

Acetatos para as aulas de

Introdução à Relatividade

no âmbito da disciplina de Introdução à Física Quântica e à Relatividade
dos cursos de Lic. em Física e Química e em Eng. Física
(2005-2006)

José Figueiredo

Departamento de Física

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade do Algarve

Nota Prévia

Estes resumos destinam-se a alunos de cursos da área de Física da Universidade do Algarve. Não pretendem ser enciclopédicas nem se assumem como tendo a “papa toda”, mas também não são “acetatos”, e não dispensam ou substituem, aliás recomendam vivamente, a frequência das aulas e a consulta (sempre que sejam consideradas insuficientes) de outras fontes, nomeadamente as citadas na bibliografia, servindo apenas para orientar o aluno no seu estudo.

Apresentam-se também “novas” séries de problemas e exercícios, para além das fornecidas nos anos anteriores.

Espera-se que o aluno faça um trabalho sério, empenhado e seja um leitor atento. O aluno, após assistir às aulas, deve estudar todos os assuntos por si, tentar fazer os problemas, e, se necessário, voltar a ler os textos relevantes ao problema. Deve ter sempre presente que a aprendizagem ocorre pensando criticamente nos assunto e resolvendo problemas.

Convém referir que estes resumos podem conter (e têm com certeza) erros involuntários (de dactilografia, de “copiar e colar”, ou de outra natureza). Agradece-se a comunicação dos mesmos, bem como o envio de comentários, para jlongras@ualg.pt.

O autor agradece ao Professor Robertus Potting toda a colaboração prestada.

Bom trabalho!

Gambelas, Março de 2006

O docente,

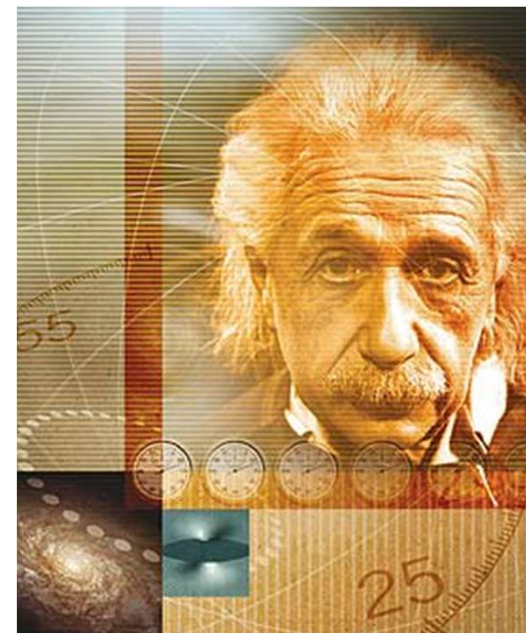
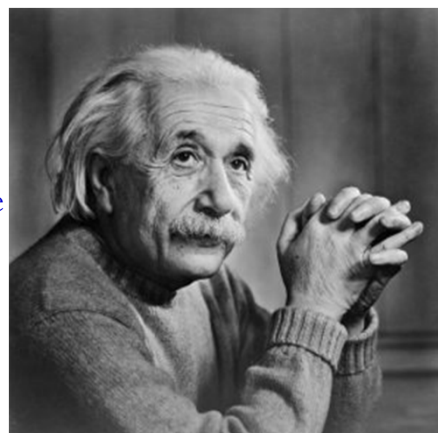
José Figueiredo

Departamento de Física da Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e
Campus de Gambelas, 8000-117 FARO, Portugal.

URL: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/>

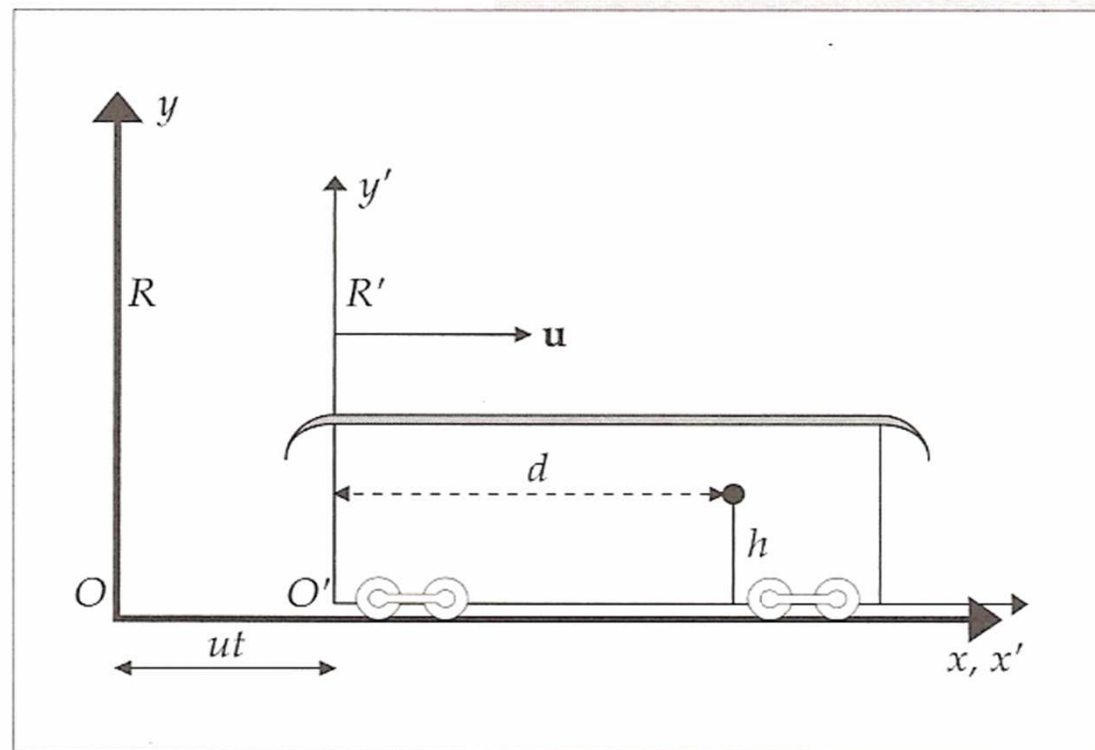
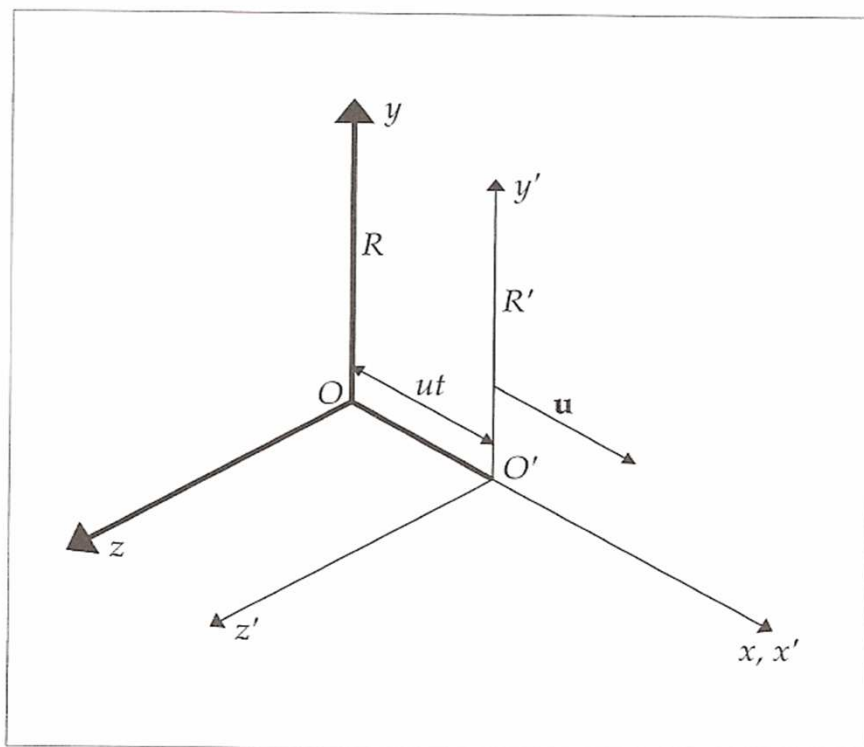
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/fm.html>

E-mail: jlongras@ualg.pt

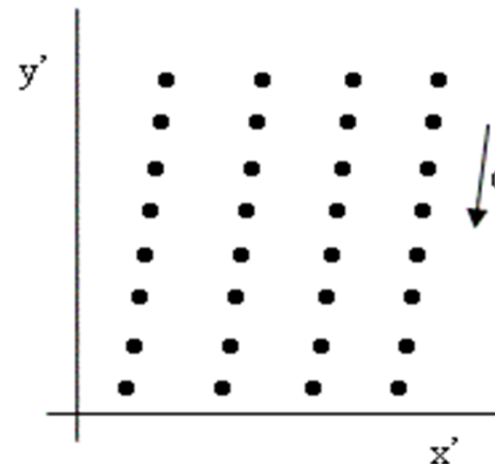
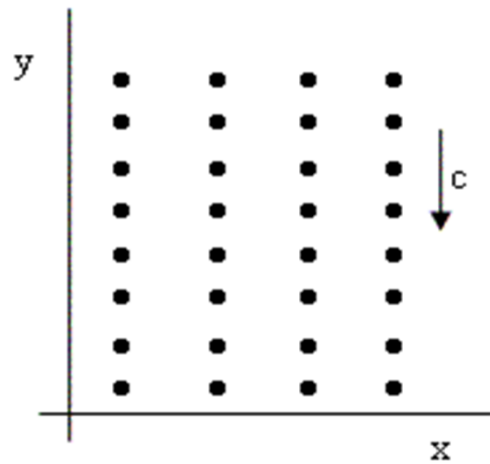
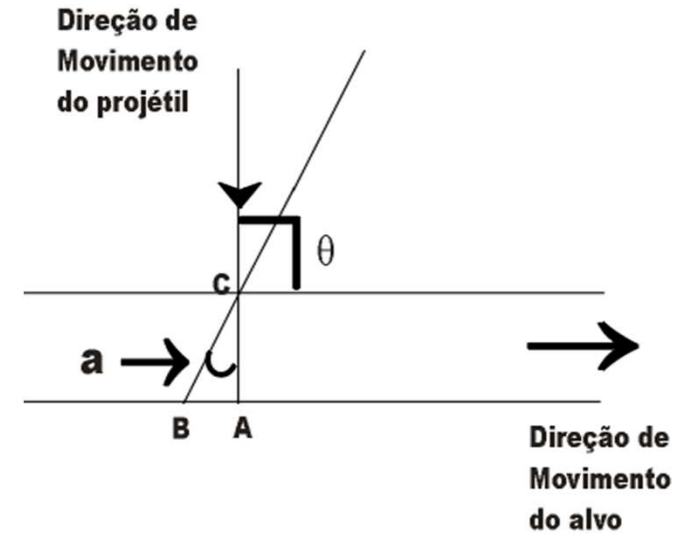
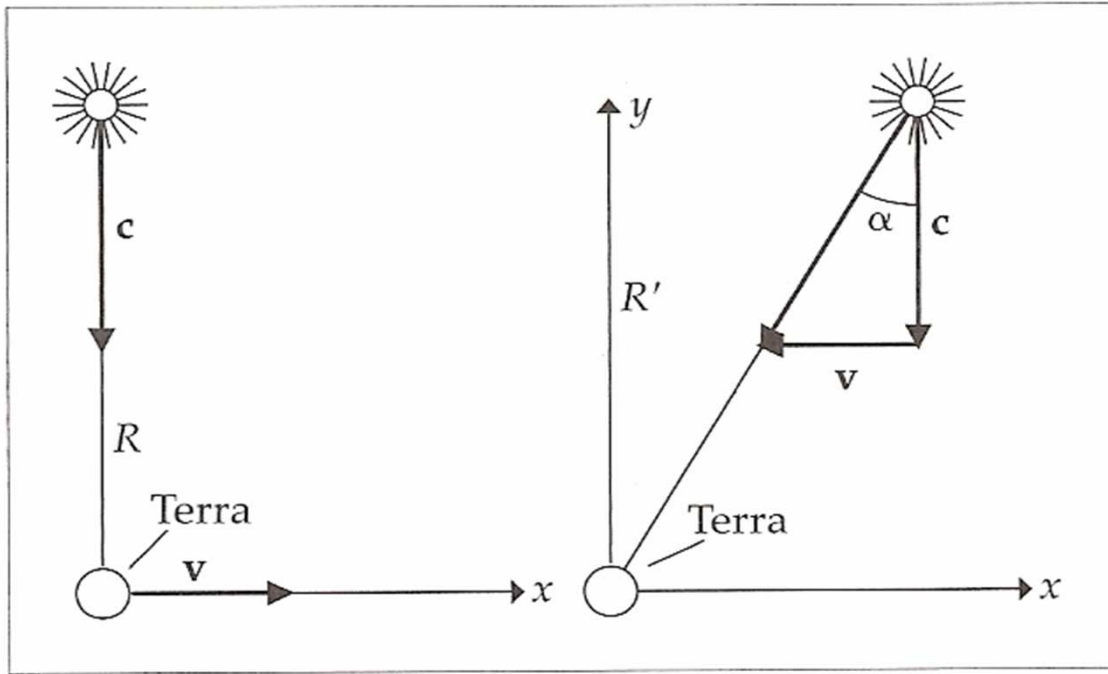


Transformação de Galileu

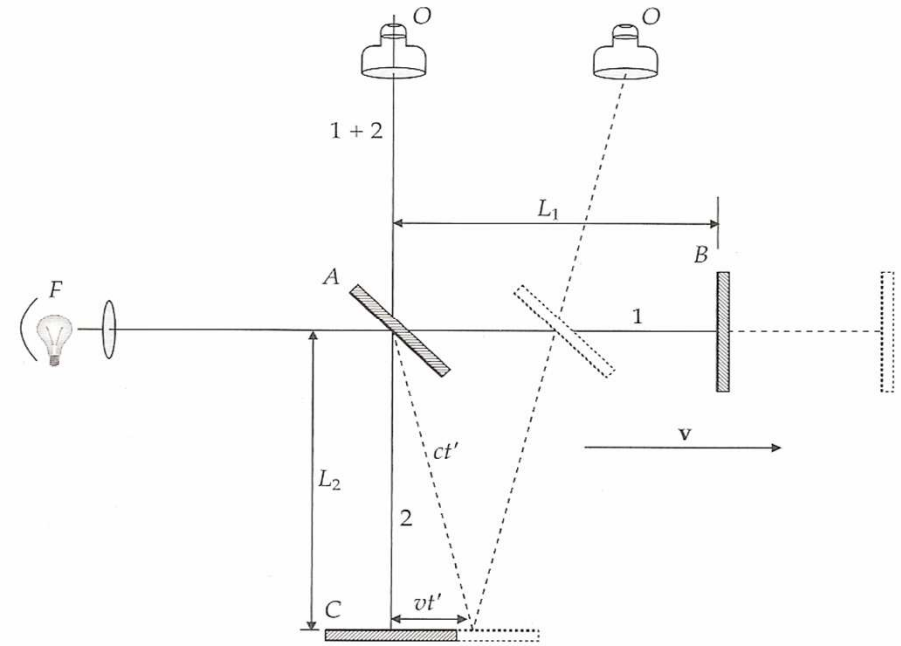
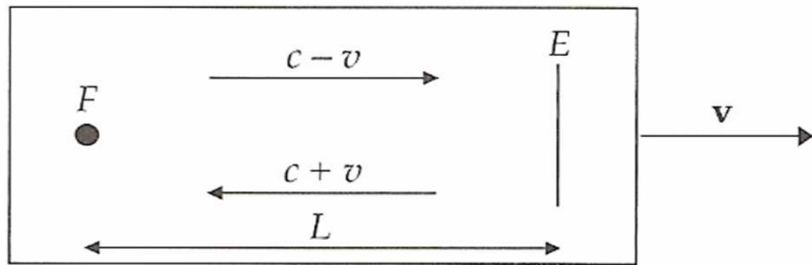
Exemplo de aplicação do princípio da relatividade de Galileu



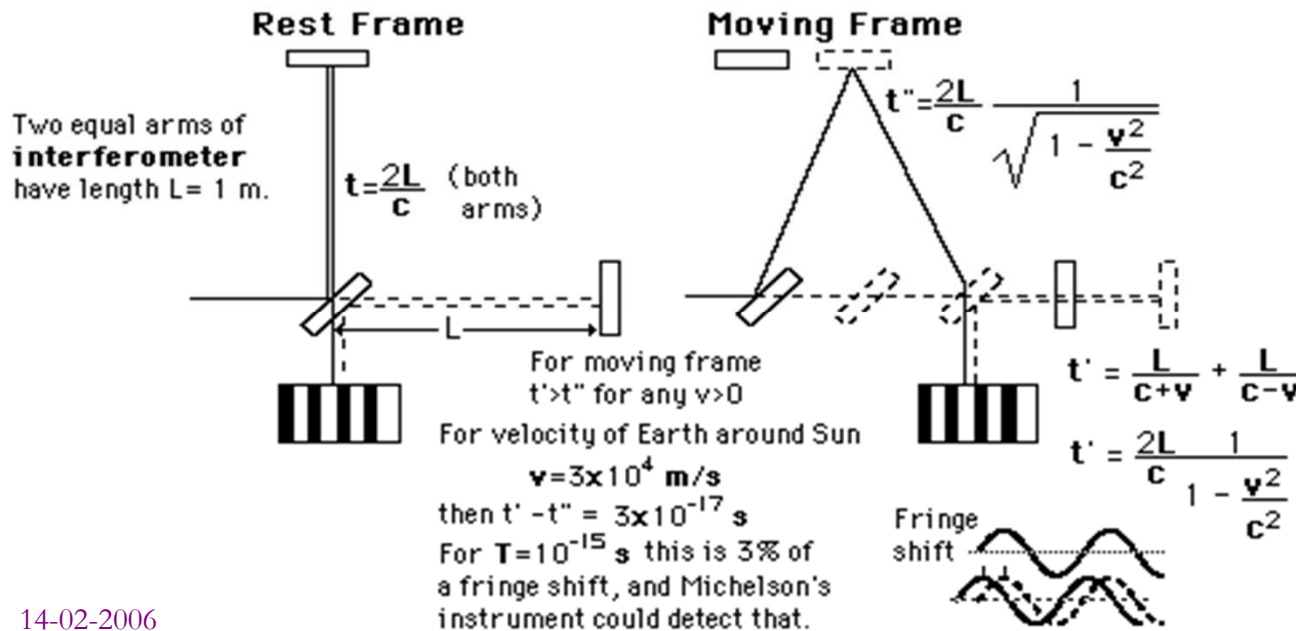
Aberração da luz das estrelas e experiência de Fizeau-Fresnel



A velocidade da luz e a experiência de Michelson e Morley



Michelson Morley Experiment
 A famous experiment which failed. (?*)
 *Nobel Prize, 1907

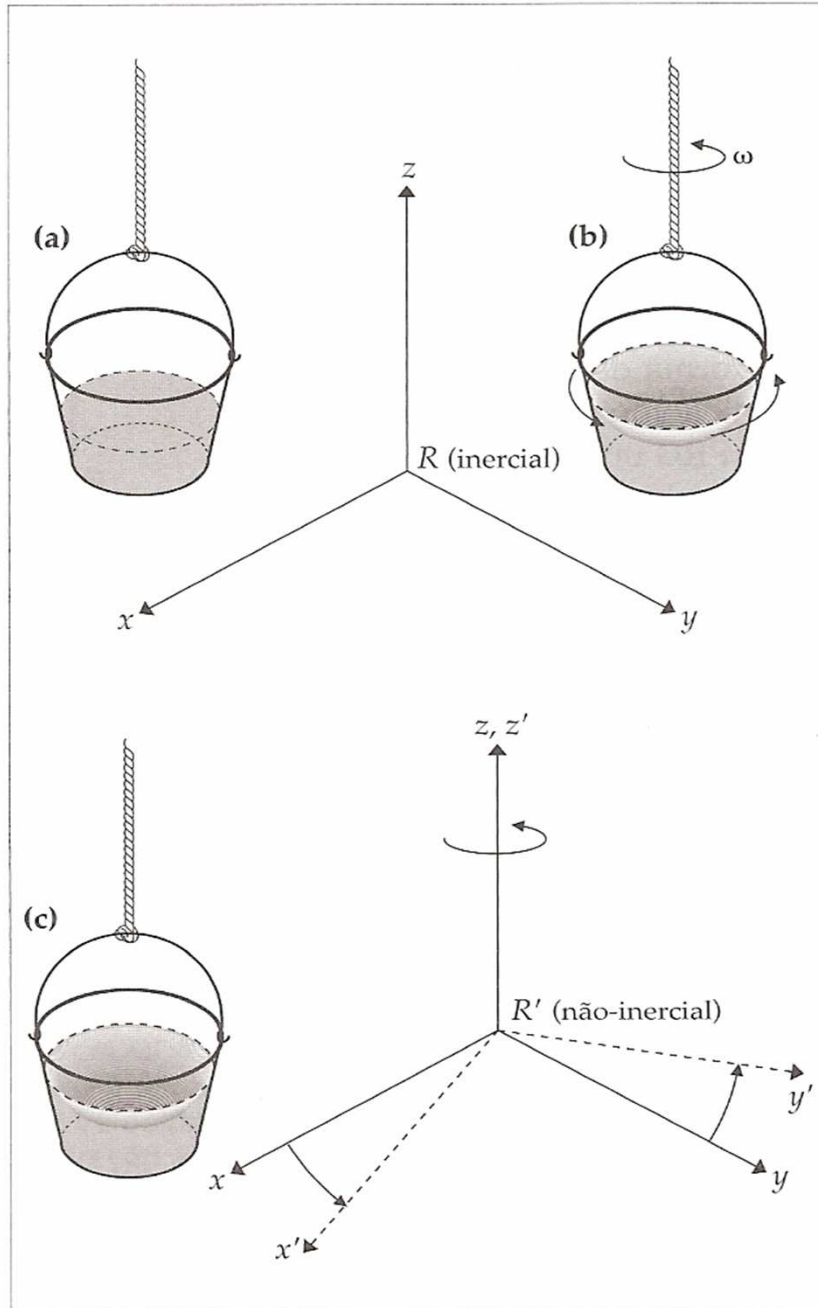


Deslocamento das franjas esperado por MM

$$\Delta N = \frac{c(\Delta t - \Delta t')}{\lambda} = \frac{2(L_1 + L_2)}{\lambda \sqrt{1 - \beta^2}} \approx \frac{(L_1 + L_2)}{\lambda} \beta^2$$

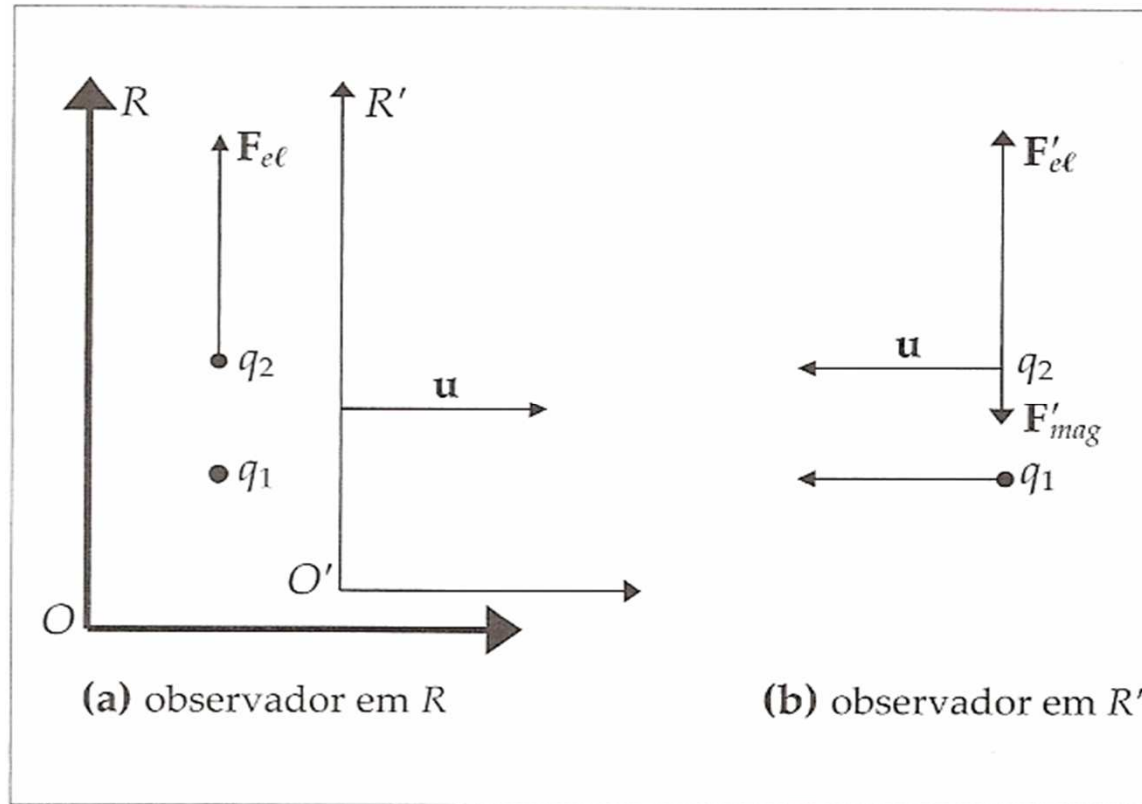
O valor de ΔN obtido é muito inferior ao previsto

Aceleração absoluta e Princípio de Mach

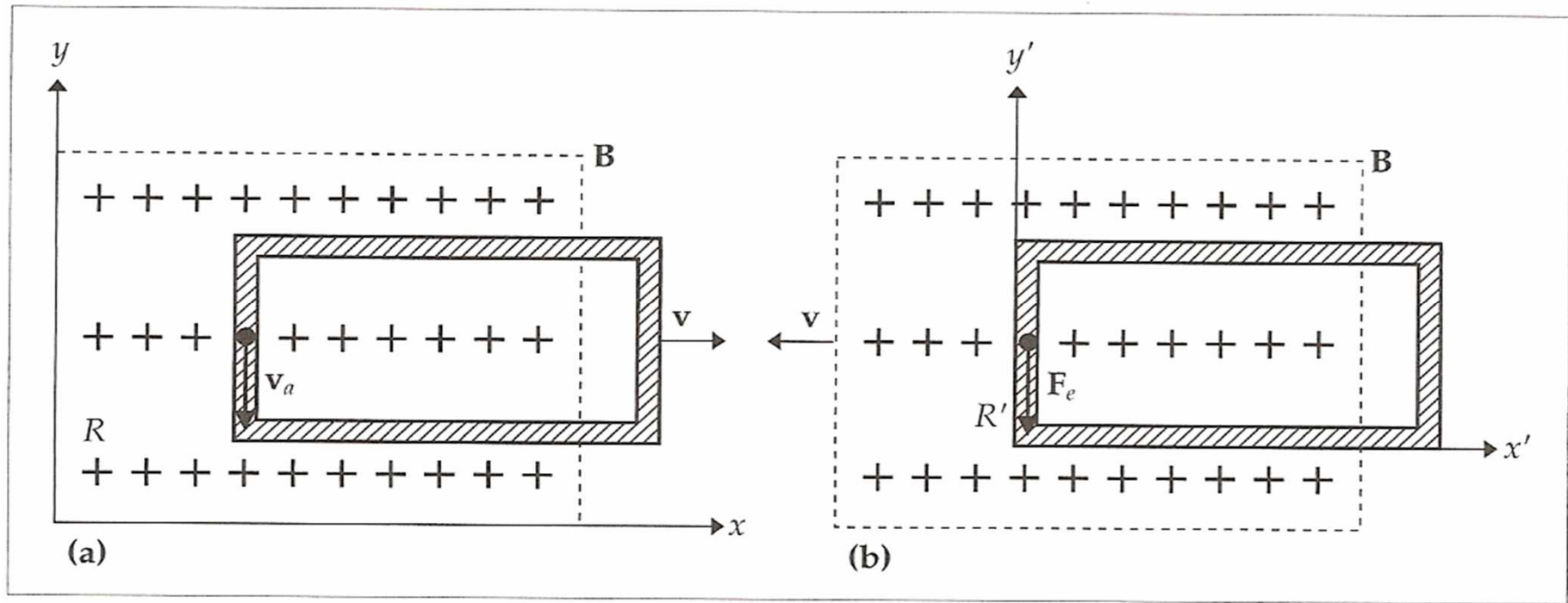


- Princípio de Mach (na formulação de Einstein):
- “A inércia mede a resistência de um ponto material à aceleração com respeito às massas de todos os corpos do universo, sendo, portanto, afectada por elas.”

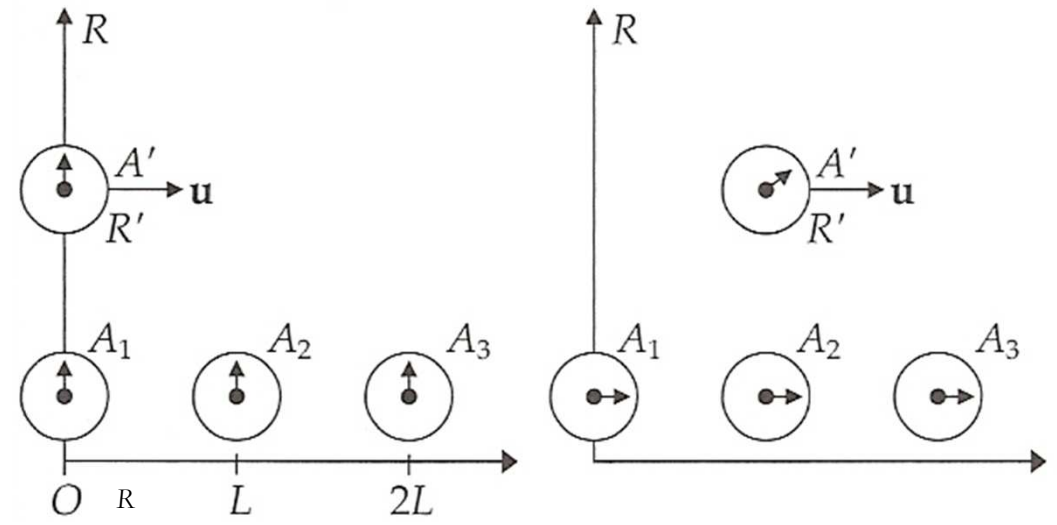
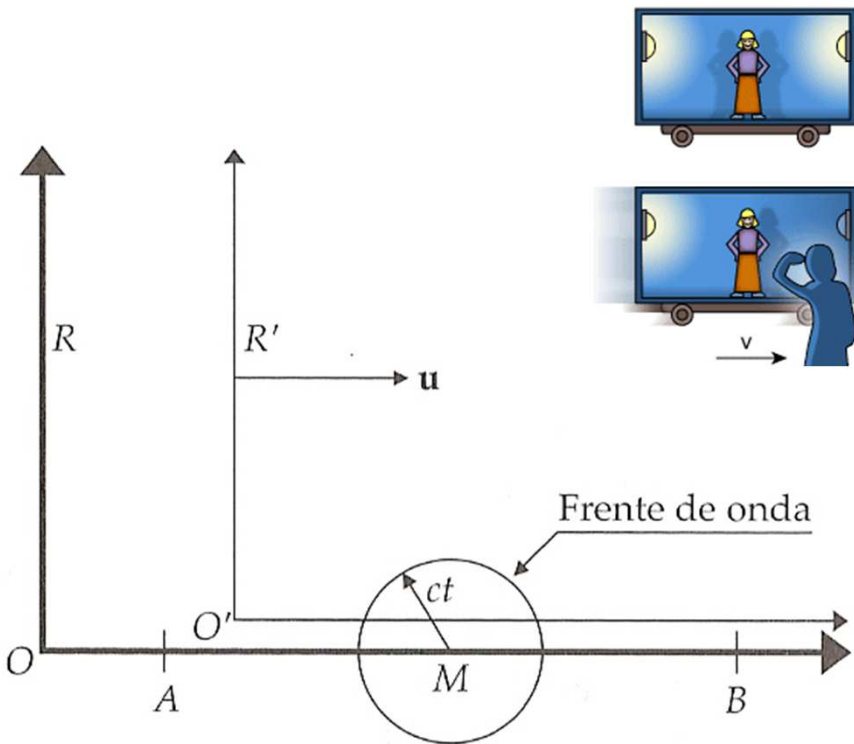
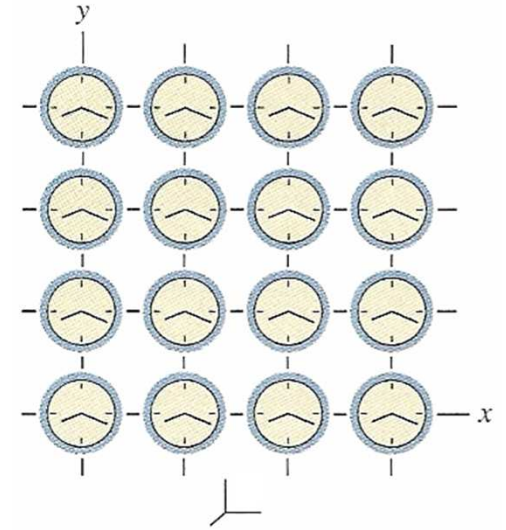
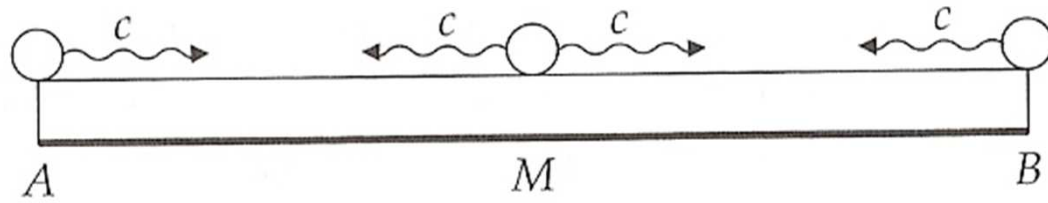
Não invariância das equações de Maxwell



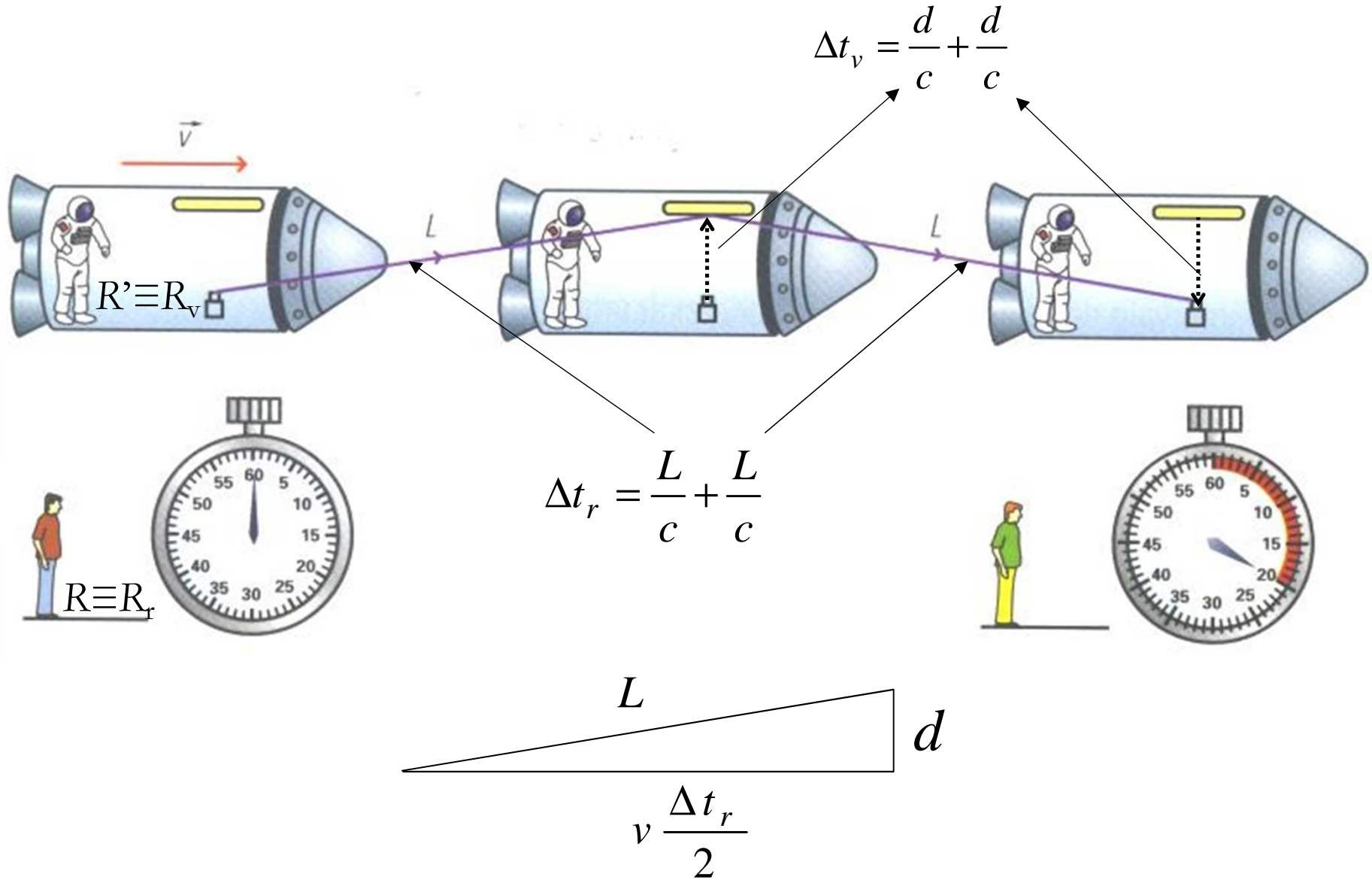
Assimetria na explicação dos fenómenos electromagnéticos



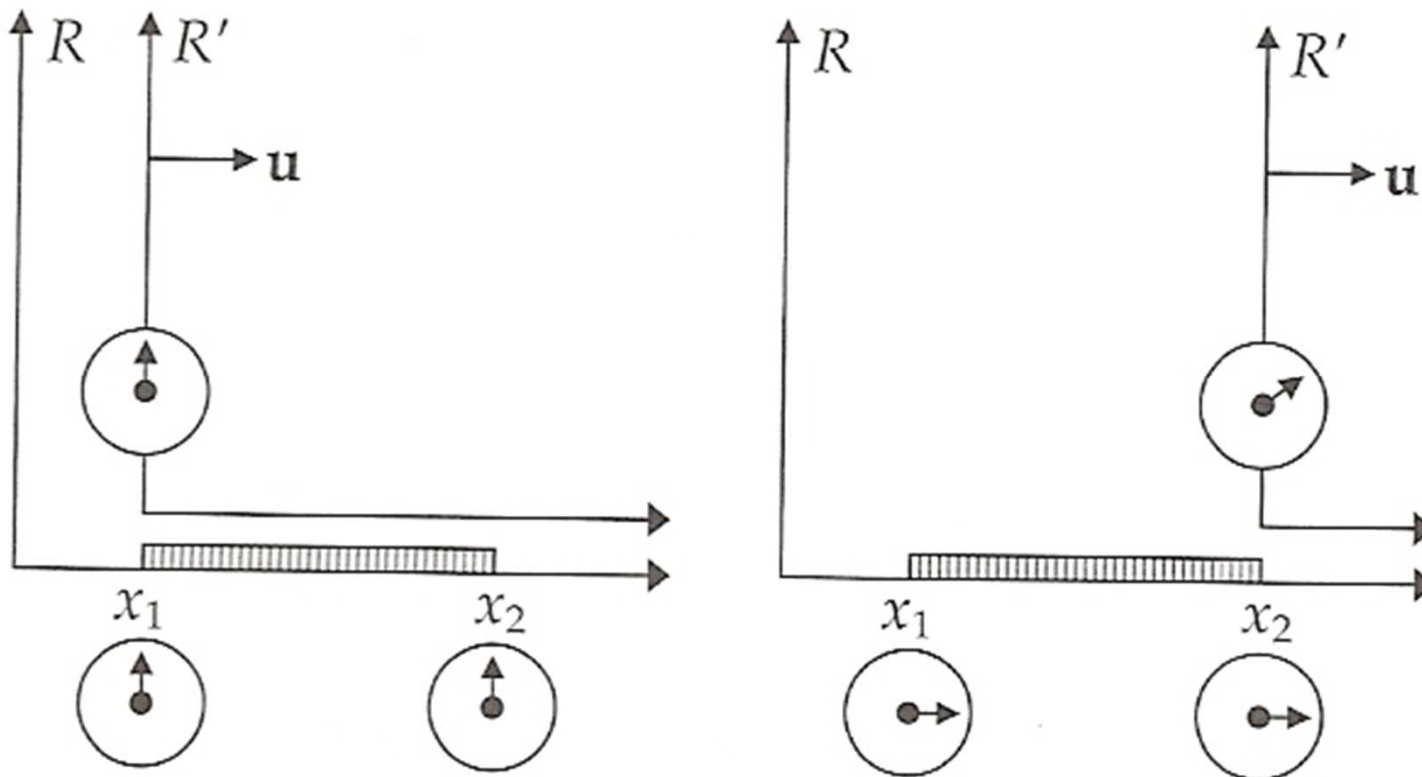
Relatividade do conceito de simultaneidade



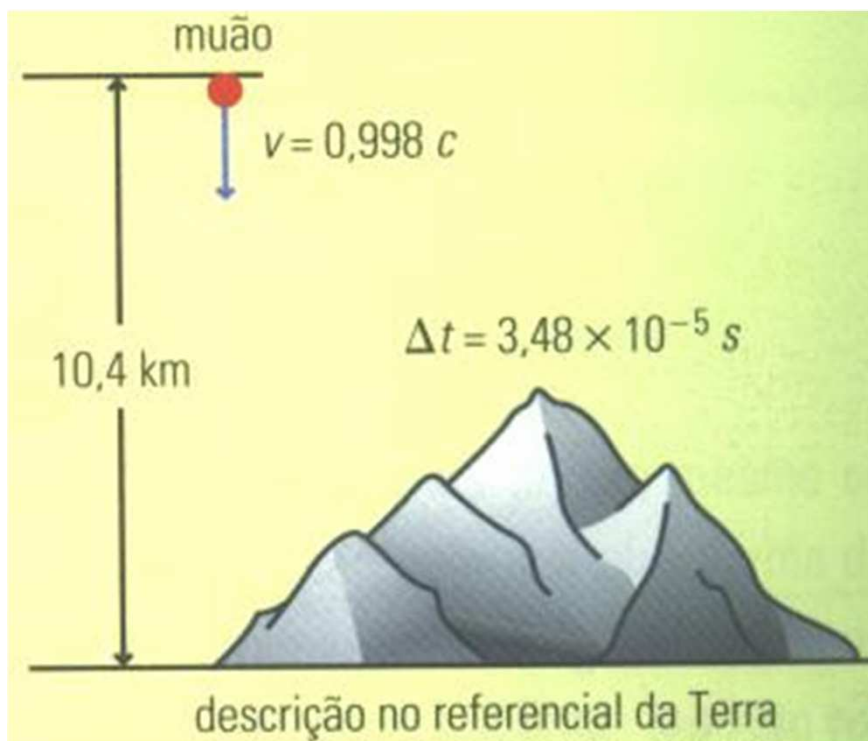
Relatividade dos intervalos de tempo



Relatividade do comprimento na direcção do movimento



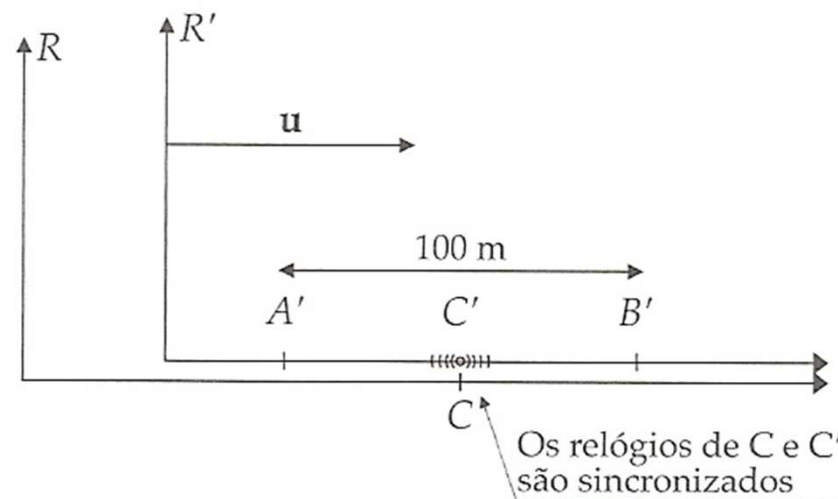
Problemas (3)



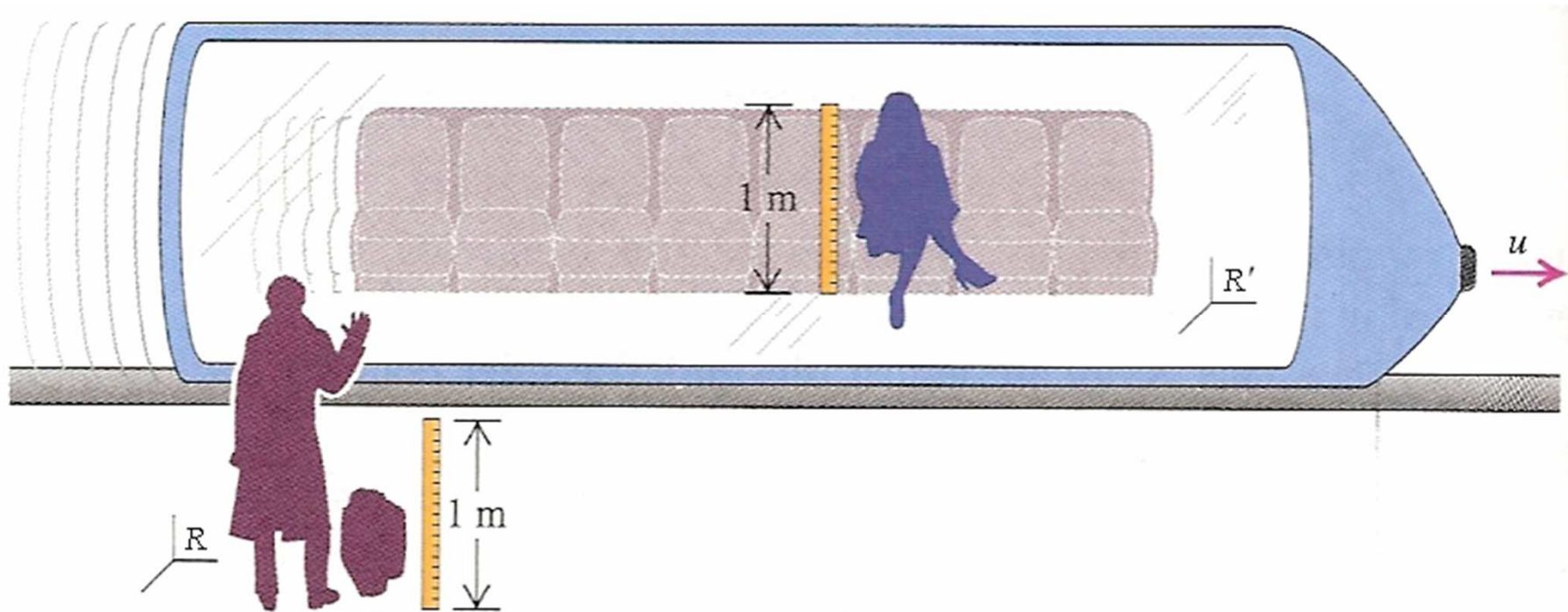
DEMONSTRAÇÃO POR MESÕES

Os mesões são partículas criadas pelo impacto de raios cósmicos no topo da atmosfera. Os mesões «vivem» apenas por alguns microssegundos, tempo insuficiente para que cheguem a atingir o solo. Eles deslocam-se tão rapidamente que os seus «relógios» trabalham lentamente. Cada um dos seus microssegundos equivale a nove microssegundos na Terra, tendo um tempo nove vezes superior para fazerem a viagem. Para um mesão, a Terra encontra-se em movimento acelerado. O seu movimento é tão rápido que a atmosfera contrai-se para um nono da extensão que medimos e, como tal, eles só têm de percorrer um nono da distância. Até hoje os mesões têm sido detectados na Terra contrariando a lógica do senso comum!

Tempo & Espaço, Visual Ciências, Verbo.



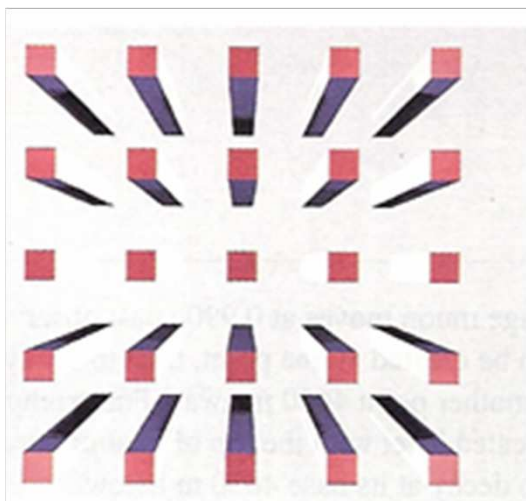
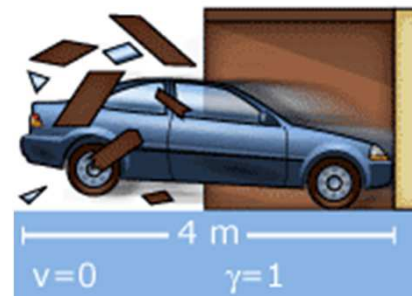
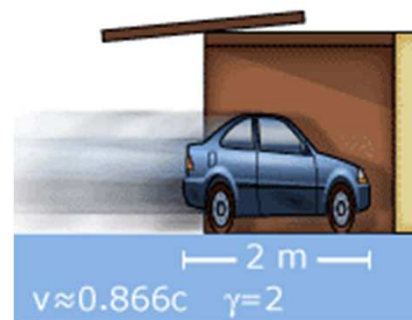
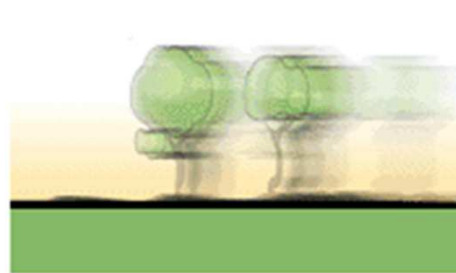
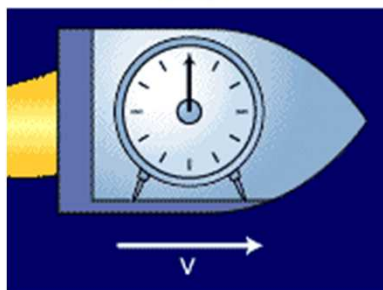
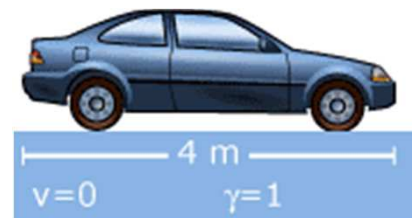
Comprimentos nas direcções perpendiculares ao movimento



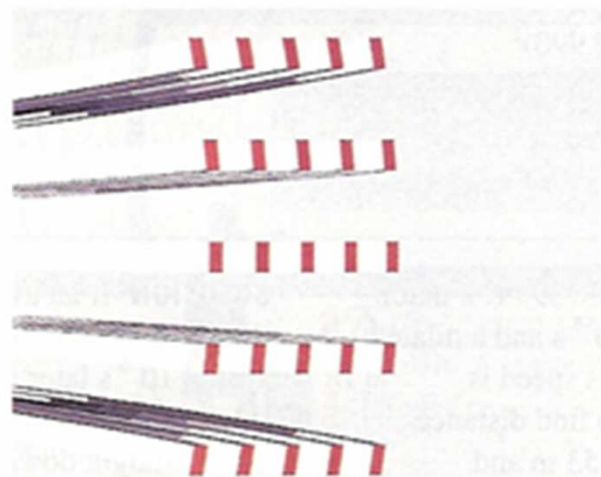
Interpretação da relatividade dos tempos e dos comprimentos



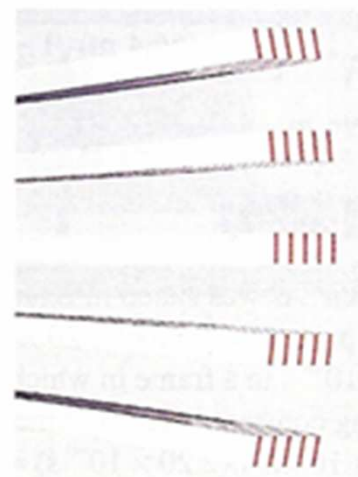
$v=0$



$u=0$



$u=0,2c$

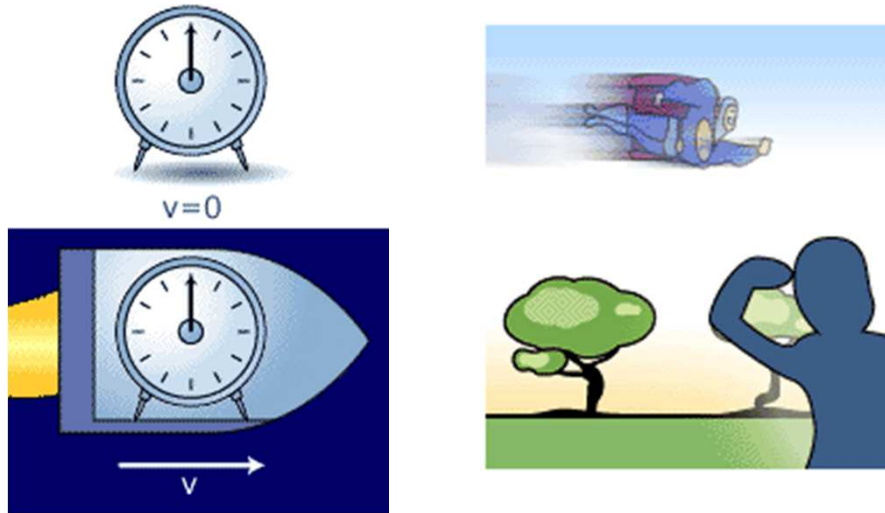


$u=0,9c$

Relatividade do tempo e do comprimento: efeitos e «demonstrações»

IFQR 2005-2006

- Ter sempre presente que as imagens abaixo representam situações que se referem a medidas de intervalos de tempo e de comprimentos, objectivas, em diferentes referenciais, e não são percepções sensoriais. Por exemplo, na figura do super-homem, o observador não «vê» o super homem contraído, mas mede uma “altura/comprimento” inferior à «altura própria» do super-homem; o mesmo se aplica ao automóvel.



A Terra parece-nos estar em repouso

Mesão que se desloca a alta velocidade

O relógio de mesão trabalha lentamente

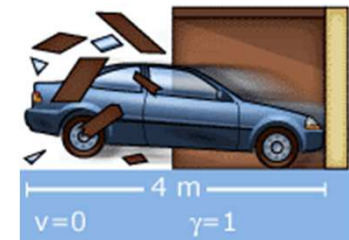
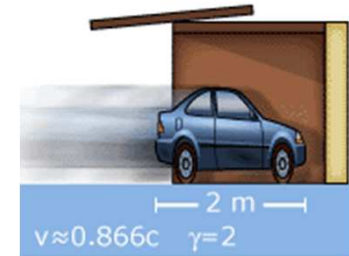
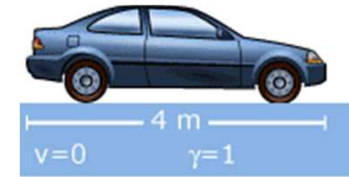
O mesão atinge a Terra contrariando as leis de Newton

Mesão estacionário / A Terra precipita-se em direcção ao mesão

DEMONSTRAÇÃO POR MESÕES

Os mesões são partículas criadas pelo impacto de raios cósmicos no topo da atmosfera. Os mesões «vivem» apenas por alguns microssegundos, tempo insuficiente para que cheguem a atingir o solo. Eles deslocam-se tão rapidamente que os seus «relógios» trabalham lentamente. Cada um dos seus microssegundos equivale a nove microssegundos na Terra, tendo um tempo nove vezes superior para fazerem a viagem. Para um mesão, a Terra encontra-se em movimento acelerado. O seu movimento é tão rápido que a atmosfera contraí-se para um nono da extensão que medimos e, como tal, eles só têm de percorrer um nono da distância. Até hoje os mesões têm sido detectados na Terra contrariando a lógica do senso comum!

Tempo & Espaço, Visual Ciências, Verbo.



José Figueiredo

06-03-2006

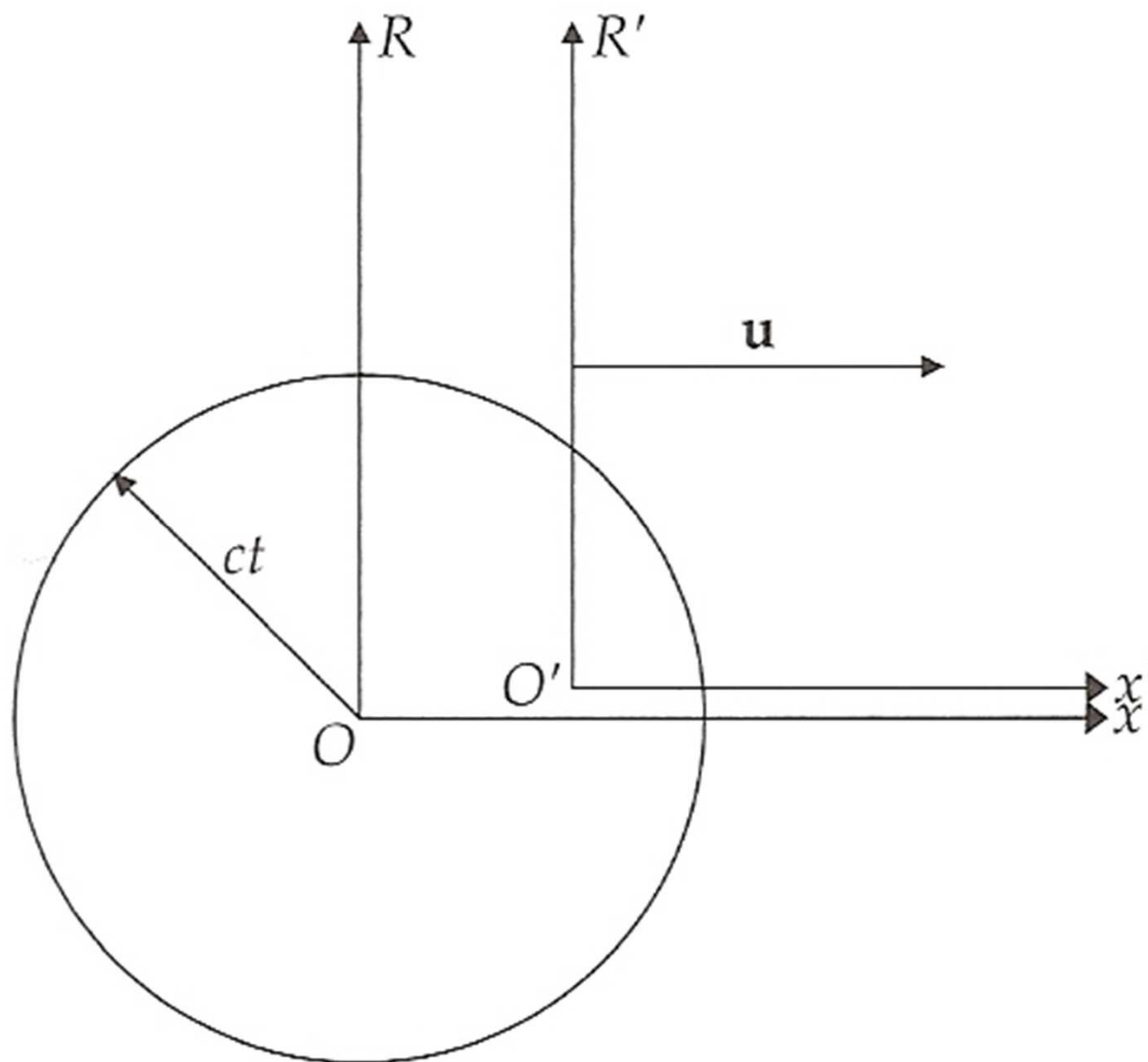
Nobel Foundation (www.nobel.se)

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/ensino.htm>

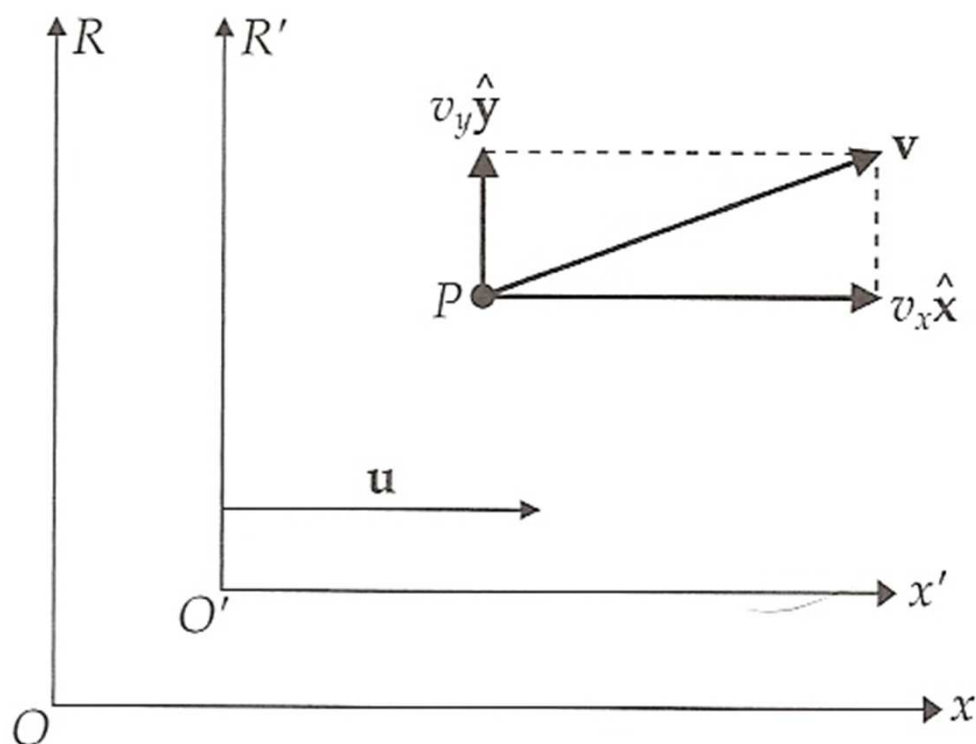
JF, DF-FCT-ULAG

15

Equações da transformação de Lorentz



Transformação das velocidades

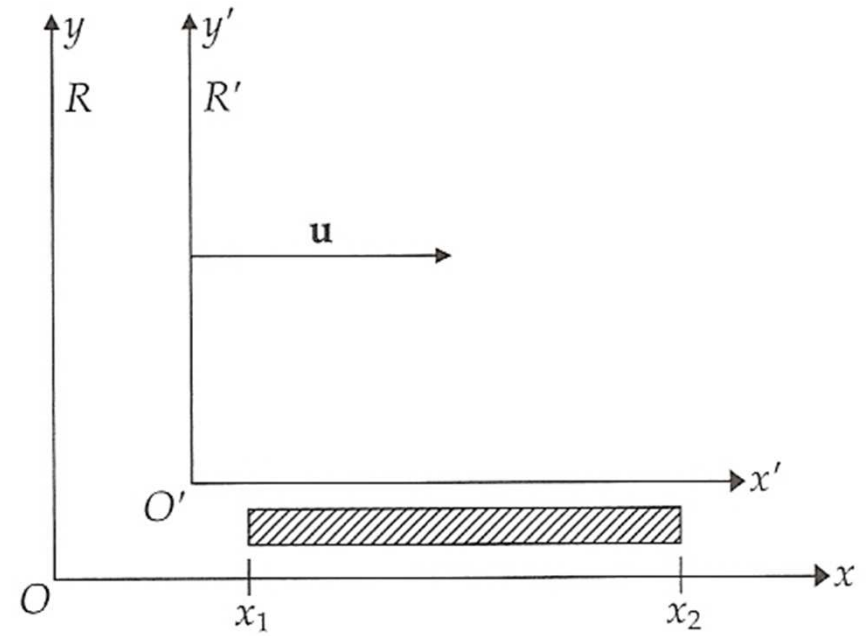
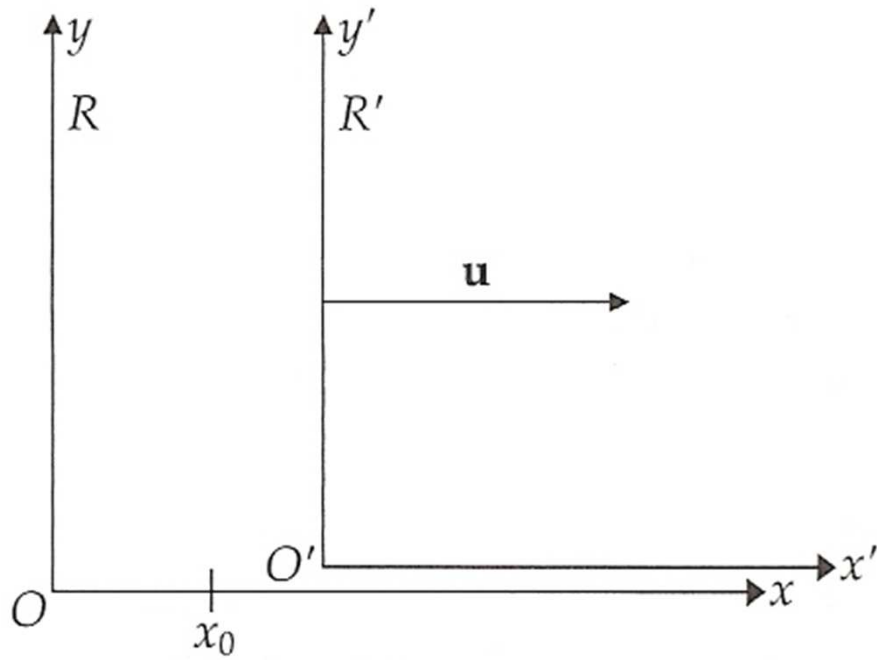


$$v'_x = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\gamma(\Delta x - u\Delta t)}{\gamma(\Delta t - \frac{u}{c^2}\Delta x)} = \frac{\frac{\Delta x}{\Delta t} - u}{1 - \frac{u}{c^2}\frac{\Delta x}{\Delta t}} = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u}{c^2}v_x} \quad \left[v_x = \frac{v'_x + u}{1 + \frac{u}{c^2}v'_x} \right]$$

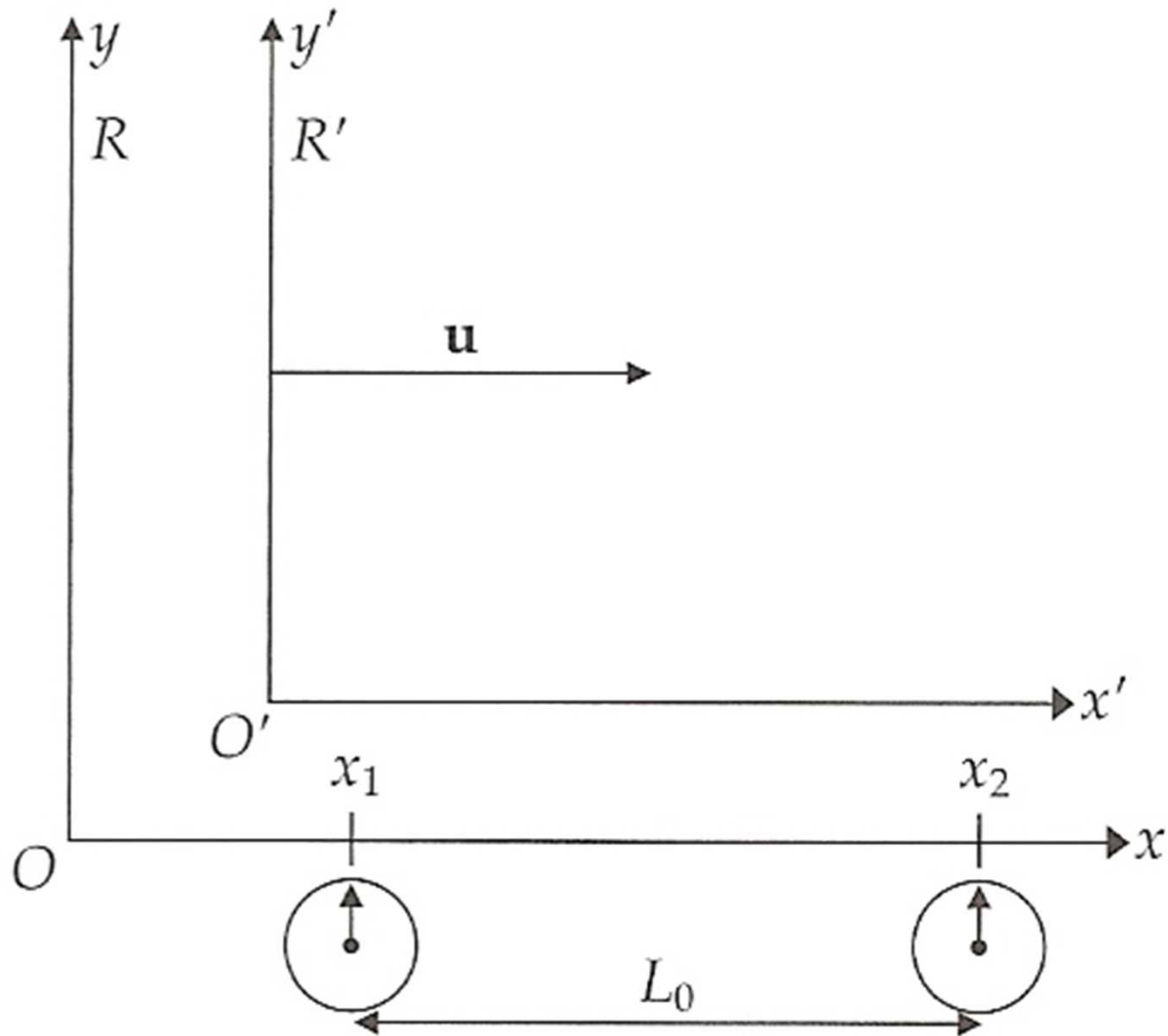
$$v'_y = \frac{\Delta y'}{\Delta t'} = \frac{\Delta y}{\gamma(\Delta t - \frac{u}{c^2}\Delta x)} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta t}}{\gamma(1 - \frac{u}{c^2}\frac{\Delta x}{\Delta t})} = \frac{v_y}{\gamma(1 - \frac{u}{c^2}v_x)} \quad \left[v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + \frac{u}{c^2}v'_x)} \right]$$

$$v'_z = \frac{\Delta z'}{\Delta t'} = \frac{\Delta z}{\gamma(\Delta t - \frac{u}{c^2}\Delta x)} = \frac{\frac{\Delta z}{\Delta t}}{\gamma(1 - \frac{u}{c^2}\frac{\Delta x}{\Delta t})} = \frac{v_z}{\gamma(1 - \frac{u}{c^2}v_x)} \quad \left[v_z = \frac{v'_z}{\gamma(1 + \frac{u}{c^2}v'_x)} \right]$$

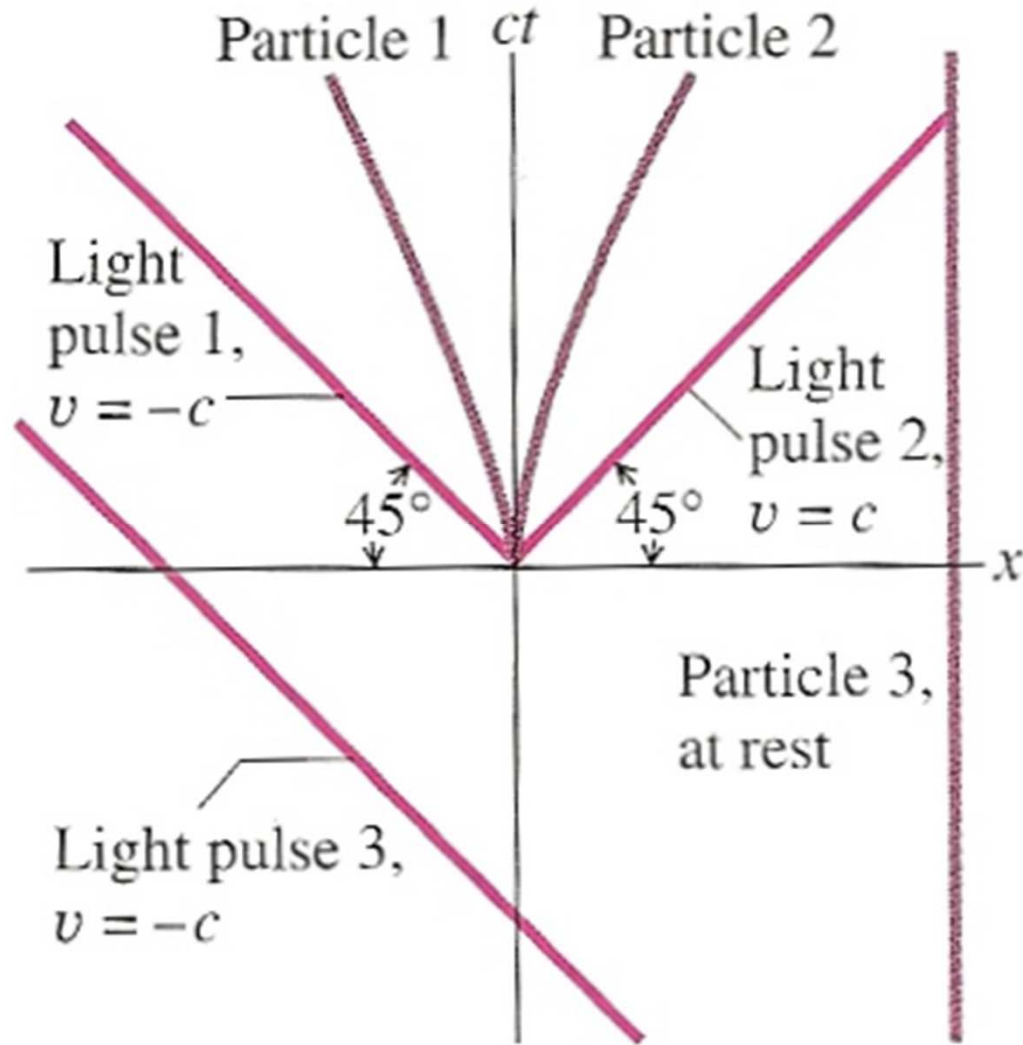
Consequências das equações da transformação de Lorentz (1)



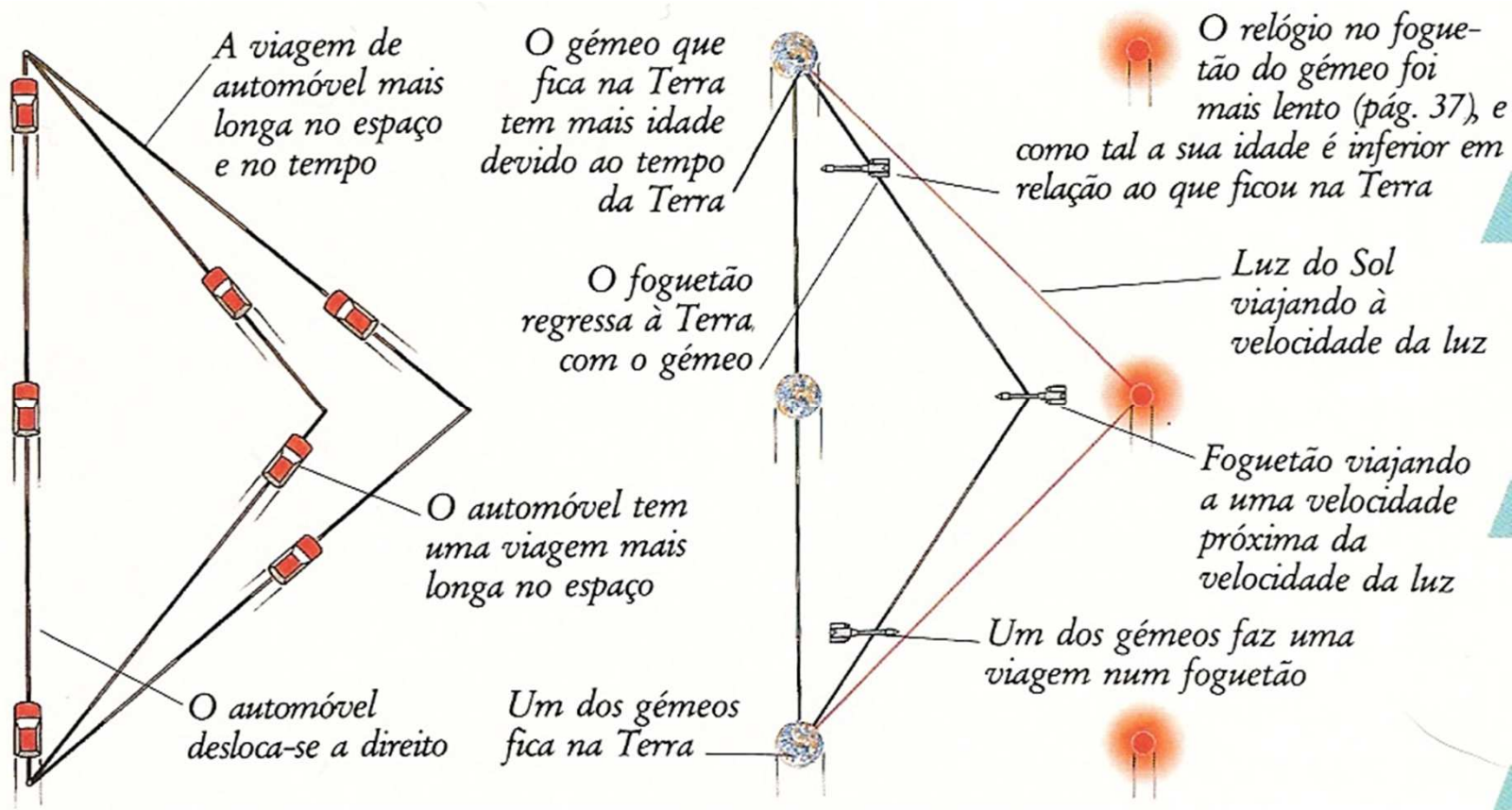
Consequências das equações da transformação de Lorentz (2)



Conceito de espaço-tempo e diagramas espaço-tempo

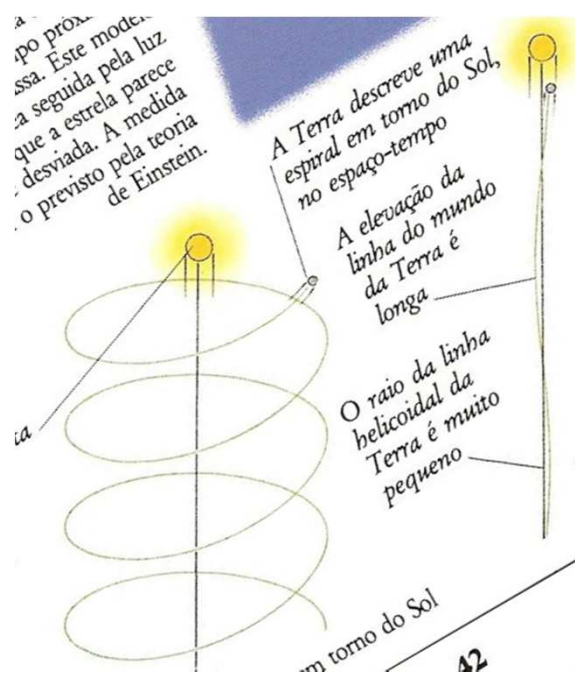
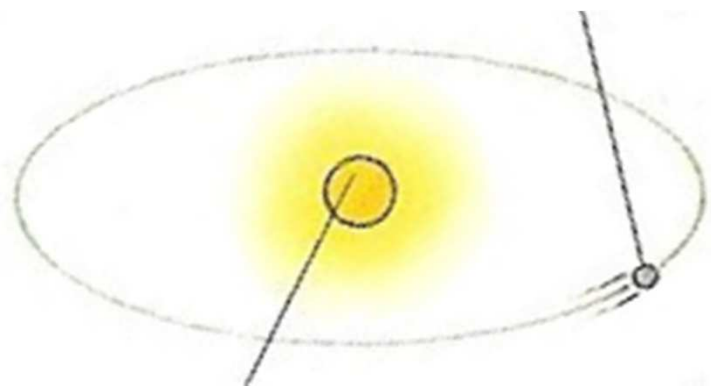


Descrição de eventos no espaço-tempo

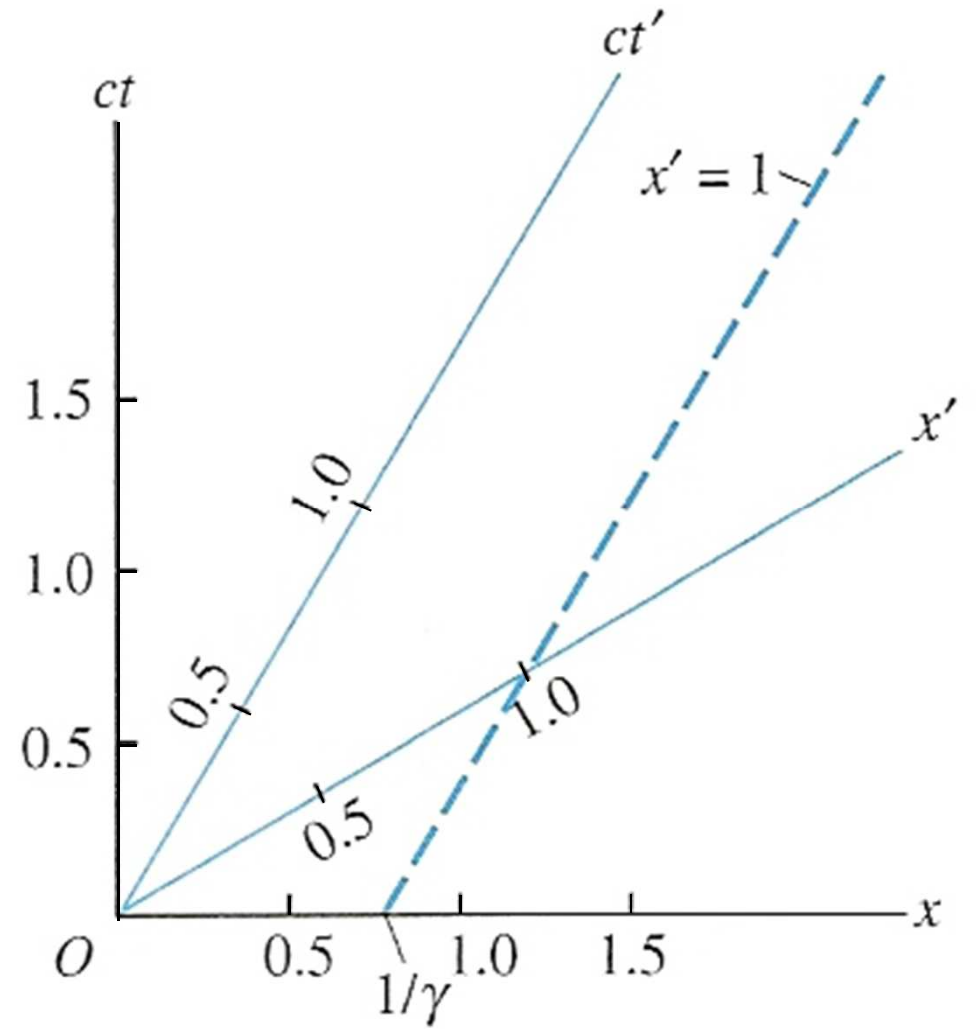
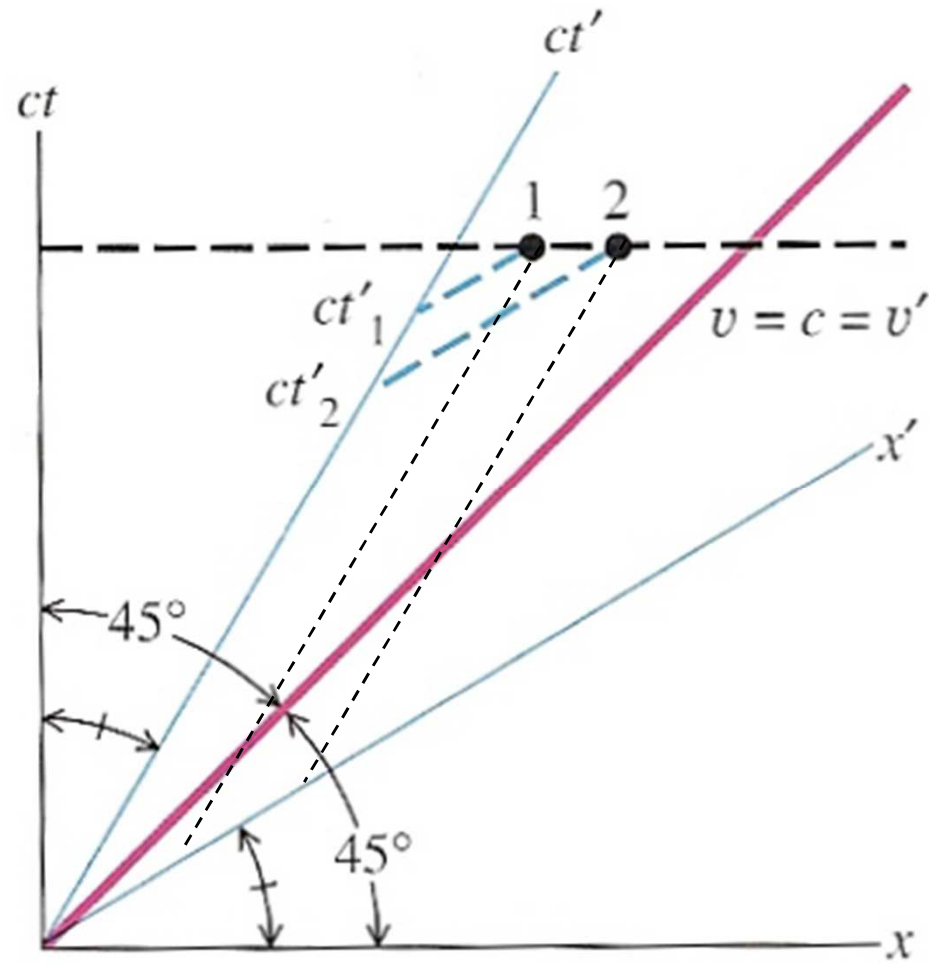


Descrição de eventos no espaço-tempo

7



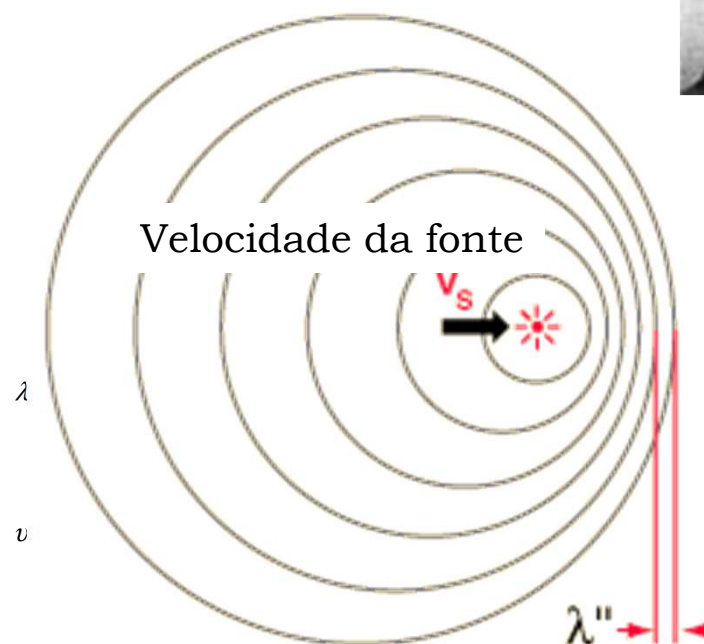
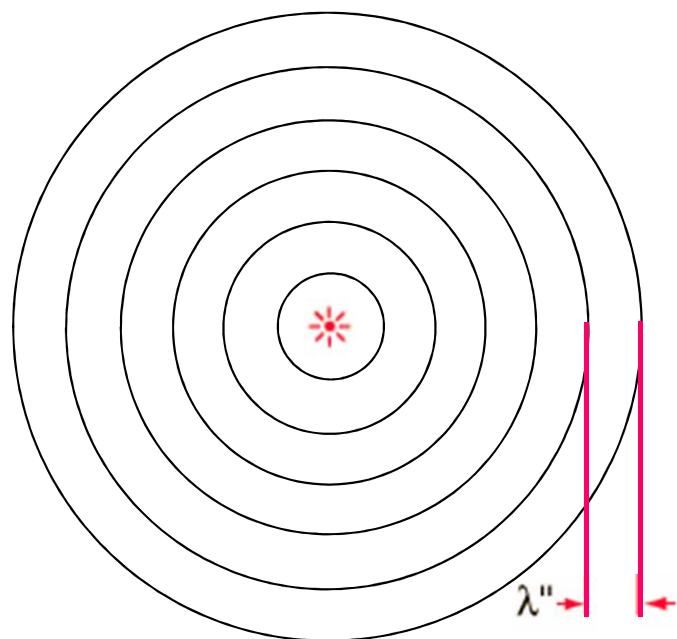
Eventos nos diagramas espaço-tempo dos referenciais R e R'



Efeito Doppler



O comprimento de onda (λ) é a distância ou «espaço» de propagação durante um período T .



Física Clássica

- Fonte em repouso relativamente ao observador:
 $v = v_s = 0$ e $\lambda'' = cT'' = c/v$ (v é a frequência da fonte)
- Fonte aproximando-se do observador:
 $v = +v_s$ e $\lambda'' = c/v'' = (c - v_s)T'' = (c - v_s)/v$
- Fonte afastando-se do observador:
 $v = -v_s$ e $\lambda'' = c/v'' = (c + v_s)T'' = (c + v_s)/v$

Relatividade restrita

- Fonte em repouso relativamente ao observador:
 $v = v_s = 0$ e $\lambda'' = c/v'' = cT'' = c/v$ (v é a frequência da fonte)
- Fonte aproximando-se do observador:
 $v = +v_s$ e $\lambda'' = c/v'' = (c - v_s)T'' = (c - v_s)T / \gamma_v = (c - v_s) / v \gamma_v$
- Fonte afastando-se do observador:
 $v = -v_s$ e $\lambda'' = c/v'' = (c + v_s)T'' = (c + v_s)T / \gamma_v = (c + v_s) / v \gamma_v$

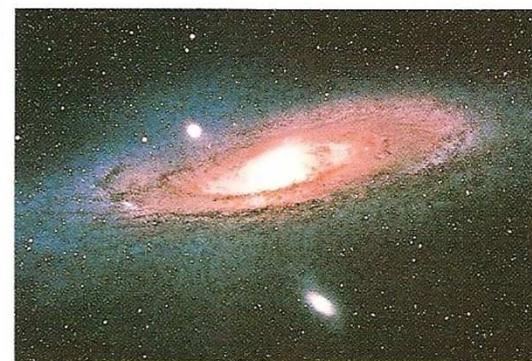
Desvio para o vermelho

DESLOCAMENTO DA ANDRÓMEDA

Como o Universo se encontra em expansão (pág. 43), a luz de corpos distantes é desviada durante a sua viagem até nós, movendo-se em direcção ao vermelho do espectro, fenómeno a que se dá o nome de «deslocamento para o vermelho». No entanto este fenómeno não se verifica no caso da galáxia Andrómeda, uma vizinha da Via Láctea.



Galáxia da Andrómeda e o seu espectro



GALÁXIAS DO CÚMULO

As galáxias do cúmulo, que se encontram a uma distância de 350 milhões de anos-luz, aparecem nos nossos telescópios como gotas. O valor do seu deslocamento para o vermelho, 0,022, é proporcional à distância a estas galáxias. Uma galáxia com o dobro do deslocamento para o vermelho está duas vezes mais longe.

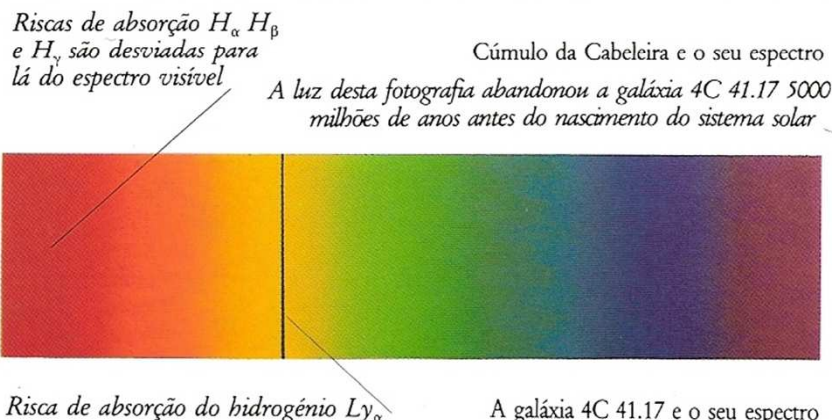


Cúmulo da Cabeleira e o seu espectro



DESLOCAMENTO DA 4C 41.17

A galáxia 4C 41.17 é tão distante que o seu deslocamento para o vermelho é de 3,8, o que equivale a uma distância de 10 000 milhões de anos-luz. Para deslocamentos superiores a 0,3, a regra da proporcionalidade deixa de se poder aplicar, e neste caso os astrónomos utilizam cálculos baseados nas teorias de Einstein.



A galáxia 4C 41.17 e o seu espectro



Tempo & Espaço, Visual Ciências, Verbo.

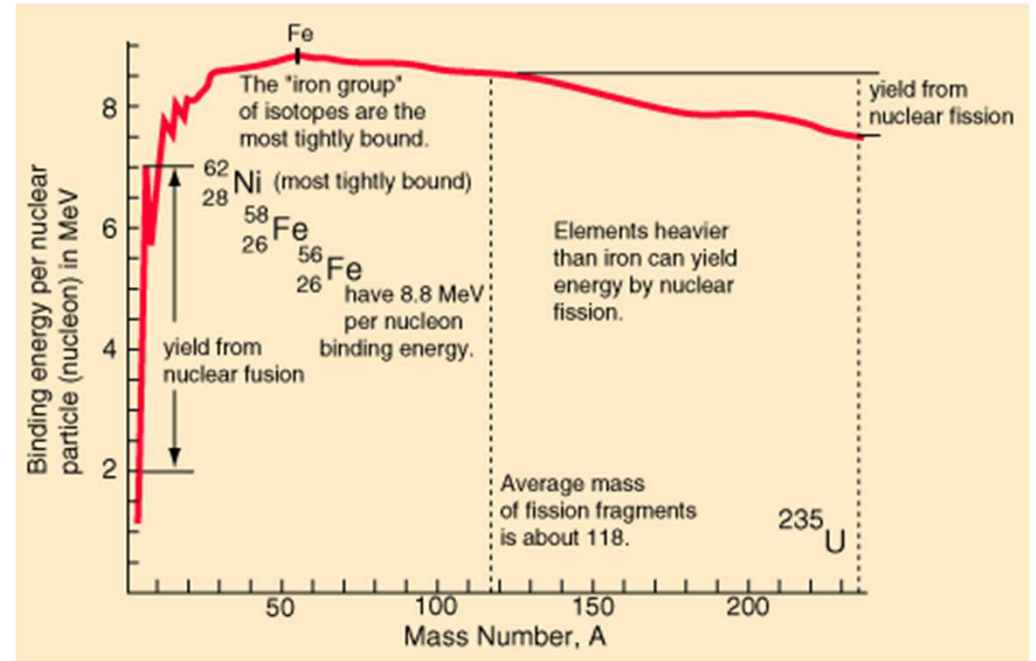
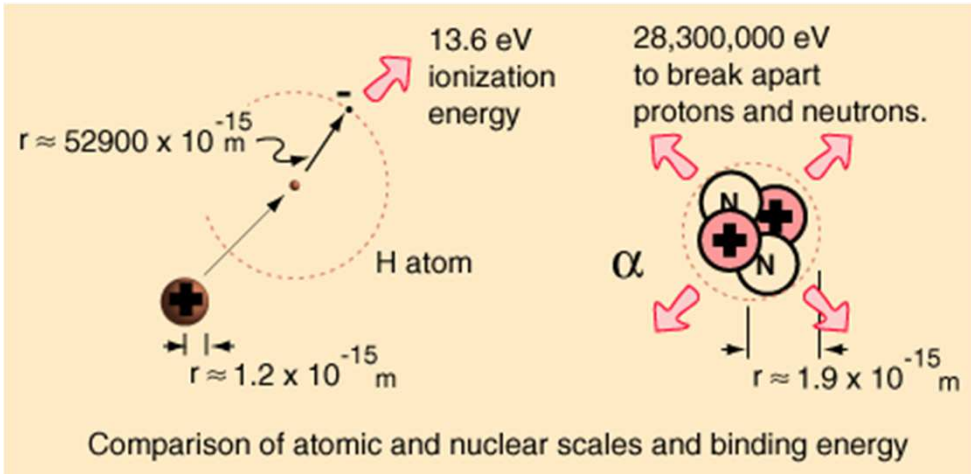
Os astrónomos caracterizam o desvio em comprimento de onda pelo parâmetro z:

$$z_{rece} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} = \frac{\lambda'' - \lambda_s}{\lambda_s} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1 \quad \left(\beta = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \right)$$

Modern Physics, P. A. Tipler and R. A. Llewellyn, W. H. Freeman and Company, 2002.

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/ensino.htm>

Reacções nucleares e estabilidade nuclear



protons $2 \times 1.00728 \text{ u}$

neutrons $2 \times 1.00866 \text{ u}$

Mass of parts 4.03188 u

Alpha particle

Mass of alpha 4.00153 u

$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$

FUSION

fast particles

deuterium $m=2$

tritium $m=3$

1 UNIT = energy use of one U.S. citizen in 1 year.

$m_{\text{after}} = 4.98$

$E = (.02)c^2$

676 units

FISSION

slow neutron $m=1$

235 U

one of many possible divisions

90 Rb

143 Cs

$m_{\text{after}} = 235.8$

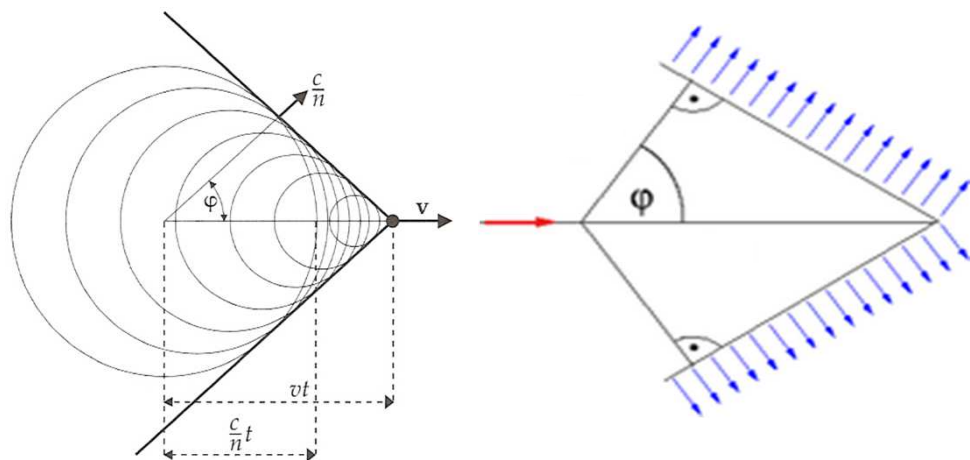
$E = (.2)c^2$

176 units

Conversion to energy per kg fuel

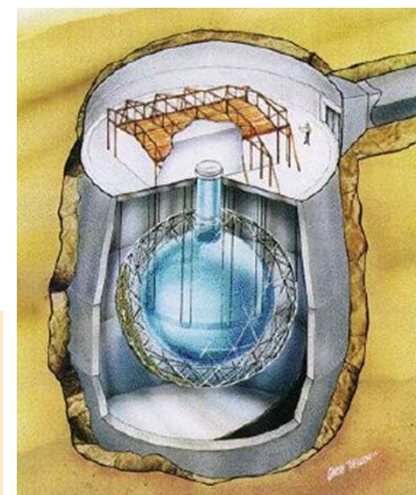
FUSION		FISSION	
deuterium	1875.62 MeV	235 U	218,896.8 MeV
<i>Fuel</i>		<i>Fuel</i>	
tritium	2808.92 MeV	neutron	939.57 MeV
<i>Products</i>		<i>Products</i>	
alpha	3727.38 MeV	Average fission yield 215 MeV	
neutron	939.57 MeV		
D-T fusion yield:	17.6 MeV	Fractional yield: $\frac{215 \text{ MeV}}{219,836.37 \text{ MeV}} = .00098$	
Fractional yield:	$\frac{17.6 \text{ MeV}}{4684.54 \text{ MeV}} = .00375$	Calculation of the number of reference units of energy produced from 1 kg of fuel by fusion and fission.	
	$3.38 \times 10^{14} \text{ J}$	Per kg of fuel: Δmc^2	$8.80 \times 10^{13} \text{ J}$
	676	1 UNIT = energy use of one U.S. citizen in 1 year.	176

Efeito (radiação) de Cherenkov



Brilho no núcleo do reactor TRIGA

(<http://triga.ga.com/45years.html>)



Detector de neutrinos

Cerenkov cone

$$\cos \theta = \frac{c}{vn}$$

v = particle velocity
 n = index of refraction of the medium

For water with $n=1.33$, the limiting angle for high speed particles is given by:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{1}{1.33} = 41.2^\circ$$

The threshold particle speed for Cherenkov radiation is $v = c/n$, which for an electron in water gives a threshold particle kinetic energy of 0.26 MeV.

$$\beta = 0.752, E_{\text{electron}} = \gamma m_e c^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} m_e c^2 = (1.52)(0.511 \text{ MeV}) = .775 \text{ MeV}$$

Kinetic energy = 0.775 MeV - 0.511 MeV = 0.26 MeV

Cerenkov radiation cone

The Cerenkov radiation from a muon produced by a muon neutrino event yields a well defined circular ring in the photomultiplier detector bank.

v_μ Muon neutrino Muon

Electron shower

The Cerenkov radiation from the electron shower produced by an electron neutrino event produces multiple cones and therefore a diffuse ring in the detector array.

v_e Electron neutrino Electron shower

Introdução à Teoria da Relatividade Geral



Bibliografia:

- *Teoria da Relatividade Especial*, Ramayana Gazzinelli, Editora Edgard Blücher, Brasil 2005.
- *Subtil é o senhor - Vida e pensamento de Albert Einstein*, A. Pais, Gradiva 1993.
- *Tempo & Espaço*, Visual Ciências, Verbo.
- *O Annus Mirabilis de Einstein - cinco artigos que revolucionaram a Física*, John Stachel, Gradiva, 2005.
- *Modern Physics*, P. A. Tripler and R. A. Llewellyn, W. H. Freeman and Company, 2002.

Matemática da relatividade geral



«A matéria diz ao espaço-tempo como curvar e o espaço-tempo diz à matéria por *‘onde andar’*». Adaptado de John Wheeler.

Hilbert chegou às mesmas equações de campo na mesma altura que Einstein.

Caso particular:
Espaço-tempo plano

$$g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$G_{ij} = R_{ij} - \frac{R}{2}g_{ij} + \Lambda g_{ij} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ij}$$

$$ds^2 = g_{ij}dx^i dx^j$$

$$R_{\eta\eta} = -\frac{2a^2 \frac{\partial\psi}{\partial\delta} \cot\theta}{\delta\psi} + \frac{2ac \frac{\partial\psi}{\partial\eta} \cot\theta}{\delta\psi} + \frac{a \frac{\partial c}{\partial\eta} \cot\theta}{\delta} - \frac{\frac{\partial a}{\partial\eta} c \cot\theta}{2\delta} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial\delta} \cot\theta}{2\delta} - \frac{2a^2 \frac{\partial^2\psi}{\partial\delta^2}}{\delta\psi}$$

$$-\frac{2a^2 (\frac{\partial\psi}{\partial\delta})^2}{\delta\psi^2} + \frac{4ac \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta\psi^2} - \frac{a^2 \frac{\partial d}{\partial\delta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta d\psi} + \frac{ac \frac{\partial d}{\partial\eta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta d\psi} + \frac{2a \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta\psi} - \frac{\frac{\partial a}{\partial\eta} c \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta\psi}$$

$$-\frac{3a \frac{\partial a}{\partial\delta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta\psi} - \frac{2a^2 c \frac{\partial c}{\partial\delta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta^2\psi} + \frac{2a^2 b \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta^2\psi} - \frac{a^2 \frac{\partial b}{\partial\eta} c \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta^2\psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial\eta} b c \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta^2\psi} + \frac{a^3 \frac{\partial b}{\partial\delta} \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta^2\psi}$$

$$+\frac{a^2 \frac{\partial a}{\partial\delta} b \frac{\partial\psi}{\partial\delta}}{\delta^2\psi} - \frac{2ab \frac{\partial^3\psi}{\partial\eta^3}}{\delta\psi} - \frac{2 \frac{\partial^3\psi}{\partial\eta^3}}{\psi} + \frac{4ac \frac{\partial^3\psi}{\partial\eta\partial\delta}}{\delta\psi} - \frac{2ab (\frac{\partial c}{\partial\eta})^2}{\delta\psi^2} + \frac{6 (\frac{\partial c}{\partial\eta})^2}{\psi^2}$$

$$+\frac{ac \frac{\partial d}{\partial\delta} \frac{\partial\psi}{\partial\eta}}{\delta d\psi} - \frac{ab \frac{\partial d}{\partial\eta} \frac{\partial c}{\partial\eta}}{\delta d\psi} - \frac{2c \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial c}{\partial\eta}}{\delta\psi} + \frac{\frac{\partial a}{\partial\delta} c \frac{\partial c}{\partial\eta}}{\delta\psi} - \frac{2a \frac{\partial b}{\partial\eta} \frac{\partial\psi}{\partial\eta}}{\delta\psi} + \frac{\frac{\partial a}{\partial\eta} b \frac{\partial c}{\partial\eta}}{\delta\psi}$$

$$+\frac{2a^2 b \frac{\partial c}{\partial\delta} \frac{\partial\psi}{\partial\eta}}{\delta^2\psi} - \frac{2abc \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial\psi}{\partial\eta}}{\delta^2\psi} - \frac{a^2 \frac{\partial b}{\partial\delta} c \frac{\partial c}{\partial\eta}}{\delta^2\psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial\delta} b c \frac{\partial\psi}{\partial\eta}}{\delta^2\psi} + \frac{a^2 b \frac{\partial b}{\partial\eta} \frac{\partial\psi}{\partial\eta}}{\delta^2\psi} + \frac{a \frac{\partial a}{\partial\eta} b^2 \frac{\partial\psi}{\partial\eta}}{\delta^2\psi}$$

$$+\frac{a \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial d}{\partial\delta}}{2\delta d} - \frac{\frac{\partial a}{\partial\eta} c \frac{\partial d}{\partial\delta}}{4\delta d} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial\delta} \frac{\partial d}{\partial\delta}}{4\delta d} - \frac{\frac{\partial^2 d}{\partial\eta^2}}{2d} + \frac{(\frac{\partial d}{\partial\eta})^2}{4d^2} - \frac{c \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial d}{\partial\eta}}{2\delta d}$$

$$+\frac{\frac{\partial a}{\partial\delta} c \frac{\partial d}{\partial\eta}}{4\delta d} + \frac{\frac{\partial a}{\partial\eta} b \frac{\partial d}{\partial\eta}}{4\delta d} + \frac{a \frac{\partial^2 c}{\partial\eta\partial\delta}}{\delta} - \frac{a \frac{\partial^2 b}{\partial\eta^2}}{2\delta} - \frac{a \frac{\partial^2 a}{\partial\delta^2}}{2\delta} + \frac{ac \frac{\partial c}{\partial\eta} \frac{\partial c}{\partial\delta}}{\delta^2}$$

“O pensamento mais feliz da minha vida”

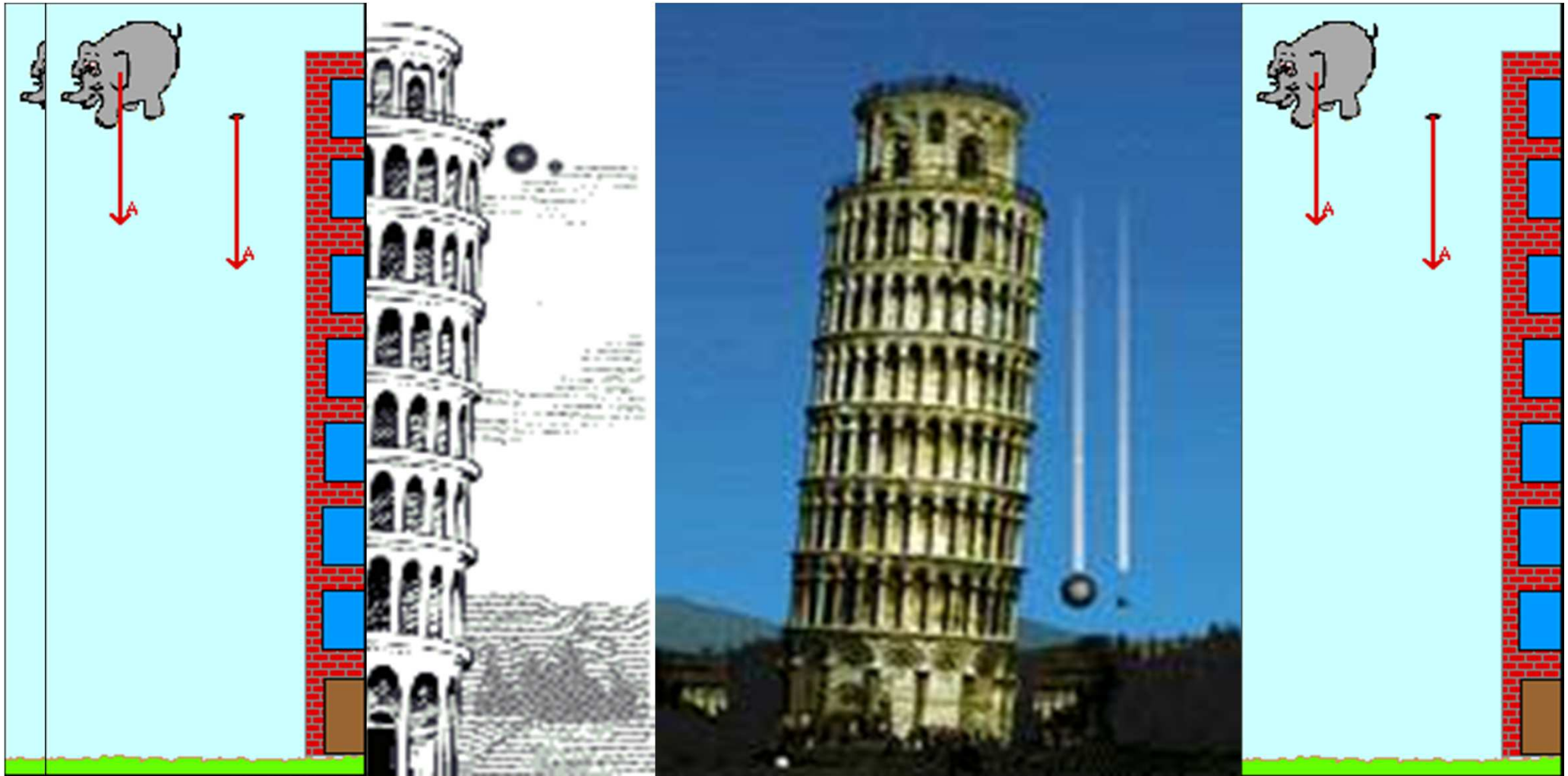
“Quando, em 1907, trabalhava num artigo de revisão sobre a teoria da relatividade restrita ... tive também de tentar modificar a teoria newtoniana da gravitação de modo que as respectivas leis se enquadrassem na teoria (da relatividade restrita) ... Então ocorreu-me **o pensamento mais feliz da minha vida**, da seguinte forma: o campo gravitacional tem apenas uma existência relativa, de algum modo semelhante ao campo eléctrico gerado por indução magnetoeléctrica. *Porque para um observador que cai livremente do telhado de uma casa não existe* - pelo menos no ambiente imediato - *campo gravitacional*. Na realidade, se o observador deixar cair alguns corpos, estes permanecerão, em relação a ele, em estado de repouso ou de movimento uniforme, independentemente de própria natureza física ou química (nestas considerações a resistência do ar é, evidentemente, ignorada). O observador, por conseguinte, tem o direito de interpretar seu estado como sendo ‘de repouso’.

Devido a esta ideia, a extraordinariamente peculiar lei experimental de que no campo gravitacional todos os corpos caem com a mesma aceleração atingiu imediatamente um significado físico profundo. Nomeadamente, se existisse um objecto que caísse de um modo diferente dos outros num campo gravitacional, então, através dele, o observador poderia concluir que se encontrava num campo gravitacional e caindo nesse campo. Se, no entanto, tal objecto não existe - como a experiência mostra com grande precisão -, então o observador carece de um método objectivo de se aperceber de que está, ele próprio, a cair num campo gravitacional. Pelo contrário, tem o direito de considerar o seu estado como de repouso e o seu ambiente como de ausência de campo no que respeita à gravitação.

A experimentalmente conhecida independência da aceleração da queda em relação à matéria é, conseqüentemente, um argumento poderoso para a necessidade de o postulado da gravitação ser generalizado a sistemas de coordenadas que, relativamente uns aos outros, estão em movimento não uniforme.” [Pais, 224-225]

Igualdade entre massa inercial e massa gravitacional

IFQR 2005-2006



José Figueiredo

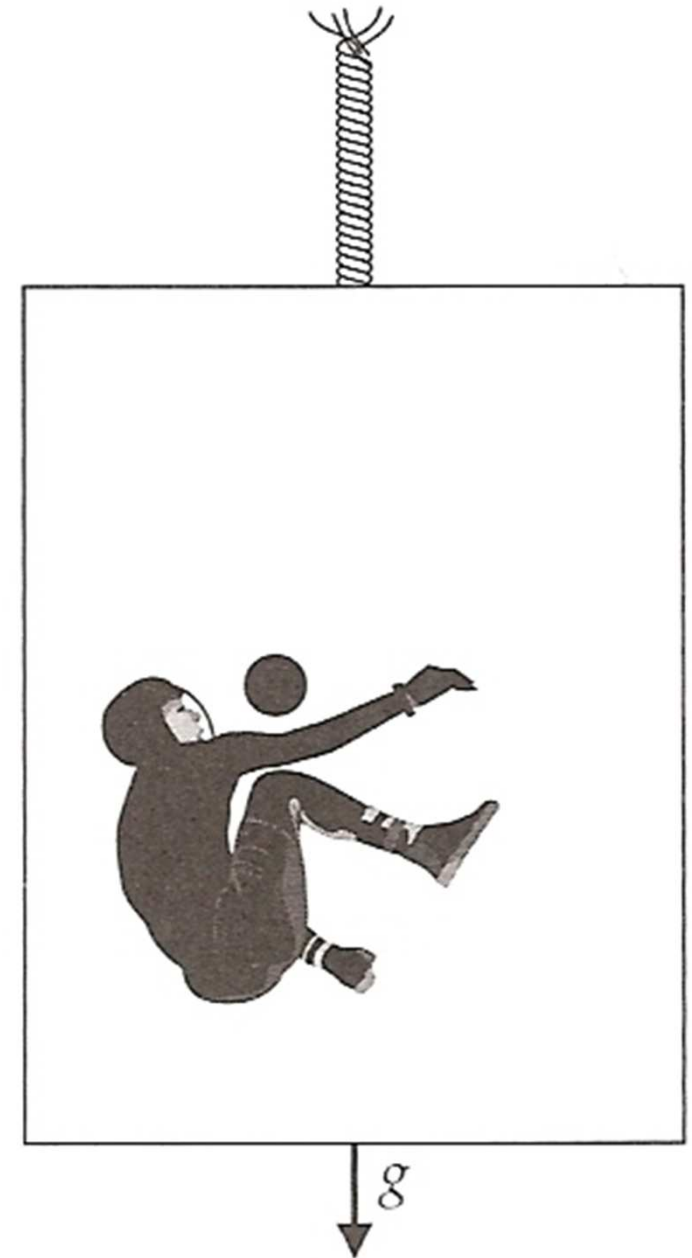
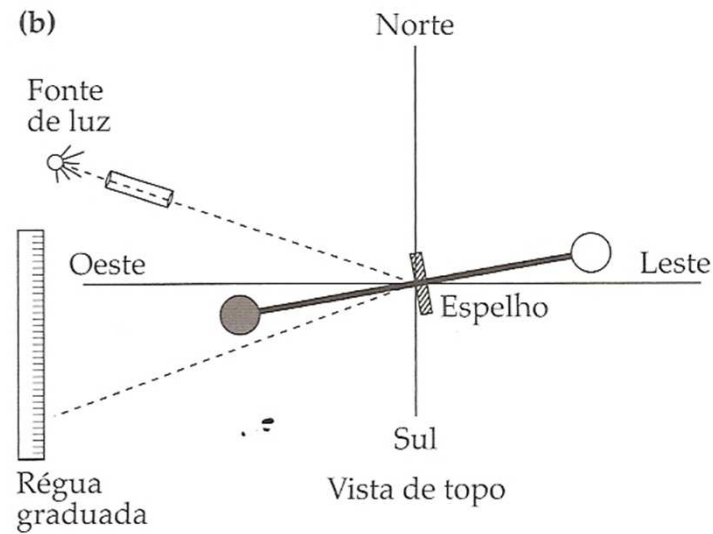
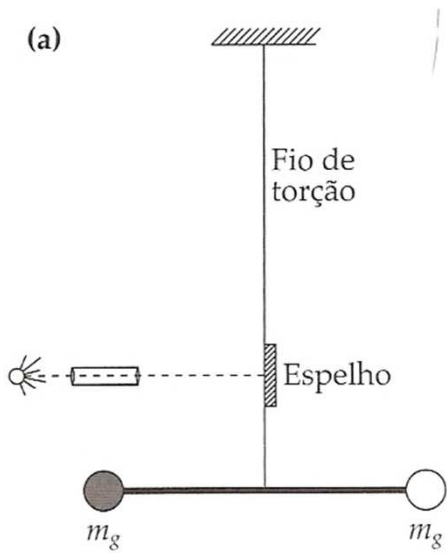
20-03-2006

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/ensino.htm>

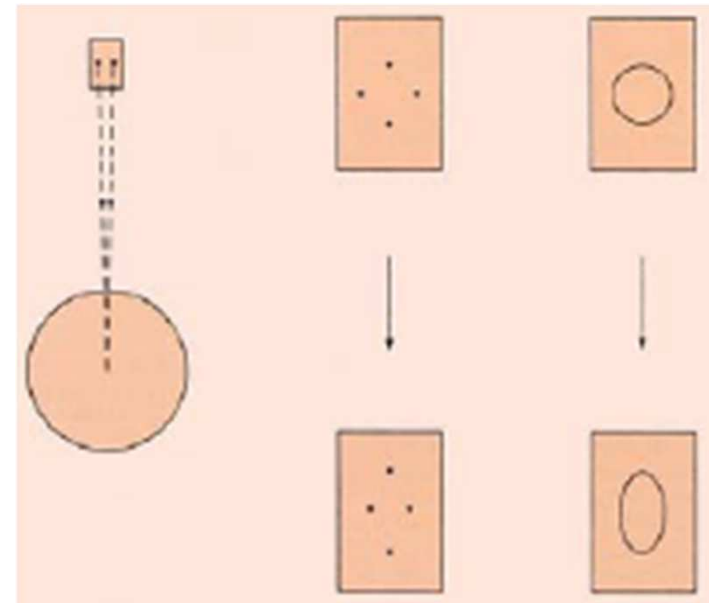
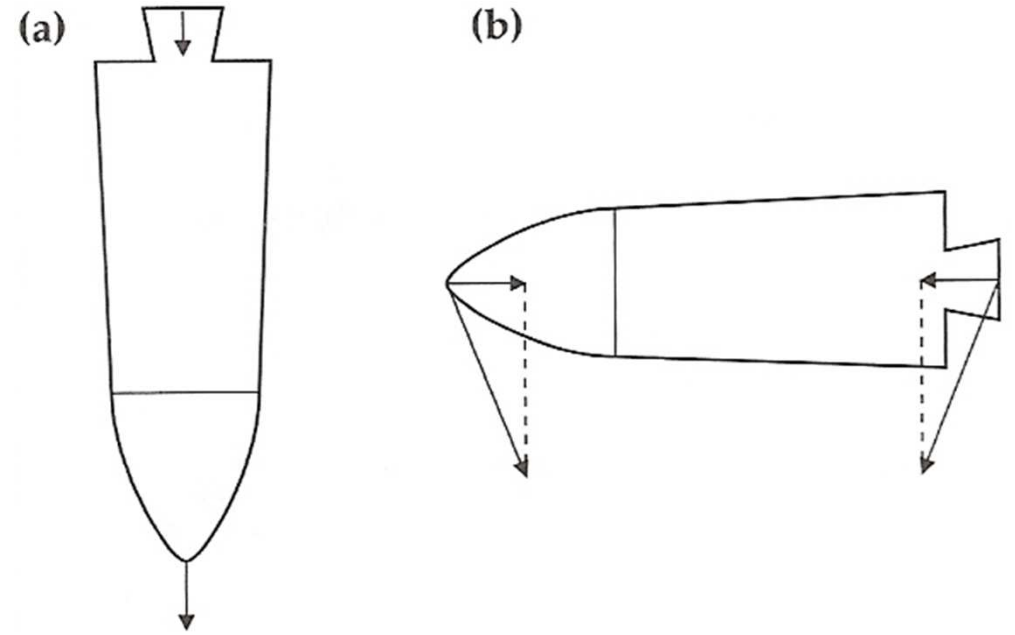
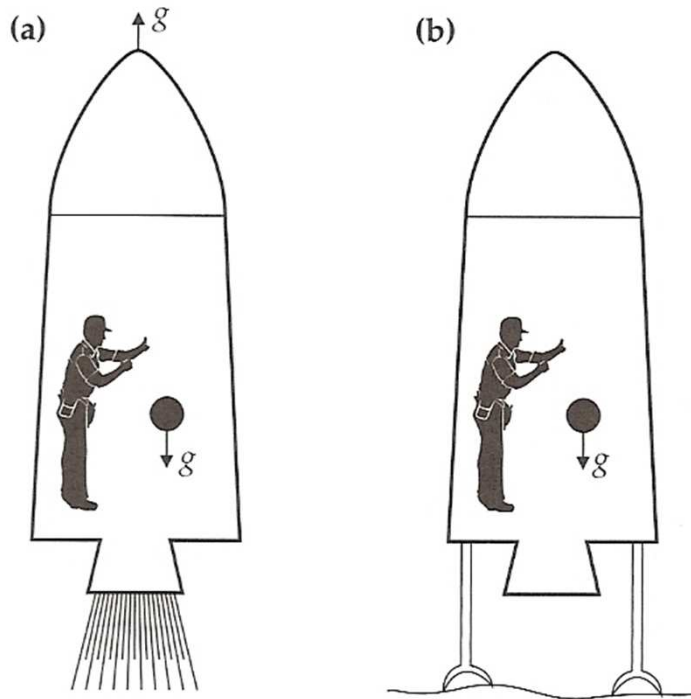
JF, DF-FCT-ULAG

31

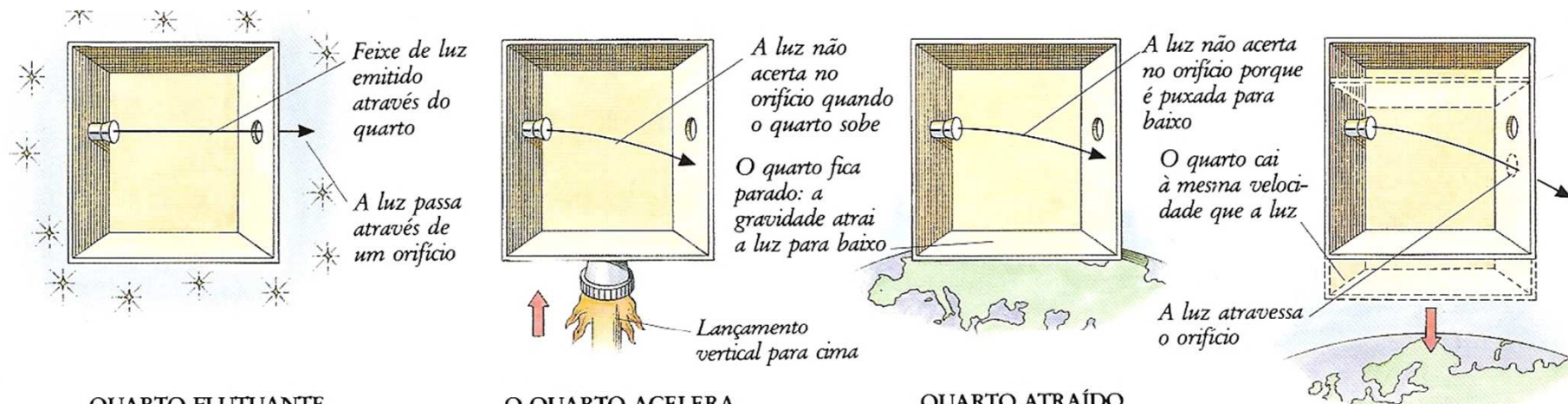
Consequência da igualdade das massas inercial e gravitacional



Princípio da equivalência e laboratórios locais



PE e a curvatura da luz num campo gravitacional



QUARTO FLUTUANTE

Einstein compreendeu que a aceleração e a gravidade são equivalentes. Num quarto fechado, longe da acção de grandes massas, e portanto longe da acção da gravidade, a luz «flutua» livremente no espaço descrevendo uma linha recta ao atravessar o quarto, e sai por um pequeno orifício da parede. Se se encontrassem astronautas neste quarto, eles estariam em queda livre.

O QUARTO ACELERA DESLOCANDO-SE PARA CIMA

Se o quarto for acelerado pelo motor de um foguetão, os astronautas imaginários cairão no chão, como se tivessem peso. O quarto acelera em sentido ascendente durante o tempo que a luz leva a atravessá-lo e, como tal, o feixe de luz é desviado para baixo, não acertando no orifício da parede, uma vez que a alcança mais abaixo.

QUARTO ATRAÍDO POR UM PLANETA

Se o mesmo quarto se encontrar em repouso na superfície da Terra, os astronautas também caem no chão. A gravidade «puxa» a luz para baixo à medida que esta atravessa o quarto e, como tal, o feixe de luz não passa através do orifício da parede, alcançando-a mais abaixo. A luz é desviada devido à acção da gravidade.

QUARTO EM QUEDA LIVRE

Quando o mesmo quarto cai livremente no campo da gravidade terrestre, os astronautas não sentem o seu peso. O feixe de luz sofre um desvio devido à gravidade, mas apenas na medida exacta para que passe através do orifício. Parece viajar a direito através do quarto.

Soldner (1801/03) e Einstein (1911/13)

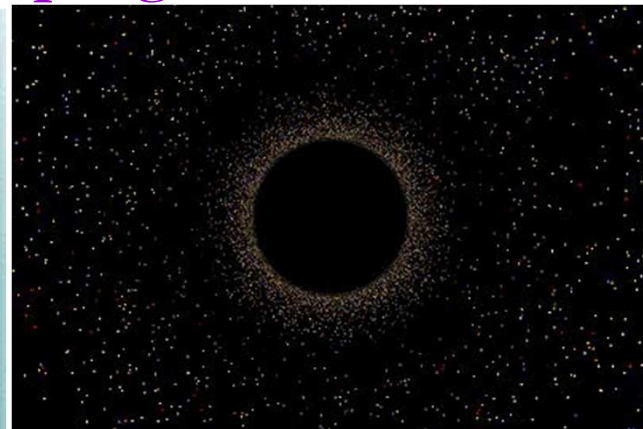
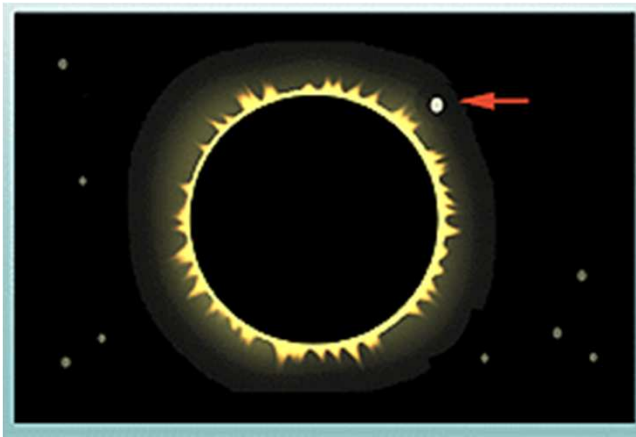
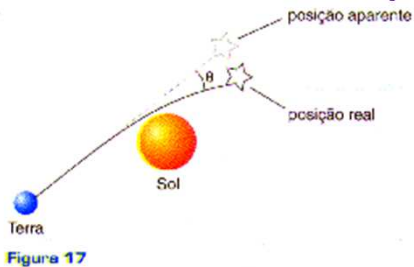


Einstein (1916)



Verificações da curvatura da luz num campo gravitacional

IFQR 2005-2006



14-10-1913
Zürich, 14. X. 13.

Aus Hoch geehrten Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfeld eine Deviation erfahren.

grav. Feld
↓
↑
Lichtstrahl

An Sonnensande müsste diese Ablenkung $0,84^\circ$ betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen (R = Sonnenradius).

- $50,84^\circ$

So wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grossen Sonnen-nähe grosse Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

Quasar-Posição real

Quasar-Posições Observadas

Galáxia Lente Gravitacional

Terra

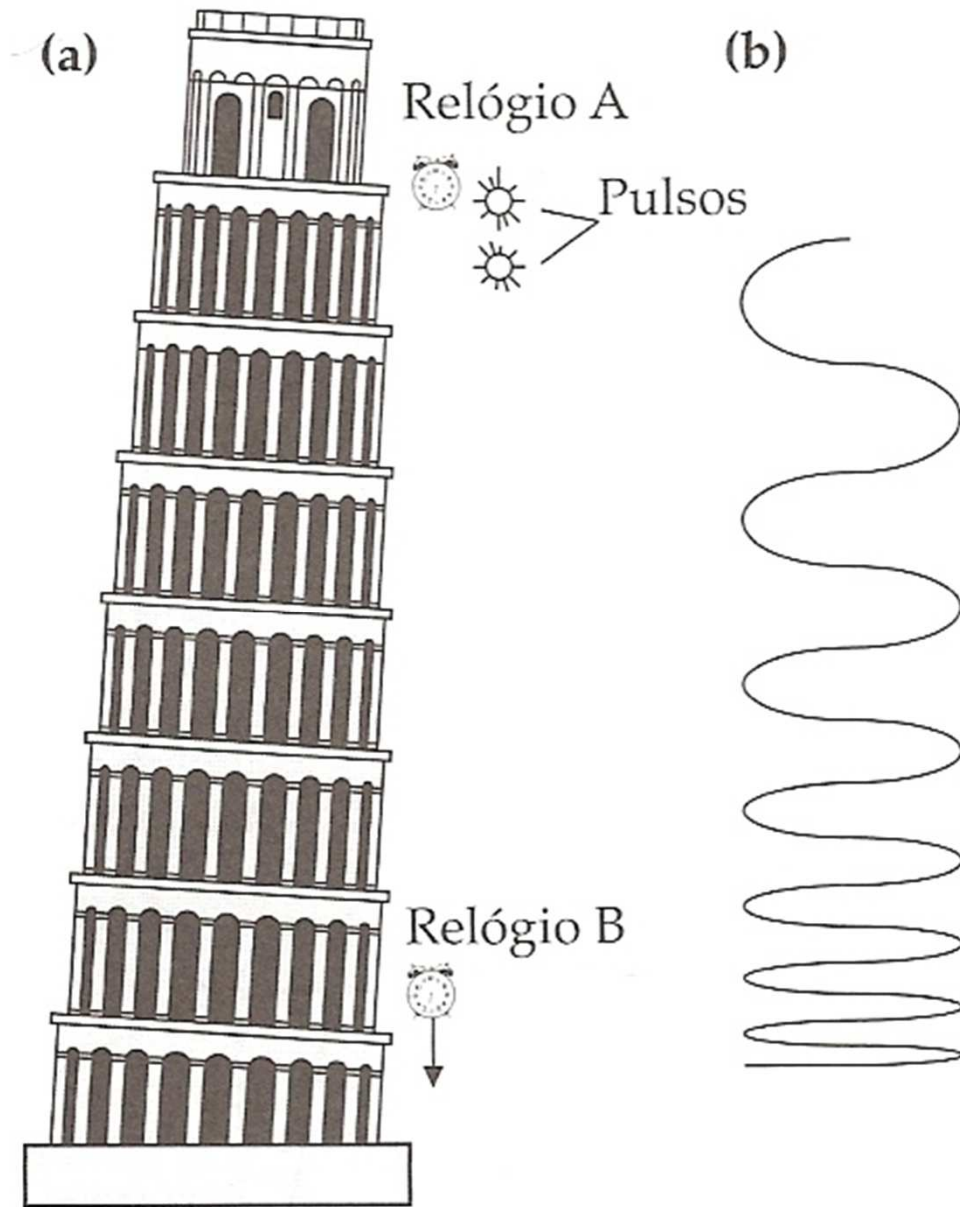
Exemplo de Lente Gravitacional

José Figueiredo

20-03-2006

JF, DF-FCT-ULAG

Dilatação gravitacional do tempo



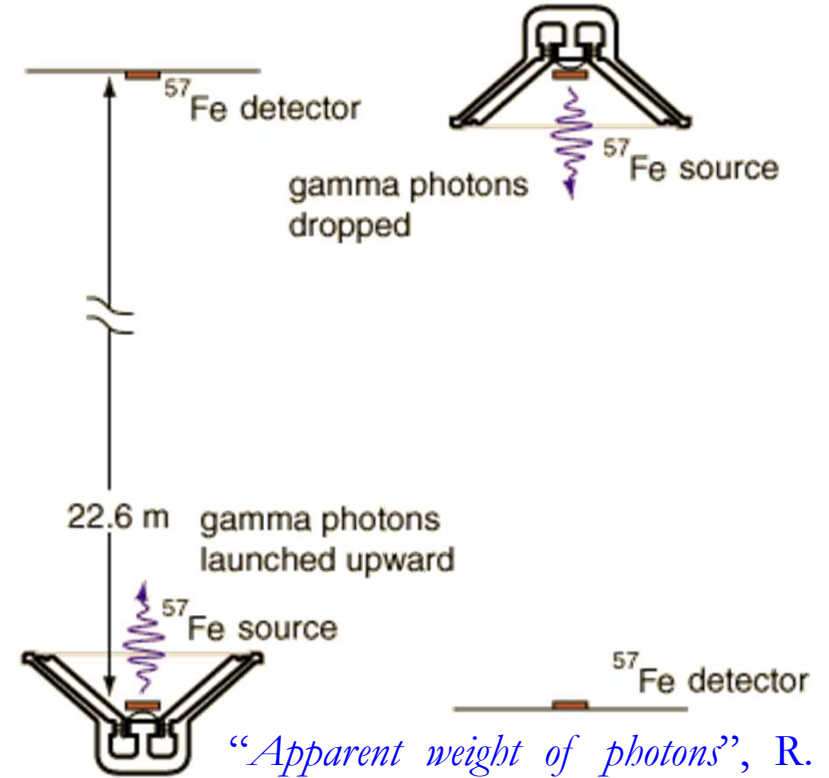
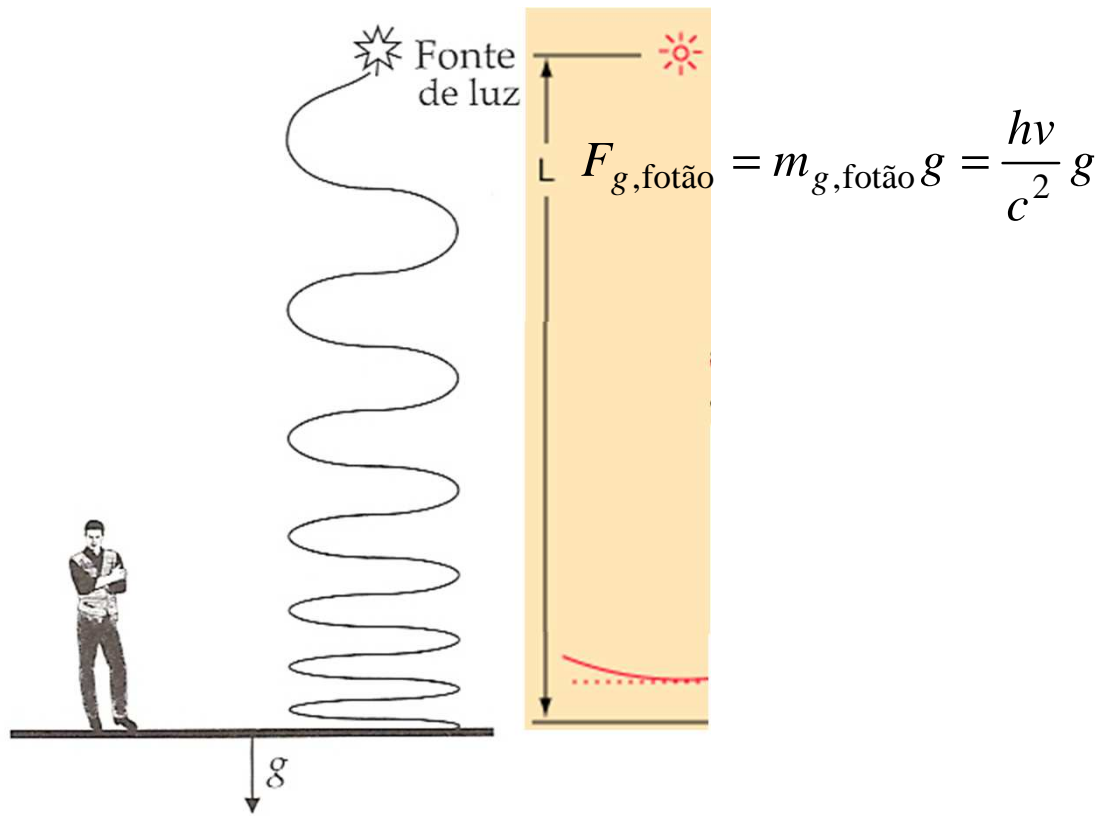
O intervalo de tempo entre dois eventos medido numa região onde existe um campo gravitacional $\Delta T(R)$, onde R é a distância à superfície da fonte de campo, e o intervalo de tempo entre os mesmos eventos medido numa região onde não existe campo gravitacional, $\Delta T(R=\infty)$, relacionam-se da forma seguinte:

$$\Delta T(R) = \Delta T(\infty) \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}$$

Na superfície da Terra :

$$\Delta T(R) = \Delta T(\infty) \sqrt{1 - \frac{2gR}{c^2}}$$

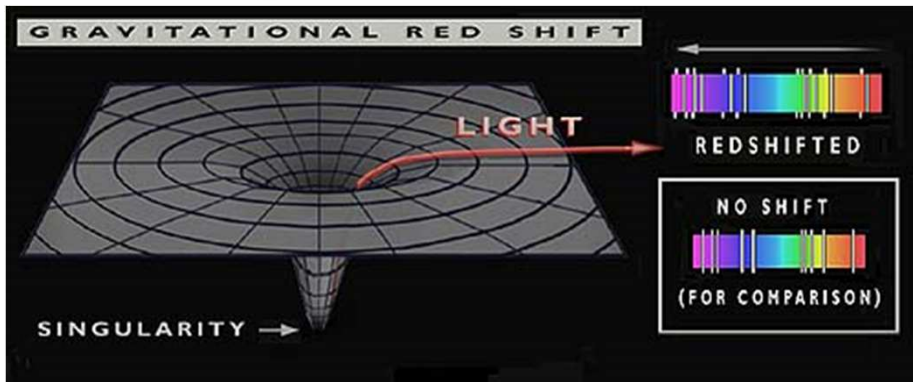
A massa gravitacional da luz



“Apparent weight of photons”, R. V. Pound e G. A. Rebka, Jr., Phys. Ver. Lett., 4, 337-341 (1960).

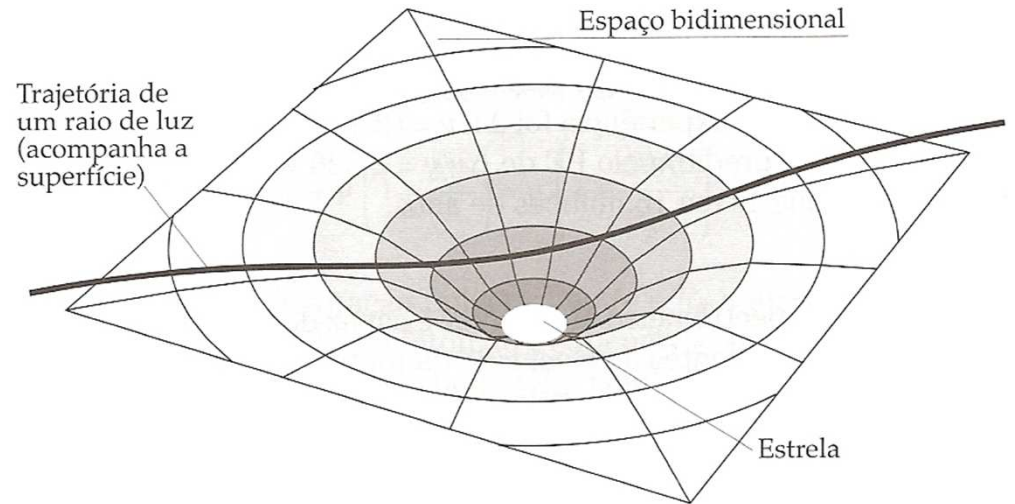
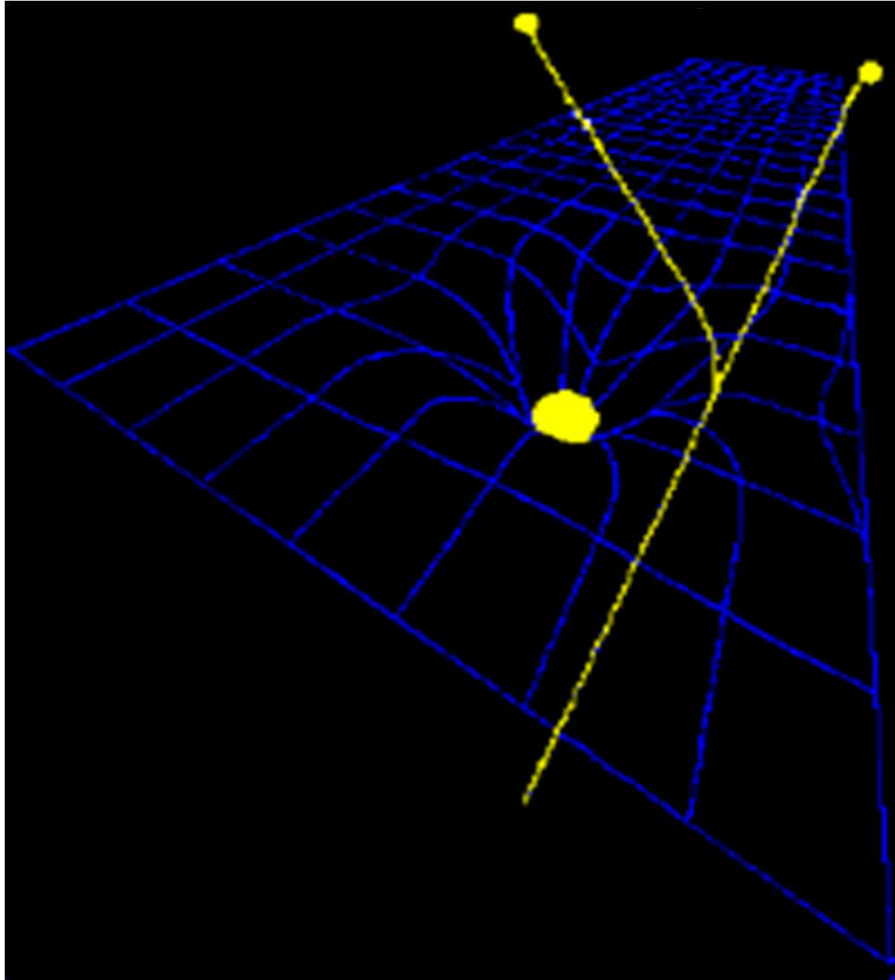
Fotão ν emitido no "infinito": $\nu' = \nu \left(1 + \frac{GM_T}{R_T c^2} \right)$

Fotão ν emitido por uma estrela: $\nu' = \nu \left(1 - \frac{GM_E}{R_E c^2} \right)$



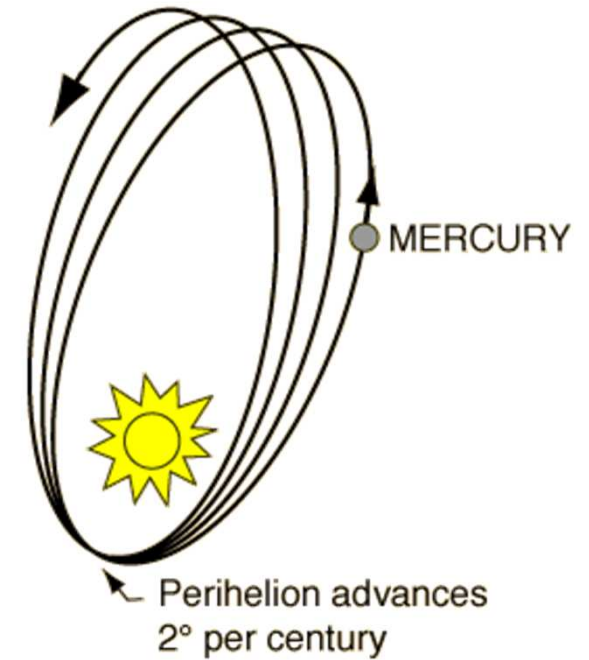
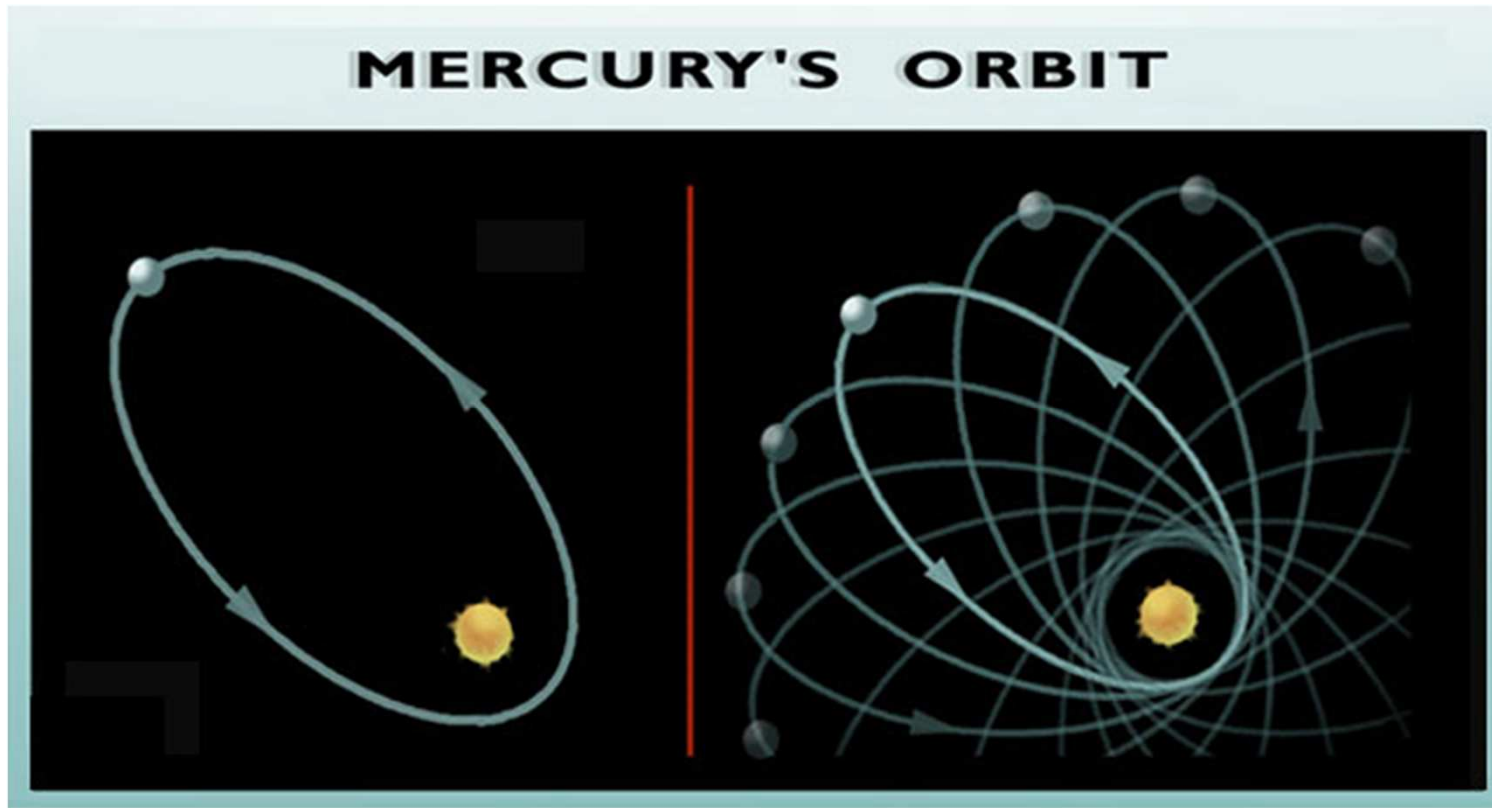
[“Apparent weight of photons”, R. V. Pound e G. A. Rebka, Jr., Phys. Ver. Lett., 4, 337-341 (1960) - na página de propostas de trabalhos de pesquisa].

Curvatura do espaço-tempo



Precessão do periélio de mercúrio

IFQR 2005-2006



Relatividade explica 43'' que não eram explicados pela teoria da gravitação

José Figueiredo

21-03-2006

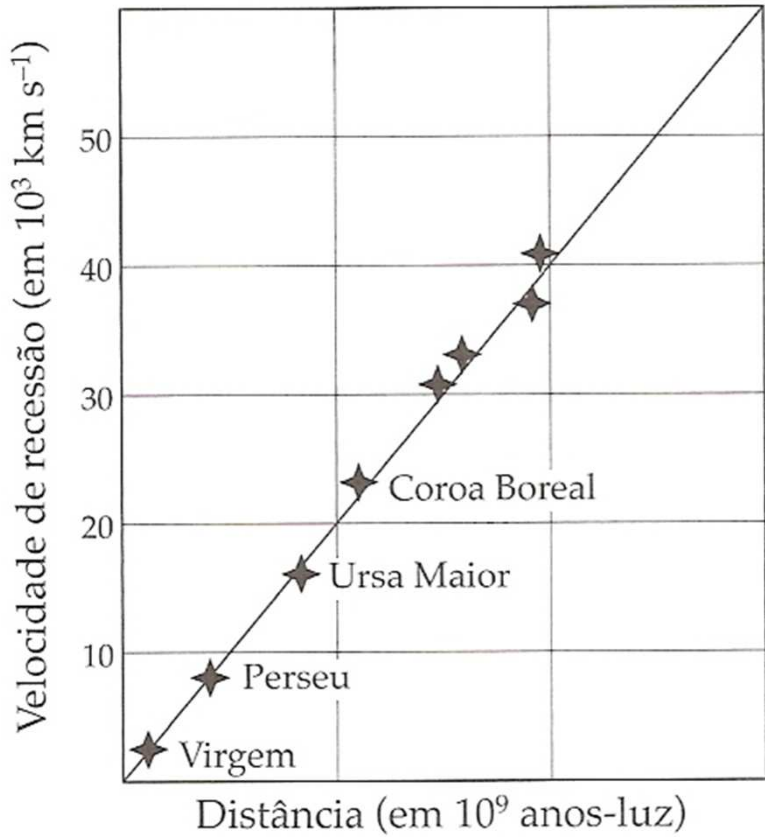
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/ensino.htm>

JF, DF-FCT-ULAG

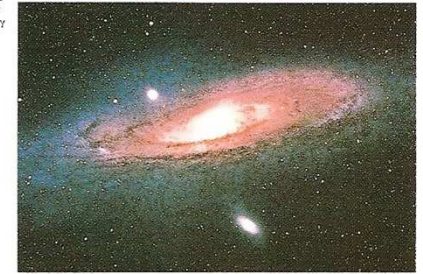
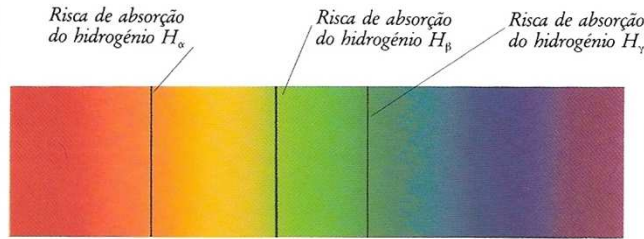
39

Recessão das galáxias

Hubble (Cefeidas)

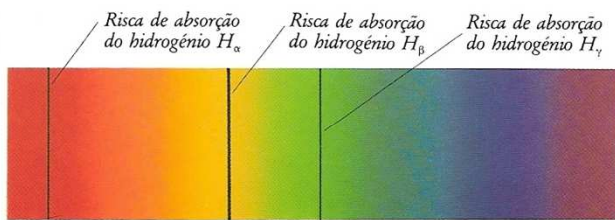


DESLOCAMENTO DA ANDRÔMEDA
 Como o Universo se encontra em expansão (pág. 43), a luz de corpos distantes é desviada durante a sua viagem até nós, movendo-se em direcção ao vermelho do espectro, fenómeno a que se dá o nome de «deslocamento para o vermelho». No entanto este fenómeno não se verifica no caso da galáxia Andrómeda, uma vizinha da Via Láctea.



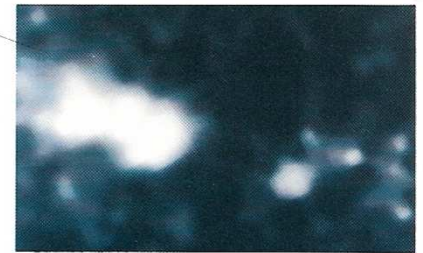
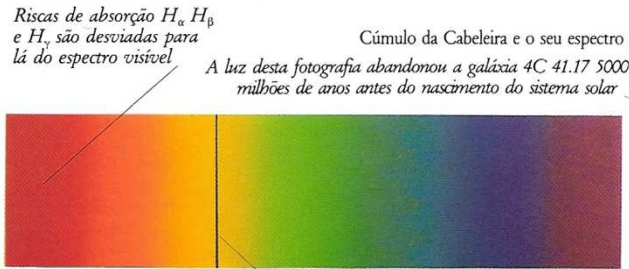
Galáxia da Andrómeda e o seu espectro

GALÁXIAS DO CÚMULO DA CABEIRA
 As galáxias do cúmulo, que se encontram a uma distância de 350 milhões de anos-luz, aparecem nos nossos telescópios como gotas. O valor do seu deslocamento para o vermelho, 0,022, é proporcional à distância a estas galáxias. Uma galáxia com o dobro do deslocamento para o vermelho está duas vezes mais longe.



Cúmulo da Cabeira e o seu espectro

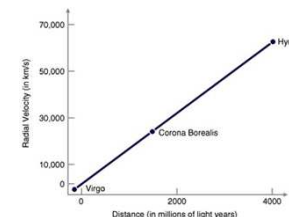
DESLOCAMENTO DA 4C 41.17
 A galáxia 4C 41.17 é tão distante que o seu deslocamento para o vermelho é de 3,8, o que equivale a uma distância de 10 000 milhões de anos-luz. Para deslocamentos superiores a 0,3, a regra da proporcionalidade deixa de se poder aplicar, e neste caso os astrónomos utilizam cálculos baseados nas teorias de Einstein.



A luz desta fotografia abandonou a galáxia 4C 41.17 5000 milhões de anos antes do nascimento do sistema solar

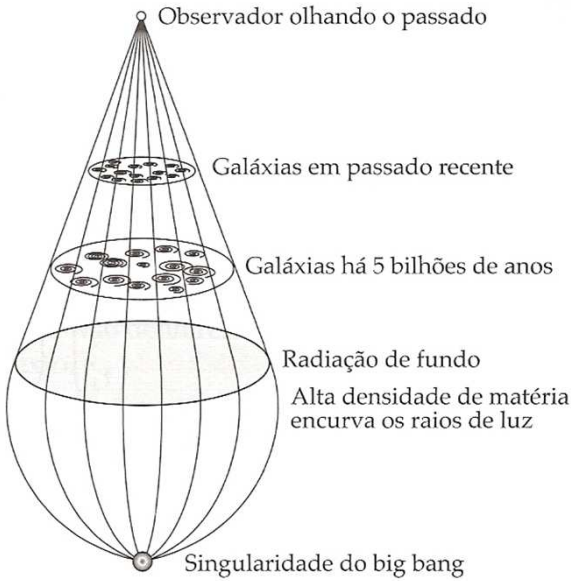
A galáxia 4C 41.17 e o seu espectro

$$v = Hd$$

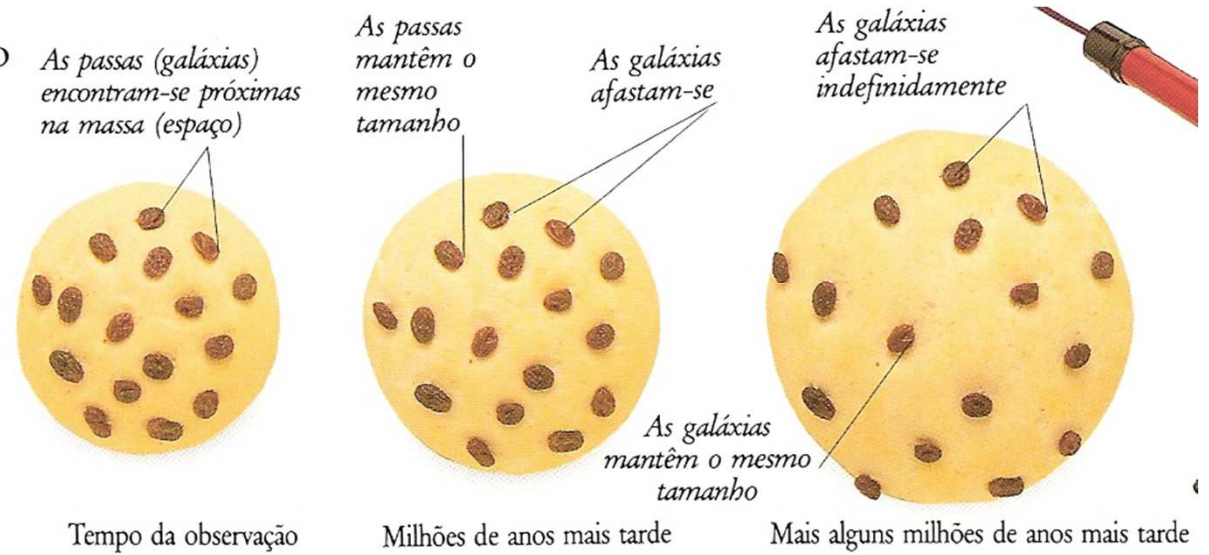


Universo em expansão, átomo primordial e a radiação cósmica de fundo

IFQR 2005-2006



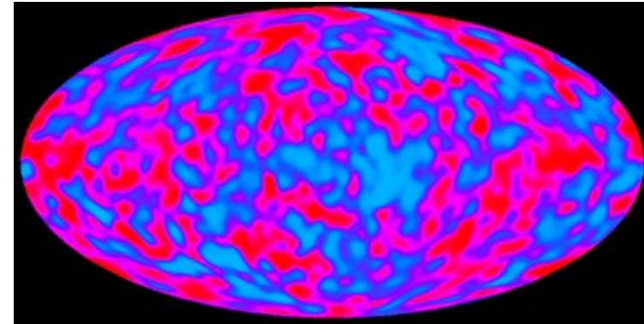
O Sol !
UNIVERSO EM EXPANSÃO
 A teoria de Einstein, para seu espanto, também prevê que o espaço vazio se encontra em expansão. O espaço existente entre as galáxias encontra-se em dilatação, afastando as galáxias. É o que acontece com as passas de uma massa que se encontra a levedar. Elas não se movem através da massa, mas estão a afastar-se entre si à medida que a massa vai levedando.



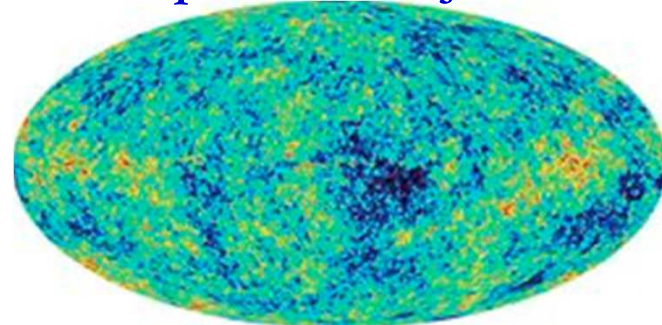
Radiação cósmica de fundo: ~2,725 K

1965		Penzias and Wilson
1992		COBE
2001		MAP (Simulated)

Variações na 5ª casa decimal



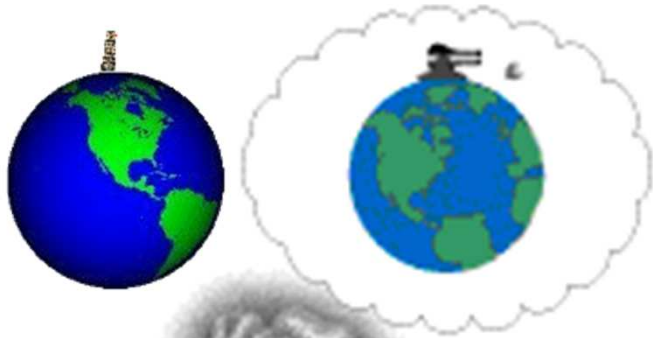
Anisotropia da radiação cósmica



José Figueiredo

A velocidade de escape e o buraco negro de Schwarzschild

IFQR 2005-2006



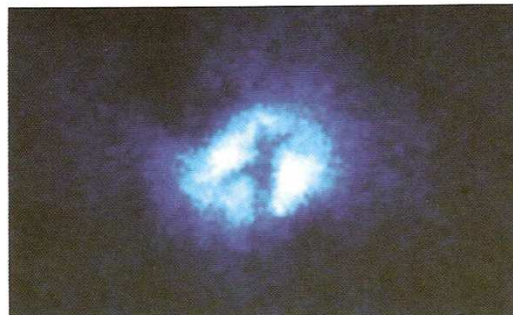
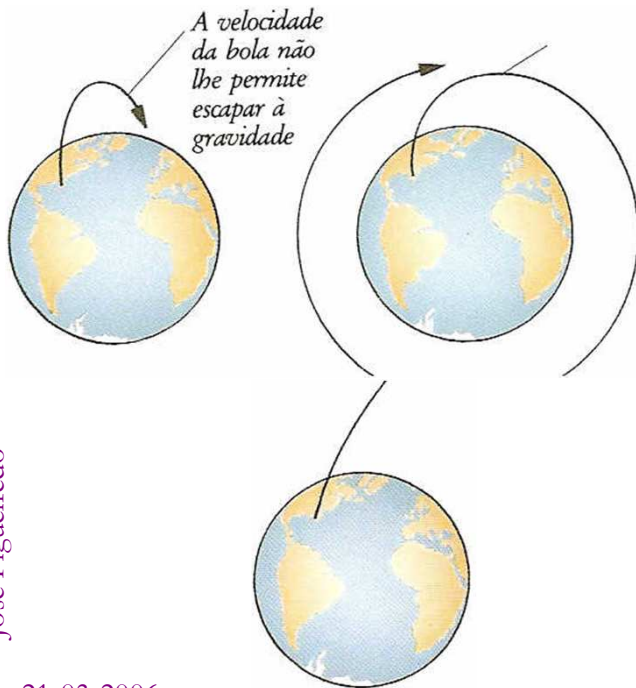
Com este tamanho a Terra seria um buraco negro



TERRA COMPRIMIDA

Se a Terra fosse comprimida numa esfera com 18 mm de diâmetro, a sua gravidade aumentaria e mantê-la-ia em queda eternamente, tornando-a infinitamente densa e deformando o espaço-tempo em torno de si, formando um buraco negro. Qualquer objecto — o Sol, uma colher de chá ou uma pessoa — formaria um buraco negro se fosse comprimido de forma a não conseguir resistir à sua própria gravidade.

$$R_{Sc} = \frac{2GM}{c^2}$$

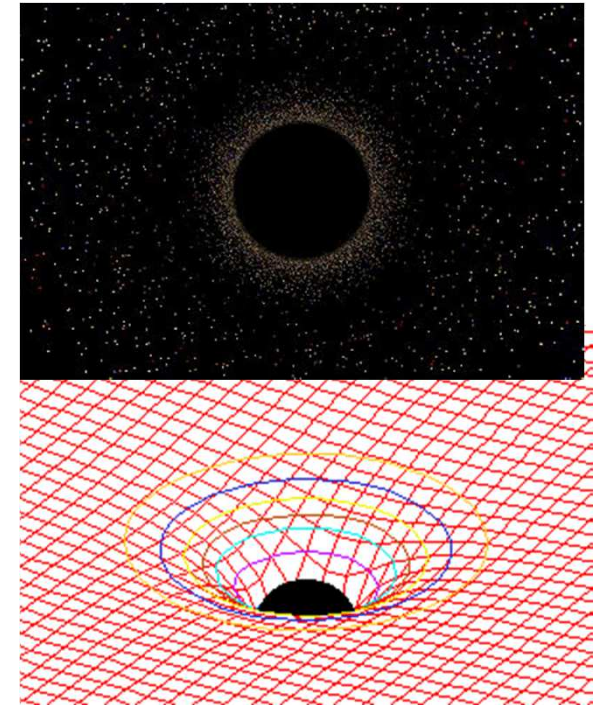
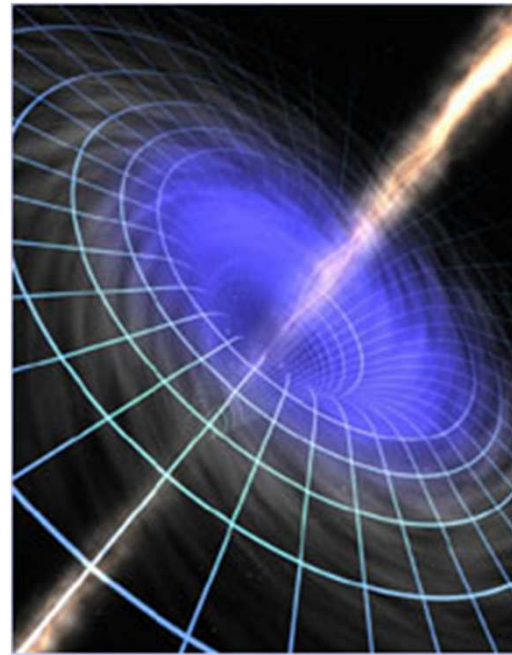
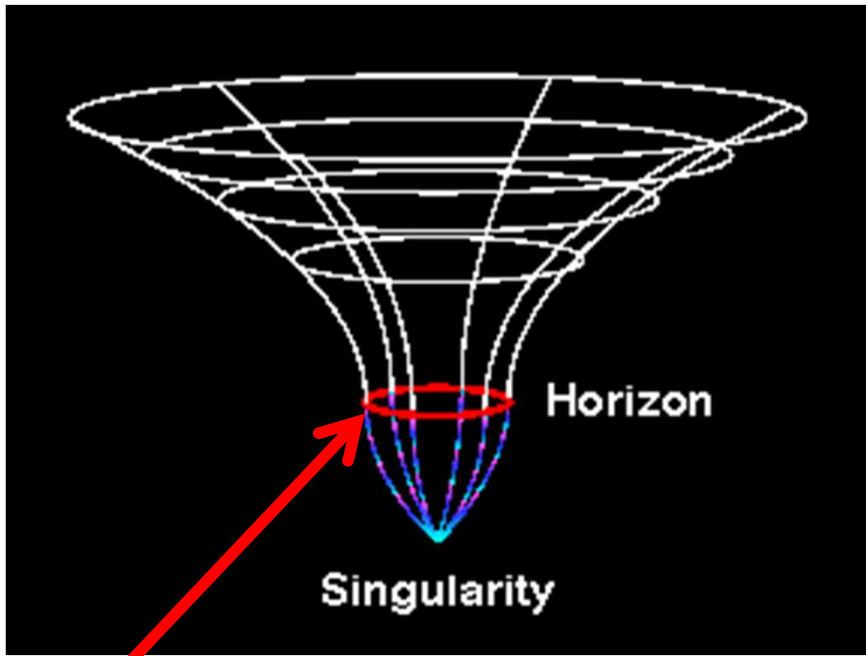


José Figueiredo

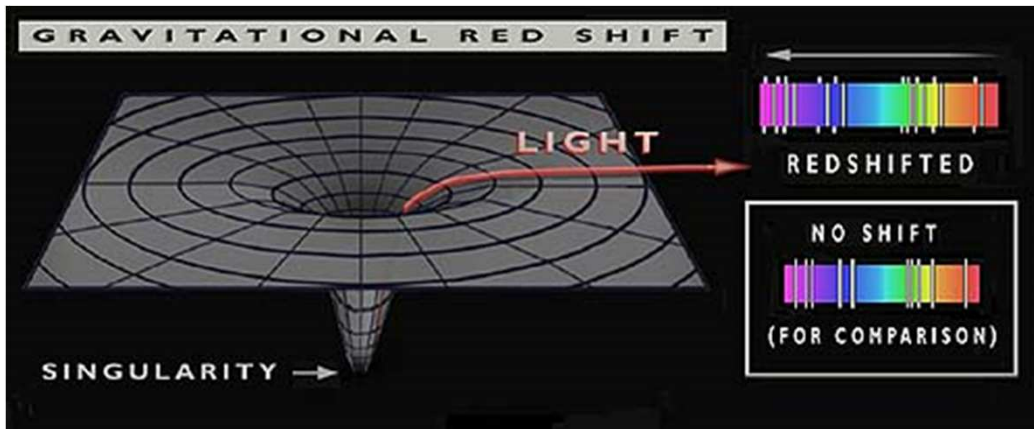
21-03-2006

“espécies” de buracos negros

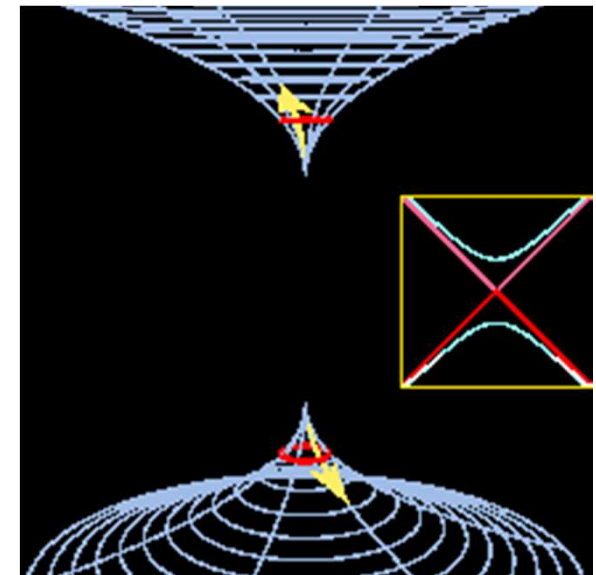
IFQR 2005-2006



$$R_{Sc} = \frac{2GM}{c^2}$$



$$v' = v \left(1 - \frac{GM_E}{R_E c^2} \right)$$



José Figüeirodo

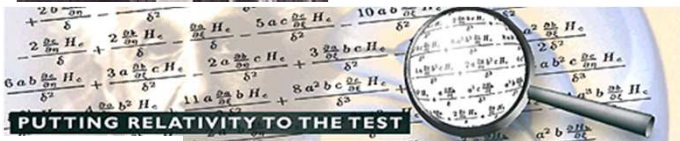
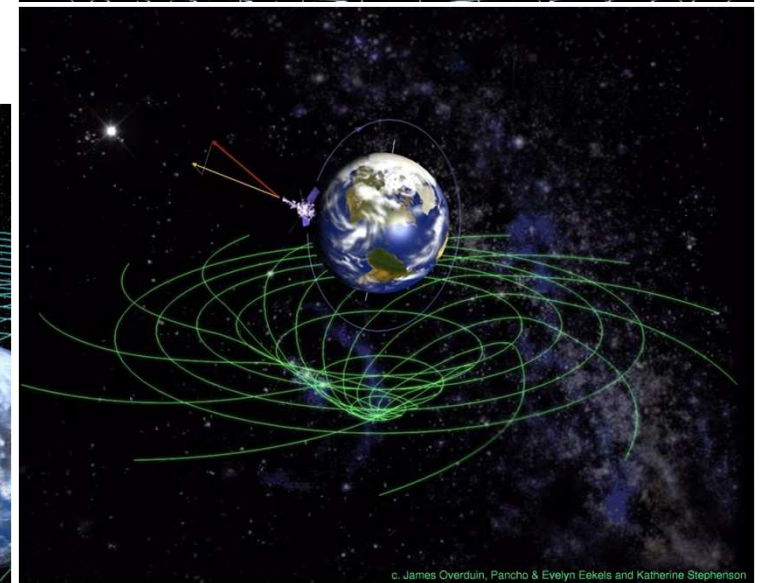
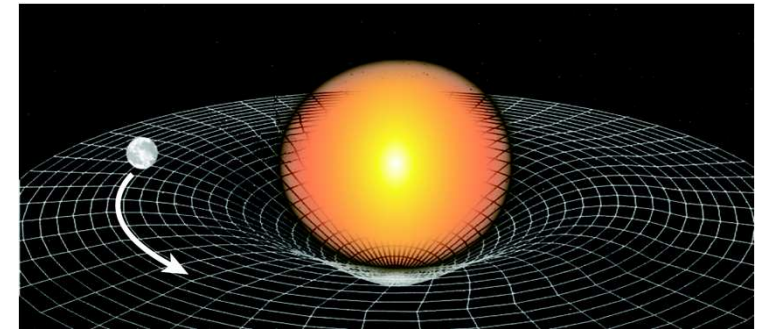
JF, DF-FCT-ULAG

“Teste” à teoria da relatividade geral

IFQR 2005-2006

- A TRG prevê a deformação do tempo e do espaço na presença de corpos maciços, antevendo, por exemplo, que **a Terra arrasta espaço-tempo ao seu redor enquanto roda: arrastamento dos referenciais inerciais.**
 - Em Abril de 2004, a NASA lançou o satélite “**Gravity Probe-B (GP-B)**”, equipado com quatro giroscópios sofisticados, que compõem um sistema de referência espaço-temporal quase perfeito (referenciais inerciais). Se a previsão de arrastamento do tempo e do espaço estiver correcta **os giroscópios sofram uma alteração no alinhamento de seus eixos.**
 - **Primeiras evidências:** parece que um grupo de investigadores da NASA mediu os deslocamentos das órbitas de dois satélites geostacionários devido ao arrastamento do espaço-tempo pela Terra. Aguarda-se a confirmação como **Gravity Probe-B (GP-B).**
 - Ver http://einstein.stanford.edu/content/fact_sheet/GPB_FactSheet-0405.pdf
- A teoria da relatividade geral de Einstein propõe que “o espaço deve ser curvo para produzir os «caminhos orbitais» e acelerações equivalentes”
Em 1960, Leonard Schiff e os colegas propuseram uma experiência com uma “giroscópio relativista” para testar a teoria de Einstein.

Requisitos da GP-B: 1) “Build a perfect straight line that can orbit the Earth stably; 2) Align it with a distant star; 3) Protect it from all forces, except for “gravity” (or curved spacetime); 4) Watch it very carefully for one year”.



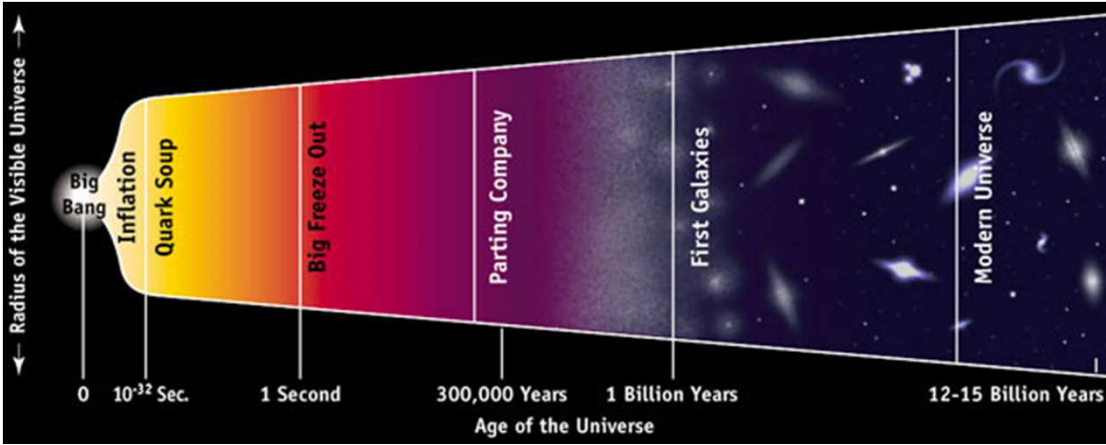
José Figueiredo

21-03-2006

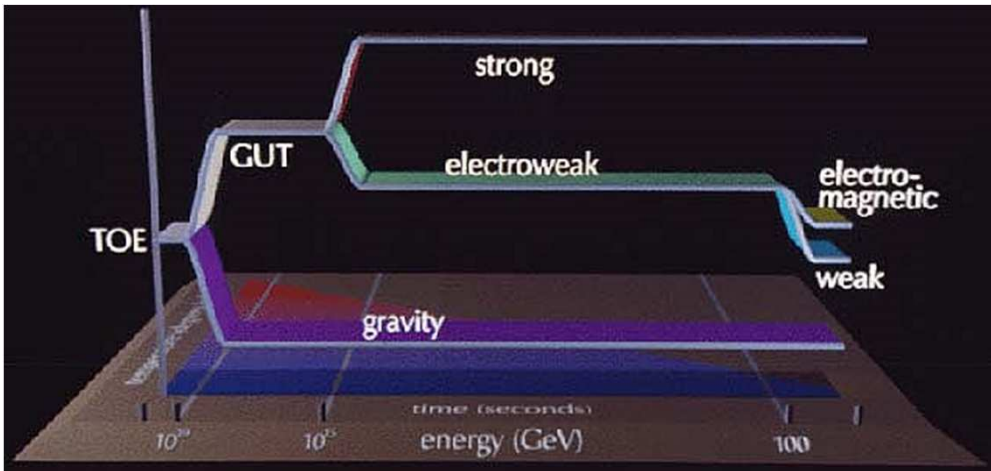
JF, DF-FCT-ULAG

O modelo do "big bang": novas evidências

IFQR 2005-2006

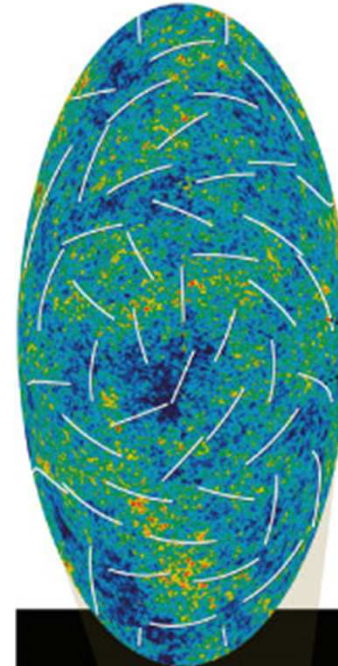


Ondas gravitacionais



José Figueiredo

21-03-2006



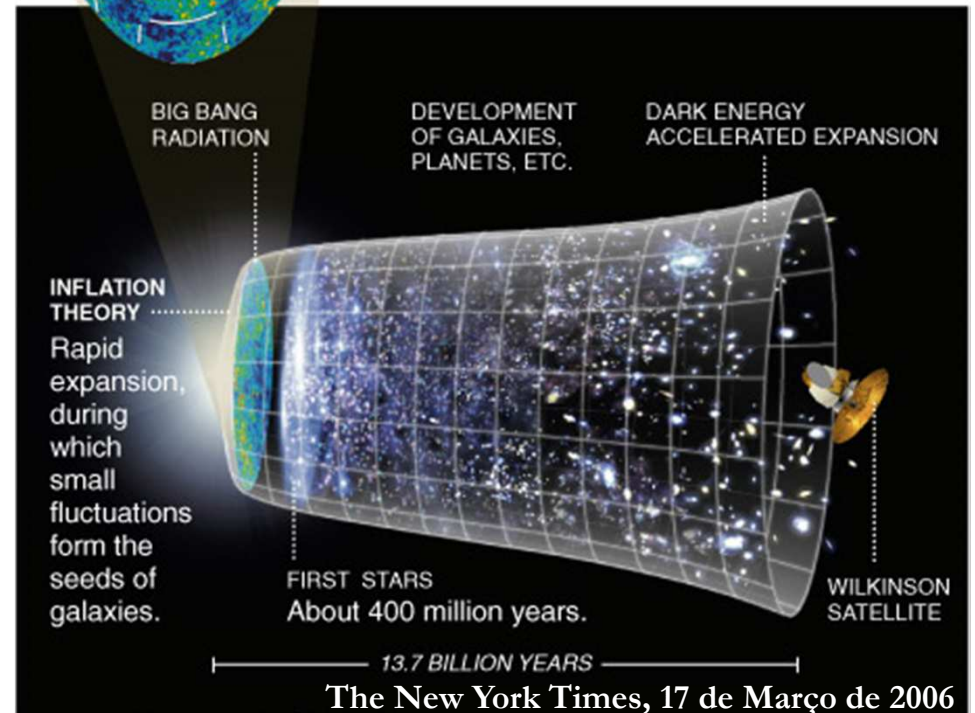
New Evidence

By measuring patterns in the polarization of the radiation from the Big Bang (map at left), astronomers were able to refine their measurements of the infant universe. They found strong evidence that the universe had undergone a violent growth spurt in the first trillionth of a second of time.

PATTERNS OF POLARIZATION
Direction of light vibration.

A Big Bang Timeline

Astronomers are now able to more accurately calculate a timeline for major events in the formation of the early universe.



The New York Times, 17 de Março de 2006

Sources: NASA; Johns Hopkins University

The New York Times

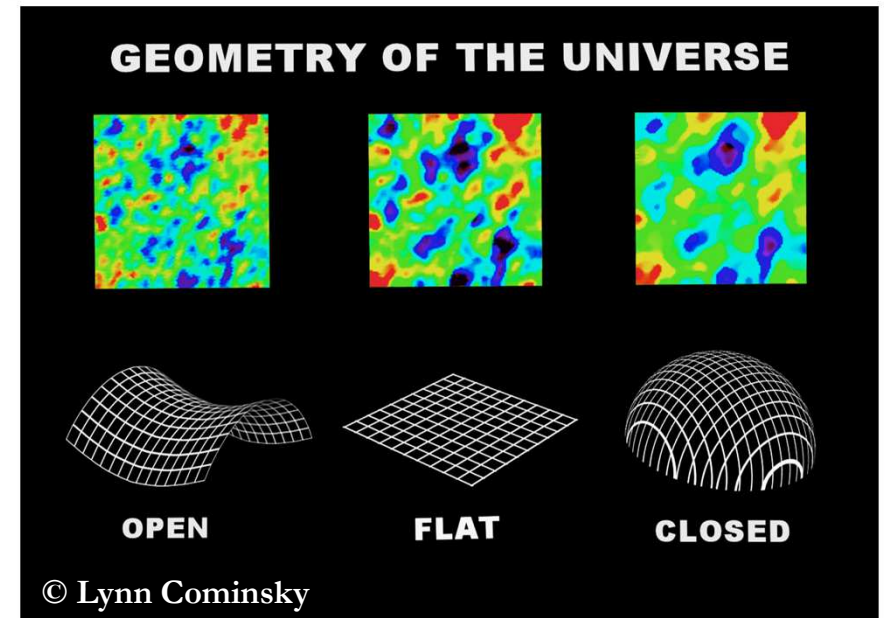
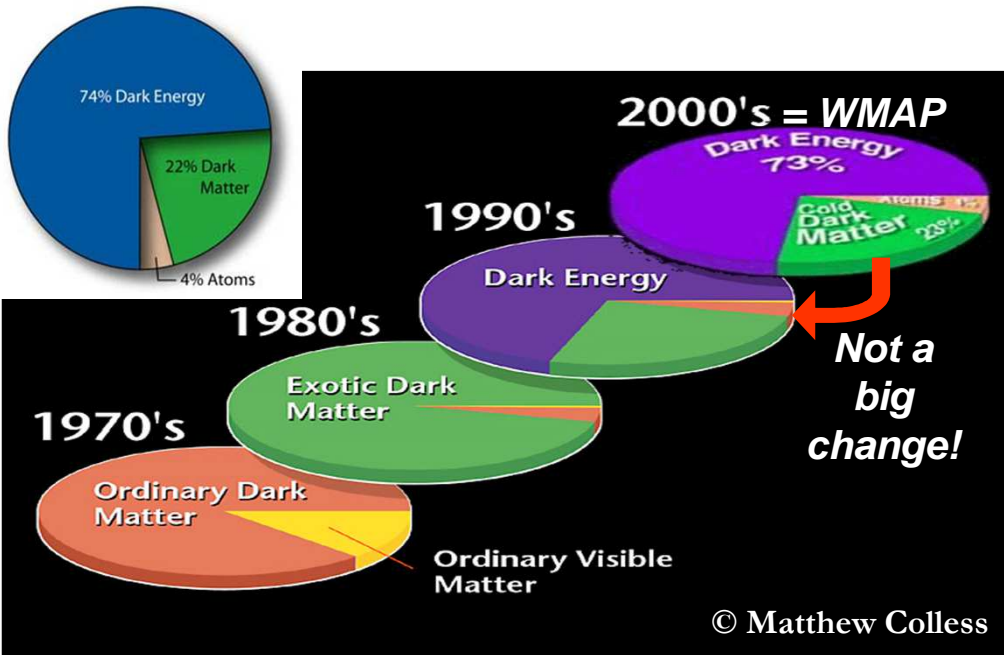
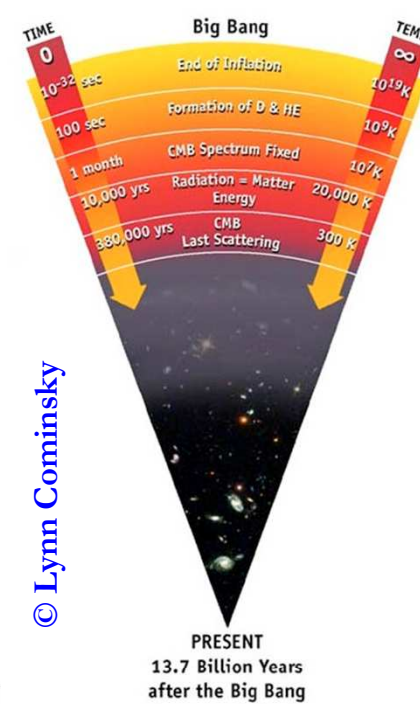
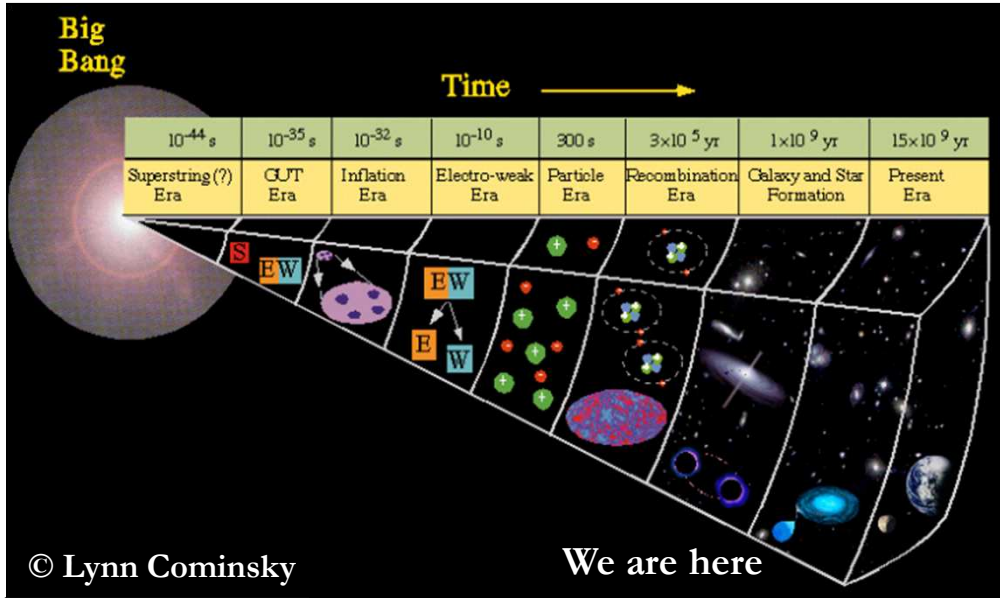
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/ensino.htm>

JF, DF-FCT-ULAG

45

Universo: estado actual de conhecimento e “especulação”

IFQR 2005-2006



José Figueiredo

http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr2/map_bibliography.cfm
<http://crd.lbl.gov/~borrill/cmb/planck/AAS2006PlanckPoster.html>
 21-03-2006

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/ensino.htm>

JF, DF-FCT-ULAG

Universo: estado actual de conhecimento e “especulação” (2)

- O universo evoluiu a partir de um estado mais denso e mais “quente”. (Convincente evidência obtida de muitas partes da Astronomia e da Física)
- O Universo expande-se conforme prevê a TRG. (Passa nos testes, mas poucos foram suficientemente rigorosos)
- A matéria escura composta por «partículas» *exóticas* domina as galáxias. (Muitas evidências indirectas, mas não foram ainda encontradas, havendo teorias concorrentes.)
- A maior parte da massa do Universo está regularmente distribuída – parece agir como constante cosmológica de Einstein, parecendo acelerar a expansão do Universo. (Está em acordo com observações, mas existem muitos *enigmas* teóricos.)
- O Universo desenvolveu-se a partir da inflação. (teoria elegante, há «espera» de evidências directas, exigindo muita extrapolação das leis da Física)
- Parece que as primeiras estrelas do Universo eram muitas vezes mais densas e luminosas que o Sol (100 a 1000 massas solares; 4 a 14 vezes o raio do Sol; 1 milhão a 30 milhões mais luminosas; temperatura na superfície: ~100 000 K; tempo de vida: 3 milhões de anos – Sol: 10 mil milhões de anos).
- Verifica-se que 25% das supernovas distantes são mais «fracas» do que se havia previsto, o que parece indicar que a expansão do espaço está acelerando – evidência de uma nova forma de energia.
- Os mapas recentes da radiação cósmica de fundo (inflação) parecem indicar que o Universo é plano e está preenchido por matéria escura.
- Se o Universo se expandiu mais lentamente no passado, como sugerem as supernovas distantes, o Universo é mais “velho” do que se pensava.
- A maior parte da matéria parece ser formada por matéria escura, cuja origem é desconhecida. Se for confirmada a constante cosmológica, poderá corresponder a uma forma de energia escura em escalas cosmológicas.
- O espaço parece ser preenchido por partículas virtuais fugazes. (Ver efeito de Casimir.) Parece que o Universo foi, recentemente, dominado por um campo de energia invisível, que está a provocar a aceleração da expansão – a quinta essência (campo quântico)).
- Um quantum de energia exerce uma *força gravitacional* atractiva ou repulsiva dependendo da sua pressão: se a pressão for zero ou positiva – matéria e radiação convencional – *força da gravidade* é atractiva. A quinta essência parece ter pressão negativa, sendo a sua força gravitacional repulsiva.
- A lei da gravidade de Newton, a força de atracção entre duas massa diminui com o inverso do quadrado da distância entre elas, tem sido testada para distâncias macroscópicas, funcionando bem até distâncias da ordem de 1 mm. Estudos da gravidade actuando sobre distâncias inferiores a 1 mm, podem revelar dimensões extra. Várias experiências estão em preparação. Estas dimensões reforçariam a produção dos objectos bizarros da gravidade quântica, como os micro-buracos negros, gravitões e supercordas, que poderão ser detectados, caso existam.
- O Large Hadron Collider permitirá *sondar* energias de TeV, esperando-se que ajude a desvendar a natureza da gravidade quântica (cordas, laços, etc.)
- A sonda Microwave Anisotropy Probe proporciona uma imagem mais detalhada do Universo primordial.
- O grande mistério para os cosmólogos é a série de eventos que ocorreram menos de um milésimo de segundo após o Big Bang. Talvez o Big Bang não tenha sido único. Podem existir muitos Universos.
- Detectar uma onda gravitacional é como observar que Saturno se aproximou do Sol de uma distância equivalente ao diâmetro do átomo de hidrogénio.
- Plano B para os cosmos: Varying-Speed-of-Light theory (VSL) – se a nova cosmologia falhar ...
- Ondas da inflação, padrões de polarização da radiação cósmica de fundo.

Bibliografia

- *Teoria da Relatividade Especial*, Ramayana Gazzinelli, Editora Edgard Blücher, Brasil 2005.
- *Subtil é o senhor - Vida e pensamento de Albert Einstein*, A. Pais, Gradiva 1993.
- *O Princípio da Relatividade*, H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowsky (Tradução do original alemão pelo Prof. Manuel dos Reis), Fundação Calouste Gulbenkian, 1971.
- *Tempo & Espaço*, Visual Ciências, Verbo, 1994.
- *O passado e o presente do Cosmos*, Scientific America Brasil, Edição especial nº1, 2003.
- *O Annus Mirabilis de Einstein - cinco artigos que revolucionaram a Física*, John Stachel, Gradiva, 2005.
- *Modern Physics*, P. A. Tripler and R. A. Llewellyn, W. H. Freeman and Company, 2002.
- *Physics for Scientists & Engineers (Physics for Scientists & Engineers With Modern Physics)* by Raymond A. Serway, Brooks/Cole Publishing Company 1999.
- *Física*, G. Gerthsen, Kneser, H, Vogel, Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.

Black Hole Merger Movie: <http://www.aip.org/png/2006/256.htm>
The Lazarus Project: http://www.phys.utb.edu/numrel/research_dir/lazarus.html
http://pt.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1gina_principal