electromagnetismo. Einstein optou pelo Electromagnetismo com uma razão e uma esperança. A razão é que as experiências da mecânica realizadas até então tinham uma precisão muito menor do que as experiências de electromagnetismo (lembremos o 10^{-8} de Michelson), de forma que parecia mais razoável introduzir pequenas correcções na mecânica que no electromagnetismo. A esperança é que a velocidade da luz, embora finita, era extremamente elevada e que a sua natureza e daí poderia resultar que as inevitáveis modificações à in-

tratar na Mecânica fossem suficientemente pequenas, em termos numéricos, para não se contrariarem qualquer facto experimental conhecido.

De facto, e Einstein reconheceu-o desde logo, o postulado de que uma velocidade (neste caso a velocidade da luz) pode ser a mesma em dois referenciais em movimento relativo não vai afectar apenas a dinâmica mas as nossas próprias concepções de espaço e de tempo. Com o Espaço Absoluto, vai desaparecer igualmente o conceito de Tempo Absoluto, pois os postulados einsteinianos implicam que a definição de simultaneidade só passa a ter um significado relativo. Dois acontecimentos serão ou não simultâneos consoante os considerarmos neste ou naquele referencial particular, o que significa que deixará de haver um tempo em si, como sempre se admitia até então, para passar a haver um tempo específico de cada referencial. Este ponto é tão essencial que me parece necessário consagrar-lhe alguns parágrafos minutos, discutindo a referência conceptual bem conhecida do universo e das físicas.



Porquê? In referência S e S' no instante da queda das físicas.

O observador de S tipando no seu referencial de uma régua rígida determina previamente um ponto C que está equidistante dos pontos A e B, tal como o observador de S' com uma régua rígida determina no seu referencial (construído em estado neutro) um ponto C' equidistante de A' e de B'. Quer em C, quer em C' estão ~~deixados~~ dispositivos de coincidência que cada um deles entende em funcionamento de por si próprios simultaneamente por duas ondas electromagnéticas, cuja emissão é provocada pelo queda das físicas.

O ponto essencial é que essas ondas electromagnéticas vão propagar-se com uma velocidade finita e que é (por hipótese) a mesma nos dois referenciais e ^{em ambas as direções} nas duas direções. Porque a velocidade de propagação é finita, as duas ondas só poderão alcançar qualquer dos detectores após um certo tempo, finito, ulterior à queda das físicas. Suponha-se então que as duas físicas ondas emitidas chegam simultaneamente a C. Ora como o construído de S move para a esquerda em relação a S', ^{a onda vinda de A} a onda vinda de A ~~chegará antes de chegar a C~~ ^{chegará antes de chegar a C} já passou pelo contador C', enquanto a ^{onda} vinda de B quando chega a C ainda não alcança C'. Quer isto dizer que se as ondas alcançarem simultaneamente C (e este o observador de S dirá que as físicas caíram simultaneamente) elas não podem chegar simultaneamente a C' (a onda vinda de A chegará antes de se ver de B') e o observador de S' dirá que as físicas não caíram simultaneamente. De forma inversa, pode acontecer que as ^{duas} físicas cheguem simultaneamente a C' e então será o observador de S' que dirá que

os flashes (são simultaneamente) dois olhos não poderão dizer simultaneamente a C. logo os dois observadores nunca poderão estar de acordo para afirmar a simultaneidade dos dois acontecimentos que correspondem à queda dos flashes.

Cada um destes observadores poderá ser tentado a acusar o outro de ter recorrido a um mau método para averiguar a simultaneidade, mas como poderá fazer-lo se o "outro" procedeu de uma maneira perfeitamente analógica à que de próprio alibi fez? Por outro lado, ambos têm de reconhecer que não foram de qualquer estato privilegiado, de modo que a única conclusão a que afinal podem chegar é que a simultaneidade é um conceito puramente relativo, o qual só adquire significado preciso quando referido a um determinado sistema de inércia. Não há simultaneidade num sentido absoluto. Dizer que "a primeira bomba atômica explodiu em Hiroshima no instante exacto em que o presidente dos Estados Unidos se sentou à mesa para tomar o seu quarto almoço" será porventura uma afirmação exacta no referencial Terra em 1945? ou não será relativamente à estrela Sírius. Ora se não há simultaneidade absoluta não há Tempo Absoluto. Um acontecimento ocorre num certo instante quando é simultâneo com uma posição correspondente do protótipo de um relógio. Se a simultaneidade é relativa, varia de um referencial para outro, o tempo também varia de um referencial para outro. O Tempo Absoluto não pode ser definido.

Ora, se isto é assim, a distância também passa inevitavelmente a ser uma grandeza relativa. Quem diz distância diz o comprimento de uma régua capaz de medir essa distância e, de forma geral, o comprimento da régua passa a depender também do referencial considerado. De facto, duas régua têm o mesmo comprimento (duas distâncias são idênticas) se se verifica que os seus pontos extremos coincidem, e isto não levanta quaisquer problemas se as duas régua estão imóveis uma em relação à outra; por outras palavras, num dado referencial o conceito de distância não sofre de qualquer ambiguidade. Mas se as duas régua têm um movimento relativo (por exemplo uma régua está imóvel em S, a outra está imóvel em S') de forma que tem o mesmo comprimento se as suas extremidades coincidem simultaneamente. Ora a simultaneidade, já o constatamos, é relativa, depende do referencial. Logo se um observador de S afirma que duas régua em movimento relativo têm o mesmo comprimento, um observador de S' não pode deixar de discordar desta afirmação porque ele não pode verificar a coincidência simultânea das suas extremidades.

A TEORIA DA RELATIVIDADE

Conferência para o 2º ano do estágio 1º ano
Física 24/IV/78

Fazer uma exposição de pouco mais de uma hora sobre a Teoria da Relatividade, mesmo entendendo que se trata somente de Relatividade Restrita, é evidentemente um esforço bastante considerável. Com o tento de que dispunha mais ou menos para fazer de que situar o problema a teoria muito longa e esboçar as respostas ao problema que a teoria trouxe. Vou tentar fazê-lo evitando a tentação de ficar pelas generalidades, sem me refugiar embora num pequeno bilúvio de cálculos insanos.

1. Sistemas de inércia e espaço absoluto

A formulação de qualquer Dinâmica implica a definição prévia do referencial (ou referências) em que as suas leis têm validade. ^{Assim, quando enunciadas} ~~no referencial~~, classicamente,

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{ou} \quad \vec{F} = m\vec{a}$$

o postulado de ~~um~~ sentido de ~~movimento~~ ^{fixamos previamente} no qual se define o sistema de referências ~~em relação ao qual~~ a aceleração é sempre definida. É por isso, aliás, que esta lei é considerada como o segundo postulado da Dinâmica. O primeiro postulado, a lei da inércia, não afirma como se diz que um corpo não afectado por forças permanece com movimento rectilíneo e uniforme: ~~é assim frase,~~ mas se a lei da inércia não seria um postulado ^{sem interesse} mais um mero terreno de $\vec{F} = m\vec{a}$, mas o próprio enunciado não teria qualquer sentido — movimento rectilíneo e uniforme em relação a quê? É que o primeiro postulado, a lei da inércia, afirma e, sim, que existem referências privilegiadas (chamadas hoje referenciais galileanos ou sistemas de inércia) relativamente aos quais qualquer corpo não afectado por forças permanece com uma velocidade constante no tempo — e esta afirmação prévia ~~que se em certas circunstâncias~~ ~~preciso de~~ ~~enunciada~~ ~~em~~ ~~seu~~ ~~sentido~~ ~~é~~, pelo menos em princípio, susceptível de verificação experimental embora, no fundo, encerre um espécie de tautologia. Adiante.

É em relação aos sistemas de inércia que as leis da Mecânica ~~se considerem definidas~~ ~~em~~ e entre elas há-se que copiam conformes de um ser com muito de teológico que é o Espaço Absoluto de Newton. Há lá hoje dúvidas de que o espaço absoluto de Newton ~~se~~ ~~identificava~~ ^{se} ~~em~~ ~~seu~~ ~~clho~~, com o Ser Divino; os objectos que existiam no Espaço Absoluto encontravam-se afinal no seio de Deus, o que garantia ao Criador a possibilidade de agir sobre as suas criaturas. Paralelamente, o Tempo Absoluto é universal que ^{flui} uniformemente em relação com nada que lhe seja exterior, também em algo de um tempo divino. É que se tivesse sido que, em unidade da própria expressão da lei fundamental da Dinâmica, em que intervém uma aceleração, verificou-se sendo logo que se as leis da Mecânica são válidas em relação a um referencial se define o Espaço Absoluto, ali, se-lo-ão necessariamente em relação a qualquer outro referencial se tem em

relaçã o S_0 uma velocidade \vec{v} constante, pois a aceleraçã o do corpo serã a mesma em S_0 e em S' . Em efeito se o corpo tem em relaça o S_0 uma velocidade $\vec{v}_0(t)$ terã em relaça o S' uma velocidade $\vec{v}'(t) = \vec{v}_0(t) - \vec{v}$ e derivado em ordem ao tempo t absoluto, isto e idêntico em todas referenciais, obtendo $\vec{a}'(t) = \vec{a}_0(t)$. Assim, na pratica, embora se guardasse o idêis newtoniano de existencia de um Espaço Absoluto, todas as referenciais de inêrcia, todas quantos tinham em relaça o ao Espaço Absoluto uma velocidade constante e, portanto, tinham entre si movimentos relativos puramente de translaça o eram fisicamente equivalentes. Digois que da infinidade de sistemas galileanos um era conceptualmente privilegiado, era o Espaço Absoluto, mas a mecânica nã o dispunha de qualquer meio de o identificar e, por isso mesmo, desistiram-se de sua identificaça o.

2. As teorias do campo e a hipotese do arrastamento parcial Michelson

A situaça o modificou-se contudo radicalmente com o desenvolvimento das teorias do Electromagnetismo e da Optica cujo sintese viria a ser realizada por Maxwell em 1870. As famosas equaç oes de Maxwell nã o contem nenhuma derivada em ordem a t mas somente primeiras derivadas

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{rot } \vec{H} = +\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \quad \vec{j} = \rho \vec{v}$$

o que significa que se nã o se intensifica a priori a presenca de uma referencial galileano para outro. Em termos mais simples, resulta das equaç oes de Maxwell que as ondas electromagnéticas ^{no vácuo} se propagam com uma velocidade $c = 3 \times 10^{10}$ m/s; e e evidente que esta conclusã o se tem sentido se a entendermos como querendo dizer que as ondas electromagnéticas se propagam com a velocidade c em relaça o a um certo referencial S_1 , pois que, em relaça o a um referencial S_2 que tenha em relaça o a S_1 uma velocidade \vec{v} (muito embora constante) a velocidade de propagaça o das ondas electromagnéticas serã $c - \vec{v}$. E e evidente que a velocidade de propagaça o vale apenas para aquele referencial em que as primeiras equaç oes de Maxwell sã o supostas verdadeiras e o problema consiste em saber como definir esse referencial. Parece lógico, para tentar harmonizar electromagnetismo e mecânica, dufer-se a tratar de um referencial de inêrcia e como se tratava de um referencial de inêrcia com um estatuto de privilegio único parecia inevitável que fosse identificado com o Espaço Absoluto. Noutros termos, esse Espaço Absoluto newtoniano que a mecânica por si só nã o tinha capacidade para distinguir entre todas as referenciais galileanas tornava-se agora passível de identificaça o por se teria do campo: era aquele em que eram válidas as equaç oes de Maxwell e, por consequência, aquele em que a velocidade da luz no vácuo tinha exactamente o valor c .

De facto, o problema era bastante mais complicado, e se no primeiro quartel do século XIX os físicos se tinham dado conta disso, com o triunfo da teoria ondulatória da luz que resultou em trabalhos de Fresnel (1732-1827) o espaço vazio de Newton fora preenchido com uma substância hipotética, o "éter luminoso", considerado indispensável para explicar a propagaça o

hai ditulis per lpsa

$$x' = \frac{x - vt}{R} \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{R}$$

$$x'_1 - x'_2 = \frac{x_1 - vt_1}{R} - \frac{x_2 - vt_2}{R} = \frac{(x_1 - x_2) - v(t_1 - t_2)}{R}$$

$$t'_1 - t'_2 = \frac{t_1 - \frac{vx_1}{c^2}}{R} - \frac{t_2 - \frac{vx_2}{c^2}}{R} = \frac{(t_1 - t_2) - \frac{v}{c^2}(x_1 - x_2)}{R}$$

$$(x'_1 - x'_2)^2 + c^2(t'_1 - t'_2)^2 = \frac{[(x_1 - x_2) - v(t_1 - t_2)]^2}{R^2} + \frac{c^2 \left[(t_1 - t_2) - \frac{v}{c^2}(x_1 - x_2) \right]^2}{R^2}$$

$$= \frac{(x_1 - x_2)^2 - 2v(x_1 - x_2)(t_1 - t_2) + c^2(t_1 - t_2)^2 + v^2(x_1 - x_2)^2 - 2vc(t_1 - t_2)(x_1 - x_2)}{R^2}$$

$$\Delta x' = \frac{\Delta x - v \Delta t}{R} \quad \Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{v \Delta x}{c^2}}{R}$$

$$\Delta x'^2 + c^2 \Delta t'^2 = \frac{(\Delta x - v \Delta t)^2}{R^2} + \frac{c^2 (\Delta t - \frac{v \Delta x}{c^2})^2}{R^2}$$

$$\Delta x'^2 + c^2 \Delta t'^2 = \frac{\Delta x^2 + v^2 \Delta t^2 - 2v \Delta x \Delta t - c^2 (\Delta t^2 + \frac{v^2 \Delta x^2}{c^2} - 2v \Delta x / c^2)}{R^2} = \frac{\Delta x^2 + v^2 \Delta t^2 - 2v \Delta x \Delta t - c^2 \Delta t^2 - v^2 \Delta x^2 / c^2 + 2v \Delta x \Delta t}{R^2}$$

$$(\Delta x')^2 + c^2 (\Delta t')^2 = (\Delta x)^2 - \frac{v^2}{c^2} (\Delta x)^2 +$$

$$x'_1 - x'_2 = \frac{x_1 - vt_1}{R} - \frac{x_2 - vt_2}{R} = \frac{(x_1 - x_2) - v(t_1 - t_2)}{R}$$

$$(\Delta x')^2 = \frac{(\Delta x)^2 + v^2 (\Delta t)^2 - 2v \Delta x \Delta t}{R^2}$$

$$t'_1 - t'_2 = \frac{t_1 - \frac{vx_1}{c^2}}{R} - \frac{t_2 - \frac{vx_2}{c^2}}{R} = \frac{(t_1 - t_2) - \frac{v}{c^2}(x_1 - x_2)}{R}$$

$$(\Delta t')^2 = \frac{(\Delta t)^2 + \frac{v^2}{c^2} (\Delta x)^2 - \frac{2v \Delta x \Delta t}{c^2}}{R^2}$$

$$\Delta x'^2 + c^2 \Delta t'^2 = \frac{(\Delta x)^2 + v^2 \Delta t^2 - 2v \Delta x \Delta t}{R^2} + \frac{c^2 (\Delta t)^2 + \frac{v^2 \Delta x^2}{c^2} - 2v \Delta x \Delta t}{R^2} = \frac{(\Delta x)^2 (1 - \frac{v^2}{c^2}) - c^2 (\Delta t)^2 (1 - \frac{v^2}{c^2})}{R^2}$$

$$= \frac{(\Delta x)^2 (1 - \frac{v^2}{c^2}) - c^2 (\Delta t)^2 (1 - \frac{v^2}{c^2})}{R^2} = \frac{[(\Delta x)^2 + c^2 (\Delta t)^2] (1 - \frac{v^2}{c^2})}{R^2} = (\Delta x)^2 - c^2 (\Delta t)^2$$

A TEORIA DA RELATIVIDADE

3

esta velocidade terá efeitos ópticos: tudo mostra parecer encurtado e que a velocidade da Terra em relação ao Éter seria, pelo menos, da ordem de 10^{14} ^{cm/s}: $v = 3 \cdot 10^{10}$ logo $\frac{v}{c}$ a 10^{-4} e $\frac{v^2}{c^2}$ a 10^{-8} . Os efeitos em $\frac{v^2}{c^2}$ bits de segunda ordem seriam provavelmente 10.000 vezes mais tênues que os efeitos em $\frac{v}{c}$ bits de primeira ordem. Na prática, no laboratório, efeitos de 1ª ordem seriam detectáveis, os de 2ª ordem estavam para além dos limites de precisão experimental.

Uma conclusão idêntica é obtida ao estudo do problema do arrastamento, total ou parcial, do éter pelo corpo material. A hipótese do arrastamento total levantava sérias dificuldades — por exemplo implicava uma variação brusca da velocidade da luz quando ela penetra num corpo em movimento. Por razões teóricas Fresnel propôs uma fórmula de arrastamento parcial $v' = \frac{c}{n} + v(1 - \frac{1}{n^2})$ que foi confirmada em primeira ordem pelas experiências de Fizeau que mediu a velocidade de propagação da luz num tubo em que se cruzava água com a velocidade v . Também permitiu entender o fenómeno de aberração e a forma obliqua do meio propriamente mais reflexivo.

Concluiu-se, afinal, que o movimento de um corpo em relação ao Éter tinha a propriedade um tanto miraculosa de ser incapaz de provocar qualquer efeito de 1ª ordem mas, em troca, dava lugar a numerosos efeitos de 2ª ordem. A primeira experiência capaz de alcançar a formidável precisão que exigia a detecção de um efeito de 2ª ordem seria tão crucial pois permitiria por em evidência o "vento de éter", identificando assim o espaço absoluto. E a primeira dessas experiências foi, como se sabe, a famosa experiência de Michelson (1851) realizada em 1887 com o colaborador de Morley.

O "resultado negativo" das experiências de Michelson era uma catástrofe conceptual para a Física clássica na medida em que esse resultado surgia como totalmente inexplicável: o "vento de éter" deveria existir enquanto a experiência mostrava sem excepção que ele brilhava pela ausência. Fitzgerald e, mais tarde, Lorentz tentaram salvar a situação admitindo é priori que um corpo que possui uma velocidade v relativamente ao éter contraia-se na direcção do movimento de modo que em vez do comprimento x_0 tenha o comprimento $x = \frac{x_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Lorentz não se contentou que haveria igualmente que admitir um atraso na relação do tipo $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ^{keimozis} mas pôde estabelecer as relações que existem entre as coordenadas x e t de um acontecimento num referencial S em função das suas coordenadas x_0 e t_0 do referencial Absoluto e da velocidade v de S em relação àquela. Eram fórmulas excelentes, e por isso não hoje fazem parte das transformações de Lorentz ou do grupo de Lorentz, mas sem grande significação física, algo que surgiu como um meio expediente de emergência.

Foi o jovem Einstein quem mostrou em 1905 qual o significado profundo do resultado da experiência de Michelson e como o mesmo se encaixa na Teoria da Relatividade.

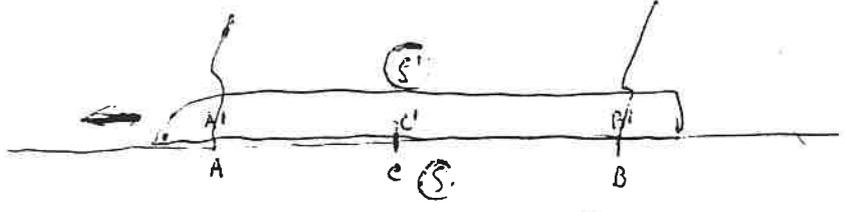
3. Velocidade da luz e simultaneidade

A teoria da relatividade einsteiniana baseia-se em duas ideias claras, simples e precisas. A primeira é o velho princípio da equivalência de todos os sistemas de inércia, expressão do facto de que o elemento que tenta reivindicar um estatuto privilegiado nesse conjunto de referências, quer dizer, o espaço absoluto, não manifestava a sua existência e, portanto, não merecia que lhe fosse atribuída qualquer realidade física; assim, para Einstein, continua a haver referências privilegiadas, as referências de inércia, mas todas com valor análogo: o Espaço Absoluto morreu. A segunda ideia é, de certo modo, necessária à coerência da primeira: se todos os sistemas de inércia são equivalentes, as equações de Maxwell como as leis da Mecânica devem ser válidas em todos eles; em particular, a velocidade da luz no vácuo, consequência directa das equações de Maxwell, deve ter o valor c em todos os referências de inércia.

Repare-se que se o princípio de equivalência é perfeitamente compatível com os fundamentos da Mecânica clássica, o segundo aparece como contraditório e frontalmente: classicamente não se conhece que uma propagação possa ter a mesma velocidade em dois referências em movimento relativo. Einstein sacrificava deliberadamente a Mecânica para salvar o Electromagnetismo, considerando com razão que a observação dos fenómenos electromagnéticos tinha um grau de precisão muito superior à dos fenómenos mecânicos e que afinal, dado o elevado valor da velocidade da luz, as correcções a introduzir na Dinâmica clássica tinham porventura para além da precisão alcançada até então na verificação da Dinâmica clássica.

De resto, a afirmação de que dois referências de inércia em movimento relativo com a velocidade, neste caso a da luz, poderão ser a mesma não vai apenas afectar a Dinâmica mas as nossas próprias concepções de Espaço e de Tempo. Com o Espaço Absoluto vai morrer o Tempo Absoluto, pois os postulados einsteinianos implicam que a própria conceção de simultaneidade vai passar a ter um significado relativo, isto é, a referir-se a um dado referencial. Parece-me essencial entender isto muito bem, e vou dedicar-lhe algumas páginas minutos referindo-me à experiência conceptual clássica do comboio.

O comboio e as flashes



Posições das referências S e S' no instante do impacto dos flashes

Por hipótese $AC = AB$ do ponto de vista de S (simultaneidade dos esp. de transformação) que S' também está de acordo em que $AC = BC$ e que S também está de acordo em que $A'C' = B'C'$

A TEORIA DA RELATIVIDADE

O observador de S' com uma régua rígida que possui no seu sistema (o centro) determinou um ponto B' que é equidistante de A' e B' tal como o observador de S com uma régua rígida que possui no seu sistema determinou um ponto E equidistante de A e de B . Em E e em C' estão dois dispositivos de coincidência que entrarão em funcionamento se forem eleancés simultaneamente pelas duas ondas eletromagnéticas que a cada emissão é provocada pela queda dos feixes.

O ponto essencial é que essas ondas eletromagnéticas não propagam-se com uma velocidade finita e que é a mesma nos dois referenciais. Porque a velocidade de propagação é finita as duas ondas só poderão eleancar os detectores um certo tempo (finito) após o instante de queda dos dois feixes. Suponhamos então que as duas feixes chegam simultaneamente a E . Então, para o observador de S , as duas feixes caíram simultaneamente. Mas no instante em que a feixe vinda de A chega à C já passou de certo por C' enquanto a feixe vinda de B ~~de~~ ainda não eleancou C' — logo as duas radiações que chegam simultaneamente a E não podem chegar simultaneamente a C' . Inversamente, se as duas radiações chegarem simultaneamente a C' não poderão chegar simultaneamente a E . Logo os dois observadores nunca poderão estar de acordo para afirmar a simultaneidade de dois acontecimentos.

Cada um deles poderá se tentado a acusar o outro de ter recorrido a um mau método para determinar a simultaneidade, mas como poderá fazê-lo se "o outro" proceder de uma maneira perfeitamente análoga e que ele próprio utiliza? Por outro lado, ambos têm que reconhecer que não gozam de um estatuto privilegiado, se não que a única conclusão razoável é que podem chegar à que a simultaneidade é um conceito puramente relativo que não se pode falar em simultaneidade em um sentido absoluto mas tão somente de simultaneidade relativa a um certo referencial. A afirmação de que "a primeira bomba atômica explodiu em Hiroshima no instante exato em que o imperador do Japão se sentava para tomar o pequeno almoço" não tem qualquer significado absoluto, é puramente exata no referencial Terra mas já não o será relativamente à estrela Sirius. Não é possível atribuir um tempo t universalmente acite a um acontecimento qualquer, o Tempo Absoluto não pode ser definido.

Orá, se o tempo é apenas relativo, se a simultaneidade só tem sentido quando se referir a um referencial bem determinado, a distância também passa a ser relativa e a referir-se sempre a um dado referencial. Quem diz distância diz o comprimento de uma régua destinada a medir essa distância e, em geral, a determinação do comprimento de uma régua depende do referencial considerado. Na verdade, duas régua, tem o mesmo comprimento se colocadas lado a lado e verificou que os seus pontos extremos coincidem; isto não levanta qualquer

problemas de as réguas estar imóveis uma em relação à outra — o que quer dizer que a definição de distância num dado referencial não sofre de ambiguidade; mas se as duas réguas se movem uma em relação à outra (logo se uma é uma régua imóvel em S, outra uma régua imóvel em S') o único critério resolúvel para afirmar que têm o mesmo comprimento é verificar que as suas extremidades coincidem no mesmo instante, simultaneamente. Ora a simultaneidade, tal a verificá-la, é relativa a um dado referencial, sob as visões de S e de S' nunca estarão de acordo em afirmar que dois acontecimentos são simultâneos. Logo se o observador de S afirma que duas réguas em movimento relativo têm o mesmo comprimento (porque ele verifica que as suas extremidades coincidem simultaneamente), o observador de S' não poderá deixar de discordar desta conclusão argumentando que as duas réguas não têm o mesmo comprimento (porque ele não pode verificar a coincidência simultânea das suas extremidades). Logo, os observadores de S e de S' não se poderão entender sobre o comprimento das réguas, também não podem estar de acordo quanto aos valores das distâncias que mediam entre as localizações dos acontecimentos. A distância entre acontecimentos torna-se assim também uma grandeza essencialmente relativa, que só tem sentido quando referida a um dado referencial.

Assim, a ocorrência dos acontecimentos R_1 e R_2 que tem em S e S' as seguintes coordenadas de espaço e de tempo

S	$R_1 \rightarrow (x_1, y_1, z_1, t_1)$	$R_2 \rightarrow (x_2, y_2, z_2, t_2)$
S'	$R'_1 \rightarrow (x'_1, y'_1, z'_1, t'_1)$	$R'_2 \rightarrow (x'_2, y'_2, z'_2, t'_2)$

Do ponto de vista clássico temos dois invariantes fundamentais:

- a distância, quer dizer $(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 = (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 + (z'_1 - z'_2)^2$
- o intervalo de tempo, quer dizer $t_1 - t_2 = t'_1 - t'_2$

Em relatividade, nenhum destes invariantes permanece. O novo invariante a que podemos recorrer escreve-se

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - c^2(t_1 - t_2)^2 = (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 + (z'_1 - z'_2)^2 - c^2(t'_1 - t'_2)^2$$

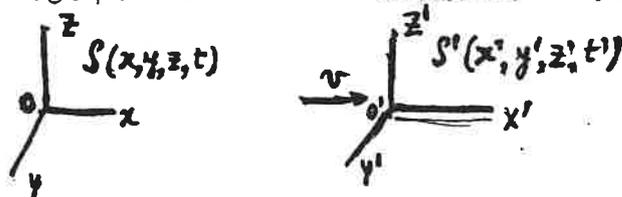
É um invariante que traduz a afinidade física e equivalência física de todos os sistemas de inércia e a constância da velocidade da luz. De certa forma ele exprime a conservação de uma distância num espaço abstracto a quatro dimensões, das quais três estão ligadas à coordenação de espaço e uma à coordenação de tempo. Este espaço abstracto quadri-dimensional é o Universo de Minkowski e assim o quadro mais natural para escrever as fórmulas relativistas que, no formalismo correspondente adquirem uma beleza, uma simplicidade e uma elegância que não transparecem na ciência habitual convenientemente para a Mecânica Clássica. Tal como a ~~invariância~~ invariância clássica de distância define espaço que se chama uma métrica que é, como todos sabem, uma métrica euclidiana — a definição da distância traduz tão só

A TEORIA DA RELATIVIDADE

O Teorema de Pitágoras a três dimensões — a invariante no espaço-tempo também define uma métrica que tem qualquer coisa de euclidiana (pori nela também figuram quadrados de diferenças de coordenadas) mas que não é totalmente euclidiana porque aquilo que se chama a assinatura da métrica não é ++++ mas +++-. Faz-se numa geometria pseudo euclidiana e, mais precisamente, em geometria hiperbólica. O estudo das geometrias hiperbólicas é muito curioso e interessante para a compreensão da relatividade, mas não tenho qualquer possibilidade de desenvolver aqui este ponto.

4. A transformação de Lorentz e o efeito cinemático

Não vou deter-me aqui com a dedução das leis de transformação das coordenadas espaciais e do tempo quando se passa de um referencial galileiano S para outro referencial galileiano S' com eixos paralelos ao do primeiro; ~~o que~~ para simplificar supondo que S' se move em relação a S com uma velocidade v constante ao longo de Ox e Ox'



Variações lógicas explicam as variáveis necessárias de deduzir dos princípios da relatividade e da hipótese da linearidade de as leis de transformação (admitidas referidas pela origem de S e S' a transformação assegurando a homogeneidade do espaço) a transformação de Lorentz e que se escreve

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Então, então, de simétrico brevemente as principais consequências destas equações como é habitual. Primeiramente, invertendo estas equações, quer dizer, escrevendo x, y, z, t em função de x', y', z', t' vem

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Resultado simétrico ao anterior em que, aparentemente, se se substituir a velocidade v de S' em relação a S pela velocidade $-v$ de S em relação a S' . Contudo o resultado é mais banal do que parece porque v é a velocidade de S' em relação a S vista pelo observador de S enquanto $-v$ é a velocidade de S em relação a S' vista pelo observador de S' ; como nem os referen- ciais nem o relógio de S e S' coincidem, a conclusão é natural. ~~Quanto~~

Consideremos agora, qualitativamente, a variação dos padrões de medida das distâncias

e do tempo (regras e relógios) com o movimento relativo.

Regra invariável em S' de comprimento $\Delta l' = x'_2 - x'_1$. Um observador de S que a vê em movimento com velocidade v deve atribuir-lhe um comprimento $\Delta l = x_2 - x_1$, sendo x_2 e x_1 as coordenadas de dois pontos com os quais coincidem x'_2 e x'_1 simultaneamente o referencial de S . Temos assim

$$\Delta l' = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

quer dizer $\Delta l = \Delta l' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ e como $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ $\Delta l' > \Delta l$. Como se costuma dizer a regra em movimento contrai-se. Evidentemente que o mesmo raciocínio leva a concluir que a regra invariável em S contrai-se para o observador de S' . E por detrás desta circunstância não há mais esta de que a ausência de simultaneidade absoluta: para o observador invariável em relação à regra, o observador em movimento não determina os pontos coincidentes com as extremidades da regra simultaneamente (simultaneamente do seu ponto de vista) e daí a diferença de conclusões.

Digo de semelhante passa-se com o relógio. Admita-se uma haste com um relógio. Consideremos ainda um relógio invariável em S' , no ponto de coordenada x'_0 . Ao tempo t' marcado por este relógio em S' corresponde em S o tempo

$$t = \frac{t' + vx'_0/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

e, portanto, se intervalo de tempo $t_2 - t_1$ em S corresponderá em S' o tempo $t'_2 - t'_1$ tal que

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 + vx'_0/c^2}{R} - \frac{t'_1 + vx'_0/c^2}{R} = \frac{t'_2 - t'_1}{R} \quad (\text{os pontos } x'_0)$$

quer dizer $R \Delta t = \Delta t'$. Como $R < 1$ $\Delta t > \Delta t'$ e a conclusão é que um relógio em movimento funciona mais lentamente do que se diz também atrás. O efeito é igualmente recíproco e a sua razão de ser é ainda a ausência de simultaneidade absoluta. É que se passa, de facto, é que o observador de S , em relação ao qual o relógio está em movimento, não compara-lo não com um relógio de S mas com diferentes relógios de S situados em diferentes locais de S diferentes. Se no instante t_1 o relógio é comparado com um relógio de S situado no origem O , no instante t_2 será comparado com um relógio de S situado alguma na parte positiva de Ox , tanto mais longe de O quanto maior for o intervalo de tempo decorrido. Ora para o observador de S' (ou seja o relógio está, por hipótese invariável) os relógios de S não estão "certos" entre si e encontram-se cada um mais atrasado quanto maior a sua distância em S . Daí que, de ponto de vista de S' , o tempo feito uma medida que ele teria tentado de achar incorrecto se não tivesse Relatividade.

Uma outra consequência quase indispensável de citar na cinemática relativista é a for

A TEORIA DA RELATIVIDADE

u

uma modificação que adquiere o princípio da relatividade de abdicar das velocidades, resultado previsível pois que a teoria seria invariante se o teorema não adquirisse uma forma tal que a velocidade c de um móvel fosse a mesma em todos os sistemas inerciais. Na verdade, diferenciando as equações de transformação das coordenadas e do tempo vem

Intervalo

$$\Delta s^2 = (\Delta x^2 - c^2 \Delta t^2)$$

Δs^2 é um invariante $\rightarrow m$
L0

Δs^2 é um invariante $\rightarrow m$
L0
 Δs^2 é um invariante $\rightarrow m$
L0
gênero tempo
 $\Delta s^2 < 0$
gênero espaço

$$\Delta x' = \frac{\Delta x - v \Delta t}{\gamma} \quad \Delta t' = \frac{\Delta t - v \Delta x / c^2}{\gamma}$$

onde se tira de $u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

$$\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\Delta x - v \Delta t}{\Delta t - v \Delta x / c^2} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{1 - v/u}{1 - \frac{v}{c^2} \frac{\Delta x}{\Delta t}} \quad \text{quer dizer } u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}$$

clássicamente, concluiríamos que a partícula com velocidade u em S teria uma velocidade de u' = u - v em S' e, nomeadamente, que se tivesse uma velocidade c em S teria uma velocidade c - v em S'. Mesmo para velocidades enormemente à nossa escala temos praticamente u' = u - v mas, todavia, se for u = c vem $u' = \frac{c-v}{1 - \frac{cv}{c^2}} = \frac{c-v}{\frac{c-v}{c}} = c$. Não é grande novidade, é somente uma constatação de coerência.

Rel do género tempo há um significado absoluto em hier que um lá parece o outro.

Das palavras somente sobre as consequências da Relatividade Restrita para além da cinemática. No que respecta à Electrodinâmica e à Óptica, há de se modificar, e com teoria relativista muito antes do aparecimento da Relatividade, que afinal não se fez ao que afirmar a supremacia das concepções de Espaço e de Tempo pelas implícitas mas vez admitida a sua validade em todos os sistemas de inércia. O que importa a seguir é a coerência e a simetria na equação de Maxwell adquirem quando expressas num espaço abstracto quadridimensional de coordenadas

$$x_1 = x \quad x_2 = y \quad x_3 = z \quad x_4 = ict$$

$$\text{rot } \vec{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{div } \vec{H} = 0$$

Então, introduzindo um tensor $F_{\mu\nu}$ dito o tensor campo electromagnético $F_{\mu\nu}$, antisimétrico

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & H_z & -H_y & -iE_x \\ -H_z & 0 & H_x & -iE_y \\ H_y & -H_x & 0 & -iE_z \\ iE_x & iE_y & iE_z & 0 \end{pmatrix}$$

é um quadrivector derivado de carga corrente

$$j_\mu = \left(\frac{j_x}{c}, \frac{j_y}{c}, \frac{j_z}{c}, ip \right)$$

As equações de Maxwell escrevem-se simplesmente

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = j_\mu \quad \frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} + \frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial x_\nu} = 0$$

com uma simetria e uma simplicidade magníficas.

É evidente que, ao contrário do Electromagnetismo, a mecânica precisa de ser alterada para se adaptar às novas concepções de Espaço-Tempo. Uma forma muito simples de o fazer, embora por via intuitiva, é a de postular a equação fundamental da nova Dinâmica sob a forma usual

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \vec{F} = \frac{d}{dt} (m\vec{v}) \quad \text{mas tomando agora } m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou } \vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

A dedução de que a massa relativista deve ser tomada não como uma constante (tal como em teoria clássica) mas como variável com a velocidade pode aliás obter-se facilmente, como Dilmer mostrou há poucos meses em análise de um problema de choque elástico em que se supõem valer hipóteses muito simples, nomeadamente a conservação da quantidade de movimento. De qualquer modo obtemos

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{dm}{dt} \vec{v} = \dots \text{ e constatamos, resultado singular, que em relati-}$$

vidade a aceleração não tem, em geral, a direcção de força.

Definindo o trabalho realizado por uma força \vec{F} no deslocamento $d\vec{r}$ sob a forma usual

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} = \text{ou de } W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} = \frac{d}{dt} (m\vec{v}) \cdot \vec{v} = \dots \quad \vec{v} \text{ e } \frac{d}{dt} (m\vec{v}) \text{ são colineares}$$

$$\frac{d}{dt} (mv^2) - m\vec{v} \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} (mv^2) - \frac{m}{2} \frac{d}{dt} v^2 = \dots = v \frac{d}{dt} (mv) = \dots = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad \text{Logo integrando e C a V } W = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 \text{ isto}$$

é quando se passa de velocidade 0 a velocidade v o trabalho realizado é $\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$ Há proporcionalidade entre o acréscimo de energia e o acréscimo de massa e tudo se entende enunciando $E = mc^2$ Os princípios de conservação da massa e da energia são unificados. 1º Princípio

que é, provavelmente a mais espectacular das consequências da Relatividade Restrita.

Uma última palavra para terminar. Tal como houve que construir uma mecânica rela-

tivista, põe-se o problema da formulação relativista da Termodinâmica e, por muito estranho modo que isso possa parecer ainda hoje não há unanimidade quanto às fórmulas que correspondem, por exemplo às transformações relativistas de calor ou da temperatura.

Discute-se, sobretudo, se se deve escrever

$$T' = \frac{T}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad Q' = \frac{Q}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad T' = T \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad Q' = Q \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Em qualquer caso há um particular fervoroso das seguintes fórmulas de transformações sem deixar de reconhecer que o problema é intrincado. E por aqui me fica, de tanto esperar para responder a quaisquer perguntas.

1. Crítica do conceito de referencial de inércia

Todas as teorias da física clássica (tal como a própria relatividade restrita (e, seja dito de passagem, as diversas formulações da mecânica quântica) são baseadas na velha concepção de que, entre a totalidade dos referenciais de inércia possíveis existe um conjunto de referenciais fisicamente privilegiados, isto é, referenciais de inércia relativamente aos quais são definidas as leis da física. Isto significa, por exemplo, que se quisermos descrever o movimento de um ponto material em relação a um sistema não inercial teremos que considerar — que introduzir por razões técnicas — forças suplementares nos resultados da interação física desse ponto material com outros pontos materiais e que são chamadas "forças inerciais". Isto tratava-se novamente pelo princípio da inércia, segundo o qual num desses referenciais privilegiados todos os pontos não actuados por forças possuem um movimento rectilíneo e uniforme.

De facto, e vista mais de perto, uma tal afirmação é propriamente inverificável e até, de algum modo, tautológica. A maneira de verificar que um corpo não está actuado por forças e que tem movimento rectilíneo e uniforme (a menos que o confrontamos infinitamente afastado de todos os outros corpos, o que é fisicamente impossível) deste modo, afirmar a validade do princípio da inércia é uma espécie de petição de princípio. A própria ideia de referencial de inércia parece altamente suspeita. Parece que seria muito mais satisfatório construir uma teoria física em que os referenciais de inércia deixassem de ter um estatuto tão privilegiado.

Em contrapartida, poder-se-á objectar que as $\frac{2}{3}$ chamadas forças de inércia — inércias físicas da utilização de referenciais não inerciais — são fisicamente observáveis e podem até citar a origem de fenómenos espectaculares: basta recordar o famoso exemplo que foi dado pelo próprio Newton do balde cheio de água em rotação ou, para tornar um caso verificado quantitativamente com grande precisão, a experiência do pêndulo de Foucault que demonstrava directamente a rotação da Terra sobre si mesma graças à variação do plano de oscilação de um pêndulo que, num referencial de inércia deve manter-se invariante.

Todavia o problema conceptual não é efectivamente o de saber se, em certos casos, nos podemos identificar sem ambiguidades a presença de forças de inércia (e, portanto, caracterizar um referencial como não inercial) mas sim o de saber se nos podemos sempre distinguir um referencial inercial de um que o não é. E aí surge desde logo uma nova problemática relacionada com a inexplicável identidade entre massa gravítica e massa inerte.

2. Massa inerte e massa gravítica. Relatividade Geralizada

Se num ponto do espaço-tempo existe um campo gravítico \vec{g} , ele provocará num um corpo

de massa gravítica M uma força F ou que $F = M a$. É uma relação perfeitamente análoga à que ocorre quando um corpo eletrizado de carga eléctrica Q é colocado num espaço onde existe um campo electrostático \vec{E} : o corpo eletrizado é actuado por uma força $\vec{F} = Q\vec{E}$. Tal como Q é uma carga (carga eléctrica, porque determina a força provocada por um campo eléctrico \vec{E}), a massa gravítica também é uma espécie de carga (carga gravítica, porque determina a força provocada por um campo gravítico \vec{G}).

Segundo a lei de Newton da dinâmica, uma força \vec{F} que actua sobre um corpo (seja este corpo gravítico, eléctrico ou que qualquer outra natureza) imprime a este corpo uma aceleração \vec{a} proporcional à força, a constante de proporcionalidade sendo uma grandeza característica do corpo, é qual chamamos a sua massa inerte ou massa inercial

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

e m exprime tão-só a maior ou menor facilidade com que a velocidade do corpo será alterada sob a acção de uma dada força; m é uma grandeza puramente mecânica que nada tem a ver com a natureza física de \vec{F} .

Se considerarmos, por exemplo que \vec{F} é de origem electrostática teremos

$$Q\vec{E} = m\vec{a} \quad \text{ou} \quad \vec{a} = \frac{Q}{m}\vec{E}$$

e a relação entre a aceleração do corpo \vec{a} e o valor do campo eléctrico depende de dois parâmetros independentes, um m característico do corpo, outro Q que exprime o seu estado de eletrização; assim, para um determinado corpo de massa m num certo ponto do espaço-tempo onde o campo electrostático tem um valor bem definido \vec{a} variará linearmente com Q . Isto parece perfeitamente natural.

Examinar agora o que se passa com o campo gravítico. De forma análoga teremos

$$M\vec{G} = m\vec{a} \quad \text{ou} \quad \vec{a} = \frac{M}{m}\vec{G}$$

mas agora a experiência fornece-nos uma constatação inesperada: num dado ponto do espaço-tempo, quer dizer, para um certo valor de \vec{G} , a aceleração \vec{a} é sempre a mesma para todos os corpos. Isto já estava de algum modo implícito nas experiências de Galileu com os planos inclinados mas, nessa altura, nem sequer havia consciência de que sob o nome de massa se incluíam duas grandezas muito diferentes, m e M . Na segunda metade do século XIX, quando se tornou consciência desse facto singular, fizeram-se experiências para verificar se esta proporcionalidade não era apenas uma aproximação grosseira. Mas antes do fim do século sabia-se que o erro relativo $\Delta m/m$ era de facto inferior a 10^{-8} . Estamos hoje seguros desse facto com uma precisão fantástica, inferior a 10^{-10} (Dicke, 1961).

Com uma escolha conveniente das unidades podemos pois tomar $m = M$ e a grande questão que se põe imediatamente é a de saber porque. A resposta que vem imediatamente ao espírito é que se trata de mesma grandeza. Trata-se de uma ideia que é de todo inaceitável em mecânica clássica mas Einstein vai tomar essa igualdade $M = m$ como um dos fundamentos da sua tentativa de nova generalização da mecânica sob o nome de Princípio da Equivalência.

3. O elevador de Einstein

Munido desta nova hipótese de que a massa inerte e a massa gravítica são uma e a mesma grandera voltamos à questão da referencial de inércia. Para compreender exatamente as consequências do princípio da equivalência vamos supor que a Terra é um referencial de inércia e que num elevador hermeticamente fechado se encontram observadores inteligentes que procuram interpretar por meio de experiências mecânicas tudo quanto lhes vai ocorrendo.

Se o elevador ativar imóvel, os observadores que nele estão encerrados poderão medir o comportamento de corpos em queda livre no elevador, verificarão que eles caem com uma aceleração de $9,8 \text{ m/s}^2$ e poderão concluir que existe um campo gravítico exterior responsável por essa aceleração. Imaginemos agora que o elevador começa a descer (relativamente à Terra) com uma aceleração de 2 m/s^2 . Os observadores encerrados no elevador observarão que agora os corpos caem apenas com uma aceleração de $7,8 \text{ m/s}^2$ e alguns deles poderão interpretar o facto supondo que o elevador desce com a aceleração de 2 m/s^2 ; mas outros poderão tomar que a explicação do fenómeno não é esta mas sim que a intensidade do campo gravítico exterior diminuiu de $9,8$ para $7,8 \text{ m/s}^2$. Se o elevador descer com uma aceleração cada vez maior, as duas interpretações restam igualmente possíveis: por exemplo, com o elevador em queda livre os corpos parecem necessariamente imóveis no interior do elevador (sem aceleração) e um observador pode sustentá-los com perfeita coerência que o campo gravítico exterior se anulou; se a aceleração de descida ultrapassar $9,8 \text{ m/s}^2$, o mesmo físico dirá que o elevador está agora sujeito a um campo gravítico agindo de baixo para cima.

O ponto essencial a admitir aqui é que, localmente, ter isto de ser $m = M$, um campo de gravitação é equivalente ao campo de forças produzido por um certo movimento acelerado em relação a um sistema de inércia. Ora o que caracteriza essencialmente um sistema não inercial é o aparecimento de forças inerciais. E estas se conjuntem com forças de gravitação, a identificação ~~de uma forma inequívoca das forças inerciais torna-se conceptualmente impossível~~. Uma mecânica realmente coerente não deve tratar diferentemente forças inerciais e forças de gravitação. Localmente umas e outras são equivalentes.

Para entender bem o que se quer dizer, retomemos o caso do elevador em queda livre, quando um graveto abandonado no elevador sem velocidade inicial permanece imóvel. O físico do elevador, considerando o seu referencial um bom referencial, não vai introduzir forças de inércia e considera o campo gravítico nulo. Logo $\vec{F} = 0$ e $\vec{a} = 0$ no referencial elevador. O físico que da Terra tem conhecimento do fenómeno, sabe que $\vec{a} = 0$ em relação ao elevador, tem que concluir que no elevador $\vec{F} = 0$. Mas, para ele, $\vec{F} = 0$ porque no elevador o graveto está sujeito a uma força gravítica $\vec{F}_g = M\vec{g}$ e a uma força inercial $\vec{F}_i = -m\vec{a}$ e como em queda livre $\vec{a} = \vec{g}$, $\vec{F}_g + \vec{F}_i = 0$.

Princípio da equivalência (4. Tenenblat 315)

nas leis físicas em termos de um conjunto restrito e privilegiado de referências de inércia. De algum modo, todos os referenciais devem ser colocados agora em pé de igualdade, e a teoria da gravitação deve ser inserida nos próprios fundamentos de Mecânica a fim de que nos referenciais habitualmente concebidos como os inerciais apareçam campos gravitacionais capazes de explicar o que se observava até então como as "forças fictícias" das inercias.

Esta inserção da gravitação num novo quadro conceptual, consequência inevitável desta espécie de programa surgiu, aliás, como altamente satisfatória porque a velha teoria da gravitação de Newton não sendo uma teoria de campo revela-se incompatível com a própria relatividade restrita. Basta notar que a relatividade restrita adota por implicito um valor limite $c = 3 \times 10^{10}$ m/s, a velocidade de transmissão de um sinal, isto quando as interações gravitacionais (isto como foram concebidas por Newton) deveriam propagar-se com velocidade infinita. Mas a própria lei da gravitação deixa de ter qualquer significado preciso em Relatividade restrita: o ponto a emissão de uma força de interacção física da distância mútua r_{12} entre dois corpos materiais $\vec{F} = \vec{F}(r_{12})$ e, em Relatividade restrita, uma distância así e um invariante depende do referencial de inércia no qual é definido.

Claro está que se pode tentar escapar a estas dificuldades procurando converter adequadamente a gravitação newtoniana numa teoria de campo. Disse-se que uma das famosas equações de Maxwell, nomeadamente a equação $\text{div } \vec{E} = 4\pi\rho$ onde \vec{E} é o campo eléctrico e ρ a densidade de carga eléctrica ~~em forma~~ sob forma diferencial, em termos locais, a lei de Coulomb. Ora a lei de Coulomb é formalmente análoga à lei de Newton, a qual se pode portanto exprimir pela equação diferencial análoga $\text{div } \vec{G} = 4\pi\rho$ onde \vec{G} é o campo gravítico e ρ denota agora a densidade de massa. Esta equação não é todavia covariante relativista.

de escreve-se $\frac{\partial G_x}{\partial x} + \frac{\partial G_y}{\partial y} + \frac{\partial G_z}{\partial z} = 4\pi\rho$ e no 1º membro não encontramos a indispensável simetria entre coordenadas de espaço e de tempo subjacente à covariância relativista. Pode

mas no entanto tentar modificar a equação para obviar a este inconveniente: O campo gravítico \vec{G} deriva de um potencial escalar $U - G = -\text{grad } U$ ou $G_x = -\frac{\partial U}{\partial x}$, $G_y = -\frac{\partial U}{\partial y}$, $G_z = -\frac{\partial U}{\partial z}$ e substituindo obtemos $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -4\pi\rho$ ou, não sinteticamente $\Delta U = -4\pi\rho$ ou $\Delta G = -4\pi\rho$. O operador Lap ou $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ continua a não ser covariante relativista.

mas podemos tentar melhorar as coisas alterando a lei de Newton, e substituindo o operador $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ pelo operador d'Alembertiano $\square = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$, que é covariante relativista. Mas nem assim a equação se torna realmente satisfatória: em termos de Maxwell, o ρ é (a menos de uma constante multiplicativa) o 4º componente de um quadri-vector de espaço-tempo, a densidade de carga real (as outras três componentes são as componentes do vector \vec{j} , a densidade de corrente) tal como o U é a 4ª componente de um quadri-vector potencial (as outras componentes são as componentes de \vec{A} o potencial de que deriva o campo magnético). Na teoria da gravitação newtoniana não há nada que corresponda às correntes eléctricas nem ao potencial magnético \vec{A} e a analogia não pode ser levada mais além.

Tomebt
19/11

densidade de carga real

Fizeram-se tentativas para considerar U e P como escalas, mas elas não conduziram a conclusões experimentalmente satisfatórias e foram aliás abandonadas com o advento da teoria da gravitação de Einstein.

4. Gravitação e curvatura do espaço tempo

Einstein
Relativity Cap. 23

As conclusões precedentes que levam a identificar forças gravíticas e forças inerciais, têm consequências muito importantes, como se pode verificar considerando o exemplo simples de um disco de raio r que roda com velocidade angular constante em torno de um eixo fixo num referencial de inércia S . Um observador colocado sobre esse disco em qualquer ponto que não seja o centro de rotação encontra-se então sujeito a uma força de inércia (uma força centrífuga), isto pelo menos do ponto de vista de um observador de S . Mas se considerarmos todos os referenciais como equivalentes, o observador situado sobre o disco pode considerar que o disco está imóvel (para ele será o referencial S que roda) e recusar-se a logicamente a interpretar a força que actua sobre ele como uma força inercial: dirá que se trata de um campo gravítico e, reflectindo nos instantes, não deixará de admirar que se trate de um campo gravítico com uma lei de variação muito estranha: é nulo no ponto central e cresce proporcionalmente à distância a esse ponto.

Abordemos agora a análise da mesma situação do ponto de vista do tempo e do espaço. Suponhamos que o observador sobre o disco coloca dois relógios idênticos, um no bordo do disco outro no seu centro, ~~Abandonamos~~ de todos os modos ambos imóveis em relação a ele. Do ponto de vista de um observador de S , o relógio situado no centro do disco está imóvel e comporta-se como um "bom" relógio de S , mas o relógio situado na periferia do disco atrasa-se. O próprio observador situado sobre o disco se esse observador se encontrar situado no ponto central, ele chegará então à conclusão que relógios imóveis uns em relação aos outros marcham com ritmos diferentes e não poderá deixar de relacionar esse facto com a presença de um campo gravítico: o campo gravítico altera a marcha dos relógios.

Algo de correspondente ocorre com as distâncias. Uma régua metálica (de pequeno comprimento) situada no bordo do disco contra-se vista de S (ou vista pelo observador situado no centro); pelo contrário, não há qualquer contração no raio do disco (cujá direcção é constantemente normal à direcção do movimento) de modo que para o disco em rotação o valor do diâmetro não é afectado por essa rotação enquanto o do perímetro [↑] aumenta com r para uma certa velocidade angular ω . Por outras palavras $\frac{C}{D} > \pi$ tanto maior do que π quanto maior forem r e ω .

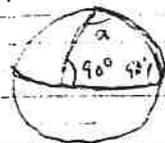
Ora a existência de uma relação constante ($= \pi$) entre o perímetro e o diâmetro de um círculo é algo que caracteriza a geometria euclídea, como a caracteriza por exemplo o teorema de Pitágoras. A conclusão a tirar é que para atribuirmos o mesmo estatuto a todos os referenciais possíveis, devemos obrigados a caracterizar o espaço por uma geometria não

encontramos em, mais geralmente, o continuo espaço-tempo por uma geometria que não é sequer pseudo-euclidiana (hiperbólica). Há que recorrer obrigatoriamente a estruturas geométricas mais complicadas.

5. Geometria e experiência

Com que direito nos polemos nos propor abandonar a geometria euclidiana? E, aliás, que significa exactamente isso? A verdade é que os matemáticos do século XIX (Gauss foi um precursor, Riemann, Lobachevski, Bolyai fizeram o essencial do trabalho) tinham concebido geometrias perfeitamente coerentes e que diforizam profundamente da geometria euclidiana. A física continuava agramada à geometria de Euclides por razões meramente pragmáticas porque a geometria euclidiana parecia dar correctamente conta do facto experimental. É bom não esquecer que se atribui ao espaço físico esta ou aquela geometria por razões de princípio mas em função de considerações eminentemente pragmáticas: por exemplo, porque, à hora escala, e na aproximação consentida pelo erro experimental, se verifica que a soma dos três ângulos de um triângulo vale 180° . Nada nos garante todavia que essa geometria — a não simples de falar e que até include outras como caso particular — continuará a contribuir uma aproximação satisfatória numa outra escala de distâncias ou em condições físicas muito diferentes: será, por exemplo, que o três ângulos de um triângulo cujos lados são da ordem de 10^8 ou de 10^{10} cm — luz ainda somam 180° ? Não é obviamente possível dar qualquer resposta a priori, só a observação (ou as teorias capazes de explicar convenientemente os resultados observáveis) é que permitirá responder. A priori tudo quanto polemos exigir é que a resposta, seja ela qual for, explique também esse facto experimental de que a nossa vivência quotidiana garante (com uma certa aproximação) a validade da geometria euclidiana tradicional.

Falar de geometrias não euclidianas não é, de certo, algo que esteja ao alcance da nossa intuição como se poderia pensar. Por exemplo, a superfície de uma mesa é um espaço euclidiano a duas dimensões, mas a superfície de uma bola também um espaço bidimensional (a menos de um ponto é univocamente definida por dois números, por exemplo a latitude e a longitude) mas não é um espaço euclidiano: a soma dos três ângulos de um triângulo não é 180° , o cociente do perímetro de um círculo pelo raio não é constante etc.



É claro que, de todos os modos, as geometrias não euclidianas são menos "intuitivas" do que a de Euclides mas isso não constitui nenhum critério de verdade física. Também é muito mais intuitivo saber a Terra imóvel do que o Sol imóvel. E matematicamente, sabemos manipular sem ambiguidades qualquer das geometrias não euclidianas. O conceito fundamental, que de algum modo define uma geometria é a sua métrica, quer dizer um conjunto de funções das coordenadas que permitem determinar a distância (mais precisamente, o quadrado da distância) entre dois pontos arbitrários.

trariamente próximos, por exemplo $P(q_1, q_2)$ e $P'(q_1 + dq_1, q_2 + dq_2)$. Neste exemplo bidimensional temos assim

$$ds^2 = g_{11} dq_1 dq_1 + g_{12} dq_1 dq_2 + g_{21} dq_2 dq_1 + g_{22} dq_2 dq_2$$

e a métrica será determinada pelas quatro funções de q_1 e de q_2 . No caso euclidiano $g_{11} = g_{22} = 1$, $g_{12} = g_{21} = 0$ e o chamado tensor métrico tem a forma simples

1	0
0	1

o que mostra $ds^2 = dq_1^2 + dq_2^2$ (teorema de Pitágoras).

No caso físico aqui considerado temos um $g_{\mu\nu}(x_\mu)$, que varia de um ponto para outro no "espaço" curvo e este tensor métrico define, em cada ponto do espaço uma curvatura que deve exprimir simultaneamente aquilo em que em física clássica chamamos as forças de inércia e as forças gravitacionais. Claro está que este "espaço" que agora levamos a considerar é, finalmente, um "espaço-tempo" a 4 dimensões, um "universo de Minkowski". Se definirmos as suas "coordenadas" sob a forma $t = x_0, x = x_1, y = x_2, z = x_3$ etc. então a distância elementar (ou, melhor, o quadrado da distância) ds^2 será representado sob a forma $ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$ o tensor métrico $g_{\mu\nu}$ deverá ser simétrico e, portanto, contando apenas 10 componentes independentes.

6. As equações do campo

Nesta perspectiva, todos os referenciais são em princípio, igualmente válidos, o que se traduz matematicamente pela necessidade de exprimir as equações da teoria sob uma forma tensorial, graças à qual as equações permanecem covariantes na passagem de um referencial qualquer para outro. Por outro lado, as forças de inércia, conjuntas localmente com as forças gravitacionais, são traduzidas pela existência de uma curvatura do espaço-tempo definida em cada ponto pelo tensor $g_{\mu\nu}$. A presença da matéria deixa de provocar o aparecimento de forças, o seu papel passa agora a ser o de modificar a curvatura do espaço-tempo.

Claramente, a lei da inércia diz-nos que, na ausência de forças a trajetória é retilínea e uniforme. Aqui, no espaço-curvo, é como se as forças (inerciais ou gravitacionais) existissem sempre ausentes, e a conclusão a tirar é que os movimentos dos corpos devem sempre obedecer a uma "espécie" de lei de inércia. Uma espécie de lei de inércia porque não existem rectas num espaço curvo; a recta corresponde todavia, no espaço euclidiano, ao caminho mais curto entre dois pontos e em tal caso, esse sim, pode ser generalizado definindo o que se chama uma geodésica: as rectas são as geodésicas do espaço "plano". No espaço-tempo curvo o movimento corresponderá assim a um movimento que se processa ao longo das geodésicas.

Tudo depende afinal da curvatura local do espaço-tempo definida pelo tensor métrico $g_{\mu\nu}(x_\mu)$ e supõe-se (chama-se por vezes a esta hipótese o "princípio de Mach") que a curvatura depende da densidade de matéria presente no espaço. As equações do campo de Einstein surgem assim como uma generalização

é a natural da equação clássica de Poisson $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 4\pi R \rho$ onde V é o potencial do campo gravitacional, ρ a densidade de matéria e R a constante gravitacional que intervem na lei clássica de Newton. Aqui, em que matéria e energia são equivalentes, o escalar densidade de matéria ρ é substituído pelo tensor energia momento $T_{\mu\nu}$ enquanto o potencial gravítico é substituído por uma expressão bastante complicada do tensor métrico $g_{\mu\nu}$ e das suas derivadas.

Einstein descobriu em 1917 que a expressão mais geral que era aceitável para as equações da teoria relativista da gravitação era

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -K T_{\mu\nu}$$

onde $R_{\mu\nu}$ é um objecto matemático complicado dito o tensor de Riemann-Cristoffel construído definido unicamente a partir do tensor de Riemann-Cristoffel $R^{\alpha}_{\beta\gamma\delta}$ tomando $\bar{g} = 0$ e somando em δ ; paralela mente R é um escalar resultante de uma nova contração do tensor de Riemann-Cristoffel. Λ é a chamada constante cosmológica e K a constante relativista da gravitação que, em primeira aproximação, é igual a $\frac{8\pi K^2}{c^2}$, sendo K a constante clássica da gravitação.

7. Verificações experimentais

Em atrácto que possa parecer, em primeira aproximação e à escala do sistema solar, a teoria relativista da gravitação reduz-se praticamente à teoria newtoniana clássica. Neste quadro, as discrepâncias entre as previsões das duas teorias são, em regra, demasiado pequenas para poderem ser observadas e daí que haja tão poucas confirmações experimentais da teoria de Einstein. Há todavia três situações, bem conhecidas em que as duas teorias divergem e se podem obter testes experimentais e, em todos, a teoria einsteiniana foi confirmada.

A primeira destas situações é a explicação do fenómeno de Mercúrio não estar fixo nem se rodando lentamente no espaço. Já sabemos que a teoria clássica só explicava muito grosseiramente. As equações de Einstein, bem imediatamente, foram o rota experimental 43.5 segundos ^{de arco} por século, uma previsão teórica excedente 42.9 segundos de arco por século. A teoria explica ainda porque se observa o efeito só em Mercúrio e não em outros planetas: para os outros planetas o efeito existe igualmente mas, como eles estão mais afastados do Sol, o efeito é demasiado pequeno para poder ser observado.

O segundo efeito refere-se à refração do campo gravitacional sobre a marcha das relógios que os atrai. Daí que a velocidade de uma onda importante as frequências e os comprimentos de onda das radiações clássicas sejam variáveis. Na superfície do Sol uma radiação de comprimento de onda λ sofre, por isso, uma variação tal que, segundo a teoria $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-5}$, o que é confirmado pela experiência.

Terceira observação-teste: a curvatura do espaço nas vizinhanças do Sol mostra que a trajetória dos raios luminosos que passam nas vizinhanças do Sol não é encurvada e, por conseguinte, permite "ver" objectos (estrelas fixas) que se encontram "por detrás" do Sol.

$$\bar{g}_{\mu\nu} = \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} + \frac{\partial}{\partial x^\gamma} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\mu} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\gamma} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\mu} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta} - \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left\{ \begin{matrix} \mu, \alpha \\ \alpha, \nu \end{matrix} \right\} \bar{g}^{\alpha\beta}$$

do Sol, Mas a lei geral permanece formalmente a mesma. A dinâmica clássica e a lei da gravitação resultam como aproximações

9. Provas experimentais

- ⇒ Valor epistemológico da teoria
- ⇒ A rotação do perihélio de Mercúrio
 - Previsão teórica 42,9 segundos de arco por século
 - Valor experimental 43,5

Como o relógio varia a sua marcha em consequência da aceleração varia - isto igualmente sob ação da gravidade.

4) Desvio gravitacional da luz

Efeitos no Sol $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \sim 10^{-6}$ observado

e) Reflexão da luz pela gravidade

Desvio de luz "1,75" de arco

Para as estrelas situadas 30 vezes mais longe do Sol

$$K = \frac{8\pi K}{c^4}$$

10. Equações do campo e equações do movimento

$R_{\mu\nu}$ tensor de Ricci

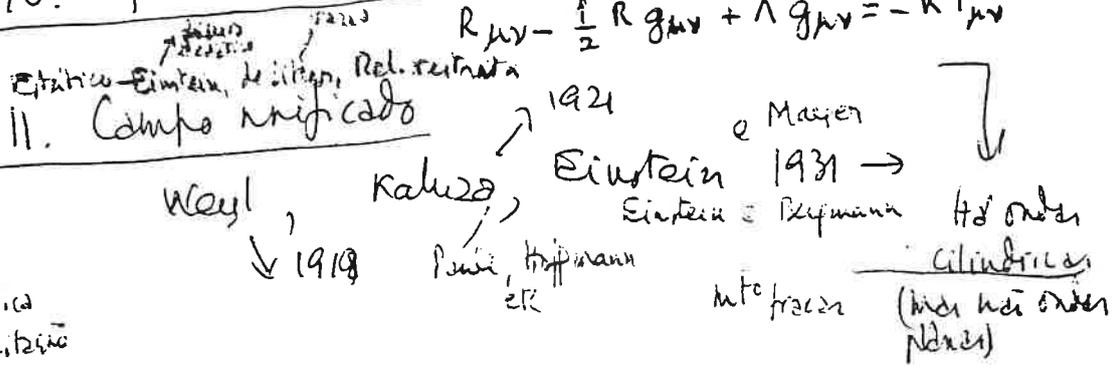
Christoffel

contraído.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -K T_{\mu\nu}$$

11. Campo unificado

R - escalar derivado de uma nova contração de tensor de R-E.



$g_{\mu\nu}$ tensor métrico

A constante cosmológica

K constante de gravitação

(em unidades aproximadas)

$$K = \frac{8\pi K^2}{c^2}$$

onde K é a constante clássica de gravitação

Ten tensor energia-quantidade de movimento

Einstein e Infeld - A evolução das ideias em Física

A. Einstein, Relativity, Methuen, London, 1954

~~Annalen der Physik~~ The Special and the General Theory

Born,

$$R_{\mu\nu}^{\tau} = \{ \mu\sigma, \alpha \} \{ \alpha\gamma, \tau \} - \{ \mu\nu, \alpha \} \{ \alpha\sigma, \tau \} + \frac{\partial}{\partial x^{\nu}} (\mu\sigma, \tau) - \frac{\partial}{\partial x^{\sigma}} (\mu\gamma, \tau)$$

$$\{ \mu\nu, \sigma \} = \frac{1}{2} g^{\sigma\lambda} \left(\frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^{\nu}} + \frac{\partial g_{\lambda\nu}}{\partial x^{\mu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\lambda}} \right)$$