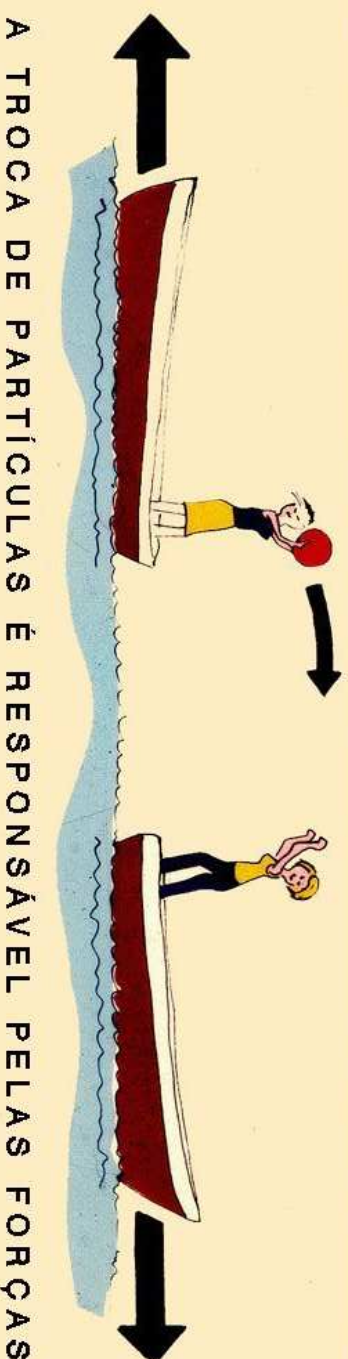


Física Moderna

Interações fundamentais no Universo

AS FORÇAS NA NATUREZA			
TIPO	INTENSIDADE RELATIVA	PARTÍCULA INTERMEDIADORA	EXEMPLOS
FORÇA NUCLEAR FORTE	1	GLUÕES (SEM MASSA)	NÚCLEOS ATÔMICOS
FORÇA ELECTROMAGNÉTICA	$\sim \frac{1}{1000}$	FOTÕES (SEM MASSA)	ÁTOMOS ELECTRICIDADE
FORÇA NUCLEAR FRACA	$\sim \frac{1}{1000000}$	BOSÕES Z^0, W^+, W^- (PESADOS)	DECAIMENTO BETA
GRAVITAÇÃO	$\sim 10^{-38}$	?	CORPOS COM MASSA



The Forces

Four



. . . . or one ?

The forces of nature between matter particles (quarks and leptons) arise from the exchange of other force-carrying particles called bosons. If a boson is emitted by one quark or lepton and is absorbed by another, then there is a force between the two.

Force	Boson	Source	Relative strength*	Range
gravity	graviton	mass	10^{-38}	infinite
weak	W^+, W^-, Z	weak charge	10^{-6}	10^{-18} m
electromagnetism	photon	charge	10^{-2}	infinite
strong	gluons	colour	1	10^{-16} m

* reference

Gravity

The weakest force, but responsible for the attraction between astronomical objects. The graviton has not been observed. Felt by all particles.

Weak

Responsible for radioactive β decay. The force carriers (W^+, Z bosons) have mass and were discovered at CERN in 1983-4. Felt by all matter particles.

The weak force and electromagnetism are different manifestations of the electroweak force. The mathematical theory of this force predicts the existence of the Higgs boson, responsible for the mass of all objects.

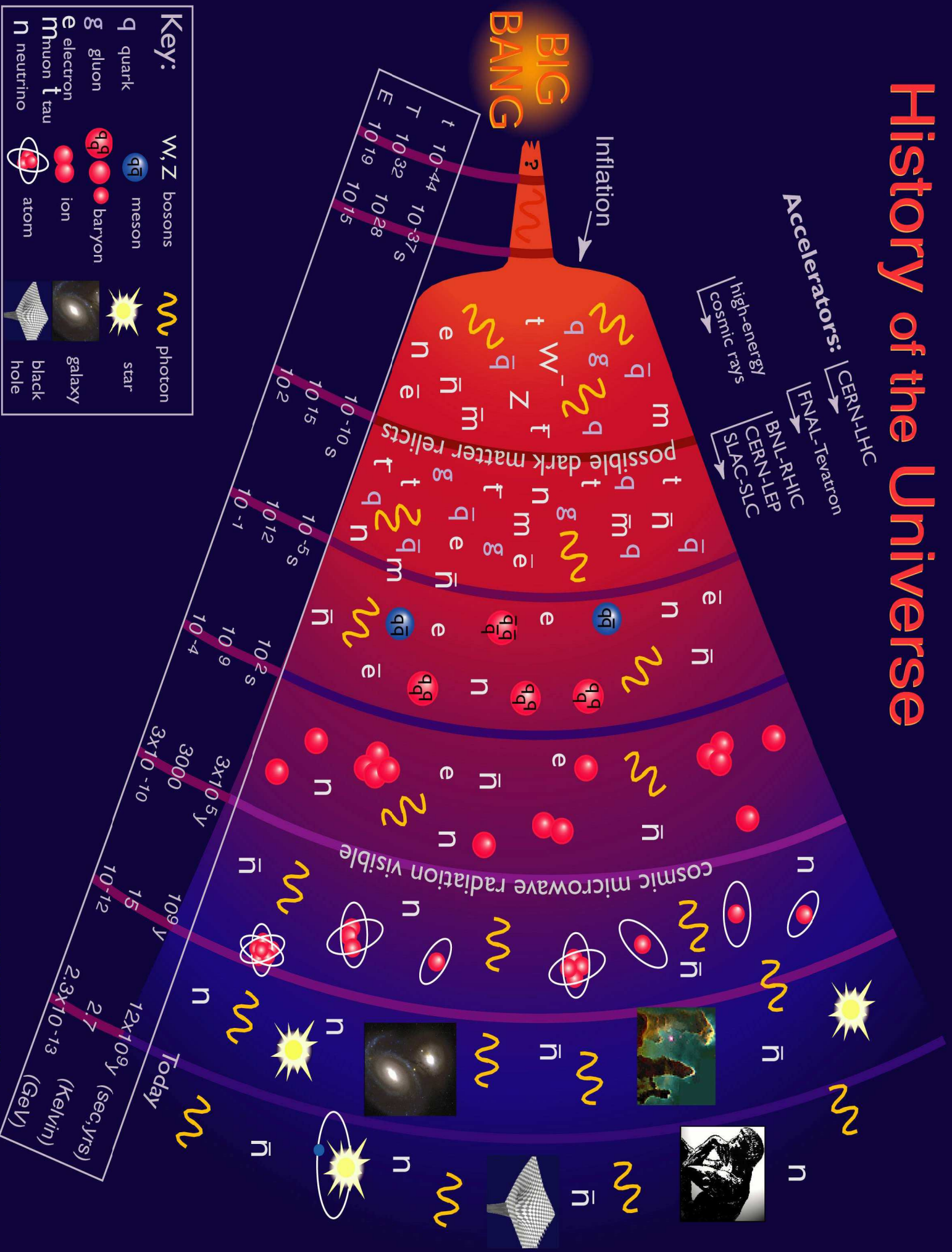
Strong

Felt by quarks only, this force also holds nuclei together. There are eight different types of gluons carrying different combinations of colour.

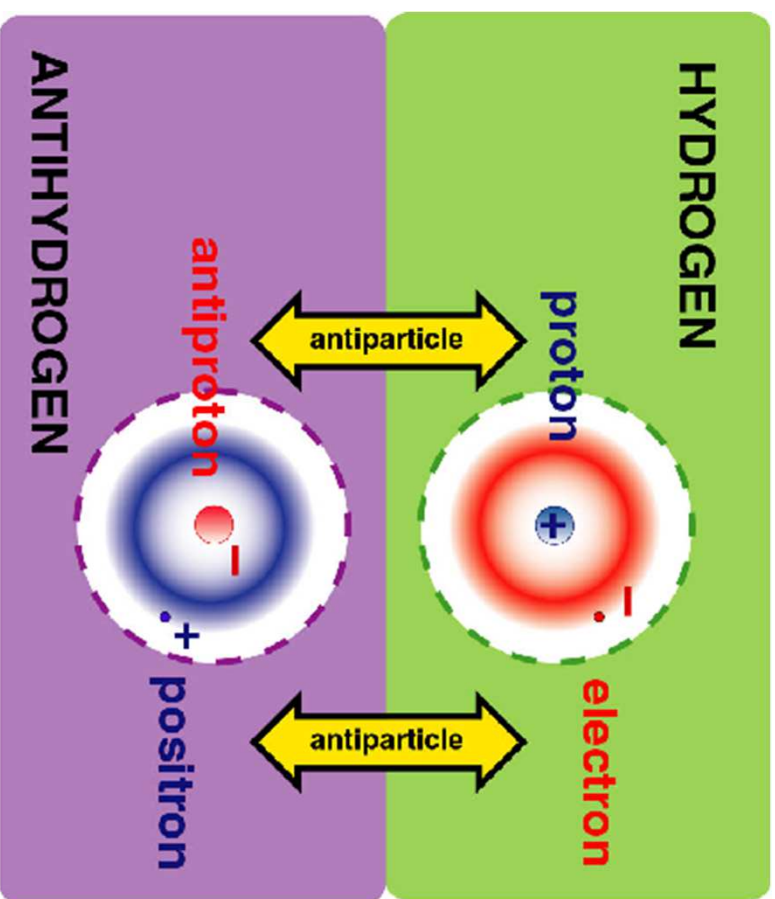
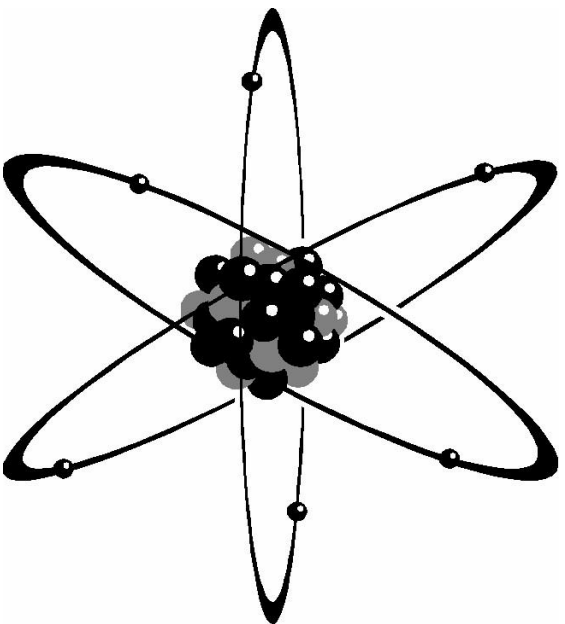
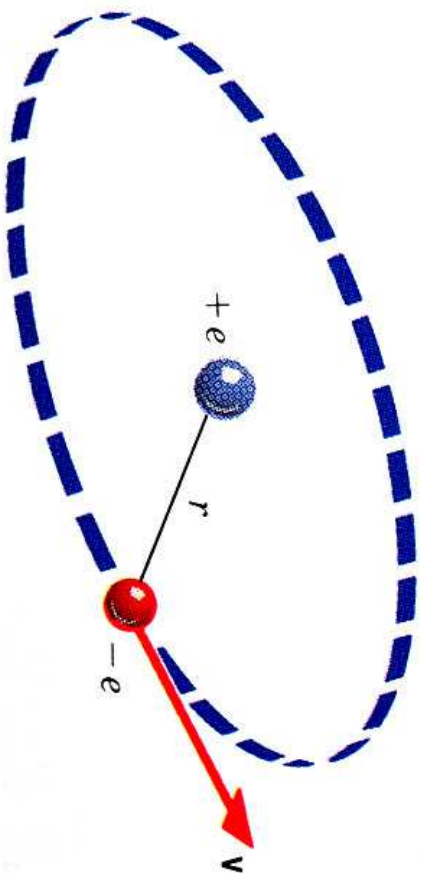
Electromagnetism

Holds atoms together and plays a major role in everyday life. The force carrier is the familiar photon. Electricity and magnetism are simply different manifestations of this force. Felt by all particles except neutrinos, which are uncharged.

History of the Universe



Matéria e anti-matéria



The Higgs Boson

What is mass?

We still do not understand what mass is and why the quarks and leptons have different masses. Our current best idea is that a "Higgs field" fills the universe and mass is a measure of the resistance to movement through this field.



1. **Procedural** The administrative changes that run through the accounts department in the company are described in the procedure.

Reprint of 1990 by David L. Katz, University of Illinois, Urbana, IL

Explanation for mass

This explanation for mass was developed in the 1960s by a number of physicists, including Peter Higgs, now Emeritus Professor at the University of Edinburgh, whose name has been associated with the idea.



Many searches have been made for the Higgs boson; the most detailed were using the LEP accelerator at CERN during the 1990s. Indirect evidence suggests it has a mass lower than 200 GeV/c² and direct searches show that its mass is above 110 GeV/c².

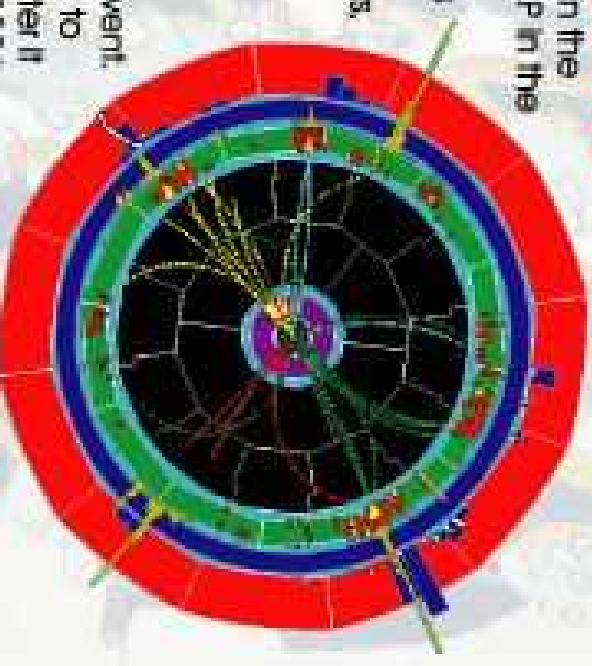
In 2000, physicists at LEP may have glimpsed the first hint of a Higgs boson signal: a few events consistent with a mass of 115 GeV/c² were observed.

Possible evidence

for the Higgs boson in the ALEPH detector at LEP in the reaction $e^+e^- \rightarrow HZ$.

The Higgs boson has decayed into the green and yellow jets, the Z boson to the red and blue jets. It is also possible,

however, that other processes could be responsible for this event. The LHC is expected to resolve the puzzle after it begins operation in 2006.



Interacções relevantes à escola humana

- **Gravitacional**
- **Electromagnética**



file:///D:/w3dev_06-08-2011-pode-sepagar/hhonda-ad-300k.swf

ordens de magnitude

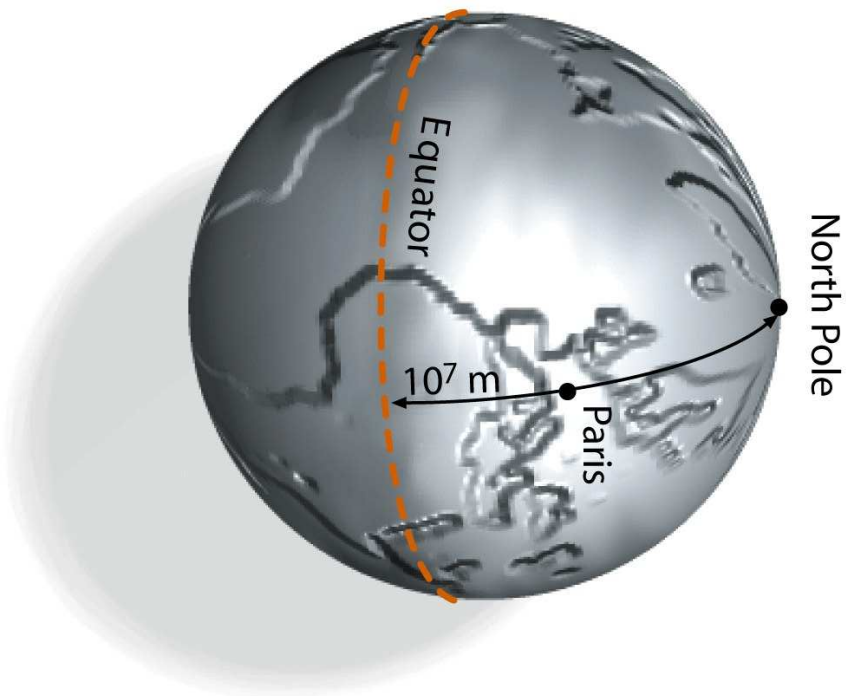


TABLE 1-1

Prefixes for Powers of $10^{\dagger}$

Multiple	Prefix	Abbreviation
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10^1	deka	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

[†] The prefixes hecto (h), deka (da), and deci (d) are not multiples of 10^3 or 10^{-3} and are rarely used. The other prefix that is not a multiple of 10^3 or 10^{-3} is centi (c). The prefixes frequently used in this book are printed in red. Note that all prefix abbreviations for multiples 10^6 and higher are uppercase letters; all others are lowercase letters.

TABLE 1-3

The Universe by Orders of Magnitude

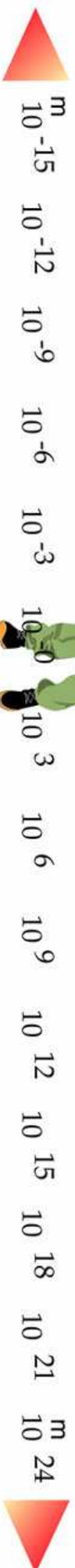
Size or Distance	(m)	Mass	(kg)	Time Interval	(s)
Proton	10^{-15}	Electron	10^{-30}	Time for light to cross nucleus	10^{-23}
Atom	10^{-10}	Proton	10^{-27}	Period of visible light radiation	10^{-15}
Virus	10^{-7}	Amino acid	10^{-25}	Period of microwaves	10^{-10}
Giant amoeba	10^{-4}	Hemoglobin	10^{-22}	Half-life of muon	10^{-6}
Walnut	10^{-2}	Flu virus	10^{-19}	Period of highest audible sound	10^{-4}
Human being	10^0	Giant amoeba	10^{-8}	Period of human heartbeat	10^0
Highest mountain	10^4	Raindrop	10^{-6}	Half-life of free neutron	10^3
Earth	10^7	Ant	10^{-4}	Period of earth's rotation	10^5
Sun	10^9	Human being	10^2	Period of earth's revolution around sun	10^7
Distance from earth to sun	10^{11}	Saturn V rocket	10^6	Lifetime of human being	10^9
Solar system	10^{13}	Pyramid	10^{10}	Half-life of plutonium-239	10^{12}
Distance to nearest star	10^{16}	Earth	10^{24}	Lifetime of mountain range	10^{15}
Milky Way galaxy	10^{21}	Sun	10^{30}	Age of earth	10^{17}
Visible universe	10^{26}	Milky Way galaxy	10^{41}	Age of universe	10^{18}
		Universe	10^{52}		

La physique des particules étudie la matière dans ses dimensions les plus petites.

Particle physics looks at matter in its smallest dimensions.

L'astrophysique étudie la matière dans ses dimensions les plus grandes.

Astrophysics looks at matter in its largest dimensions.



Microscopes
Microscopes

Jumelles
Binoculars

Telescopes optiques & radio
Optical & radio telescopes

Accélérateurs
et détecteurs
Accelerators
and detectors

L'oeil nu.
Naked eye

THE TWO FRONTIERS OF PHYSICS

LES DEUX FRONTIERES DE LA PHYSIQUE

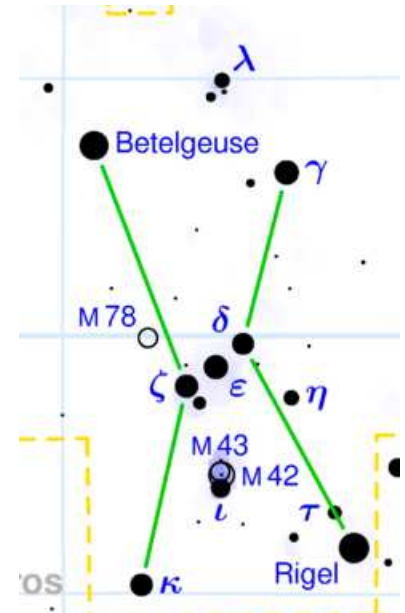
A constelação de Órion (o caçador)

A constelação de Órion é bastante fácil de ser identificada, pois nela estão as Três Marias, formando o cinturão do gigantesco caçador.

Olho nu



Telescópio



[http://pt.wikipedia.org/wiki/Orion \(constela%C3%A7%C3%A3o\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Orion_(constela%C3%A7%C3%A3o))

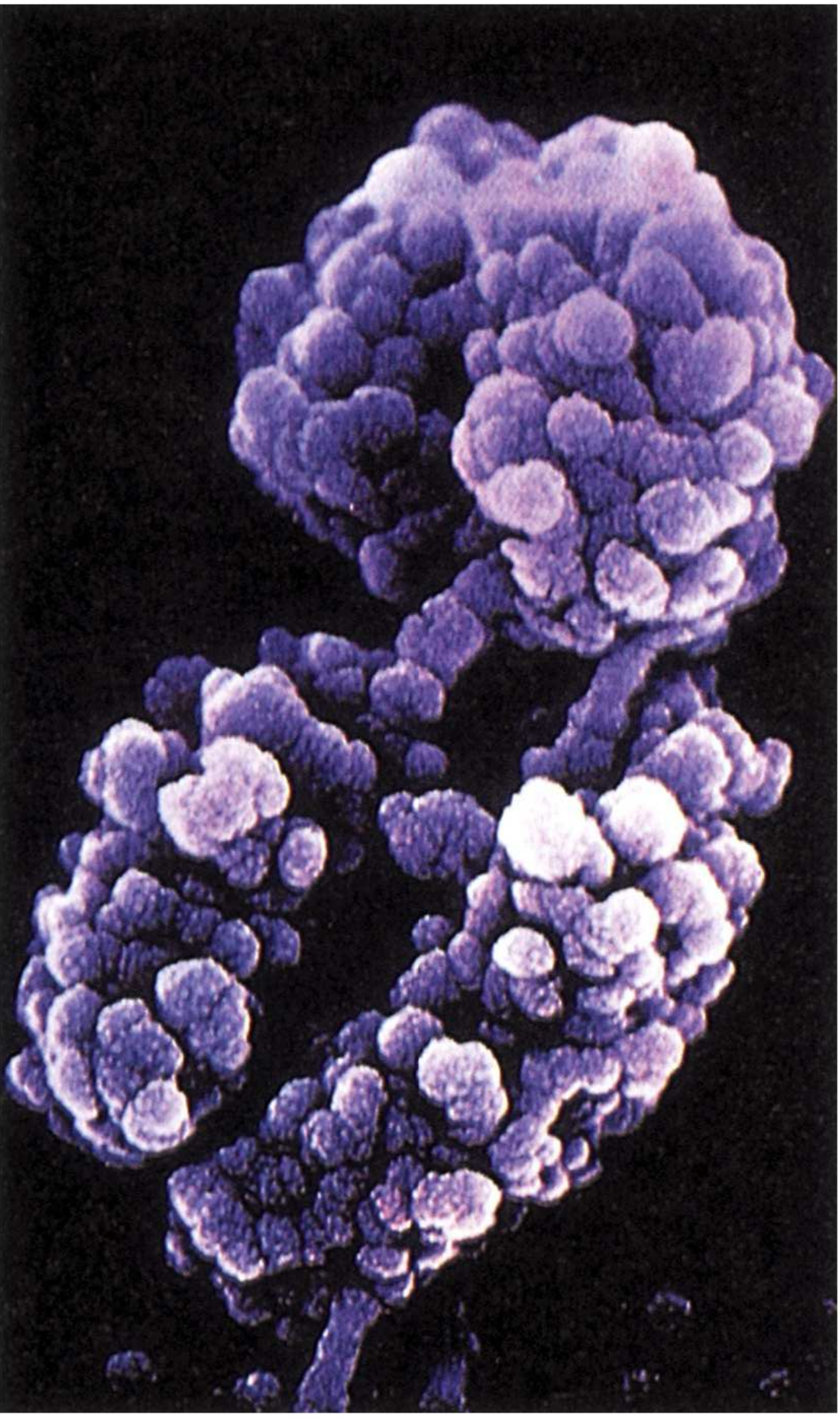
2011-2012



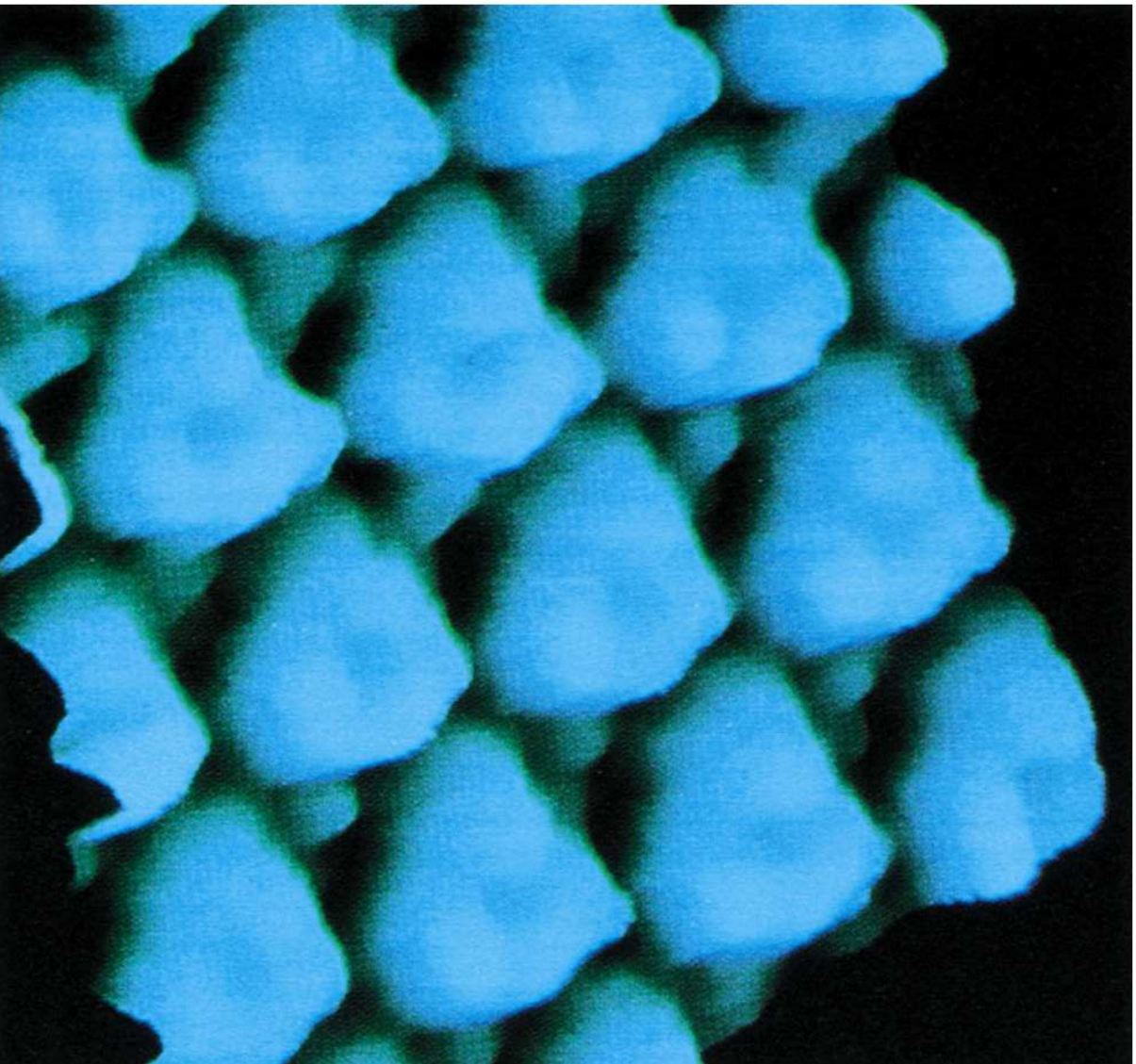




Algumas células (μm)



Alguns átomos (nm)



O átomo

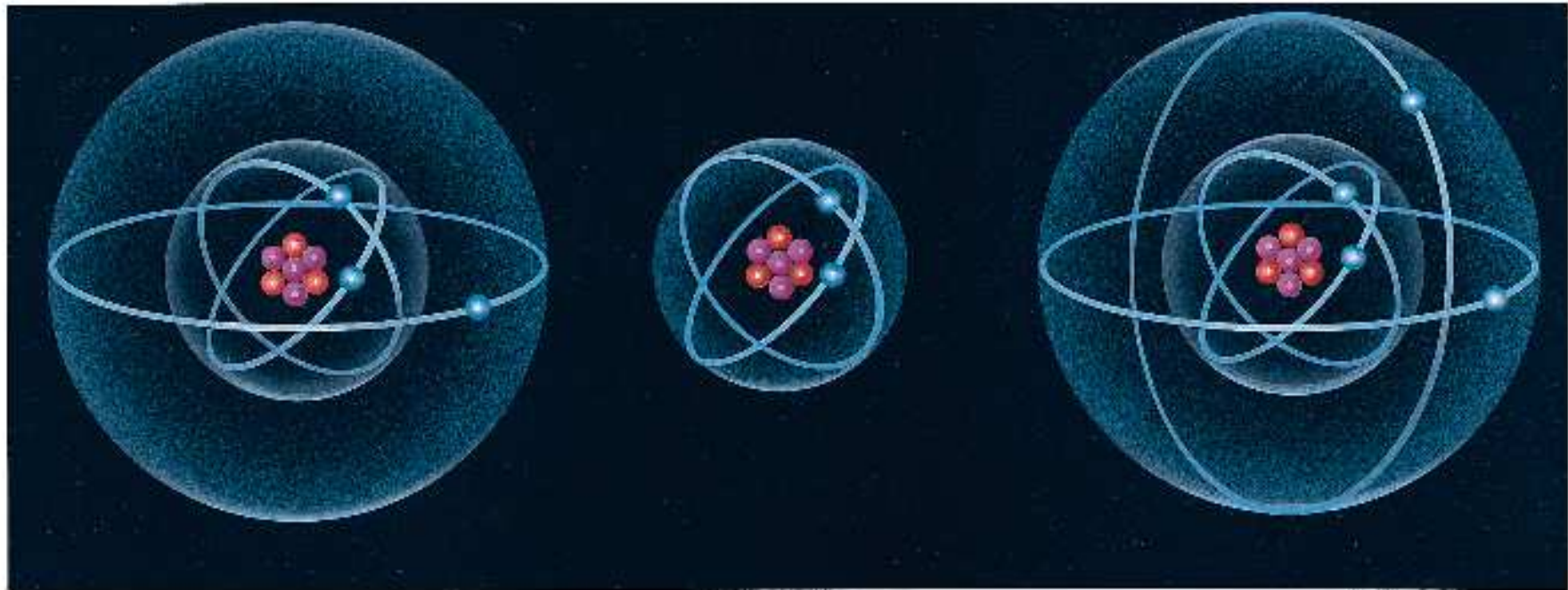


Estrutura atómica

Átomo lítio: electricamente neutro 3 protões e 3 electrões.

Catião Li: falta um electrão – carga efectiva é positiva.

Anião Li: tem um electrão a mais – carga efectiva negativa.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Lítio (quím.) elemento n.º 3 da classificação periódica, que é um metal alcalino, branco e pouco denso, utilizado em várias ligas para aumentar a rigidez e a resistência à corrosão. (Do gr. líthos, «pedra» + -io).

Revisões de eletromagnetismo

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-eo.html>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EeO-MIEET-LF-2008-2009-1a-f.swf>

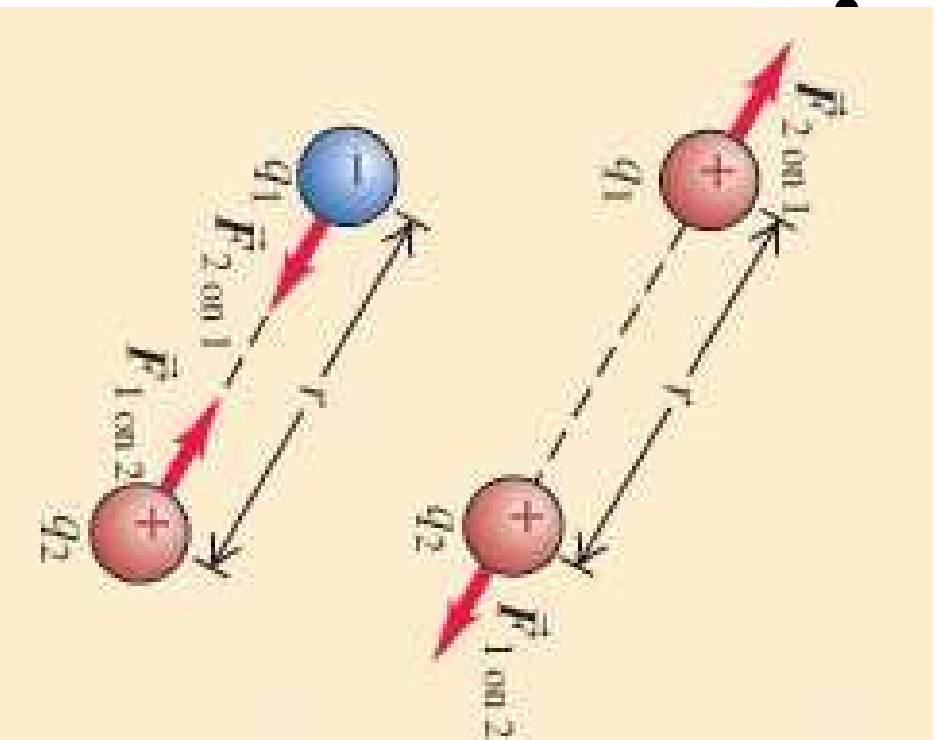
Lei de Coulomb

Electrostática s. f. estudo das propriedades das cargas eléctricas em repouso.
(De electro- + estático)

Lei de Coulomb



Charles Coulomb
1736-1806



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

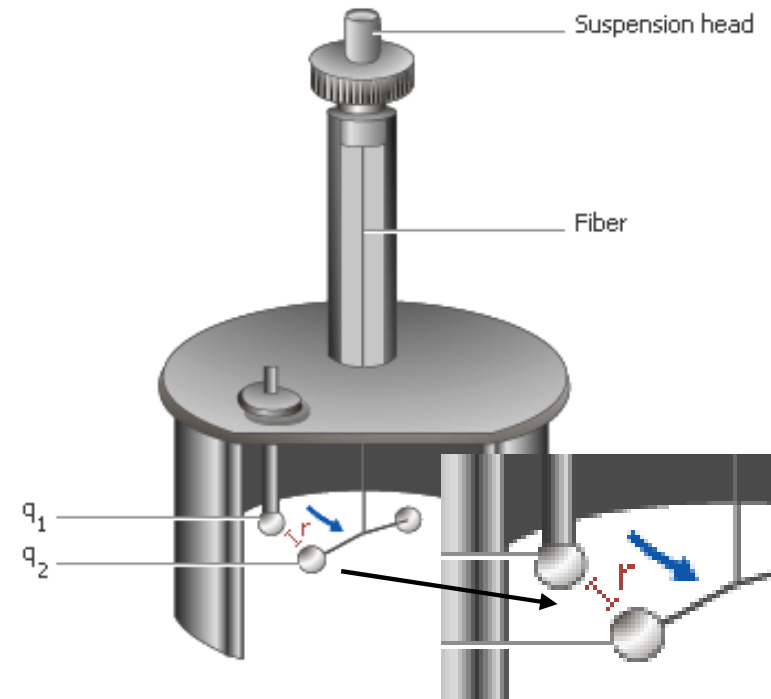
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

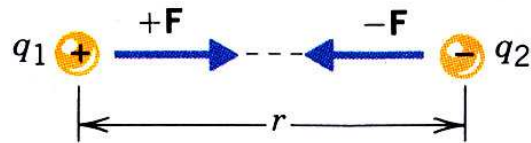
$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

Lei de Coulomb (2)

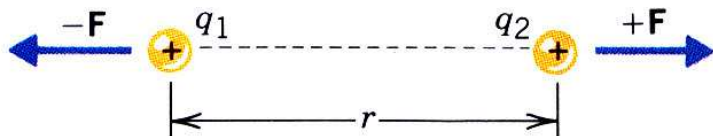
Balança de torção de Coulomb



As forças são simétricas e com a mesma linha de acção. O módulo da força eléctrica é directamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas:



(a)



(b)

$$|\vec{F}_{\text{eléctrica}}| = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

Força eléctrica versus força gravítica

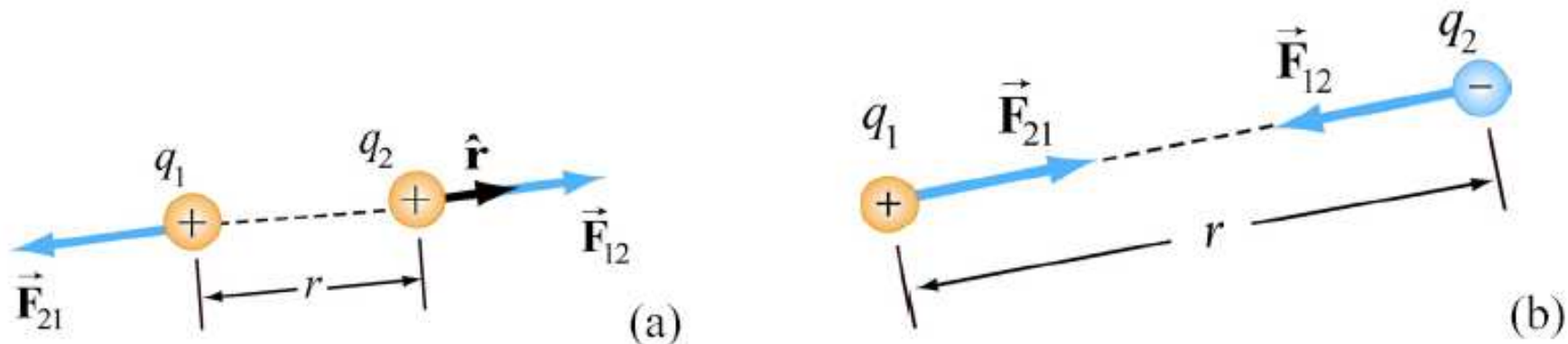


Figure 2.2.1 Coulomb interaction between two charges

$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi(8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

Força eléctrica que actua no electrão do átomo de hidrogénio

$$F_e = k_e e^2 / r^2 = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$F_g \approx 3.6 \times 10^{-47} \text{ N} \quad F_e / F_g \sim ? \quad (2.28 \times 10^{39})$$

Razão força eléctrica/gravítica
que actua no electrão numa
partícula alfa

$$F_e / F_g \sim 3.3 \times 10^{35}$$

Lei de Coulomb e o princípio de sobreposição

- A lei de Coulomb permite calcular a força exercida numa carga por muitas cargas. Para obter a força total que actua na carga em questão, calcula-se a força que cada uma das outras cargas exerce nela como se as outras não estivessem presentes. A força total corresponde à soma vectorial de todas as forças (**princípio de sobreposição**).

For a system of N charges, the net force experienced by the j th particle would be

$$\vec{\mathbf{F}}_j = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \vec{\mathbf{F}}_{ij} \quad (2.3.2)$$

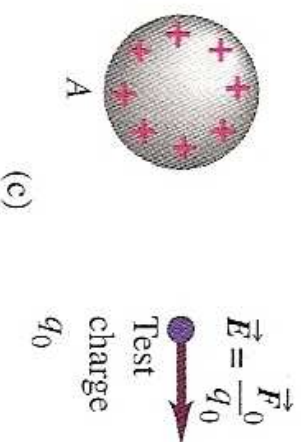
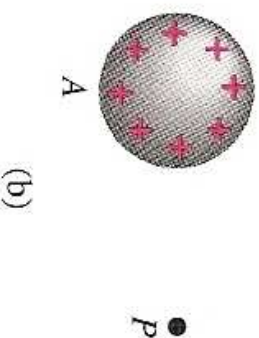
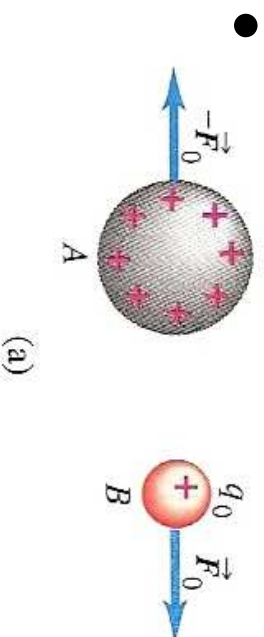
where $\vec{\mathbf{F}}_{ij}$ denotes the force between particles i and j . The superposition principle implies that the net force between any two charges is independent of the presence of other charges. This is true if the charges are in fixed positions.

Campo eléctrico

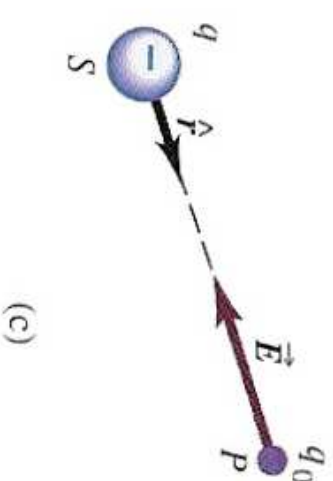
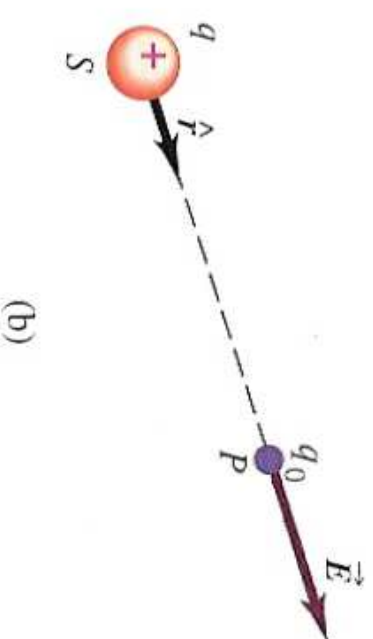
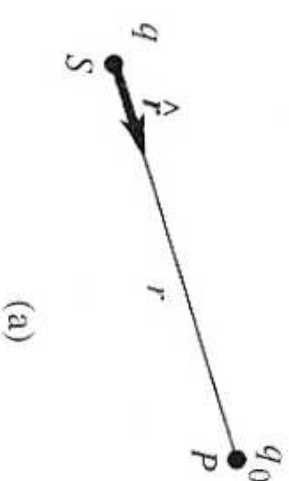
Um **campo eléctrico** é o campo de forças provocado por cargas eléctricas (electrões, protões ou iões) ou por um sistema de cargas.

Cargas eléctricas numa região do espaço onde existe um campo eléctrico estão sujeitas a uma força eléctrica.

Campo eléctrico



22-10 A charged body creates an electric field in the space around it.



Campo eléctrico (2)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{eléctrica}}}{q_0}$$

Força eléctrica que a(s) carga(s) criadora exerce na carga de prova

Carga de prova

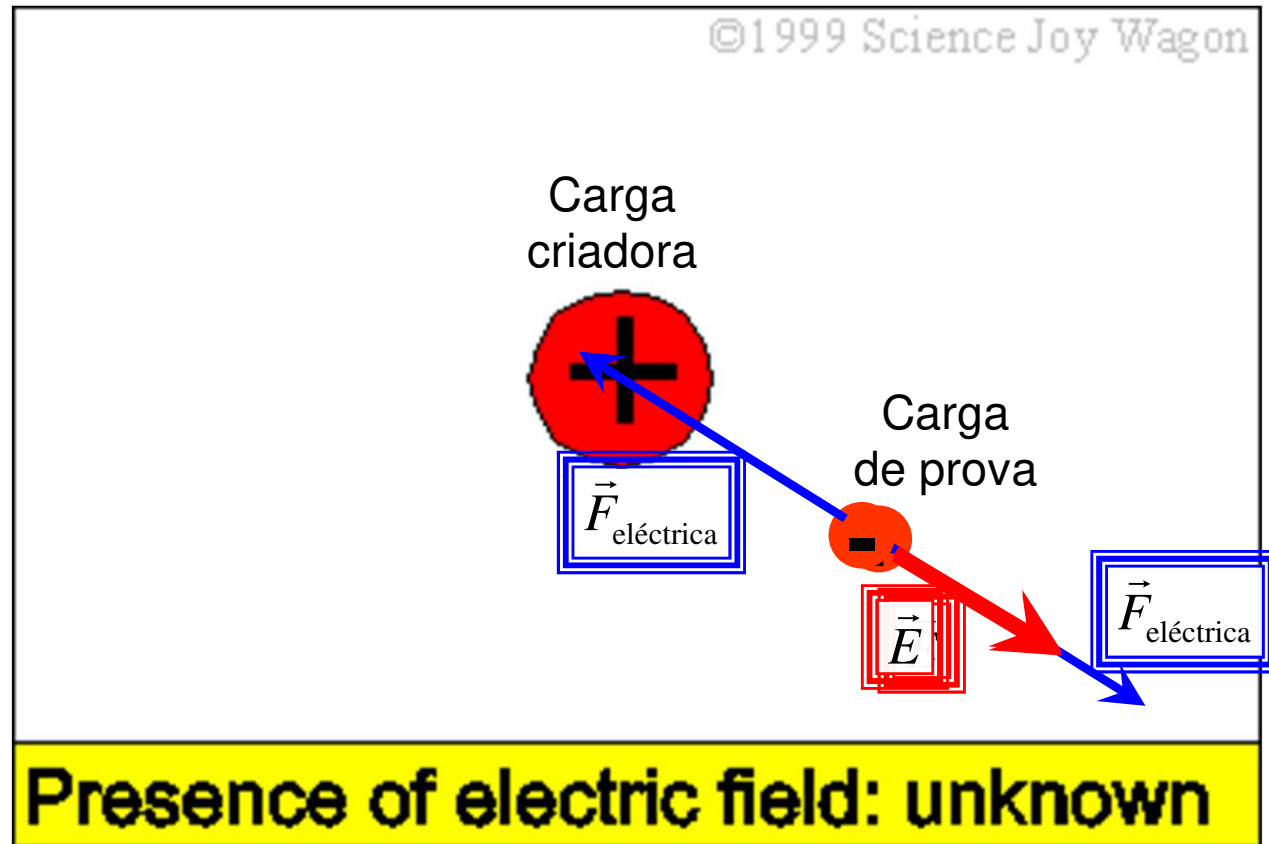
Unidade S.I.: N C^{-1} ou V m^{-1}

CAMPO ELÉCTRICO

Intensidade: força eléctrica exercida por unidade de carga de prova (1 Coulomb)

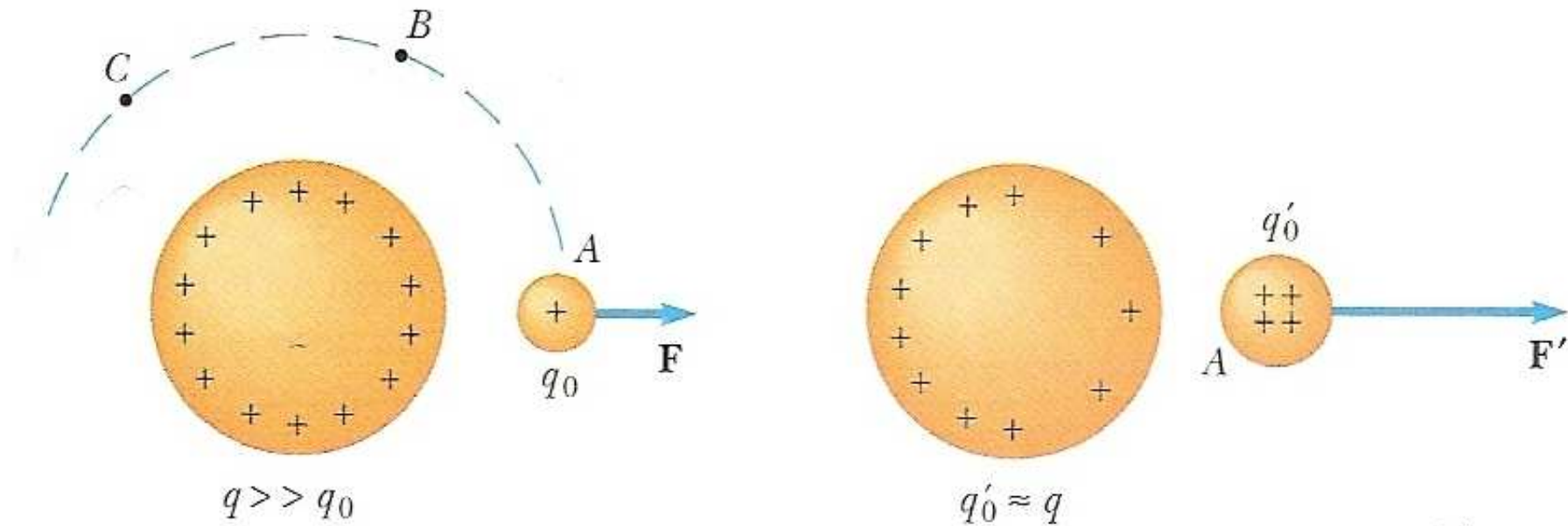
Direcção: a da força eléctrica

Sentido: o da força eléctrica exercida sobre cargas de prova positivas



<http://www.scribd.com/doc/2203403/Electrostatica-e-campo-electrico>

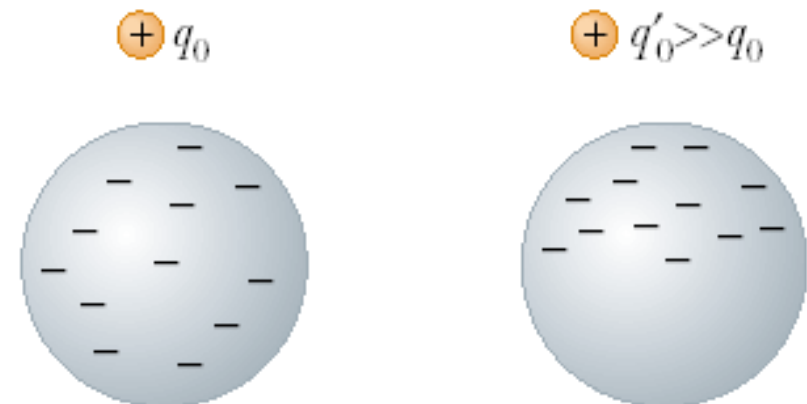
Campo eléctrico – carga de prova



Na definição de E porque é que q_0 deve tender para zero?

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$

$$\vec{g} = \lim_{m_0 \rightarrow 0} \vec{F}_m / m_0$$



Campo eléctrico (3)

An electric charge q produces an electric field everywhere. To quantify the strength of the field created by that charge, we can measure the force a positive “test charge” q_0 experiences at some point. The electric field $\vec{E}$ is defined as:

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_e}{q_0} \quad (2.4.1)$$

We take q_0 to be infinitesimally small so that the field q_0 generates does not disturb the “source charges.” The analogy between the electric field and the gravitational field $\vec{g} = \lim_{m_0 \rightarrow 0} \vec{F}_m / m_0$ is depicted in Figure 2.4.1.

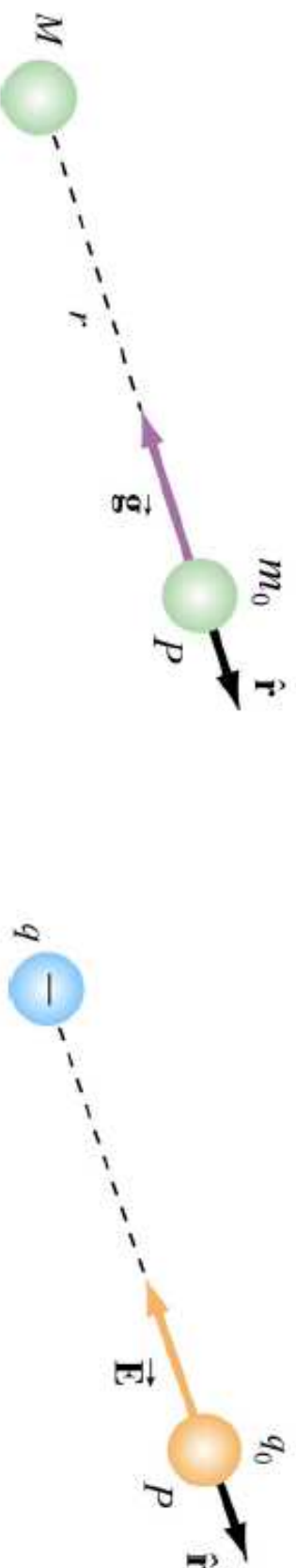


Figure 2.4.1 Analogy between the gravitational field $\vec{g}$ and the electric field $\vec{E}$.

Valores típicos de intensidade de E

Typical Electric Field Values

Source

E (N/C)

Fluorescent lighting tube

10

Atmosphere (fair weather)

100

Balloon rubbed on hair

1 000

Atmosphere (under thundercloud)

10 000

Photocopier

100 000

Spark in air

$>3\,000\,000$

Near electron in hydrogen atom

5×10^{11}

Campo eléctrico E à superfície da Terra: 100 N/C.

Troposfera: 150 N/C.

Disrupção do ar seco: 3 000 000 N/C.

Luz solar: 1000 N/C

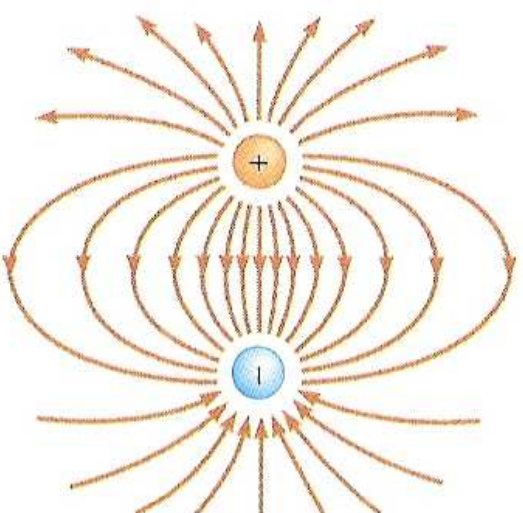
Laser: 10^{11} N/C.



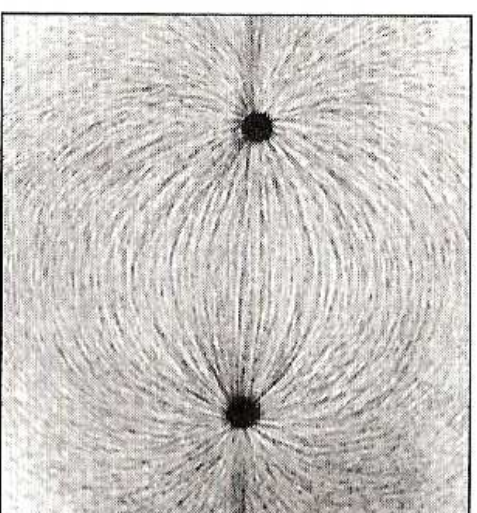
Um tubarão pode detectar campos eléctricos fraquíssimos produzidos pelos músculos da sua presa: 10^{-6} N/C.

Disrupção s. f. (electr.) salto de uma faísca entre dois corpos carregados de electricidade (Do lat. *disruptióne-, por disruptióne-, «rotura»).

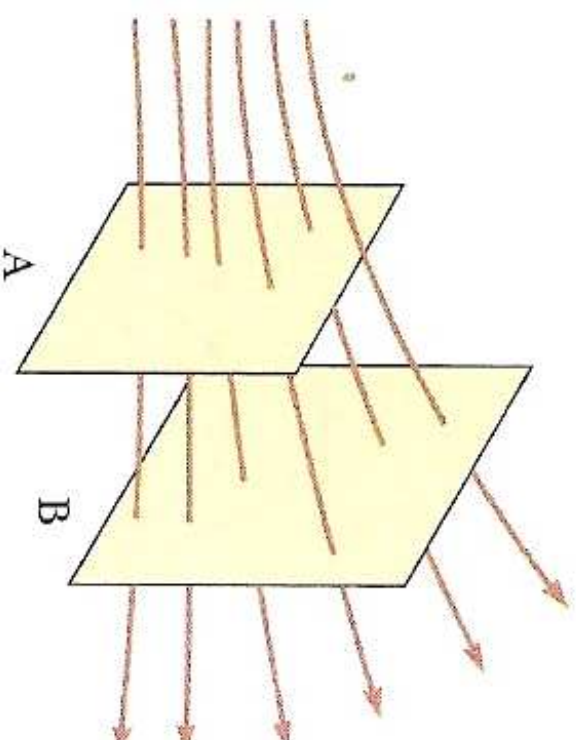
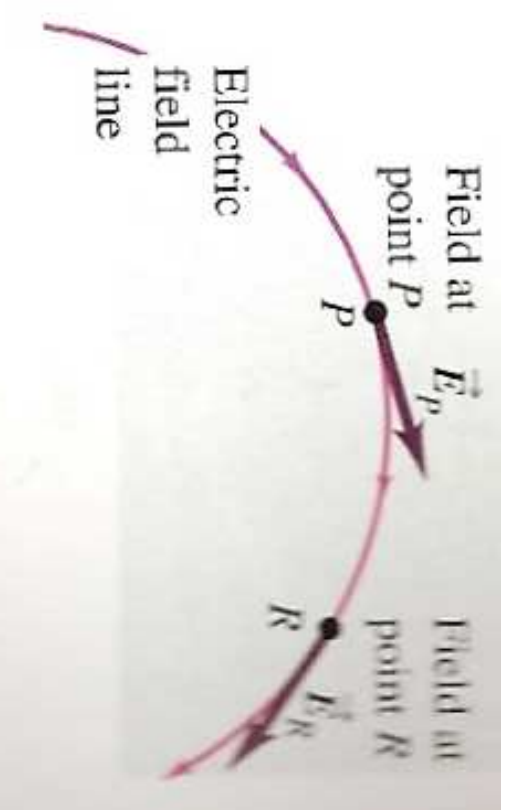
Linhas de campo eléctrico (1)



(a)



(b)



Linhas de campo eléctrico (2)

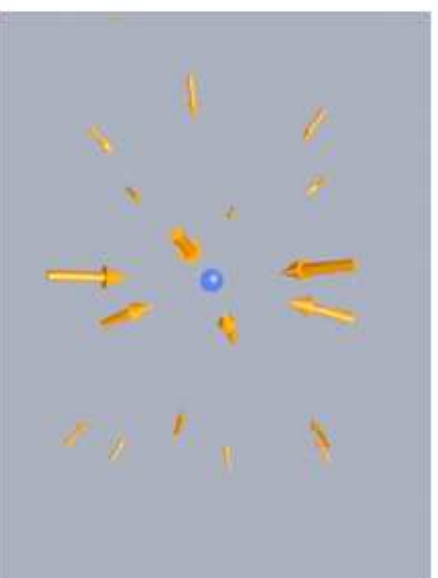
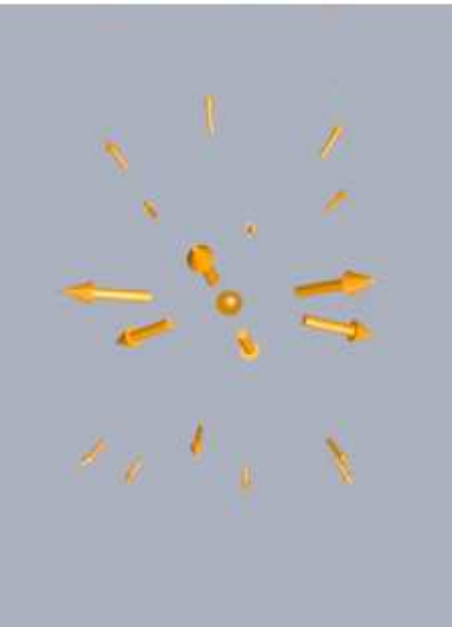


Figure 2.4.2 The electric fields of (a) a moving positive charge, (b) a moving negative charge, when the speed of the charge is small compared to the speed of light.

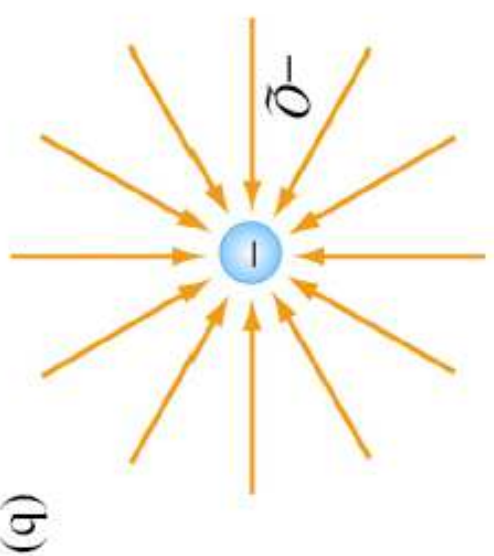
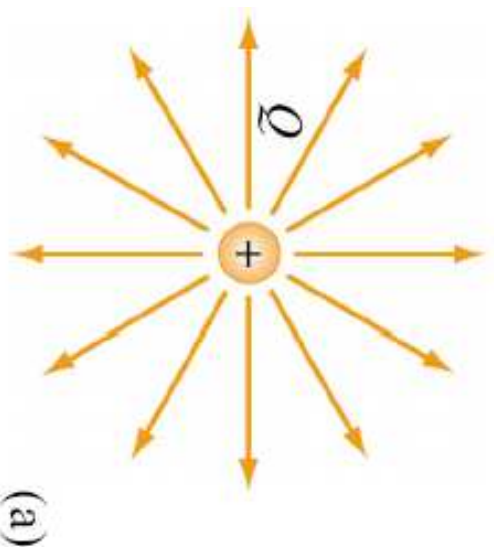
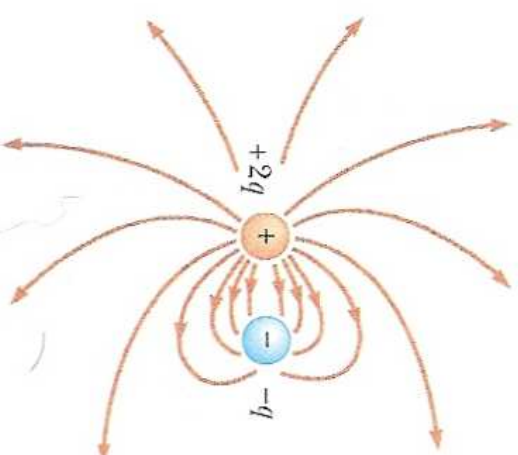
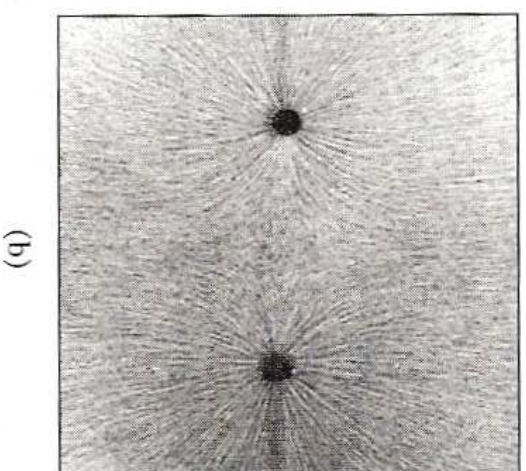
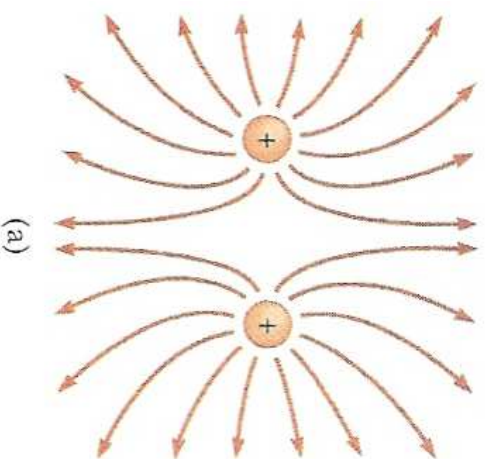
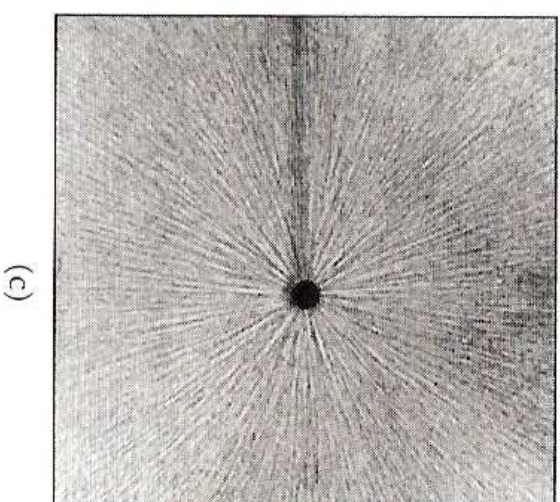
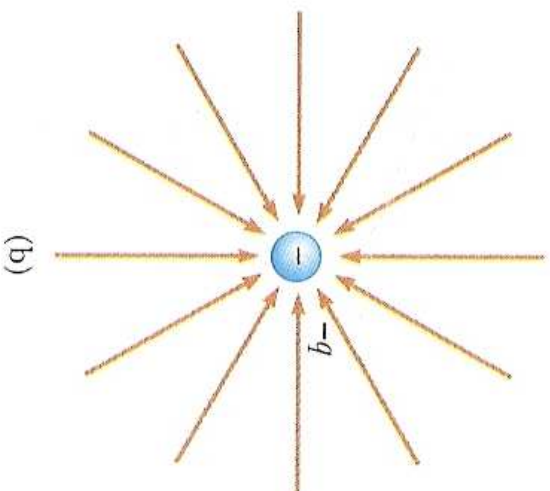
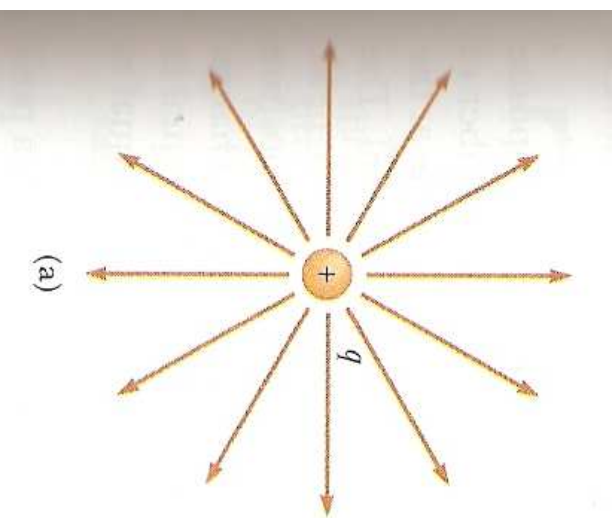
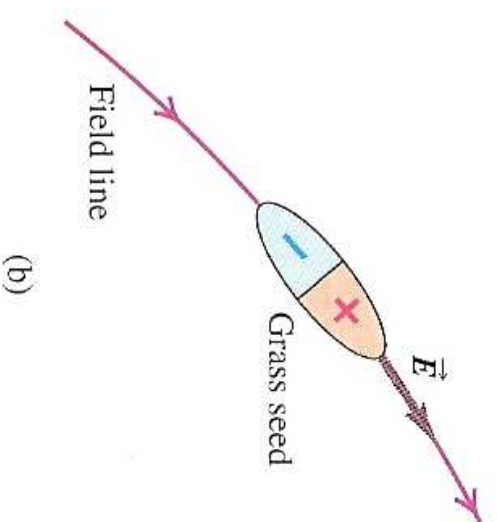
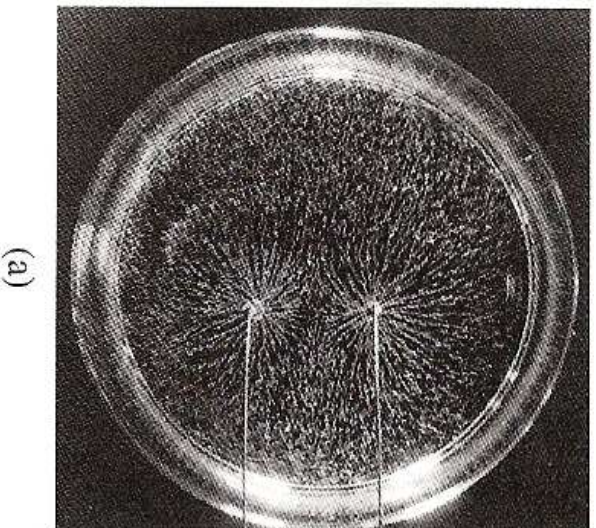
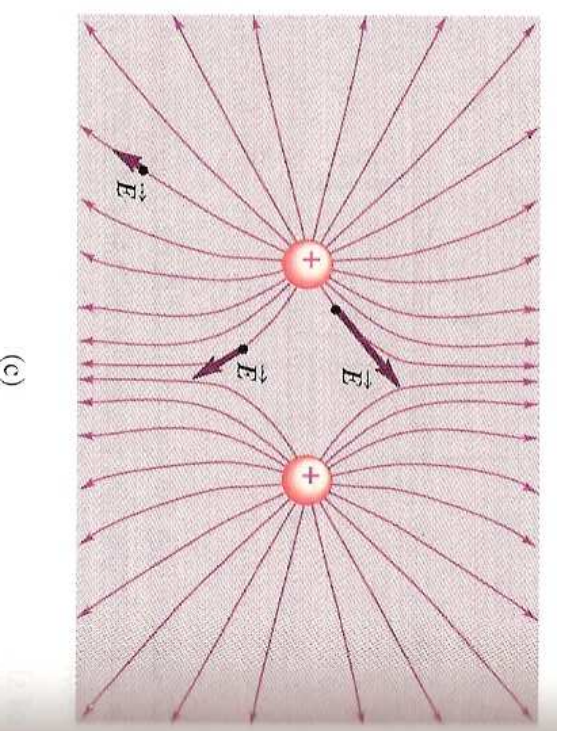
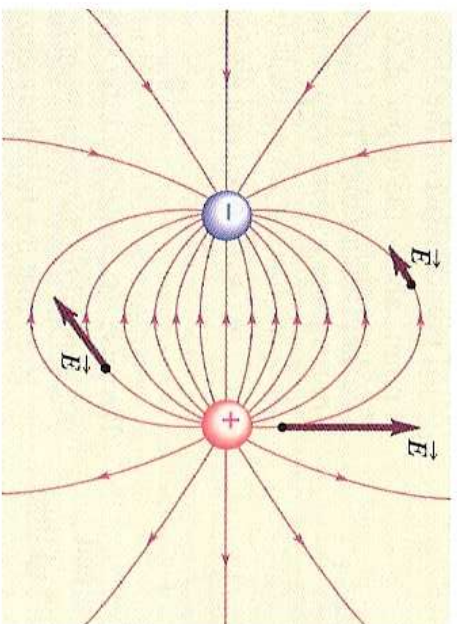
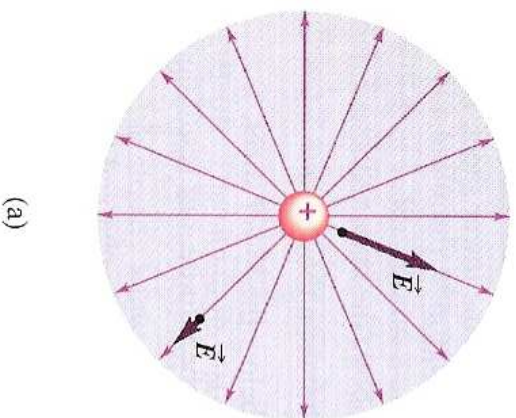


Figure 2.5.1 Field lines for (a) positive and (b) negative charges.

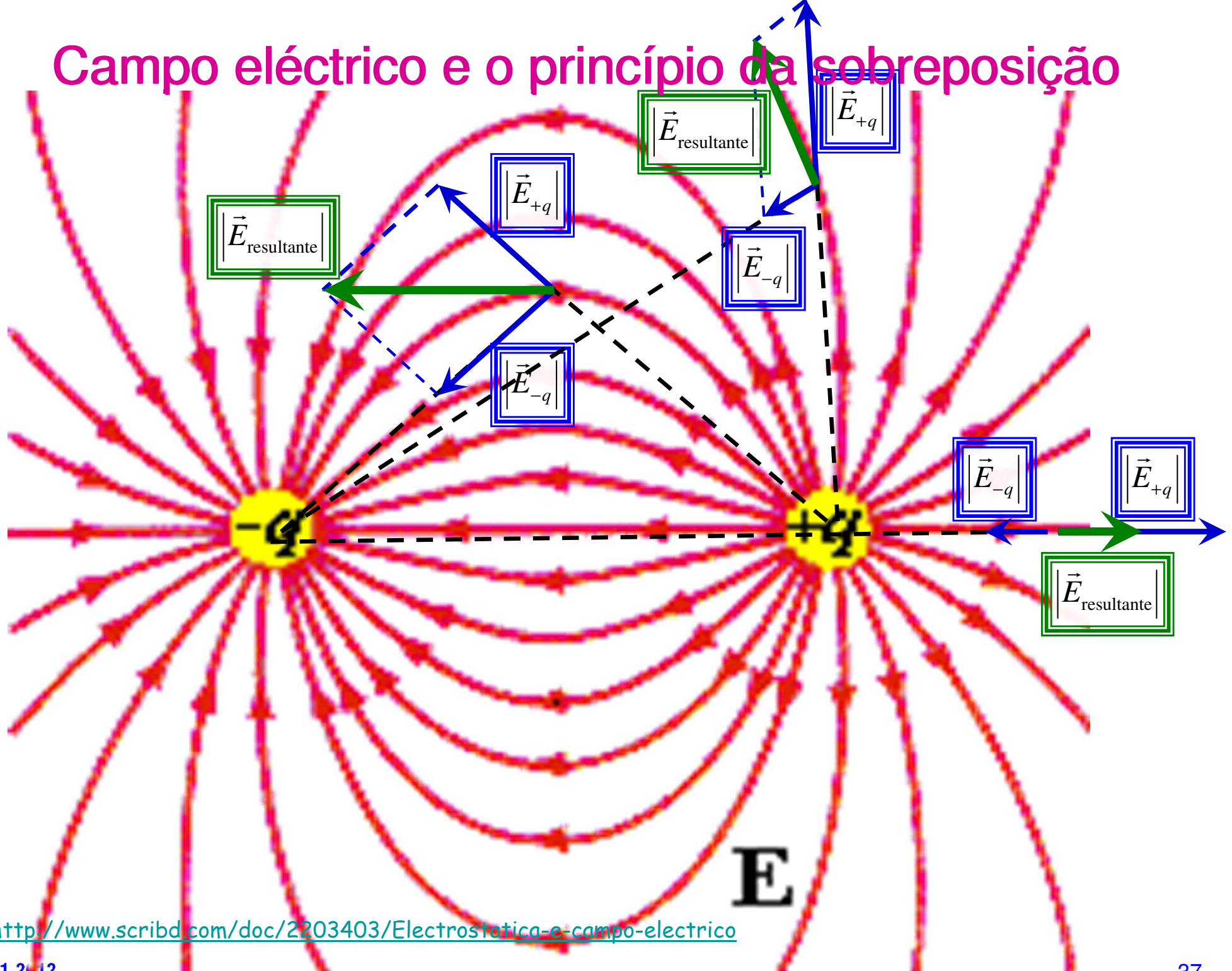
Linhas de campo eléctrico (3)



Linhas de campo eléctrico (4)

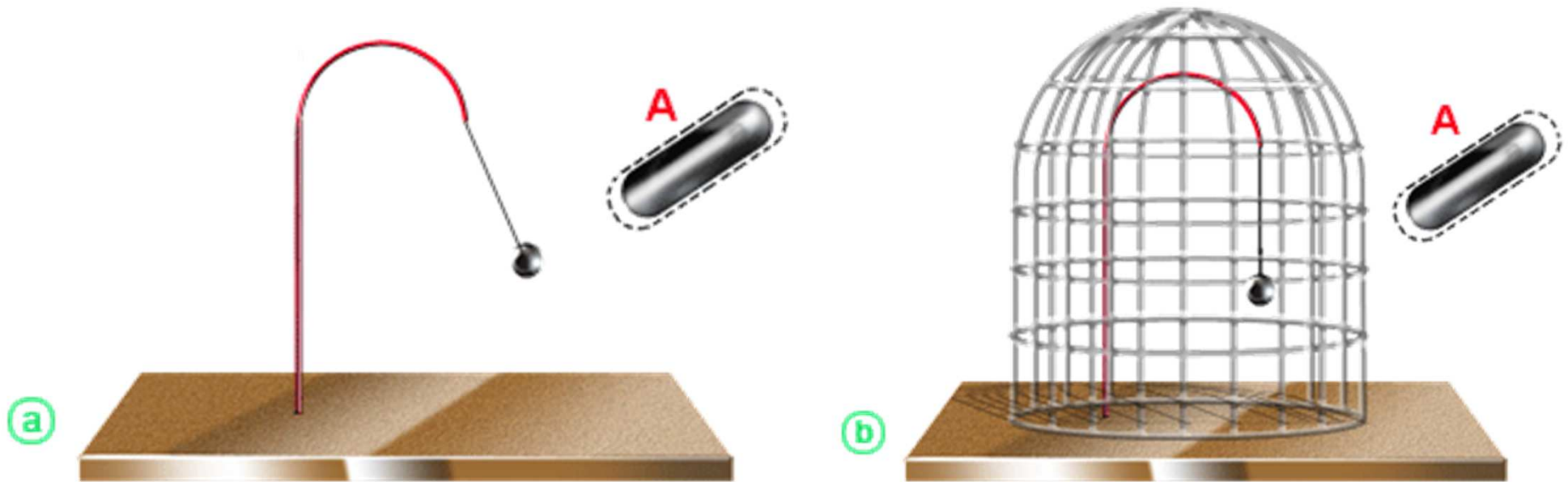


Campo eléctrico e o principio da sobreposição

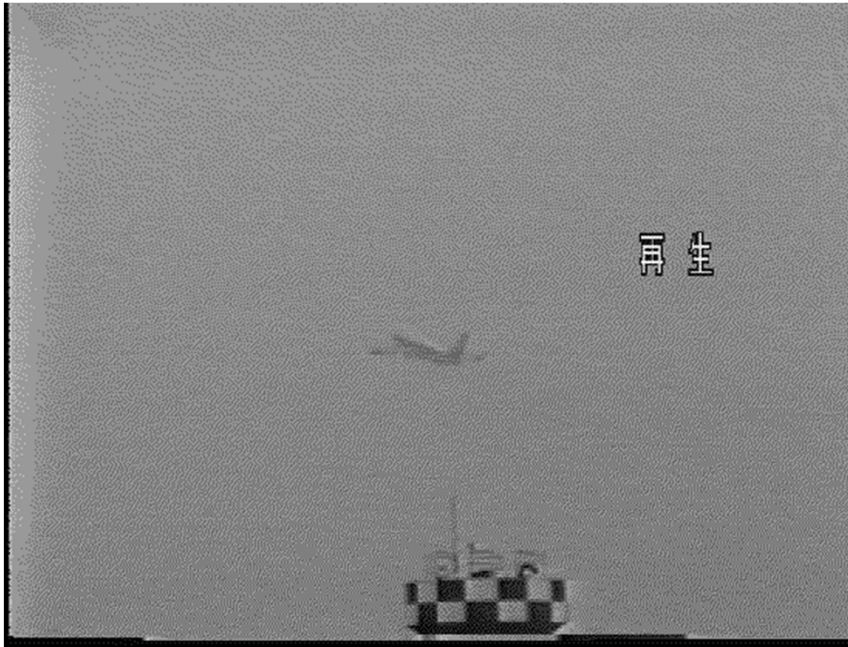


<http://www.scribd.com/doc/2203403/Electrostatica-e-campo-electrico>

A gaiola de Faraday



A gaiola de Faraday



Campo Magnético e forças magnéticas

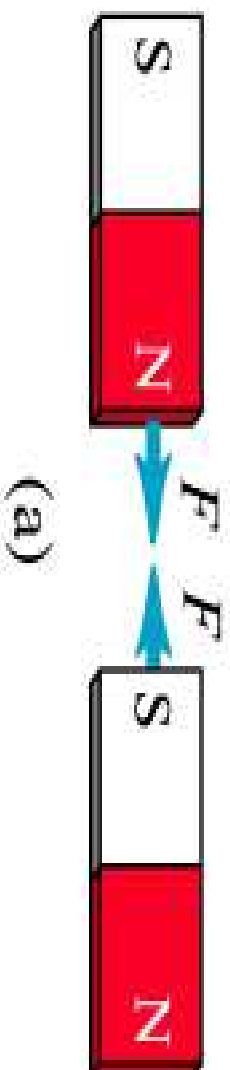
Magnetostática: s. f. estudo dos fenómenos magnéticos que podem ser considerados invariáveis com o tempo. (De magneto- + estática).

Campo magnético: (fís.) volume nas proximidades de um corpo magnetizado ou de um circuito percorrido por corrente eléctrica onde se manifestam acções magnéticas (uma força num pedaço de ferro, por ex.). (Do lat. tard. magnetîcu-, «da natureza da pedra-íman», pelo fr. magnétique, «id.»).

Magnete: s. m. objecto que tem a propriedade de atrair certos metais e suas ligas, como o ferro, e que pode ser constituído por esses mesmos metais ou por magnetite; o m. q. íman; ~ natural: o m. q. pedra-íman. (Do gr. magnétes, «da Magnésia», top., antiga cidade grega da Ásia Menor, pelo lat. magnete-, «id.»).

Magnetite s. f. (min.) mineral fortemente magnético que é, quimicamente, óxido salino de ferro, cristaliza no sistema cúbico e é importante minério de ferro; pedra-íman. (De magnete + -ite)

Forças entre ímãs permanentes



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Ímanes permanentes criam campos magnéticos

27.1 (a) Two bar magnets attract when opposite poles (N and S, or S and N) are next to each other. (b) The bar magnets repel when like poles (N and N, or S and S) are next to each other.

(a) Opposite poles attract.

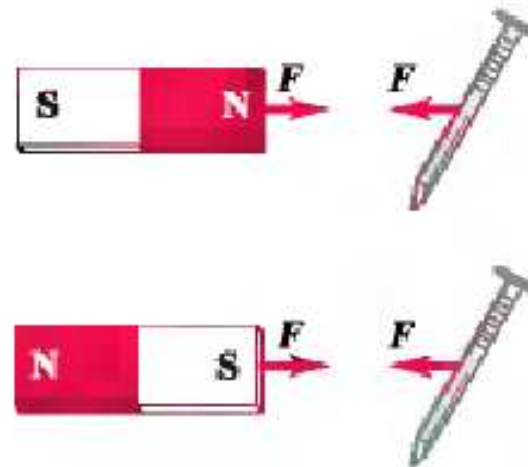


(b) Like poles repel.



27.2 (a) Either pole of a bar magnet attracts an unmagnetized object that contains iron, such as a nail. (b) A real-life example of this effect.

(a)



(b)

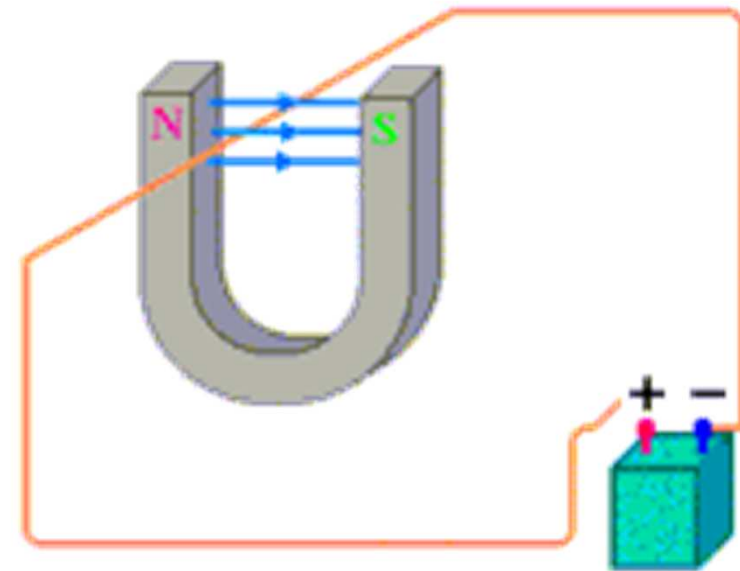
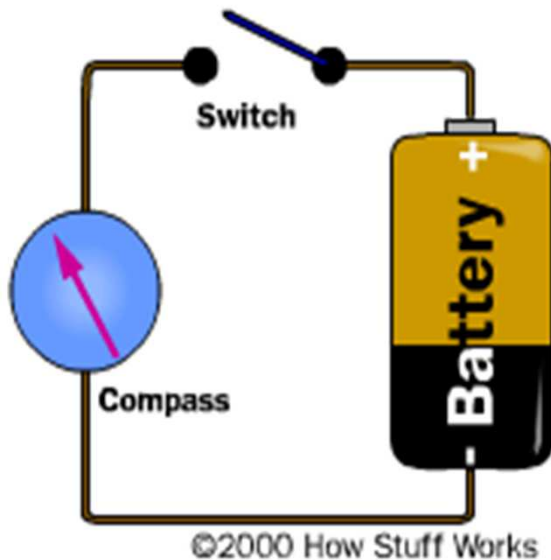


Unidade SI de indução magnética B

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$$

Uma corrente eléctrica cria um campo magnético

A electricidade comporta-se como um íman (1820 Ørsted)

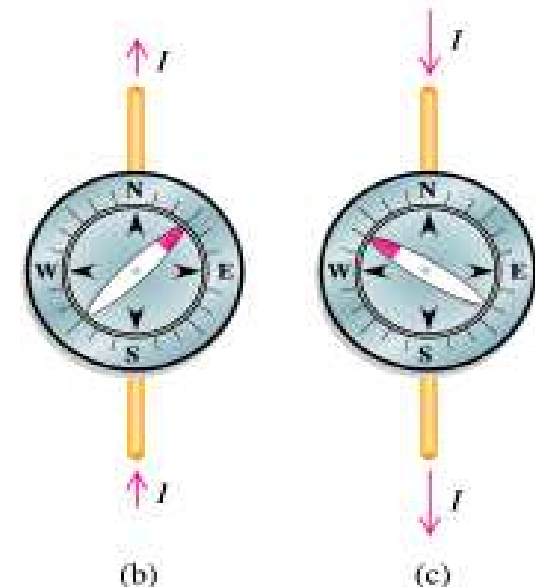
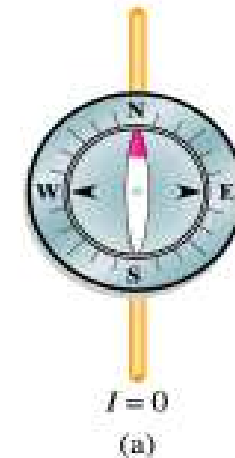
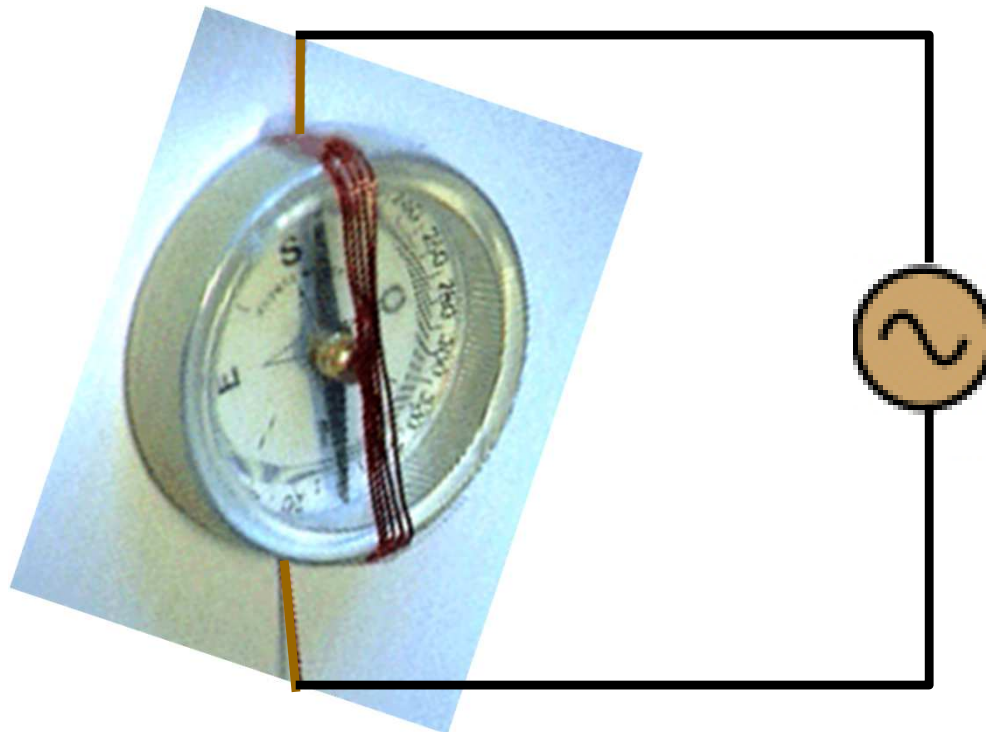


Experiência de Oersted (1819/1820):

A electricidade cria magnetismo (1820 Ørsted)

A corrente eléctrica comporta-se como um íman.

Demonstração: Bússola sobre um fio rectilíneo percorrido por uma corrente eléctrica.



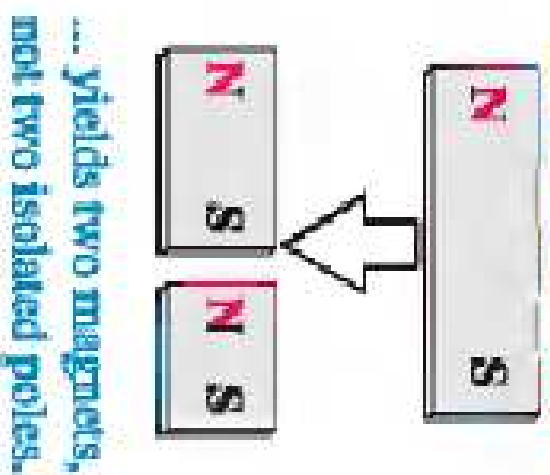
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Ímanes e correntes eléctricas

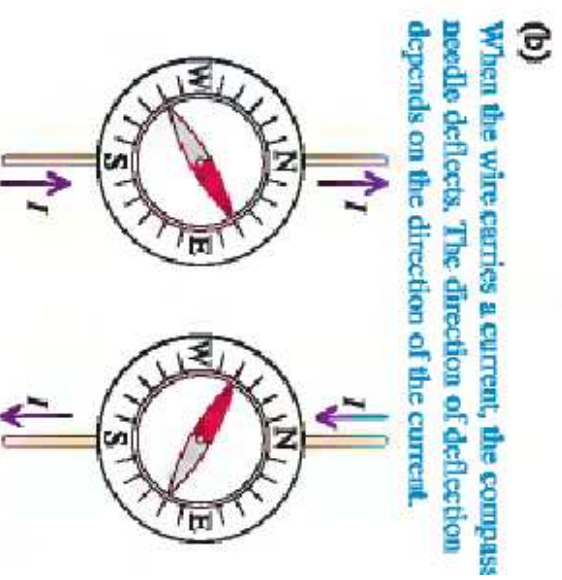
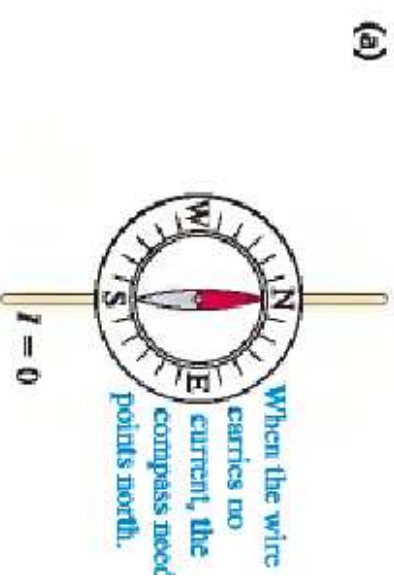
27.4 Breaking a bar magnet. Each piece has a north and south pole, even if the pieces are different sizes. (The smaller the piece, the weaker its magnetism.)

In contrast to electric charges, magnetic poles always come in pairs and can't be isolated.

Breaking a magnet in two ...



27.5 In Oersted's experiment, a compass is placed directly over a horizontal wire (here viewed from above). When the compass is placed directly under the wire, the compass deflection is reversed.



Campos magnéticos B e H

O campo magnético é caracterizado por 2 grandezas vectoriais: **H** e **B**.

H é a intensidade de campo magnético (unidade SI: ampère por metro)

B representará a densidade superficial de fluxo magnético (unidade SI: tesla, T), também chamada **indução magnética**: $B = \mu H$, onde μ representa a permeabilidade magnética.

Permeabilidade magnética absoluta μ é a razão entre o campo magnético e a excitação magnética (S.I.); μ_0 representa o valor da permeabilidade magnética no vácuo, $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am.

tesla: unidade de indução magnética, do S. I., de símbolo T, que é igual a 1 weber por metro quadrado; indução magnética uniforme que, distribuída normalmente por uma superfície de 1 metro quadrado, produz, através desta superfície, um fluxo magnético total de 1 weber. (De N. Tesla, antr., físico jugoslavo, 1857-1943)

gauss [gaus] (fís.) unidade CGS de indução magnética, de símbolo G. (De K. F. Gauß, antr., físico e astrónomo alemão, 1777-1855)

weber [vebEr] s. m. (electr.) unidade de fluxo magnético e de fluxo de indução do Sistema Internacional (S.I.), de símbolo Wb. (De W. E. Weber, antr., físico alemão, 1804-1891)

Magnitudes do campo magnético

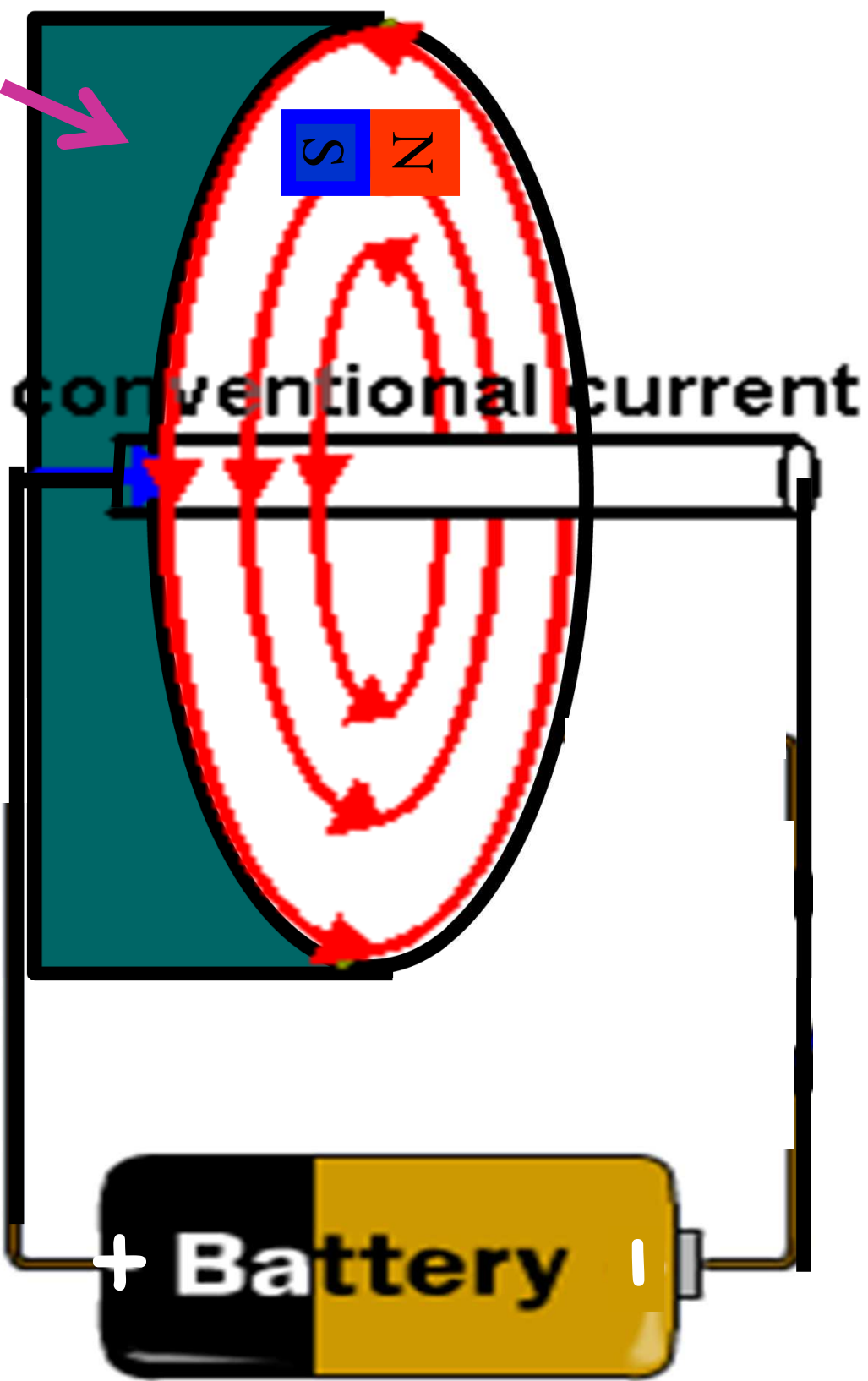
Some Approximate Magnetic Field Magnitudes	
Source of Field	Field Magnitude (T)
Strong superconducting laboratory magnet	30
Strong conventional laboratory magnet	2
Medical MRI unit	1.5
Bar magnet	10^{-2}
Surface of the Sun	10^{-2}
Surface of the Earth	0.5×10^{-4}
Inside human brain (due to nerve impulses)	10^{-13}

Unidade SI de B: tesla, T, 1 tesla = 1 T = 1 Ns/Cm = 1 N/Am. Unidade cgs de B: gauss, G, 1 G = 10^{-4} T). O campo magnético mede-se usando gaussímetros.

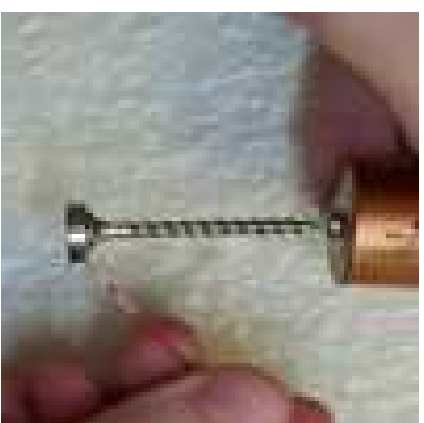
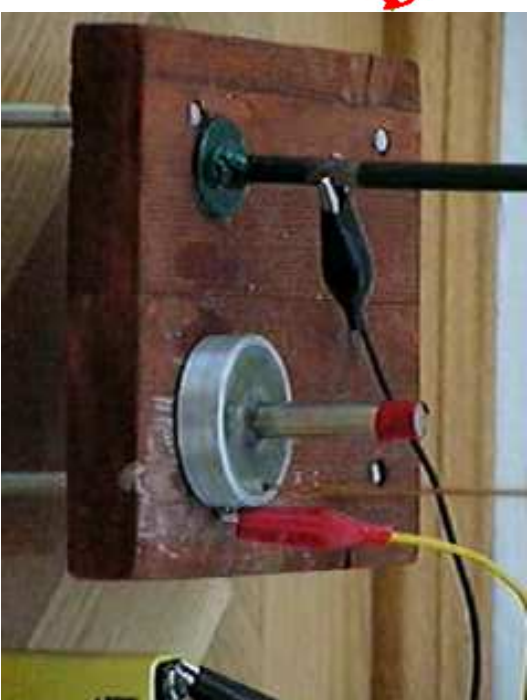
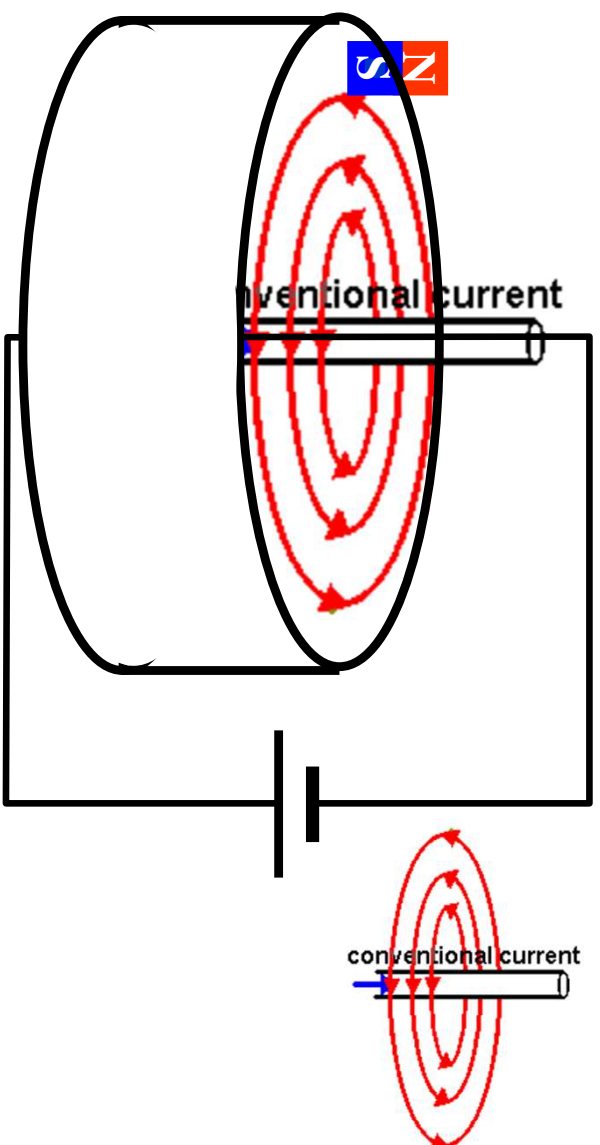
O campo magnético da terra é da ordem de 1 gauss (~ 0.1 mT). Interior do átomo: ~ 10 T. O maior campo magnético estático criado em laboratório é da ordem de 45 T. Para campos pulsados pode atingir-se 120 T (durante ms). O campo magnético criado por uma estrela de neutrões pode atingir 10^8 T na sua superfície.

Primeiro motor eléctrico (1821 Faraday)

Tina com mercúrio



Outros motores eléctricos simples



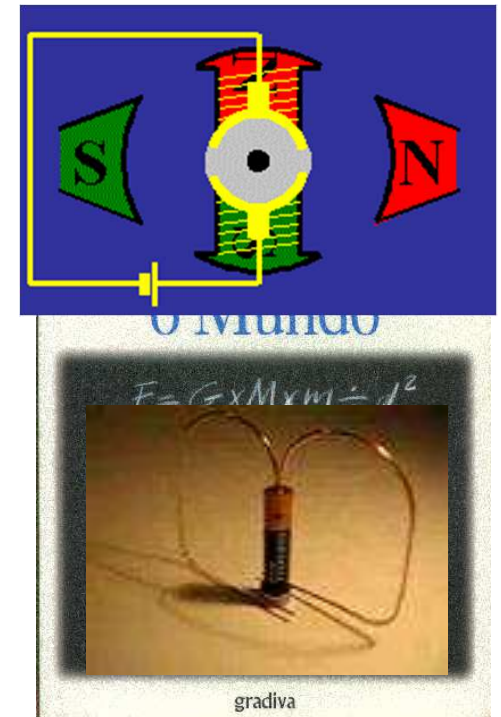
O magnetismo cria electricidade!

Um íman pode produzir corrente eléctrica (1831 Faraday)



Lei da Indução electromagnética:

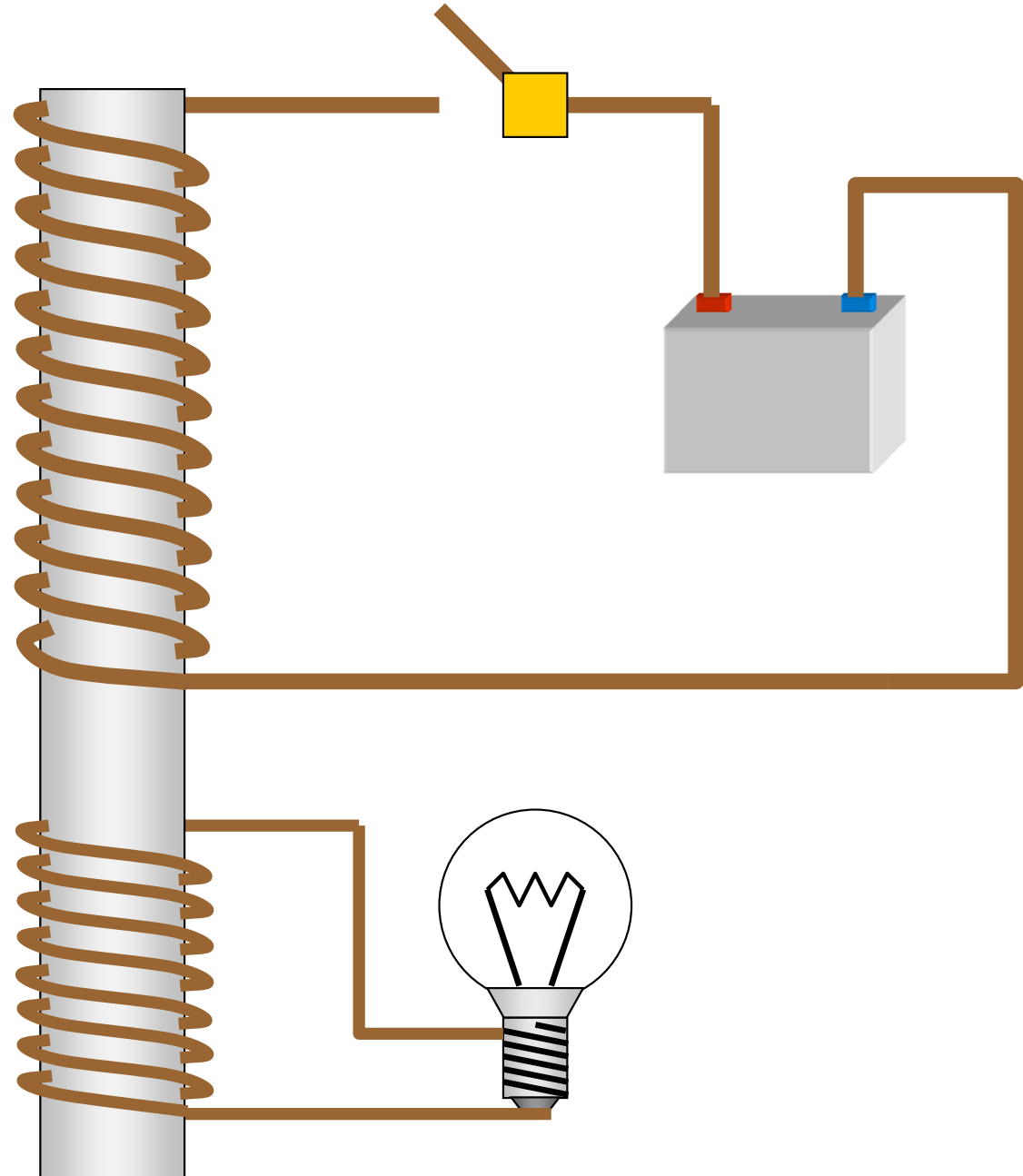
“Sempre que uma força magnética aumenta ou diminui, produz electricidade;
quanto mais depressa se dá esse aumento ou diminuição, mais electricidade se produz.”



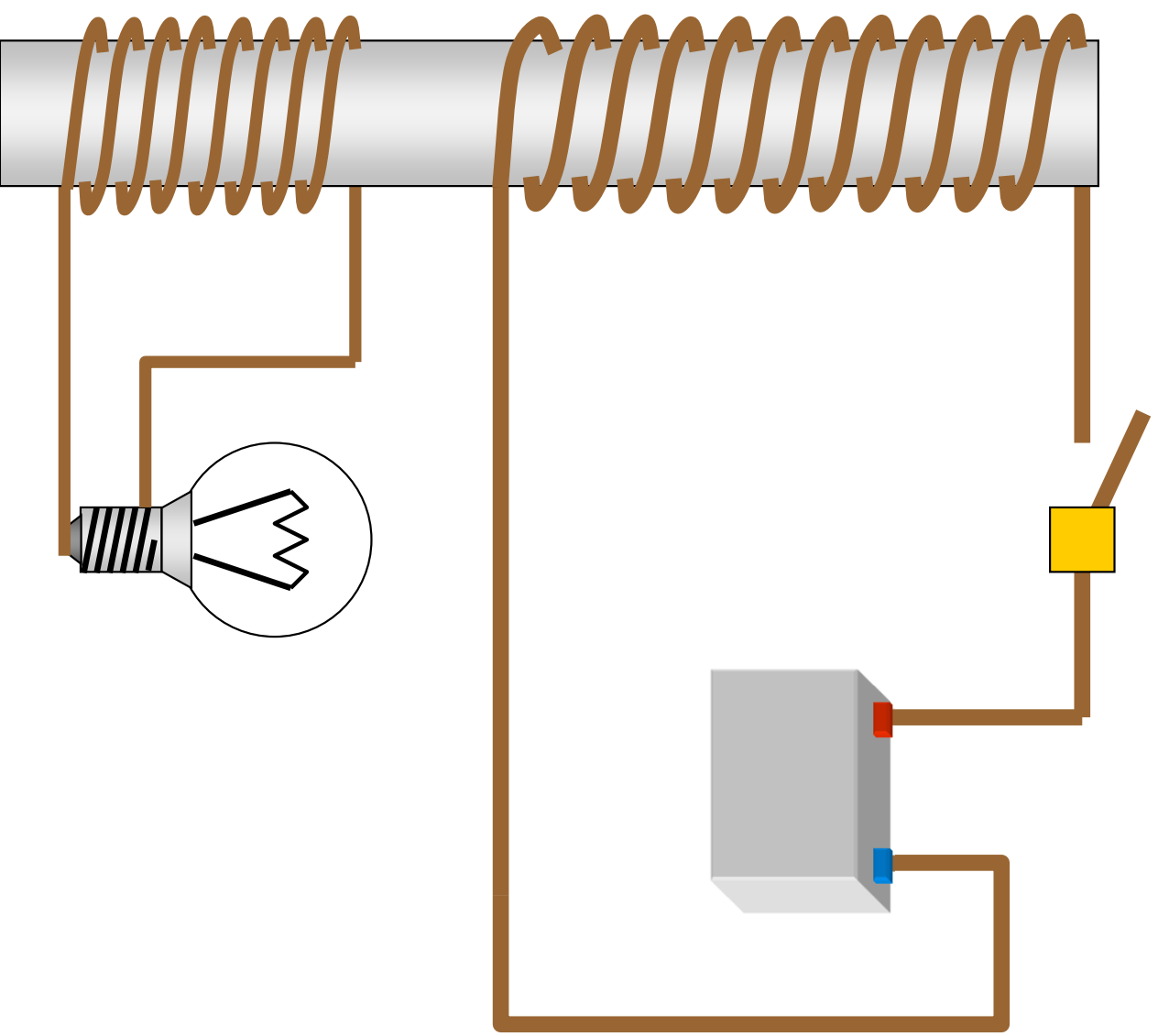
Lei de Faraday da indução electromagnética

Muito provavelmente
a descoberta com mais
impacto no
desenvolvimento das
sociedades humanas.

Faraday

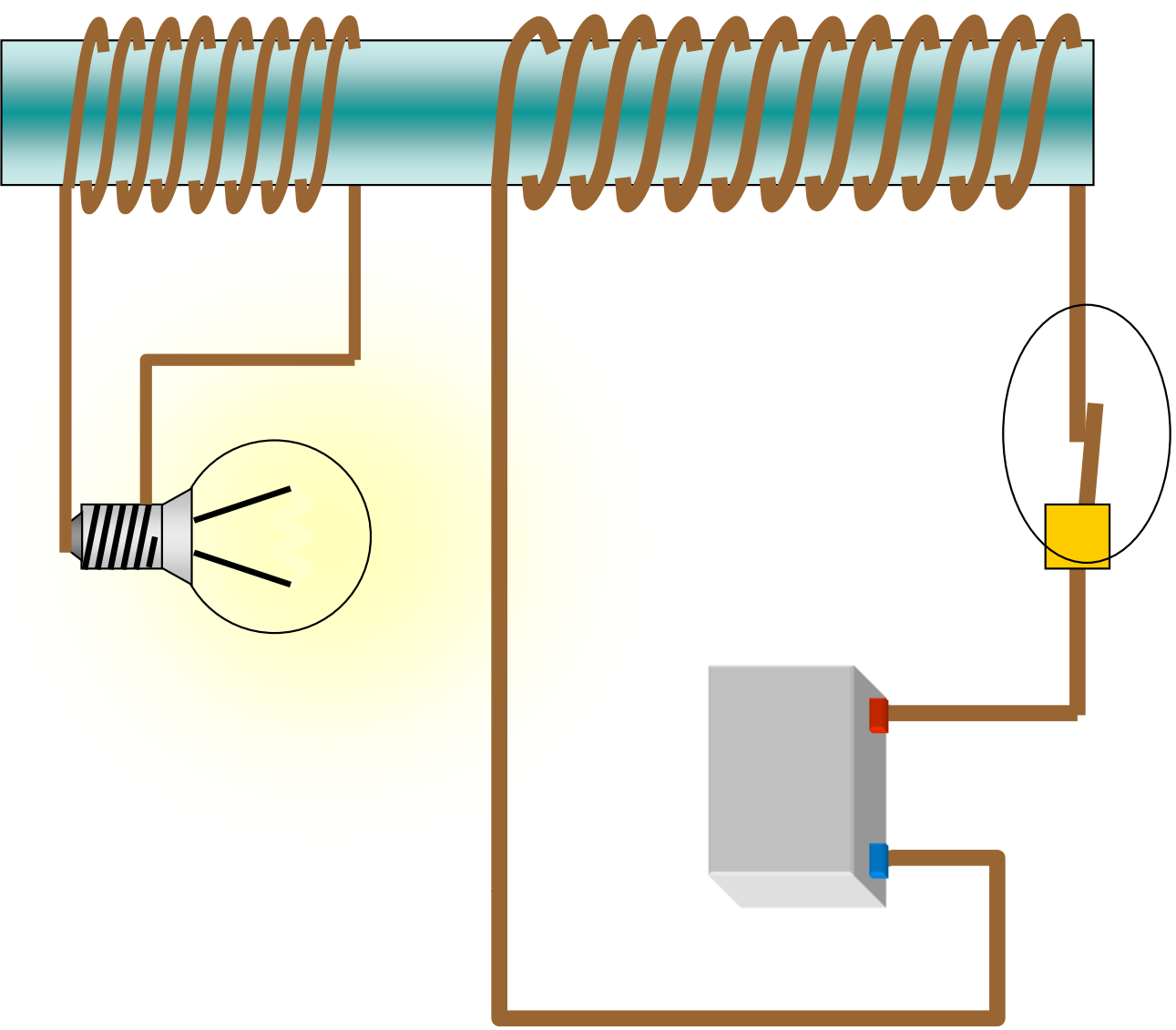


Lei de Faraday da indução electromagnética



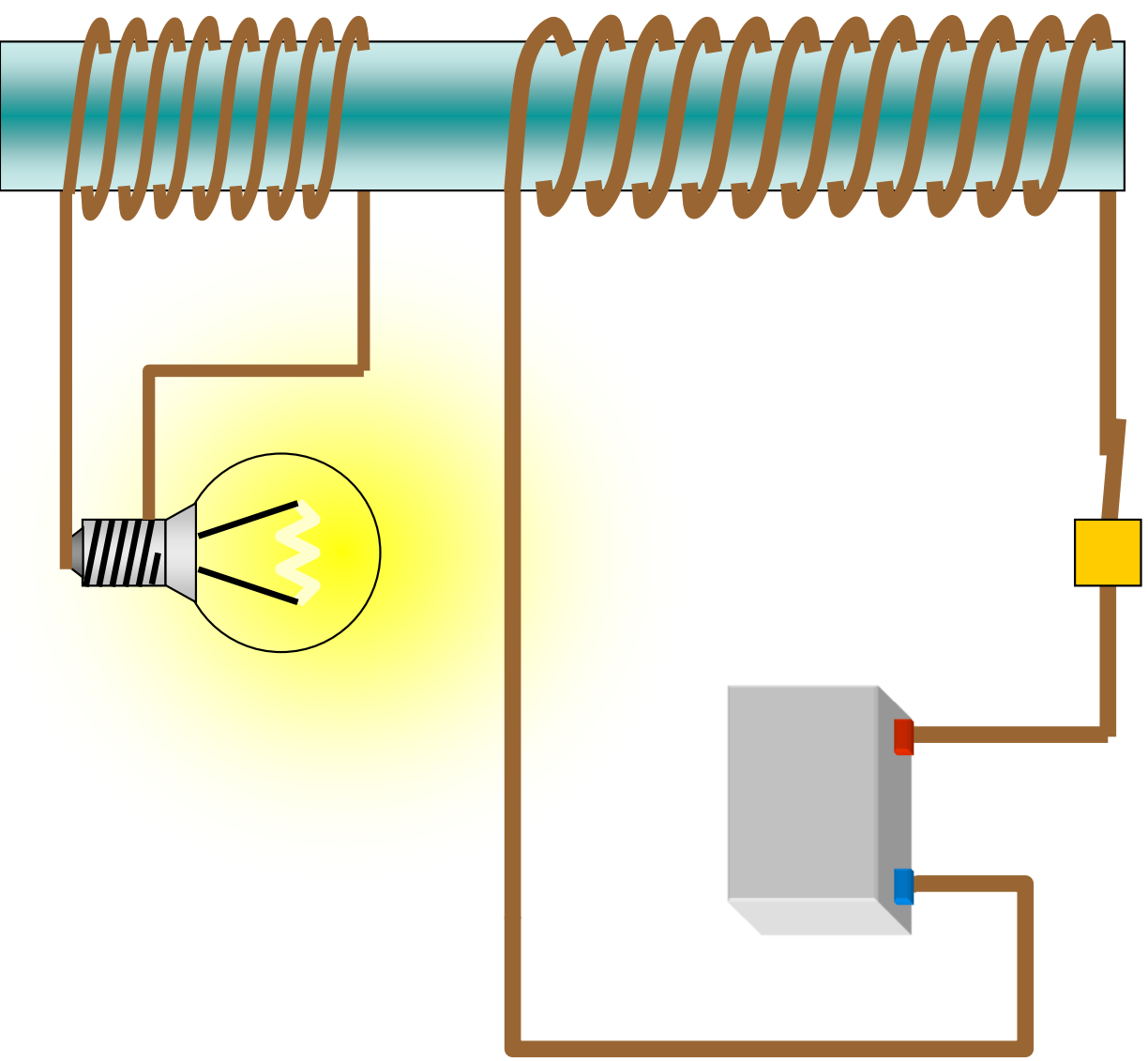
Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



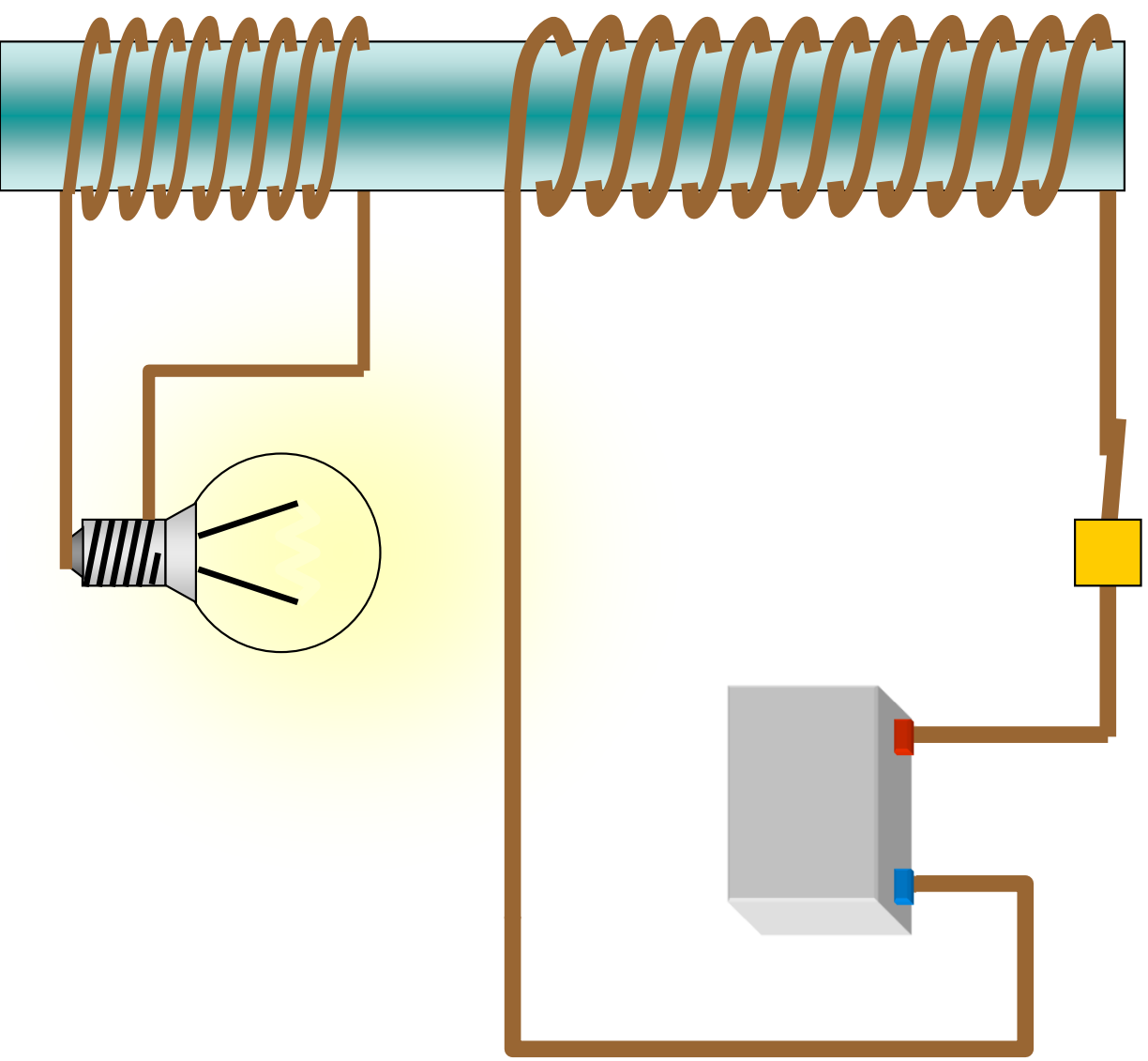
Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



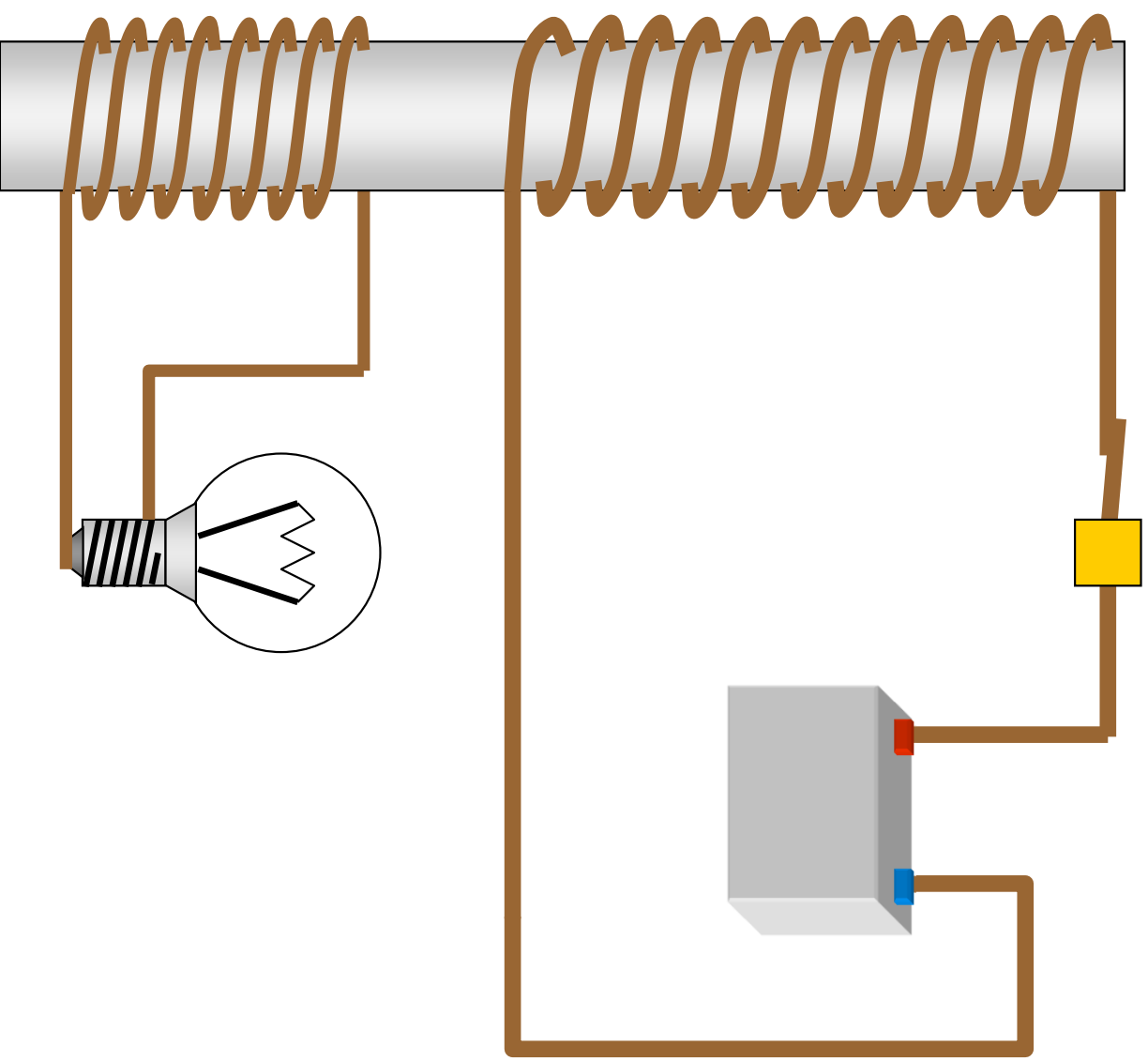
Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



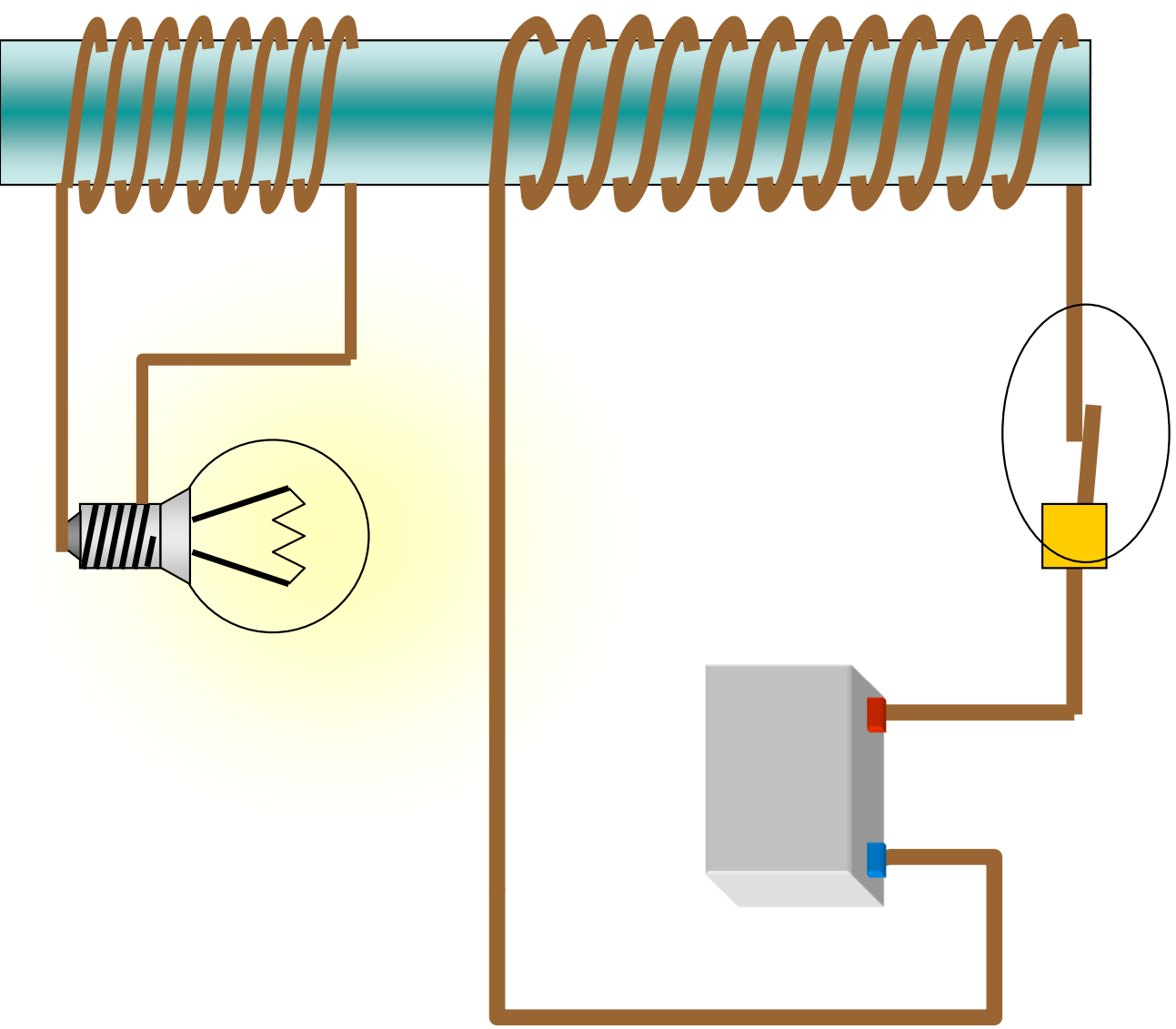
Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



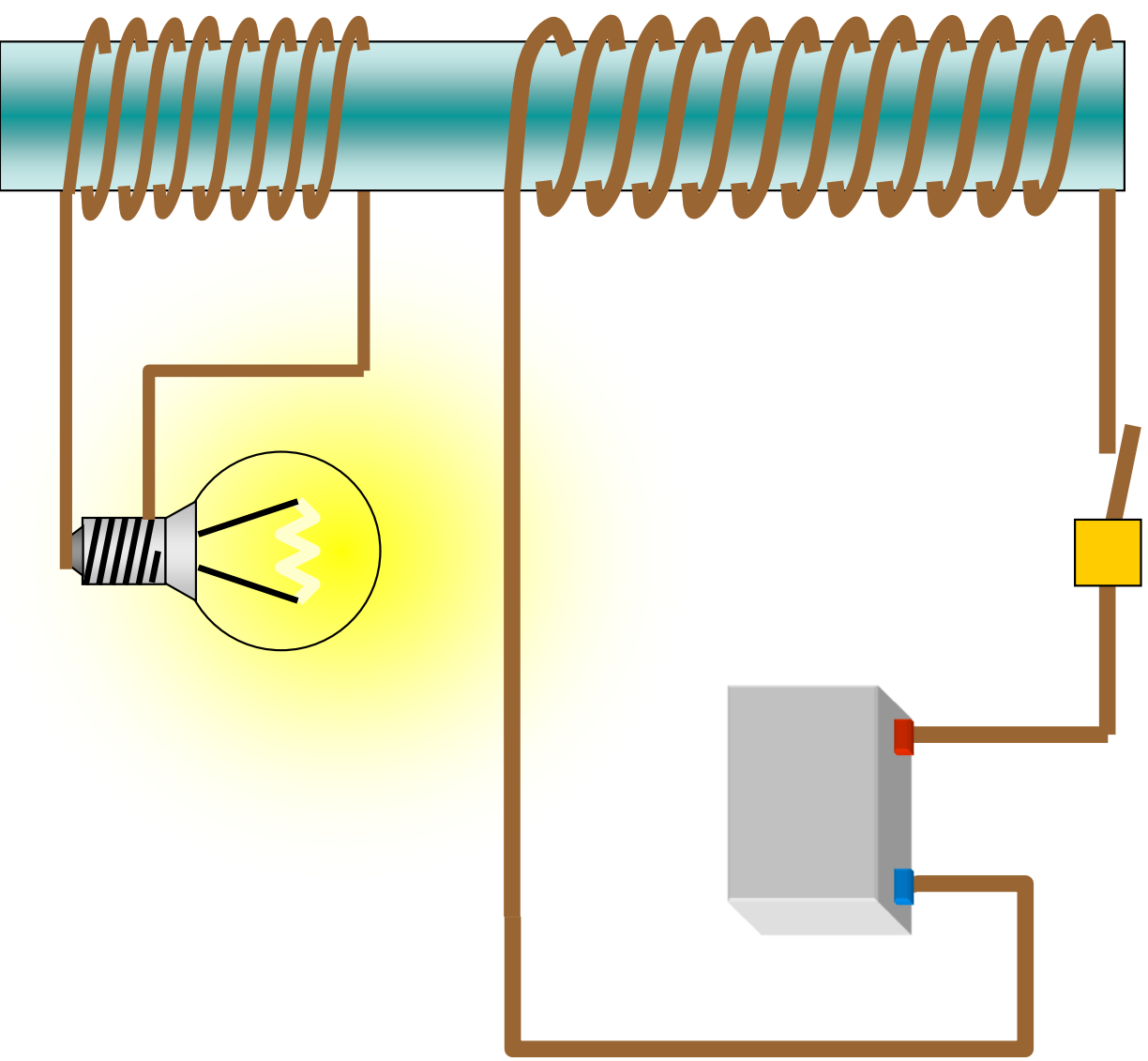
Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



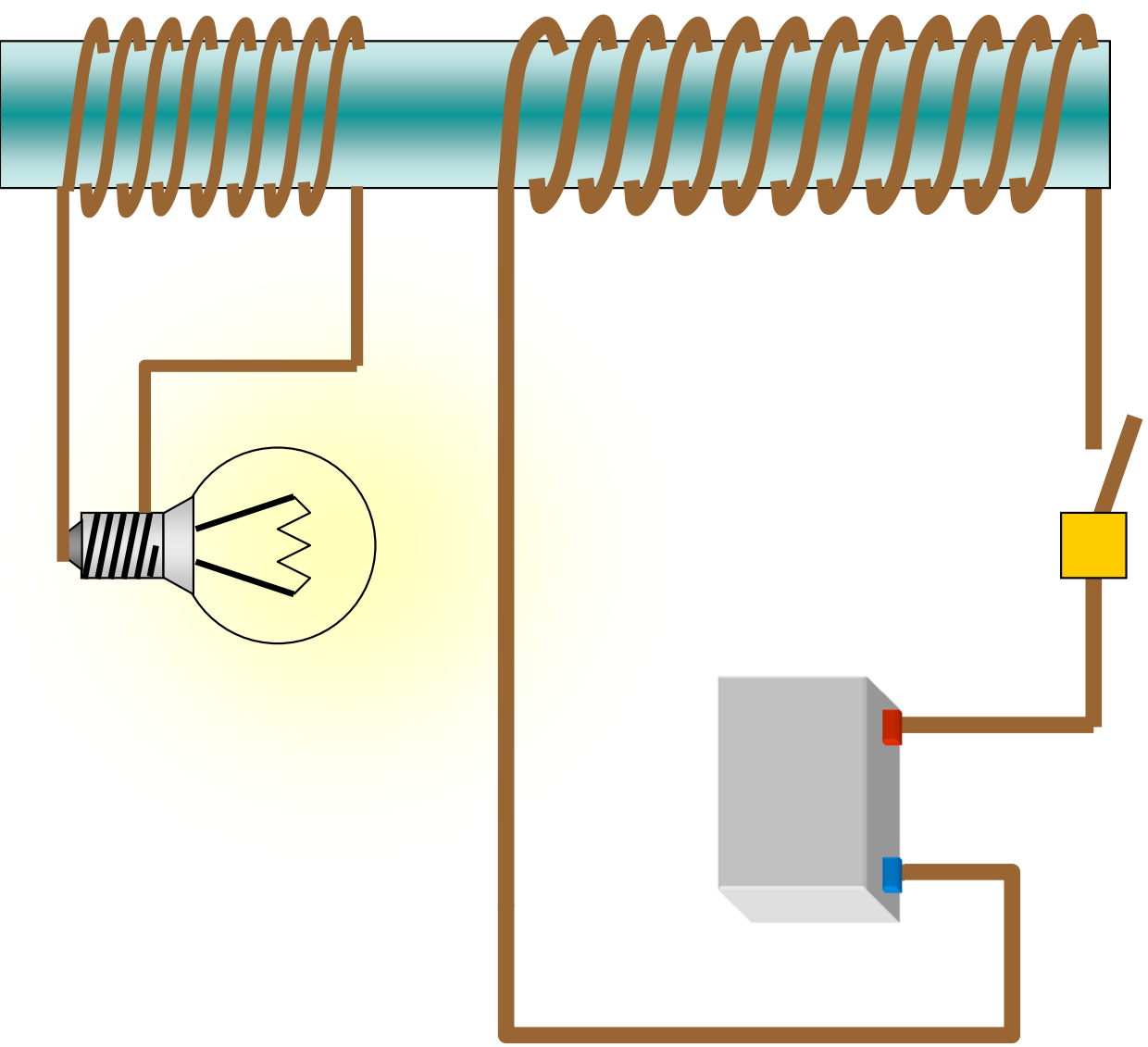
Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



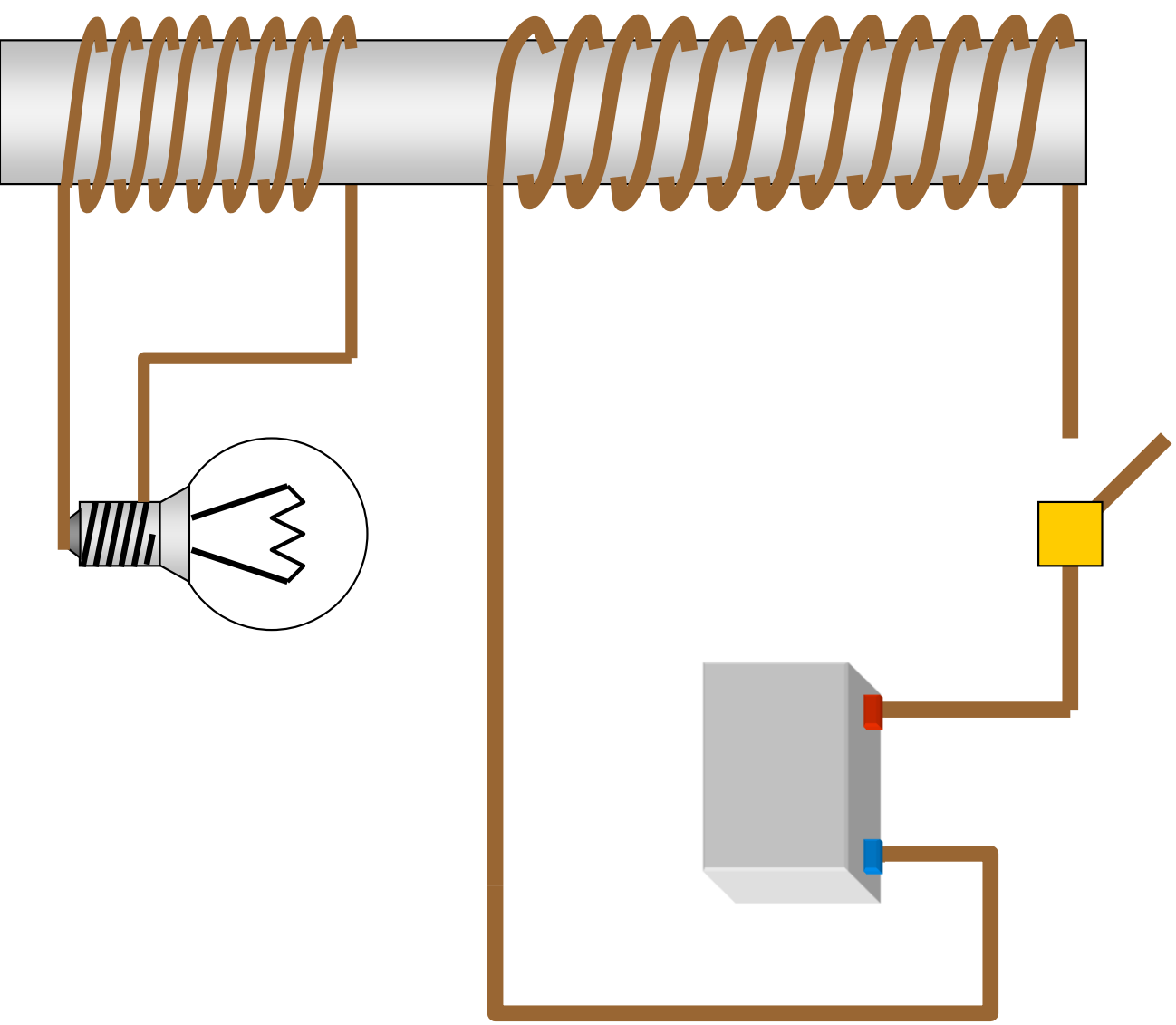
Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



Faraday

Lei de Faraday da indução electromagnética



Faraday

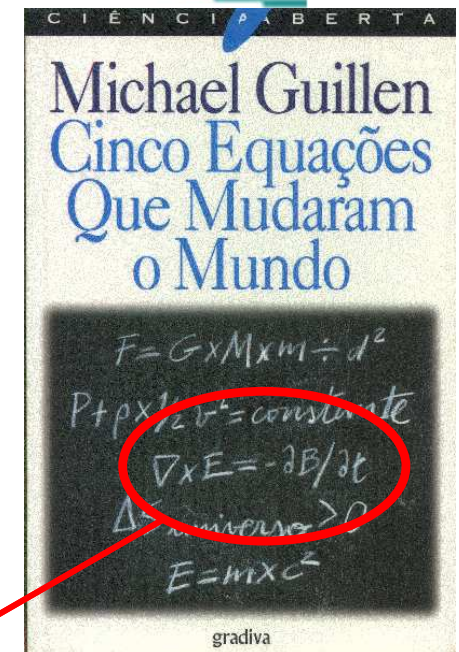
Descoberta de Faraday: O magnetismo cria electricidade!

Em 1831 Faraday mostrou que um íman pode ser usado para produzir corrente eléctrica.



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Faraday-1.mov>

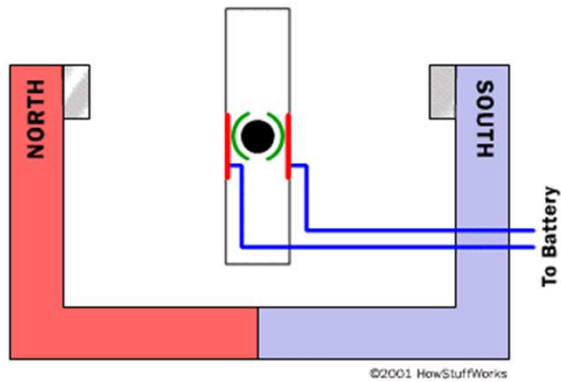
“Sempre que uma força magnética aumenta ou diminui, produz electricidade; quanto mais depressa se dá esse aumento ou diminuição, mais electricidade se produz.”



ACTO DE CLASSE: [Michael Faraday e a lei da indução electromagnética](#)

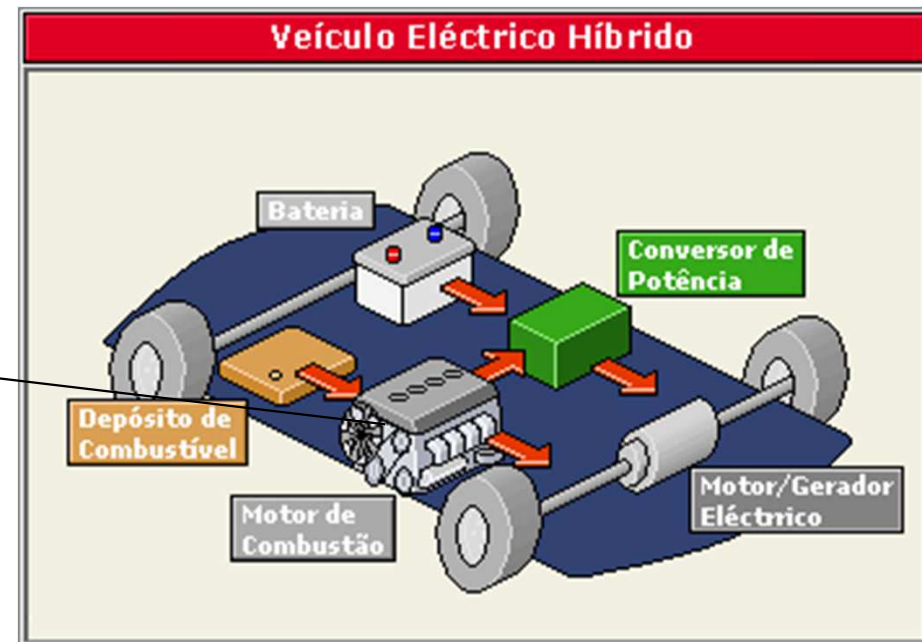
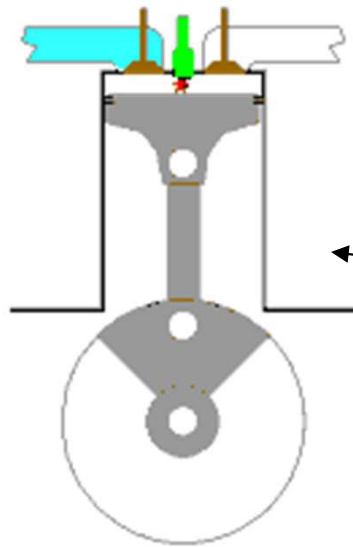
Geradores e motores eléctricos usam a lei de Faraday

Motores e máquinas eléctricas

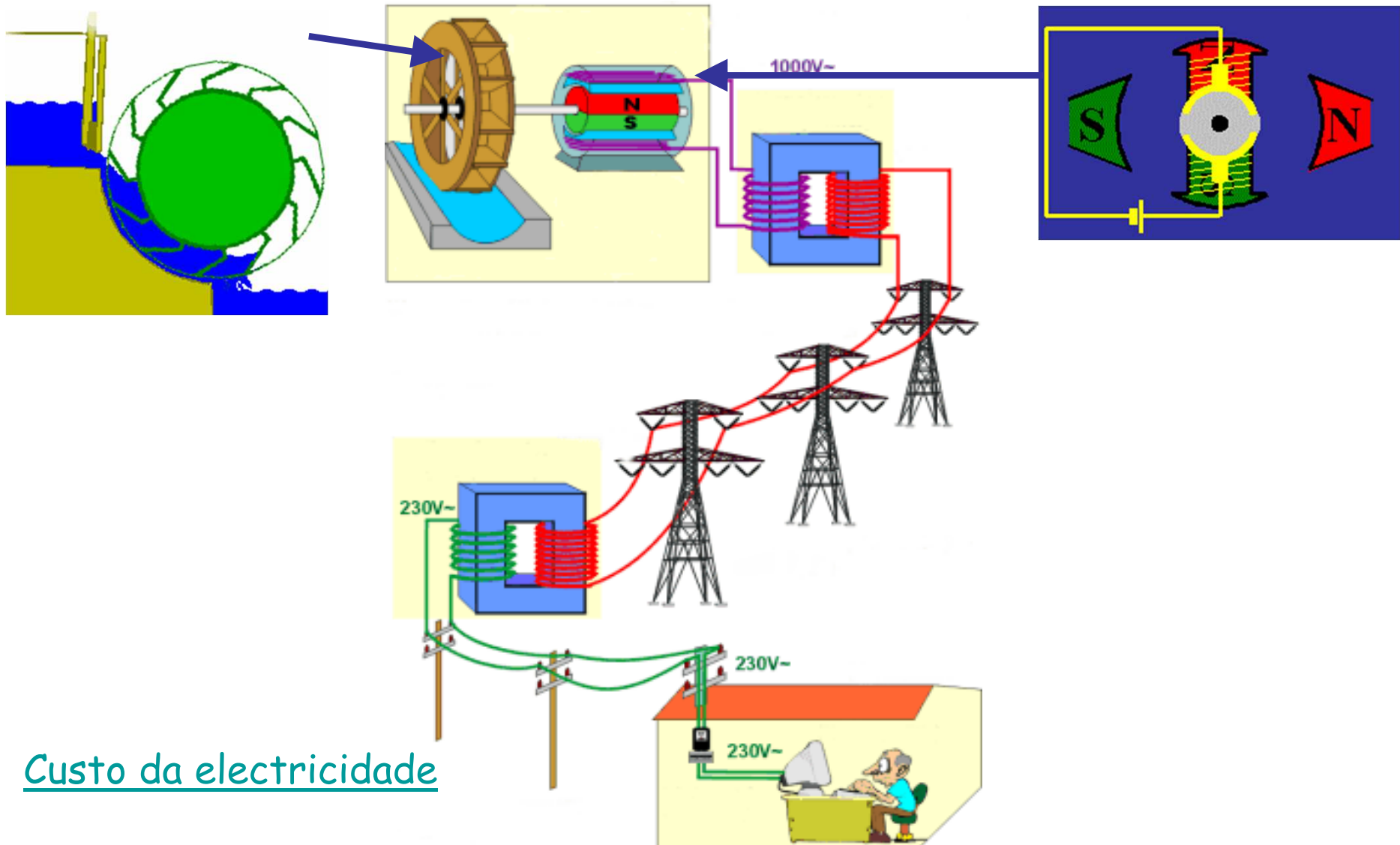


$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

[Thesimplestmotoroftheworld.wmv](http://thesimplestmotoroftheworld.wmv)

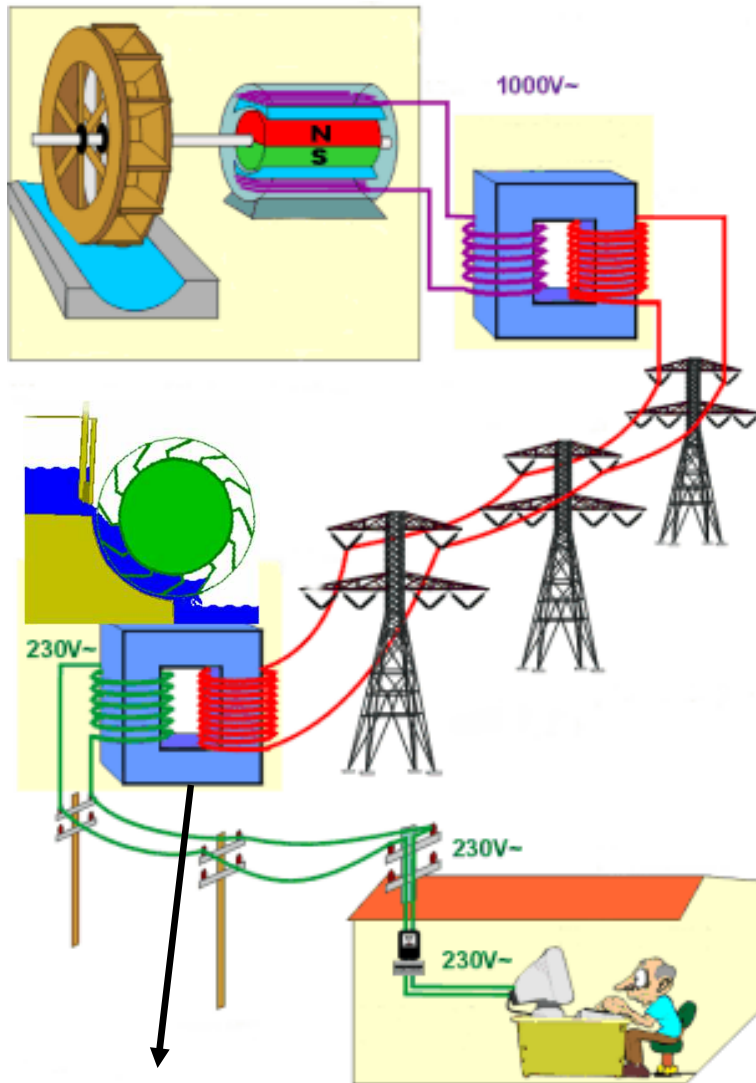


A descoberta da lei de Faraday da indução EM deu início à produção de electricidade



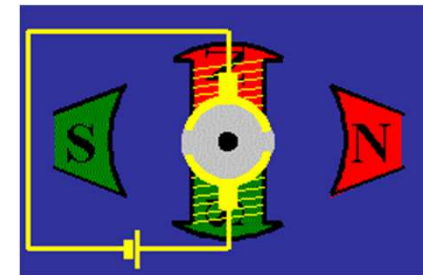
Custo da electricidade

Produção de electricidade (lei de Faraday)



Transformador

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



Custo da electricidade

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/generator.jar>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/generator-man-power.wmv>

Campo magnético e força de Lorentz

Uma carga em movimento ou uma corrente cria um campo magnético no espaço na sua vizinhança (para além do campo eléctrico).

O campo magnético exerce uma força em qualquer outra carga em movimento ou corrente na região onde existe esse campo.

Dada a existência de um campo eléctrico, que forças actuam em cargas em movimento ou em correntes?

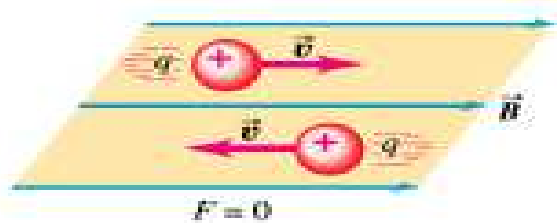
Como no caso do campo eléctrico, o campo magnético é um campo vectorial, isto é, a cada ponto do espaço está associada uma quantidade vectorial. Por agora, iremos representar o campo magnético pelo símbolo **B**. Para um dado magnete, as linhas de campo (o vector **B**) saiem do pólo norte e entram no pólo sul.

A força que actuam numa carga em movimento é proporcional ao valor da carga, à magnitude do campo nesse ponto, e à velocidade da partícula carregada. A direcção da força é perpendicular ao campo **B** e à velocidade **v**. A magnitude da força é proporcional à componente da velocidade perpendicular ao campo **B**.

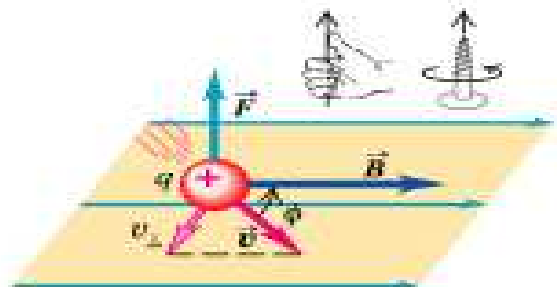
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Força de Lorentz

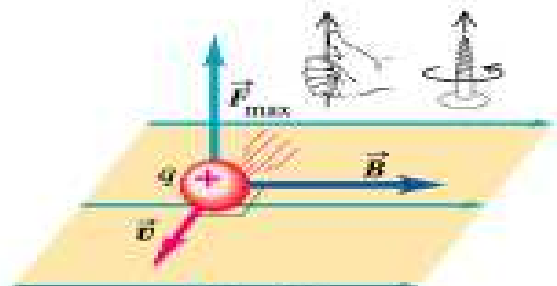
Força electromagnética sobre uma carga em movimento



(a)



(b)



(c)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Força de Lorentz: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

Exercício:

An electron in a television picture tube moves toward the front of the tube with a speed of 8.0×10^6 m/s along the x axis (Fig. 29.5). Surrounding the neck of the tube are coils of wire that create a magnetic field of magnitude 0.025 T, directed at an angle of 60° to the x axis and lying in the xy plane.

(A) Calculate the magnetic force on the electron using Equation 29.2.

$$2.8 \times 10^{-14} \text{ N}$$

(B) Find a vector expression for the magnetic force on the electron using Equation 29.1.

$$\mathbf{F}_B = (-2.8 \times 10^{-14} \text{ N}) \hat{\mathbf{k}}$$

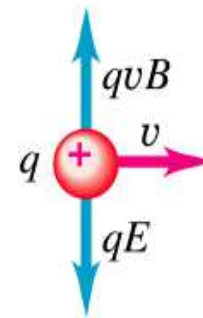
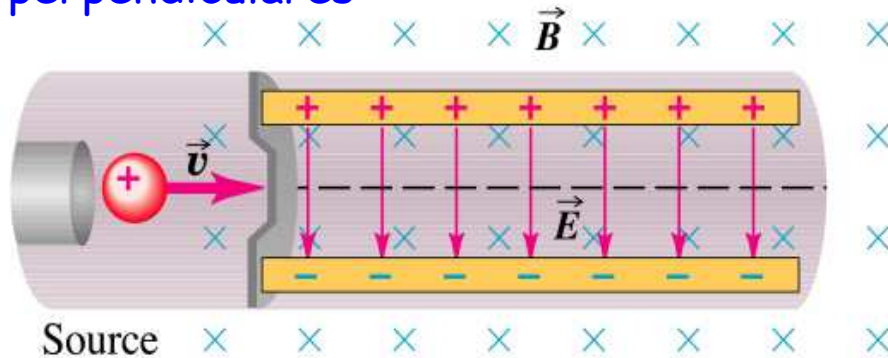
Força total (força electromagnética) que actua na carga quando na mesma região também existe um campo eléctrico $\vec{E}$:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Aplicações da força electromagnética

Selector de velocidades

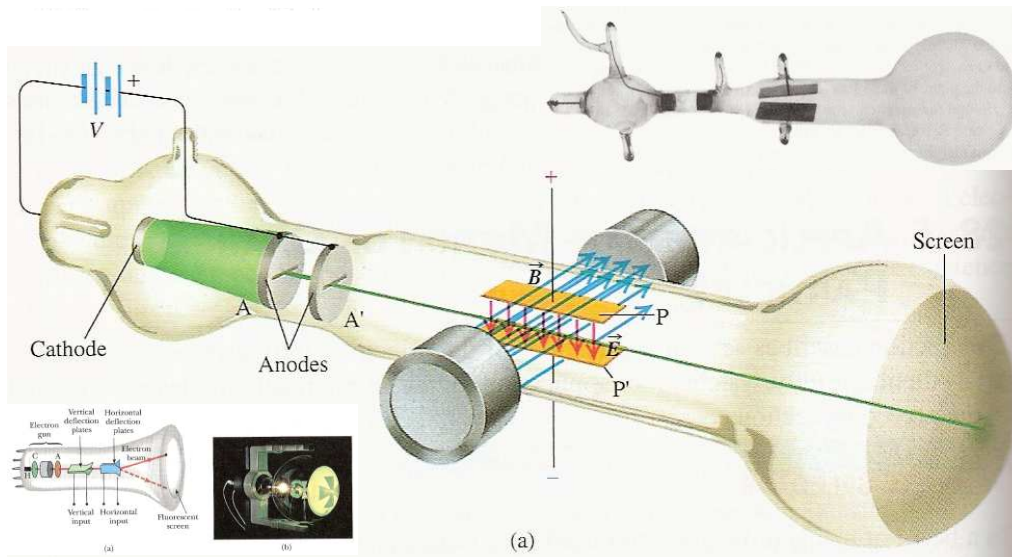
Selector de velocidades de partículas carregadas usa campos E e B perpendiculares



$$qvB = qE$$

$$v = E / B$$

Experiência de Thomson para determinar a razão e/m



$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Rever o
osciloscópio e a
experiência de
Millikan

$$\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2VB^2} \quad e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

Aplicações da força electromagnética (2)

Espectrómetro de massa (Francis Aston, 1919)

O espectrómetro de massa usa um selector de velocidades para produzir partículas com velocidades uniformes. As partículas com massa diferente, descrevem raios de curvatura diferentes que podem ser medidos:

$$R(m) = m v / q B'$$

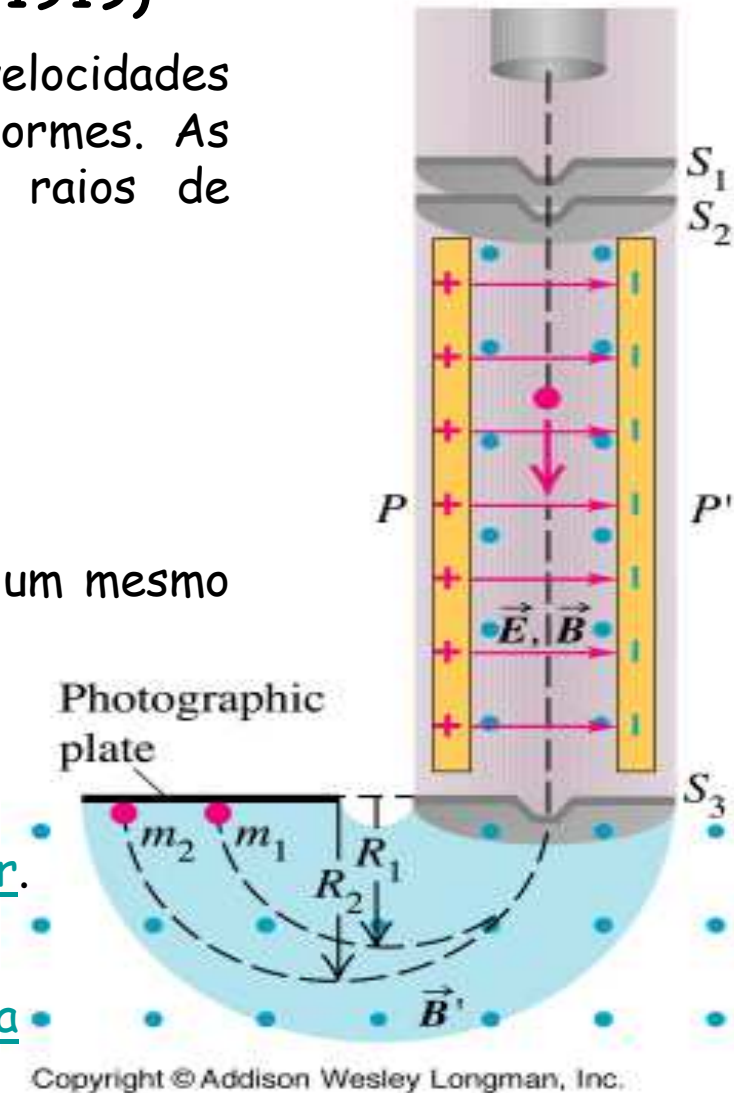
Desta forma é possível separar os isótopos de um mesmo elemento.

Ver, por exemplo:

http://en.wikipedia.org/wiki/Mass_spectrometer.

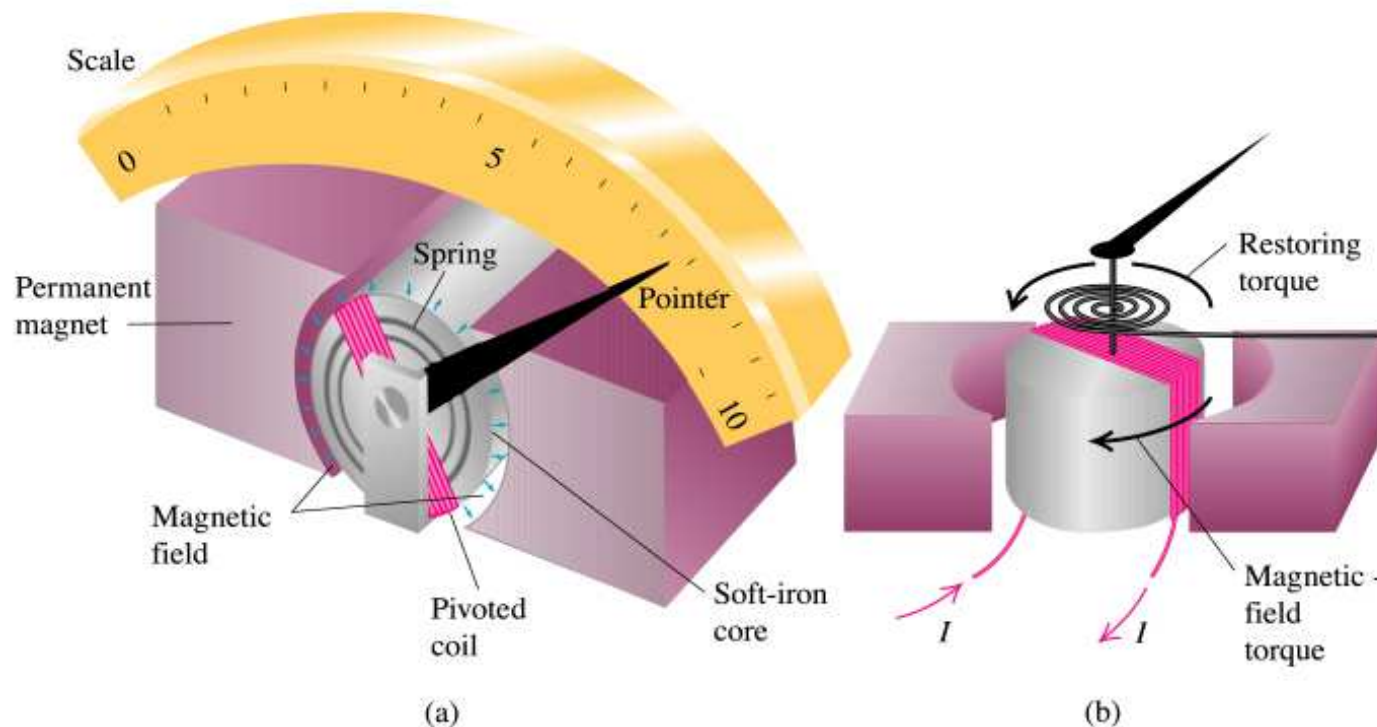
<http://en.wikipedia.org/wiki/Isotope>.

http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1922/aston-bio.html



Galvanómetro

Galvanómetro de d'Arsonval



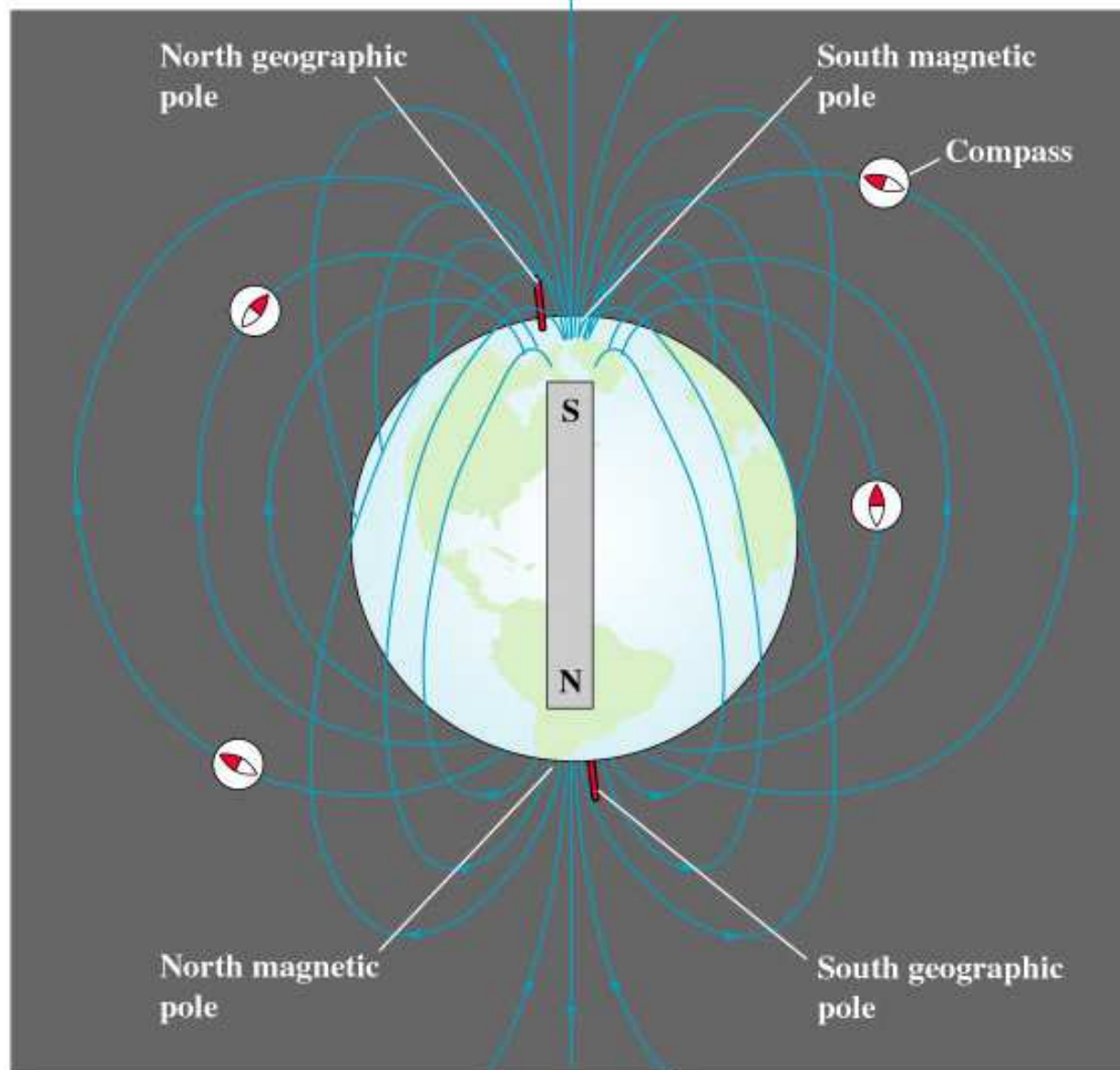
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

The deflection of a magnetic compass needle by current in a wire was first described by Hans Oersted in 1820. The phenomenon was studied both for its own sake and as a means of measuring electrical current. The earliest galvanometer was reported by Johann Schweigger at the University of Halle on 16 September 1820.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanometer>

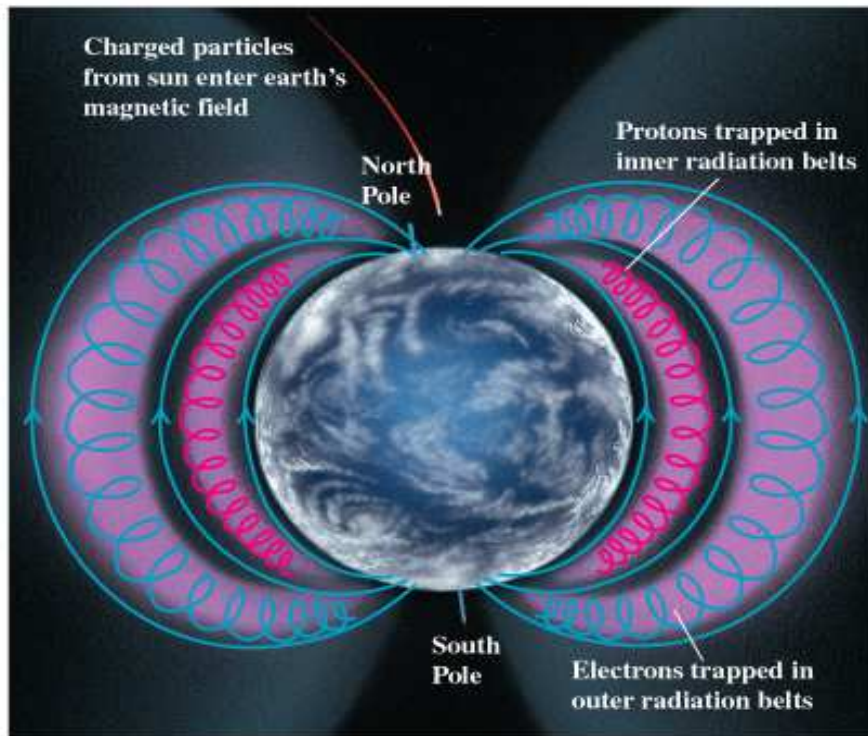
Terra: um ímã permanente

O campo magnético da terra é da ordem de 1 gauss (~ 0.1 militesla).

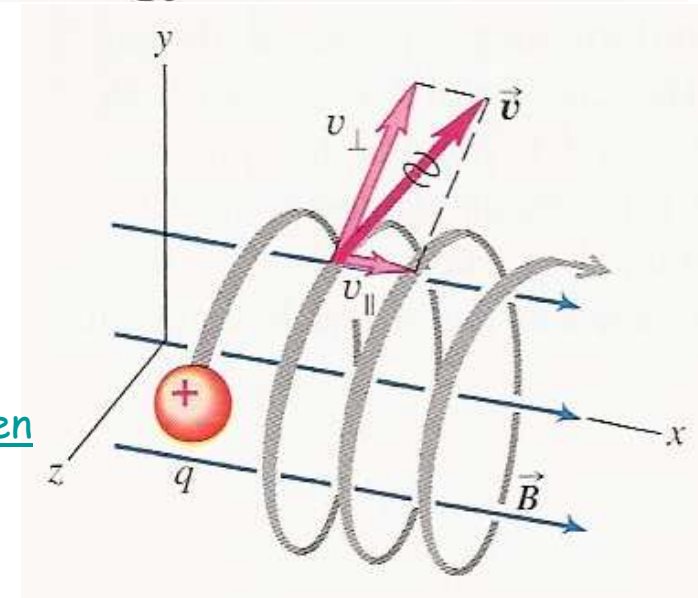


Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

Cintura de radiação de Van Allen em torno da Terra



28–14 When a charged particle has velocity components both perpendicular and parallel to a uniform magnetic field, the particle moves in a helical path. The magnetic field does no work on the particle, so its speed and kinetic energy remain constant.



[http://pt.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%A3o de Van Allen](http://pt.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%A3o_de_Van_Allen)



Aurora boreal: (geog.) aurora de luz difusa, constituída por faixas e arcos coloridos e brilhantes, que se observa em latitudes boreais. ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Aurora polar](http://pt.wikipedia.org/wiki/Aurora_polar))

Campo magnético – escudo protector (Vento solar)



Tempestades geomagnéticas

Em Outubro de 2003, a magnetosfera da Terra foi atingida por uma *chama* solar que causou uma breve, mas intensa tempestade geomagnética, provocando a ocorrência de auroras boreais muito intensas.



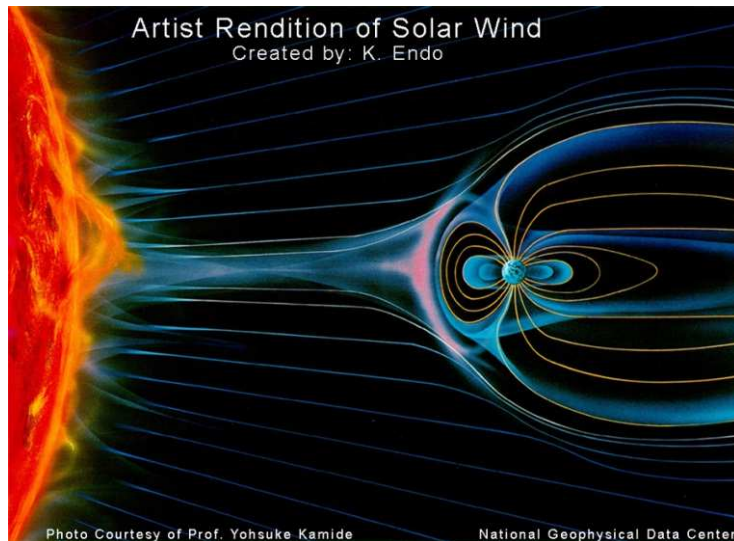
O Campo magnético do Sol é milhares de vezes superior ao da Terra. Por vezes as linhas de campo formam espirais que se estendem a mais de 100 000 km acima da "superfície" do Sol. O campo magnético exerce forças nos iões da atmosfera solar, fazendo com que estes descrevam espirais em torno das linhas de campo, produzindo arcos enormes de gás incandescente designados proeminências.

http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_magnetic_field

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sol>

http://pt.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico_terrestre

O campo magnético da Terra e as missões espaciais

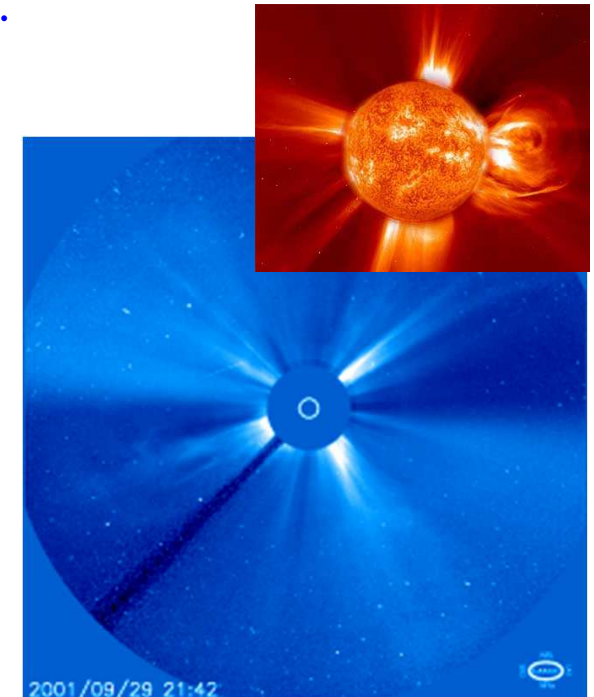
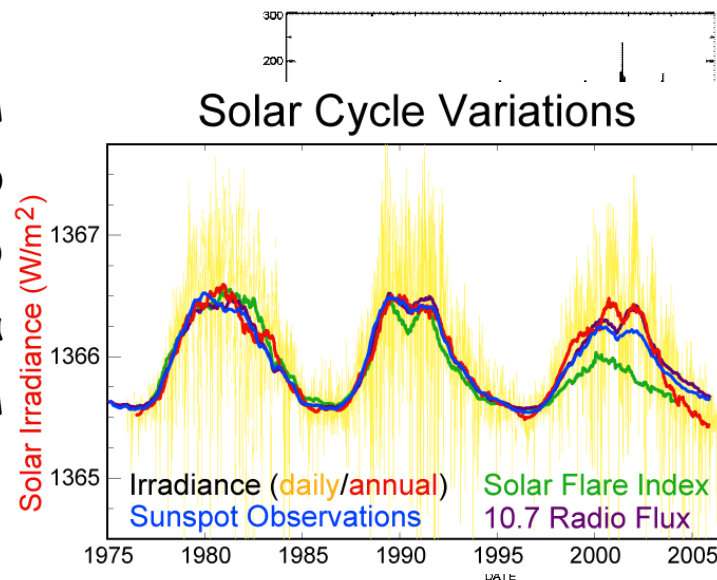


Porque é que ainda não temos bases lunares e ou não fomos a Marte? Poderá haver muitas razões, mas a principal é a falta de protecção radiológica, isto é, a saúde dos astronautas.

A fonte de radiação ionizante mais importante no sistema solar é o Sol. Na vizinhança do planeta Terra estamos protegidos pelo campo Magnético Terrestre. Mas no espaço profundo essa protecção não existe.

Ciclo solar

O ciclo solar, também conhecido como ciclo solar de Schwabe é o ciclo que mostra a actividade do sol em intervalos de ~11 anos.



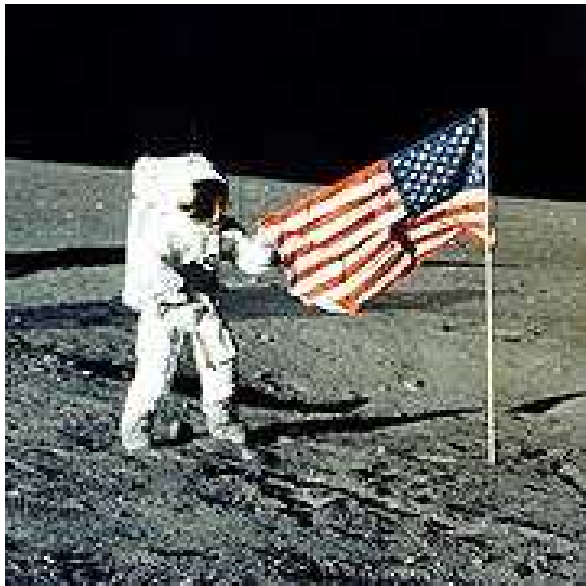
http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_solar

Como proteger os astronautas da radiação solar?



Viagem a Marte.

Durante a viagem, os astronautas ficarão expostos a doses de radiação ionizante muito elevadas. Solução: **Nano-medicina (ver vídeo).**

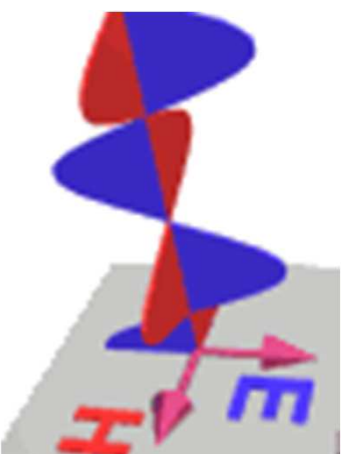
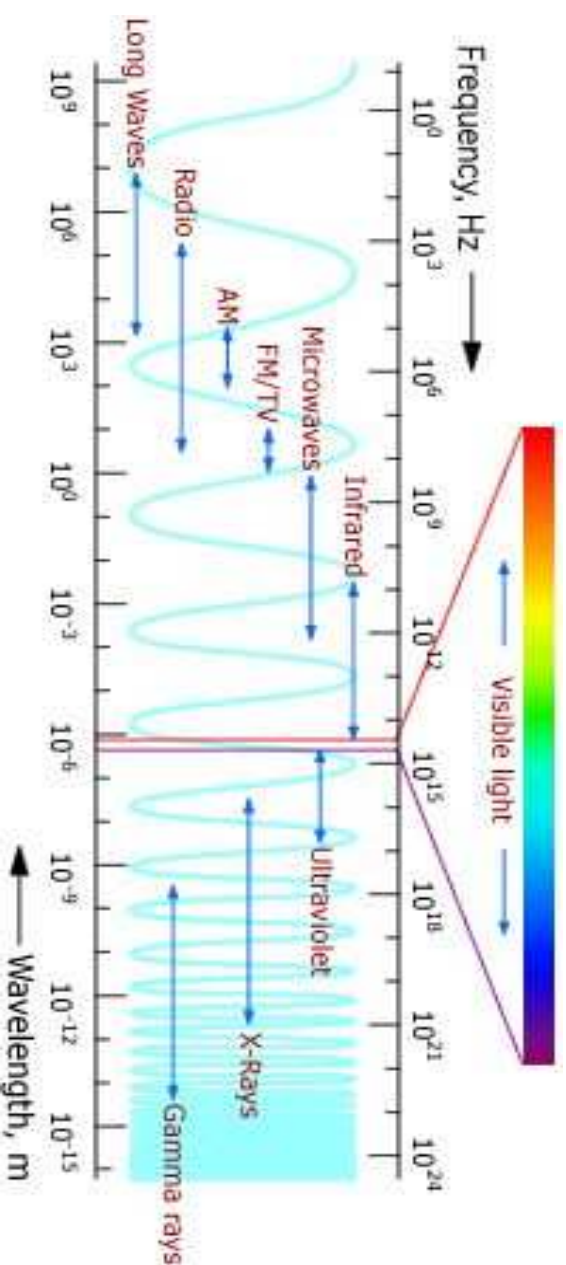
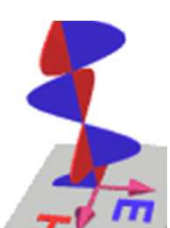
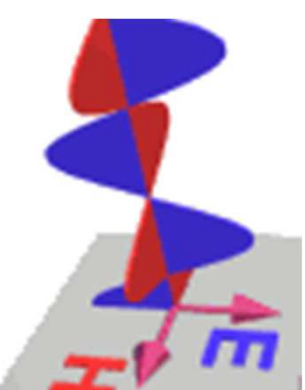
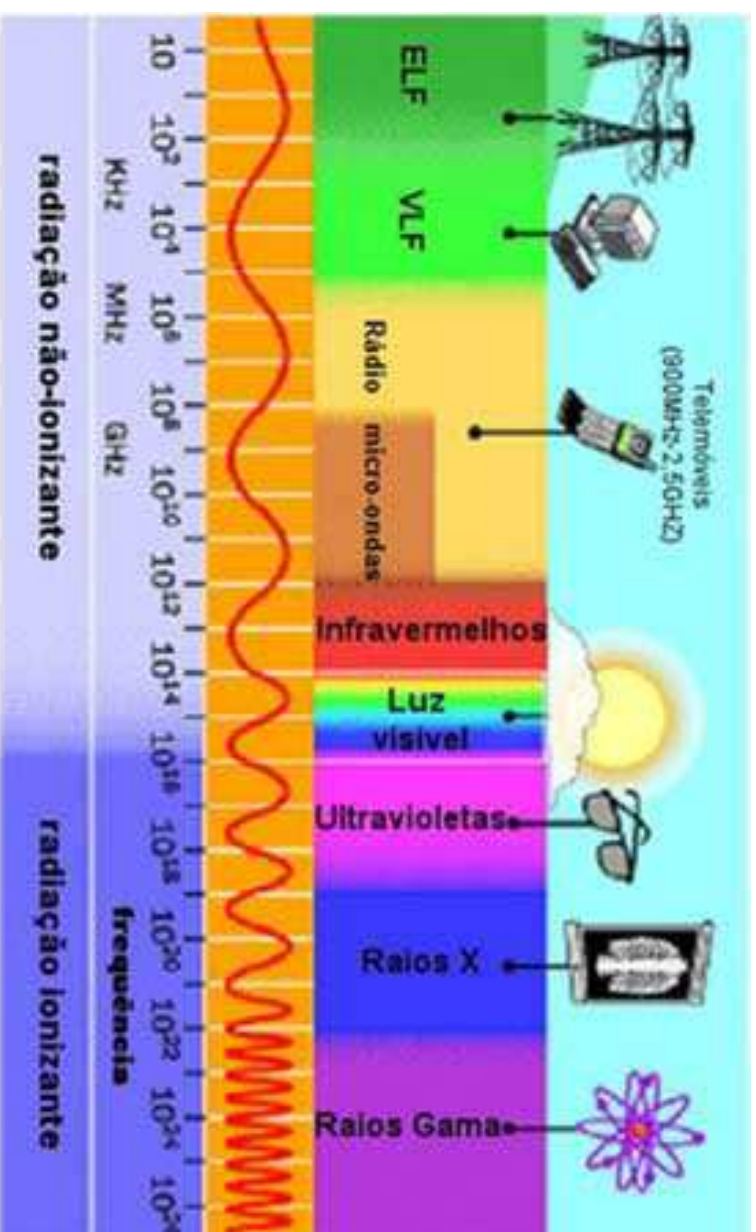


Radiação electromagnética e Espectro electromagnético

Radiação (fís.) termo utilizado quase exclusivamente para designar as várias formas de transferência de energia electromagnética, incluindo raios gama, raios X, raios ultravioletas, raios visíveis, raios infravermelhos e rádio, que se propagam todos, no vazio, com a mesma velocidade;

Radiação *não electromagnética*: feixes de partículas alfa, partículas beta, neutrões, prótons, deutérios, mesões, átomos, moléculas, etc., que se designam por radiação corpuscular.

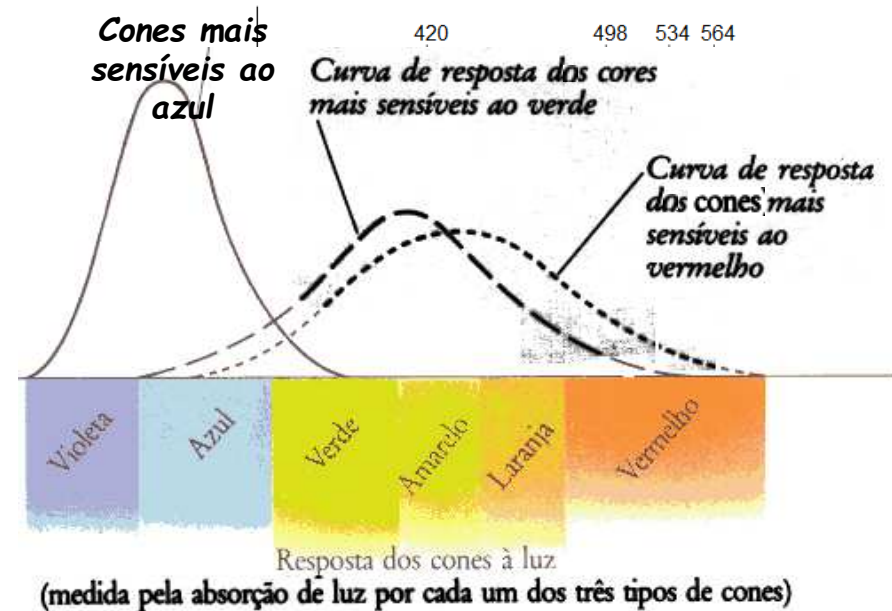
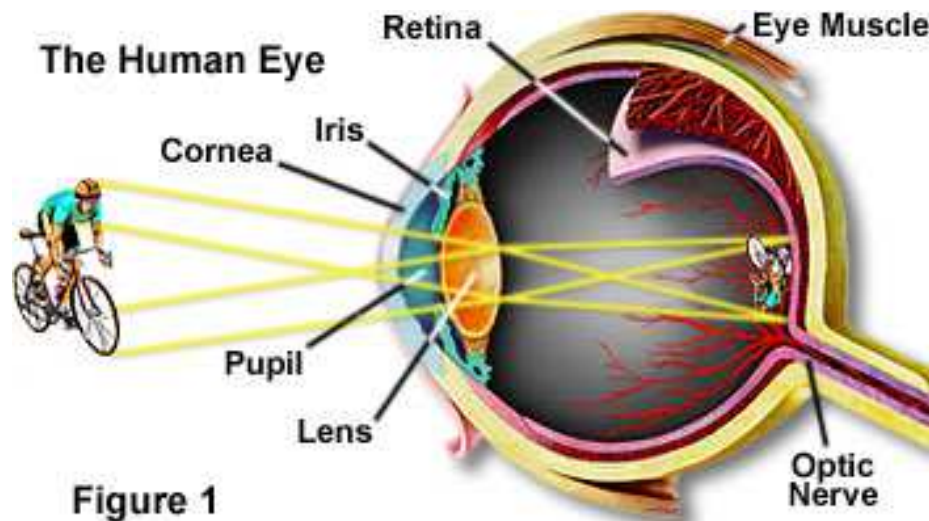
Espectro Electromagnético



Radiação/Luz visível

O **olho** é um órgão que permite detectar a luz e transformar essa percepção em impulsos eléctricos. Os olhos mais simples não fazem mais do que detectar se as zonas ao seu redor estão iluminadas ou escuras. Os mais complexos servem para proporcionar o sentido da visão.

O cristalino, uma lente natural, focaliza a imagem. Nos seres humanos e nos outros hominídeos a retina é constituída por dois tipos de células foto-receptoras, os bastonetes, que nos dão a percepção de claro e escuro, e os cones, que nos dão a percepção das cores.



http://en.wikipedia.org/wiki/Trichromatic_color_vision

http://en.wikipedia.org/wiki/Color_vision

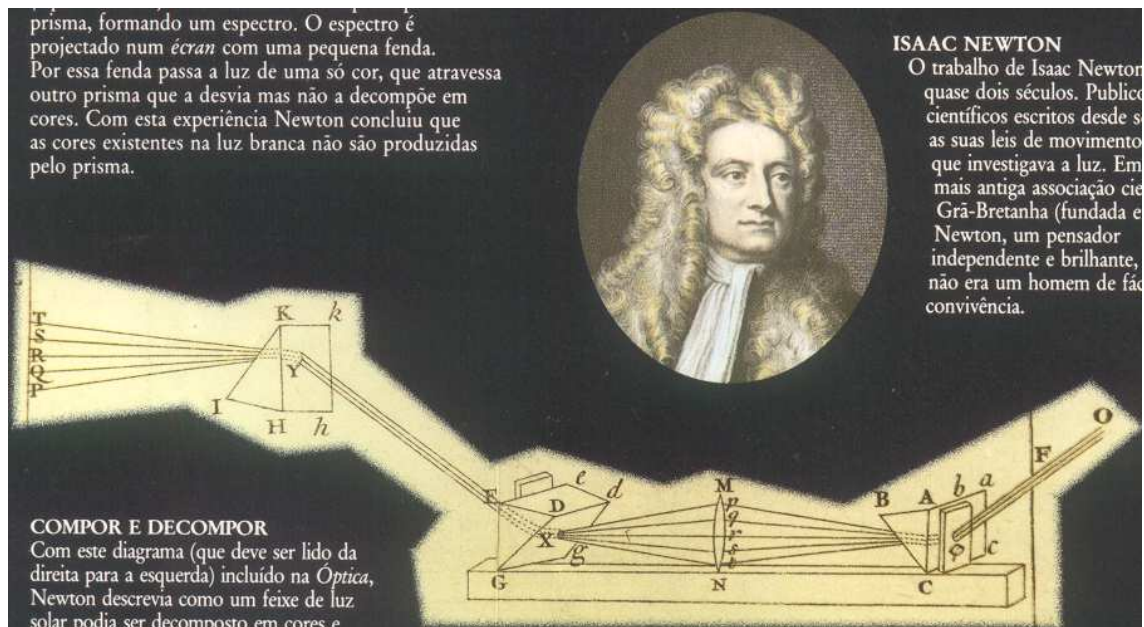
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Olho>

Espectro da luz branca

Decomposição da luz branca

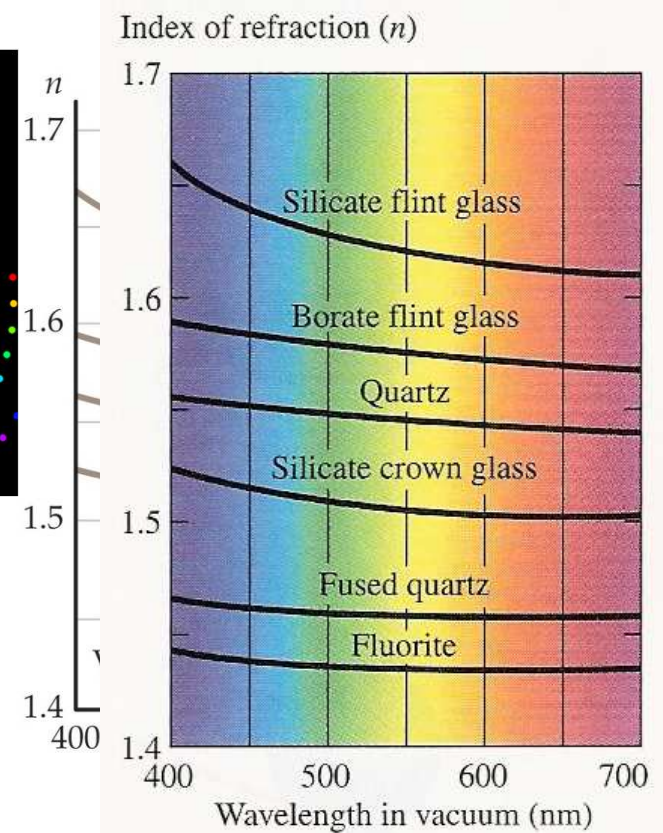
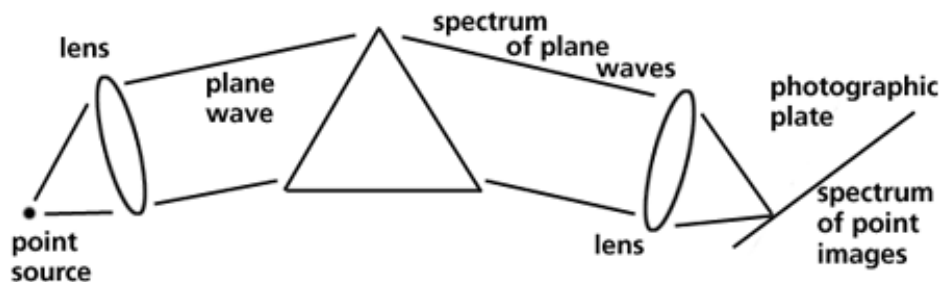
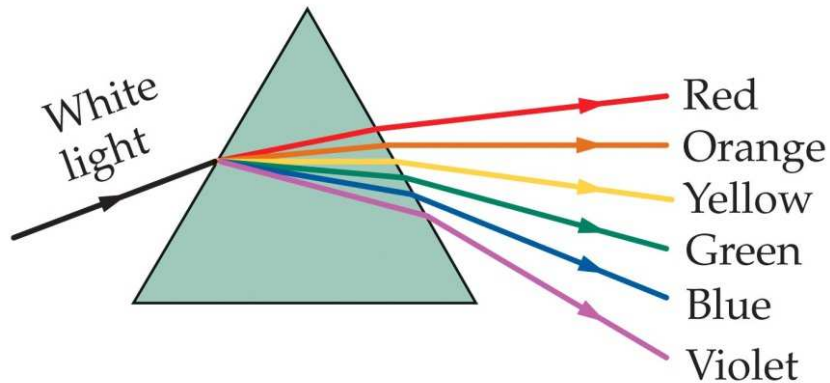
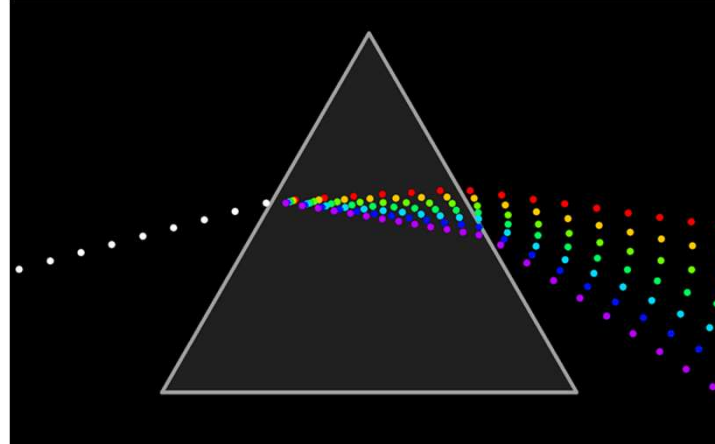
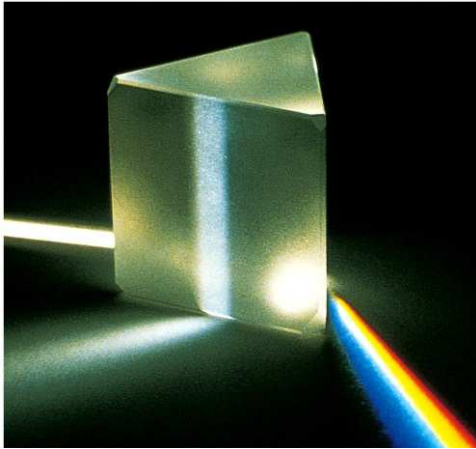


Recomposição da luz branca



Dispersão da luz

Dispersão: (fis.) separação de uma radiação heterocromática nas radiações simples que a compõem; disseminação; variação do índice de refração de uma substância com o comprimento de onda da radiação;



34-13 Variation of index of refraction n with wavelength for different transparent materials. The horizontal axis shows the wavelength λ_0 of the light *in vacuum*; the wavelength in the material is equal to $\lambda = \lambda_0/n$.

A percepção da cor

Luz visível: fluxo radiante capaz de estimular a retina para produzir a sensação visual. O **olho** é um órgão dos animais que permite detectar a luz e transformar essa percepção em impulsos eléctricos.

A cor é uma percepção visual provocada pela acção de um feixe de fotões sobre células especializadas da retina, que transmitem através de informação pré-processada no nervo óptico, impressões para o sistema nervoso.

A cor de um material é determinada pelas médias de frequência dos pacotes de onda que as suas moléculas constituintes reflectem. Um objecto terá determinada cor se não absorver justamente a luz correspondentes à frequência daquela cor.

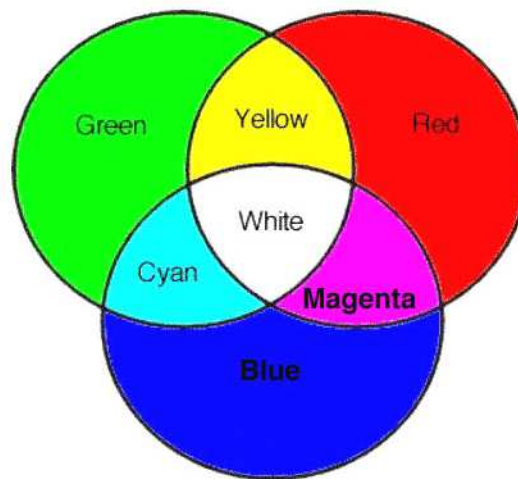
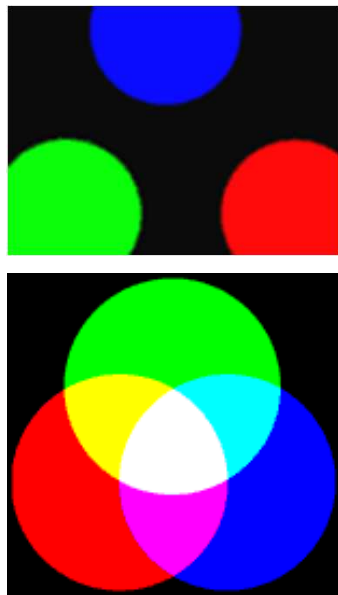
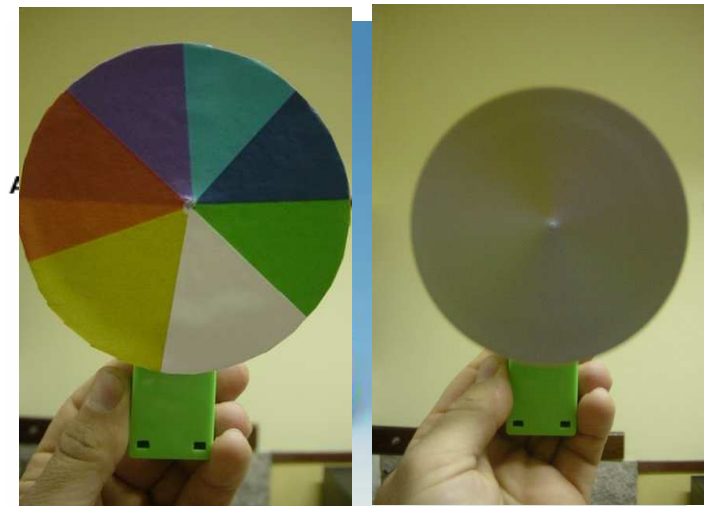


Figure 3. Additive colour mixtures of blue, green and red to produce cyan, magenta, yellow and white.

Disco de Newton



<http://pt.wikipedia.org/wiki/Cor>

<http://www.youtube.com/watch?v=dmZG2UWZHuY>

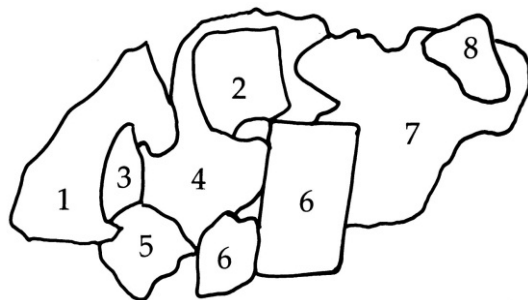
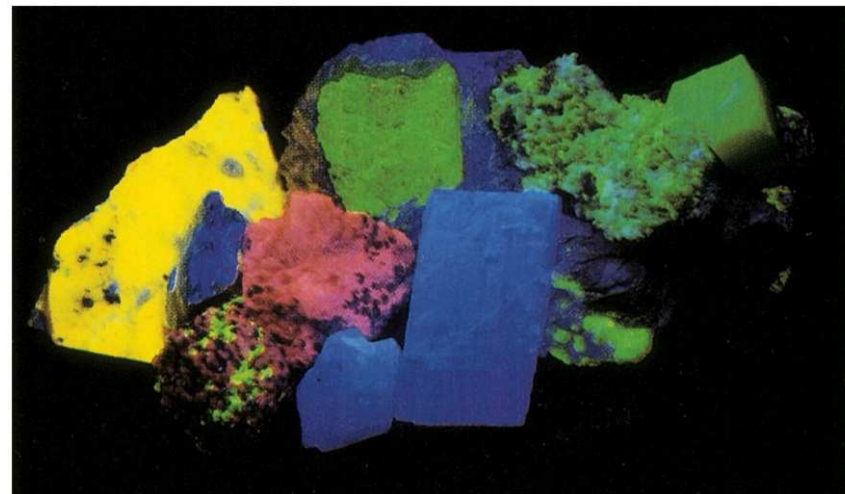
http://pt.wikipedia.org/wiki/Percep%C3%A7%C3%A3o_visual

A cor e as condições de iluminação

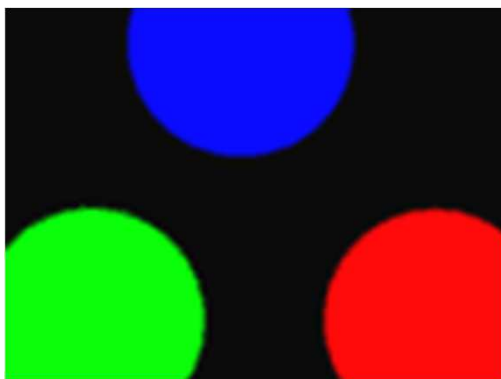
Conjunto de cristais iluminados com luz branca.



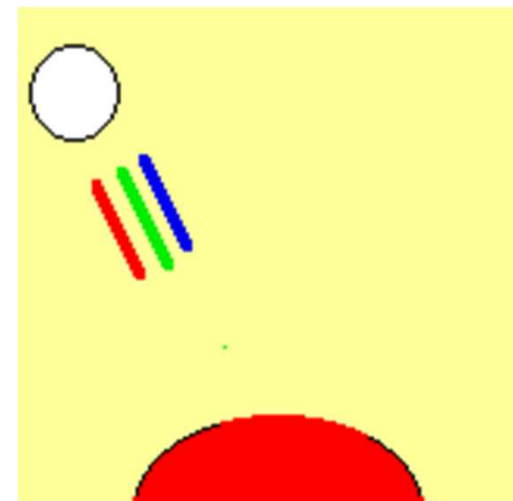
Conjunto de cristais iluminados com ultravioleta (luz negra)



1 powerlita; 2 vilemita; 3 scheelita; 4 calcita; 5 composto de calcita e vilemita; 6 calcita óptica; 7 vilemita; 8 opal.

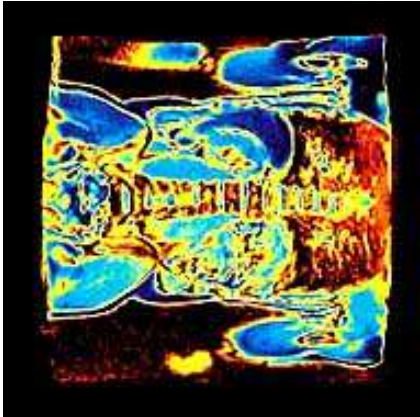
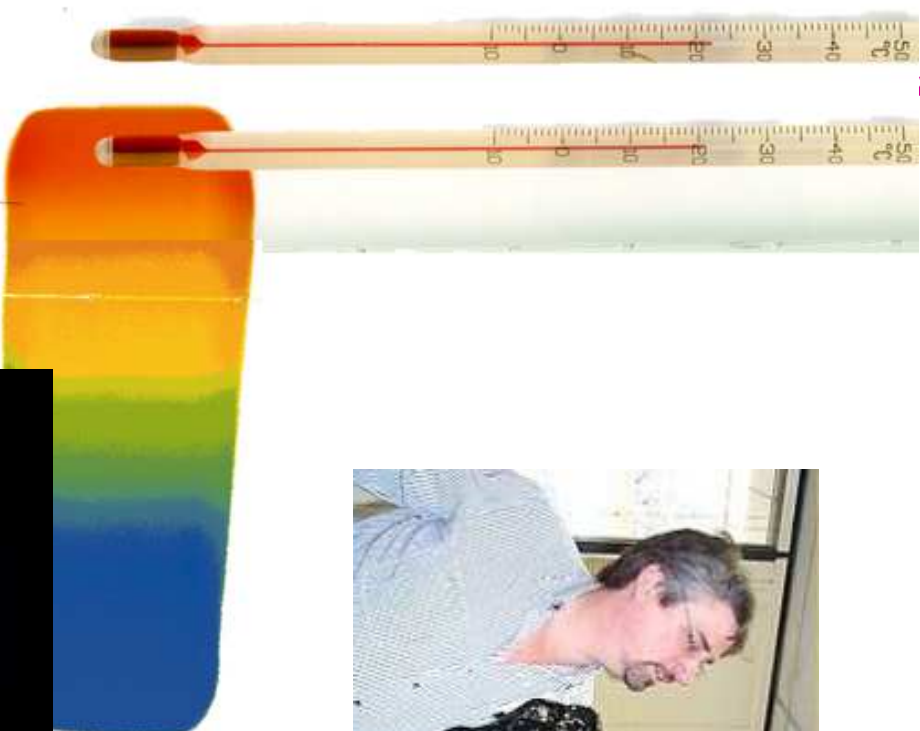
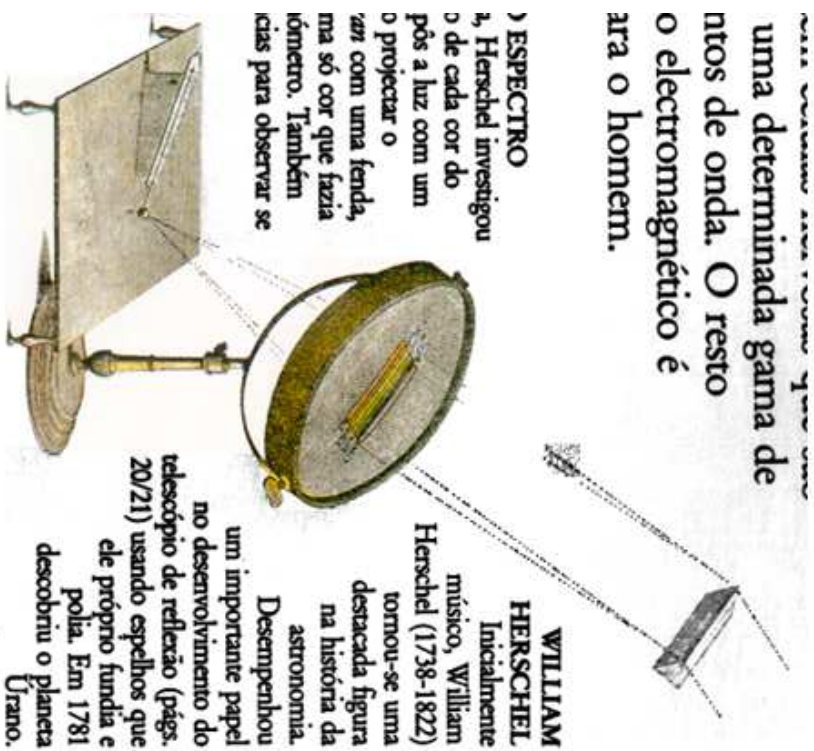


A variação na cor é devida à fluorescência sob luz ultravioleta. Na calcita óptica tanto ocorre a fluorescência como a fosforescência.



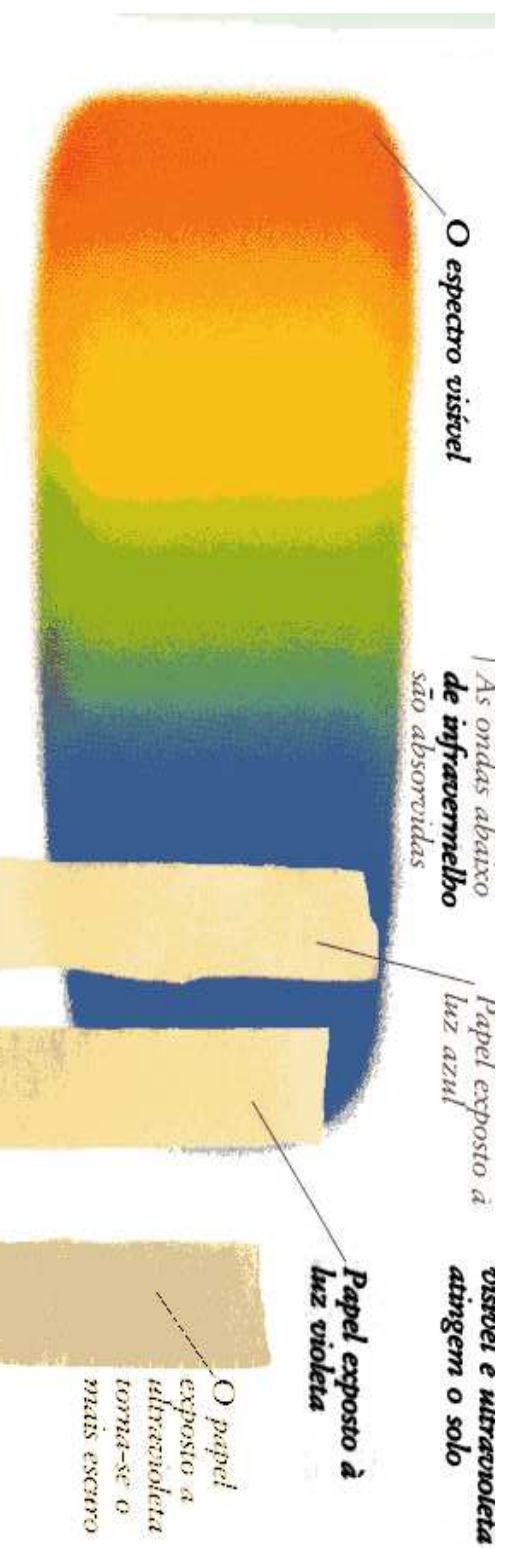
Descoberta da Radiação Infravermelha

~1800



Descoberta da Radiação Ultravioleta

~1800



Fluorescent Mercury Vapor Lamp

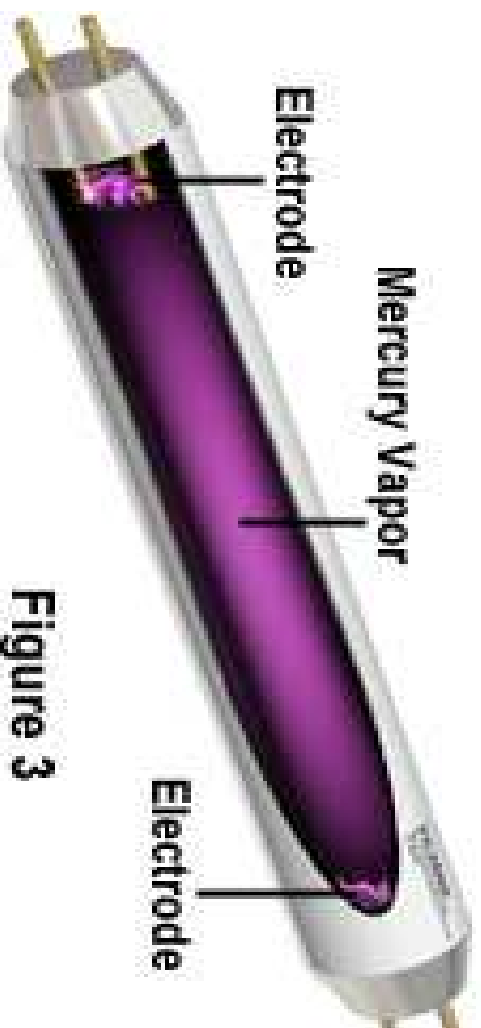
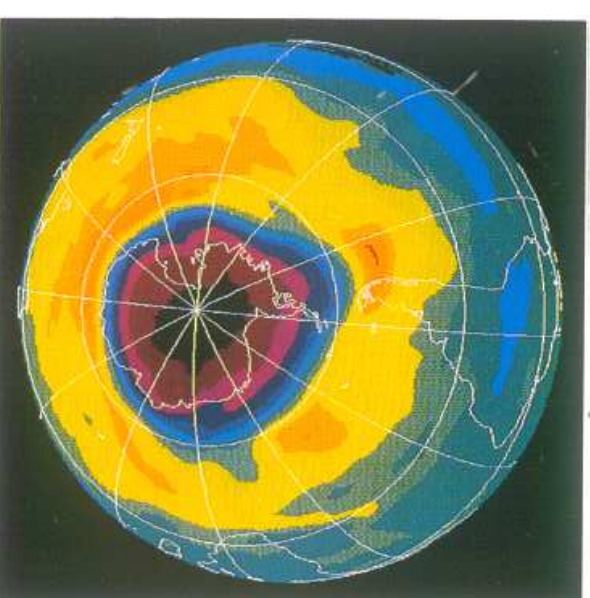
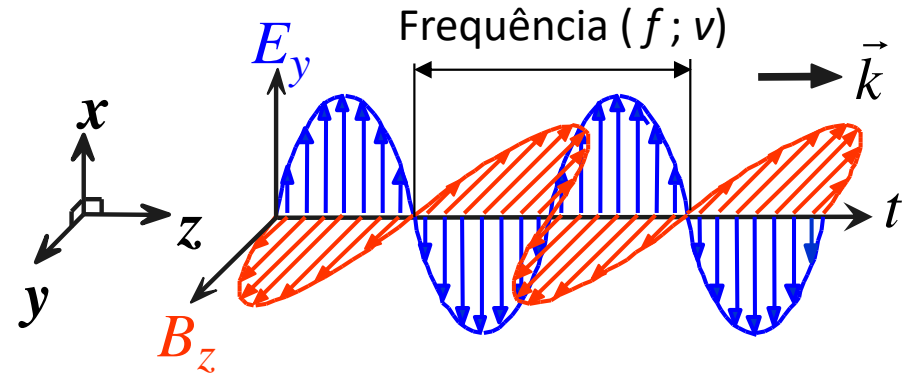
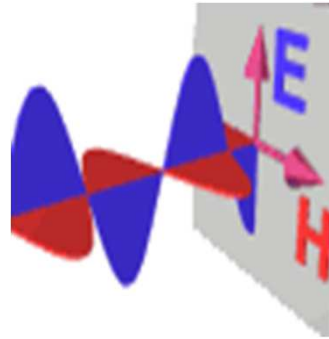


Figure 3



Em 1867 Maxwell prevê a existência de ondas electromagnéticas



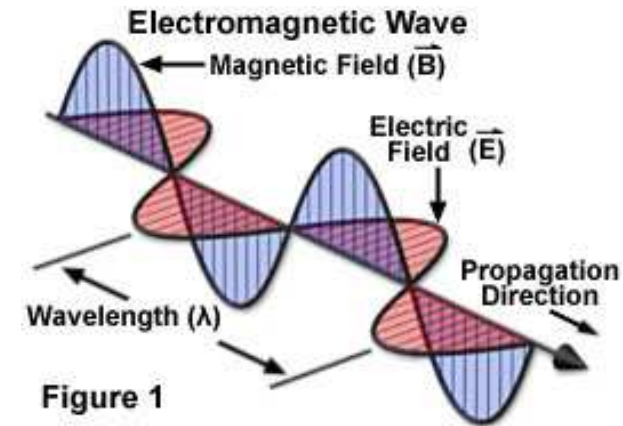
A velocidade das ondas electromagnéticas (OEM) deve ser igual à velocidade da luz c ($\sim 300\,000$ km/s). Em 1887 Hertz mostra experimentalmente que as ondas EM existem.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$c \cong 300\,000 \text{ km/s!!!}$$

Maxwell propõe que a luz é uma onda electromagnética! (Nesta altura já se conhecia o valor da velocidade da luz.)

Em 1897 Hertz verificou que Maxwell tinha razão: existem ondas de electricidade e de magnetismo!

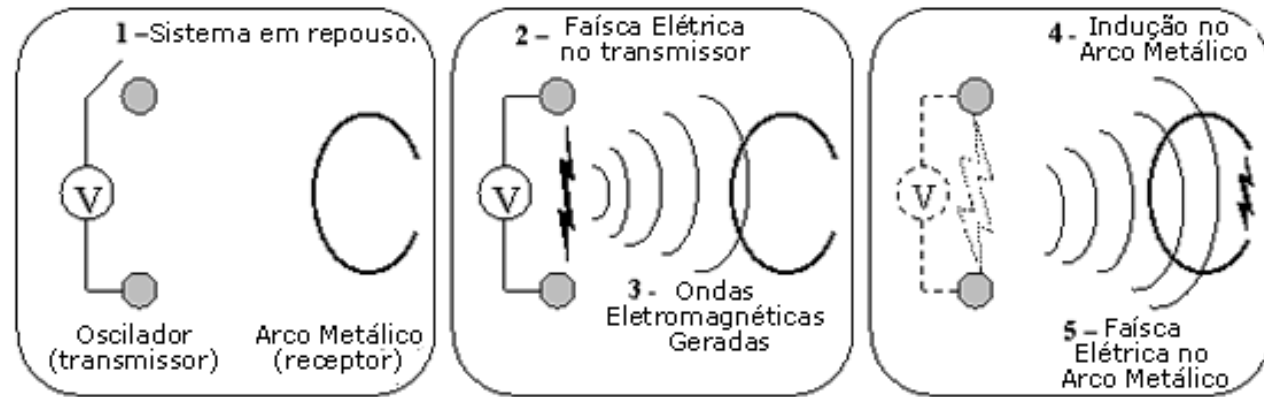


$$c = \lambda \cdot f = \lambda \cdot \nu$$

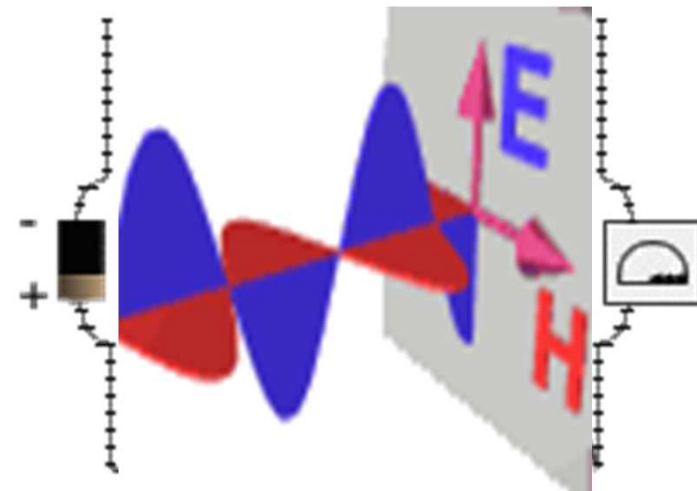
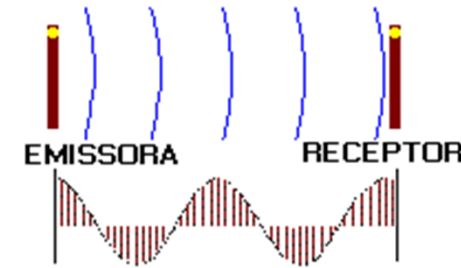
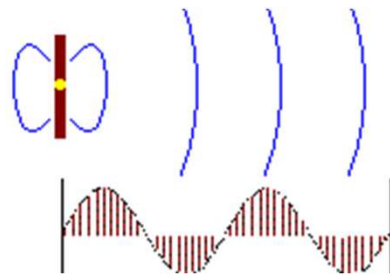
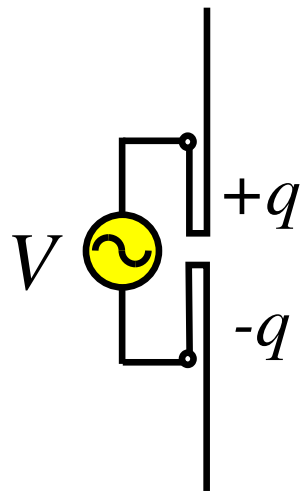
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/TheLightWaveEquation.flv>

Em 1887 Hertz descobre as ondas electromagnéticas

(1887 Hertz)



ondas hertzianas

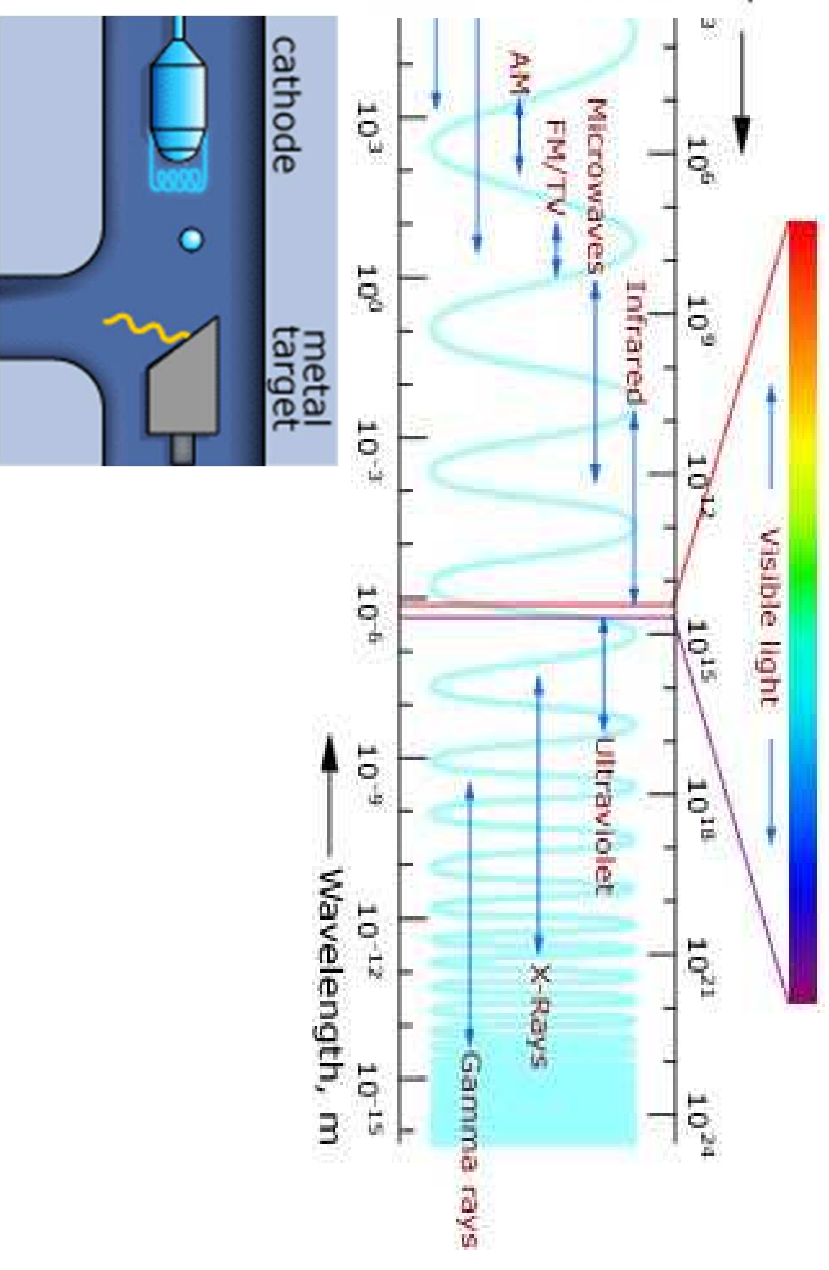
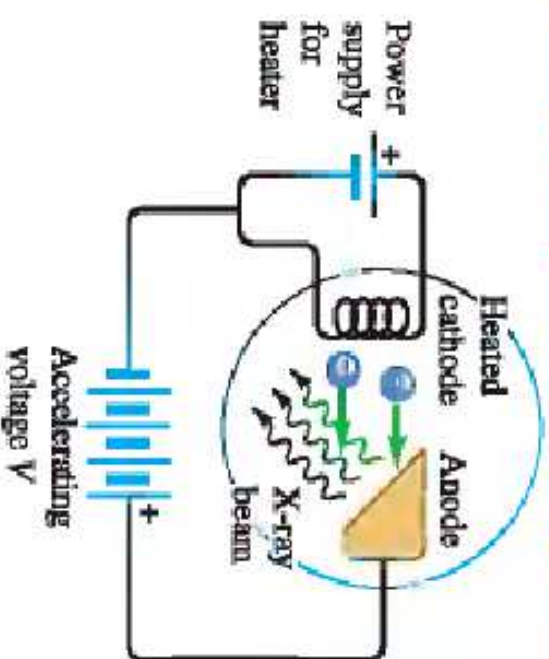


hertziano adj. referente às ondas electromagnéticas, descobertas por Heinrich Hertz, físico alemão, 1857-1894.

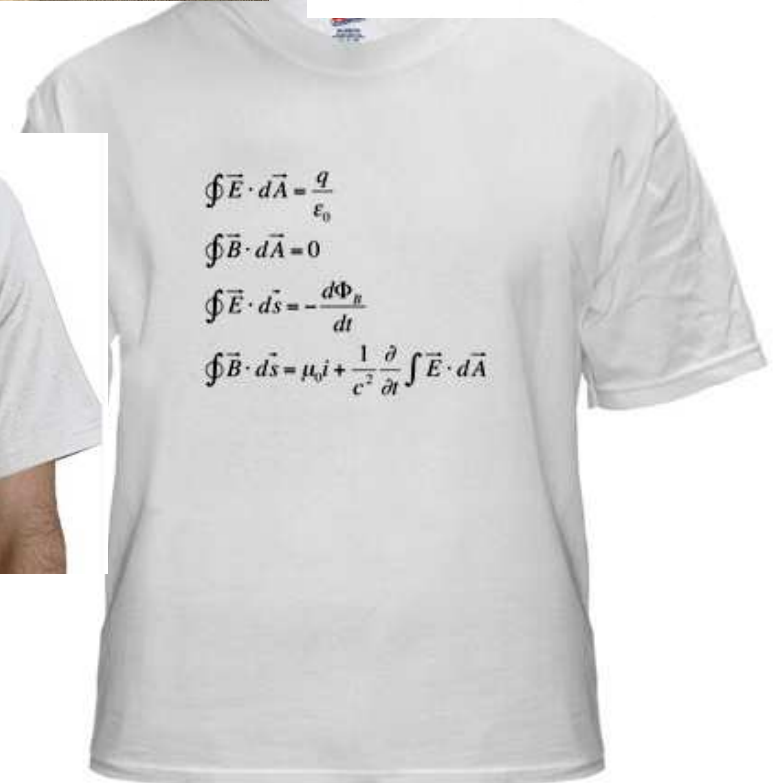
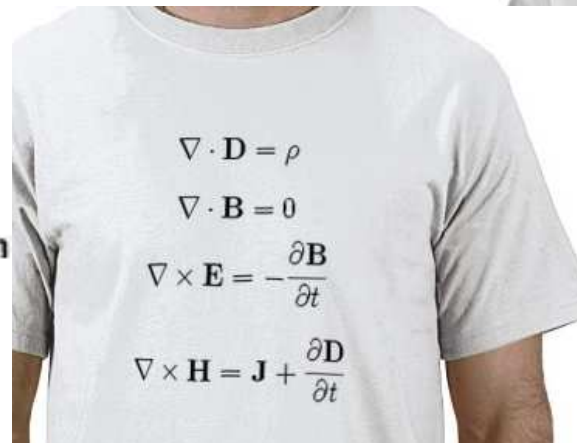
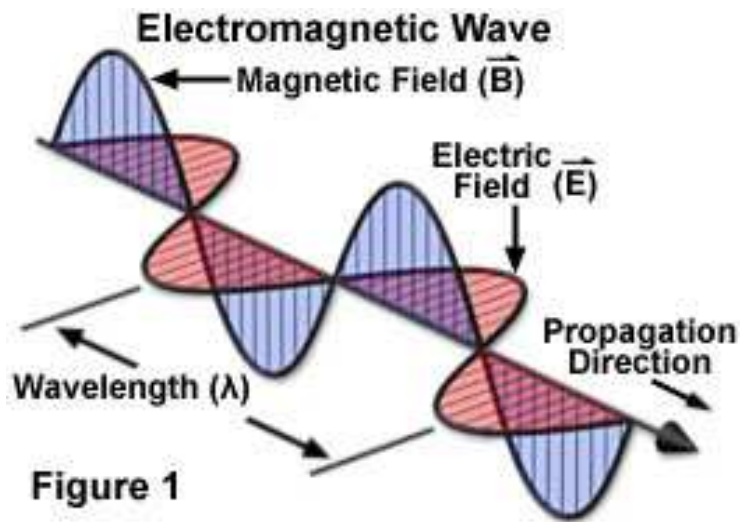
Descoberta dos Raios X

38.25 An apparatus used to produce x rays, similar to Röntgen's 1895 apparatus.

Electrons are emitted thermionically from the heated cathode and are accelerated toward the anode; when they strike it, x rays are produced.



As equações de Maxwell resumem todo o electromagnetismo



Ter presente que $c = \lambda \cdot f = \lambda \cdot \nu$ ($f \equiv \nu$)

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-eo.html>

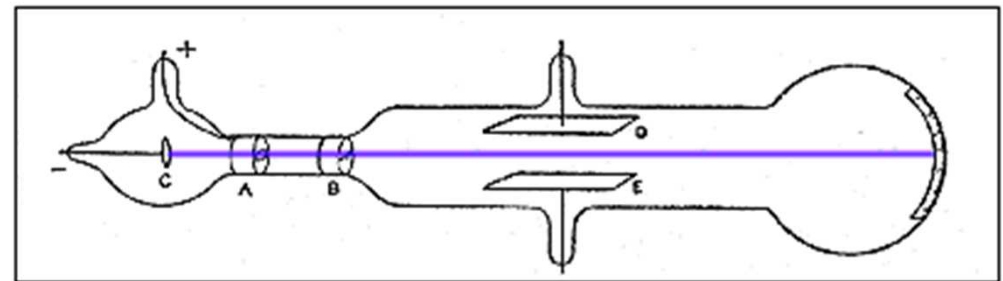
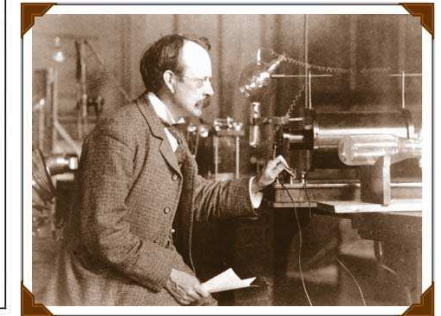
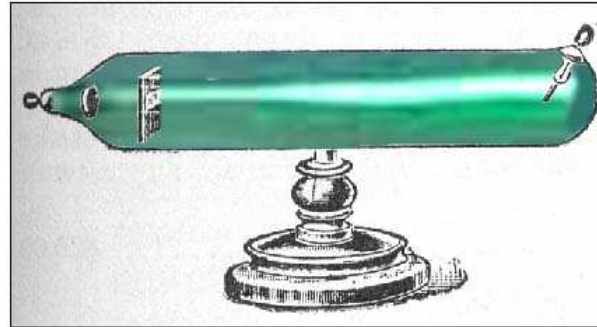
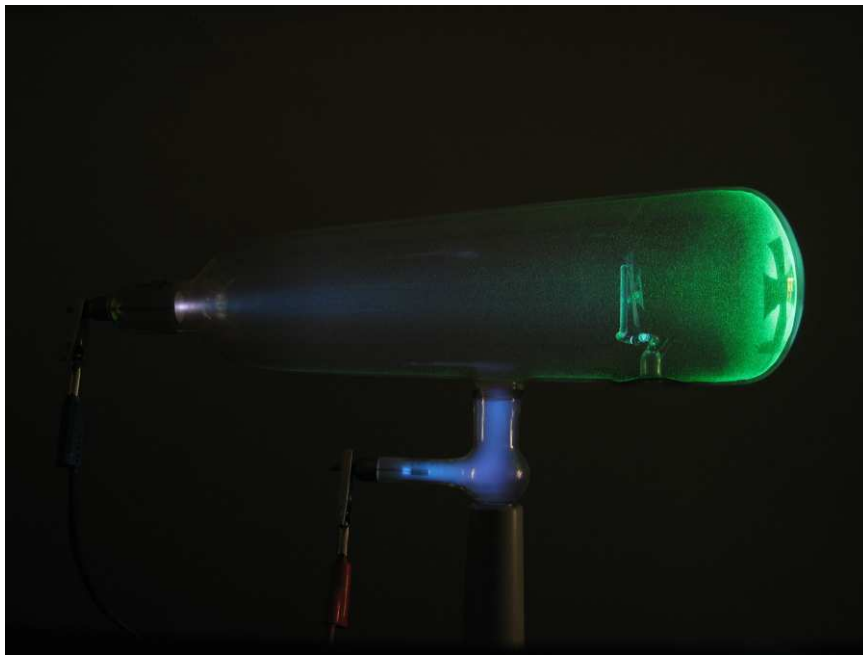
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EeO-MIEET-LF-2008-2009-1a-f.swf>

2011-2012

Da Física Clássica à Física Quântica

Descoberta do electrão

J. J. Thomson, 1897



Electrão: partícula fundamental carregada de electricidade negativa (cujo valor corresponde ao simétrico da carga elementar, $1,6 \times 10^{-19}$ C) que entra na constituição de todos os átomos na natureza e é responsável pelas forças de ligação entre átomos nas moléculas.

No modelo padrão, o electrão é um leptão, junto com o muão, o tau e os neutrinos.

A massa do electrão é de $9,109 \times 10^{-31}$ kg ou $511,0 \text{ keV}/c^2$, onde c representa o valor da velocidade da luz no vácuo. A massa de um electrão em repouso é cerca de 1840 vezes inferior à massa do átomo de hidrogénio, o mais leve dos elementos.

O átomo

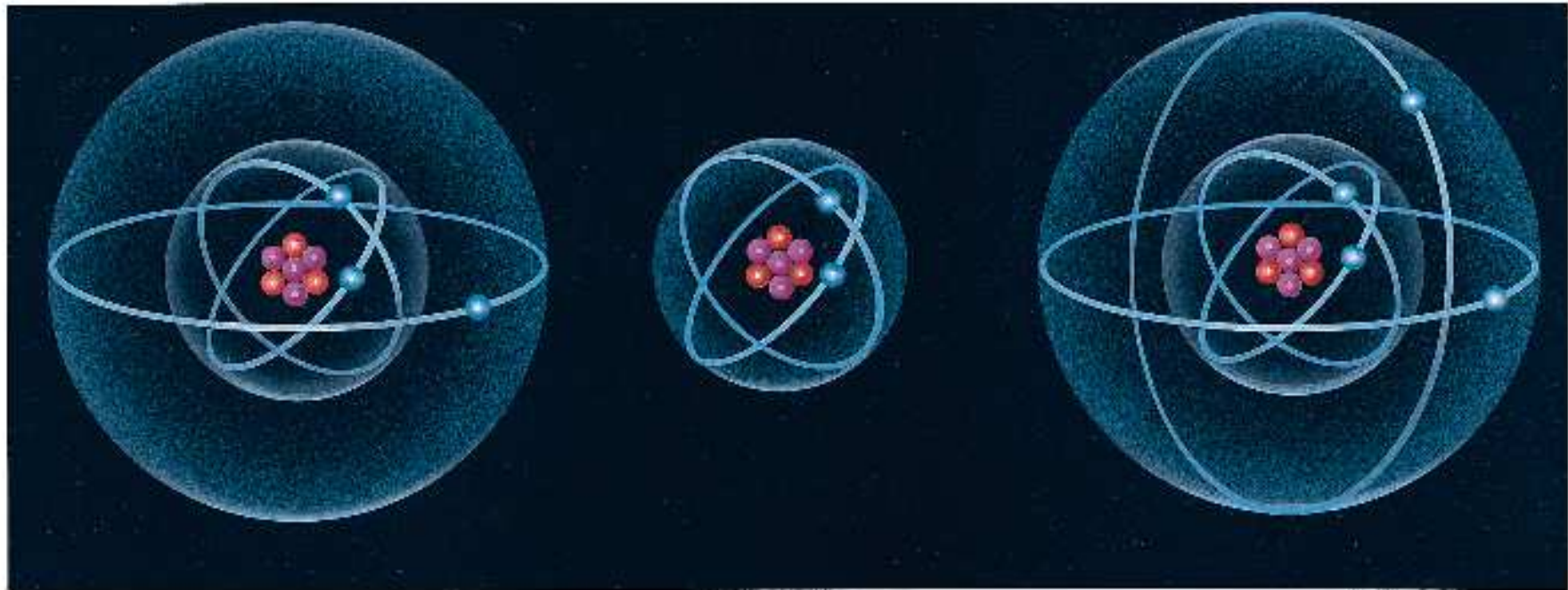


Estrutura atómica

Átomo lítio: electricamente neutro 3 protões e 3 electrões.

Catião Li: falta um electrão – carga efectiva é positiva.

Anião Li: tem um electrão a mais – carga efectiva negativa.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

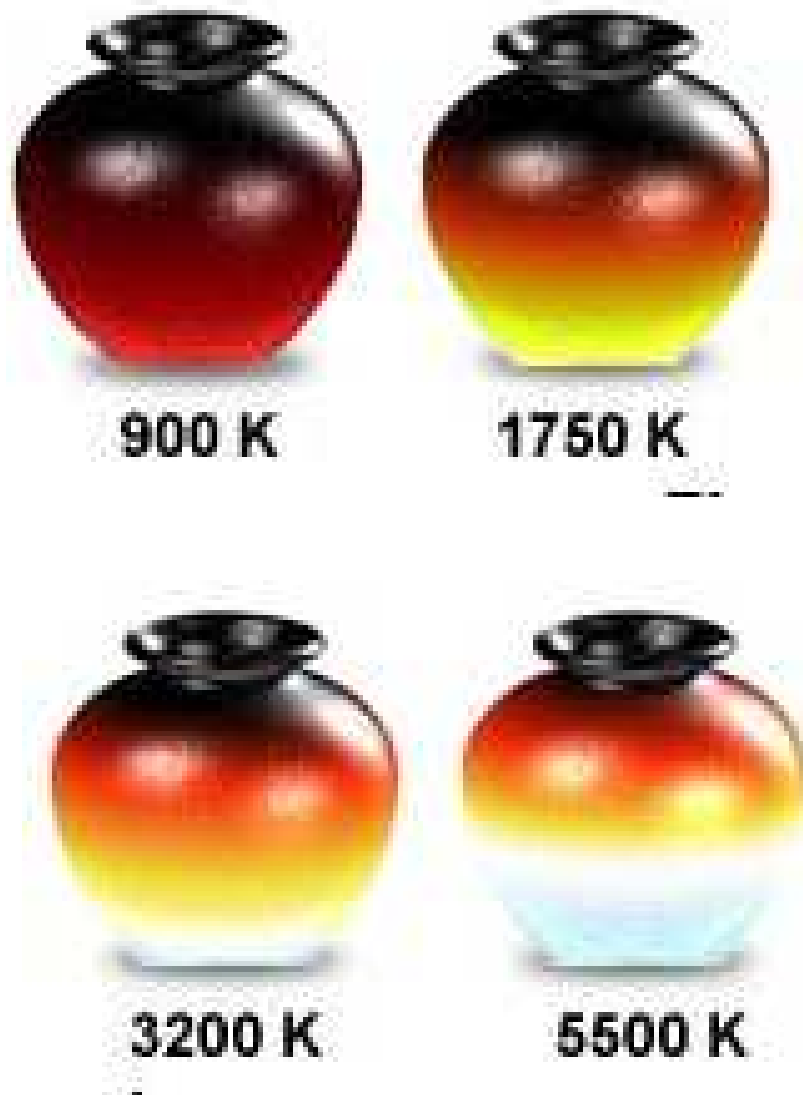
Lítio (quím.) elemento n.º 3 da classificação periódica, que é um metal alcalino, branco e pouco denso, utilizado em várias ligas para aumentar a rigidez e a resistência à corrosão. (Do gr. líthos, «pedra» + -io).

Fotões, Electrões e Átomos

Emissão e absorção de luz pela matéria

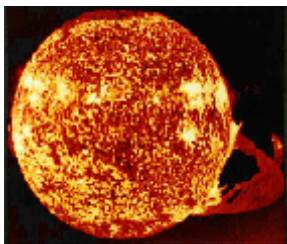
Emissão de radiação electromagnética por *sólidos*

Temperatura de um corpo vs “cor” do corpo



“A cor de uma estela indica a sua temperatura”

Estrela: (astr.) astro aparentemente fixo que tem luz própria; grande e luminosa esfera de plasma, mantida íntegra pela gravidade. A estrela mais próxima da Terra é o Sol, que é a fonte da maior parte da energia do planeta. Outras estrelas são visíveis da Terra durante a noite, quando não são ofuscadas pela luz do Sol ou bloqueadas por fenómenos atmosféricos.



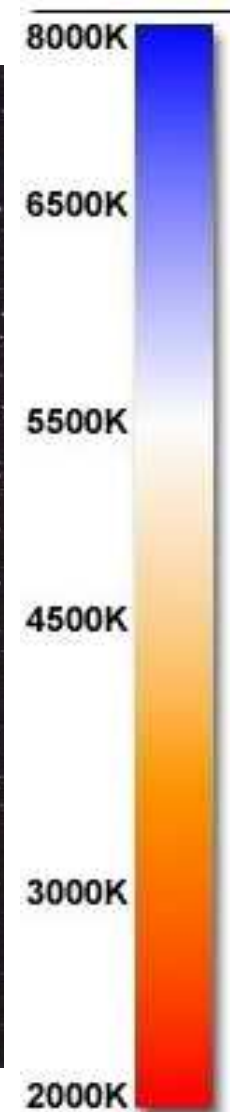
Olho nu



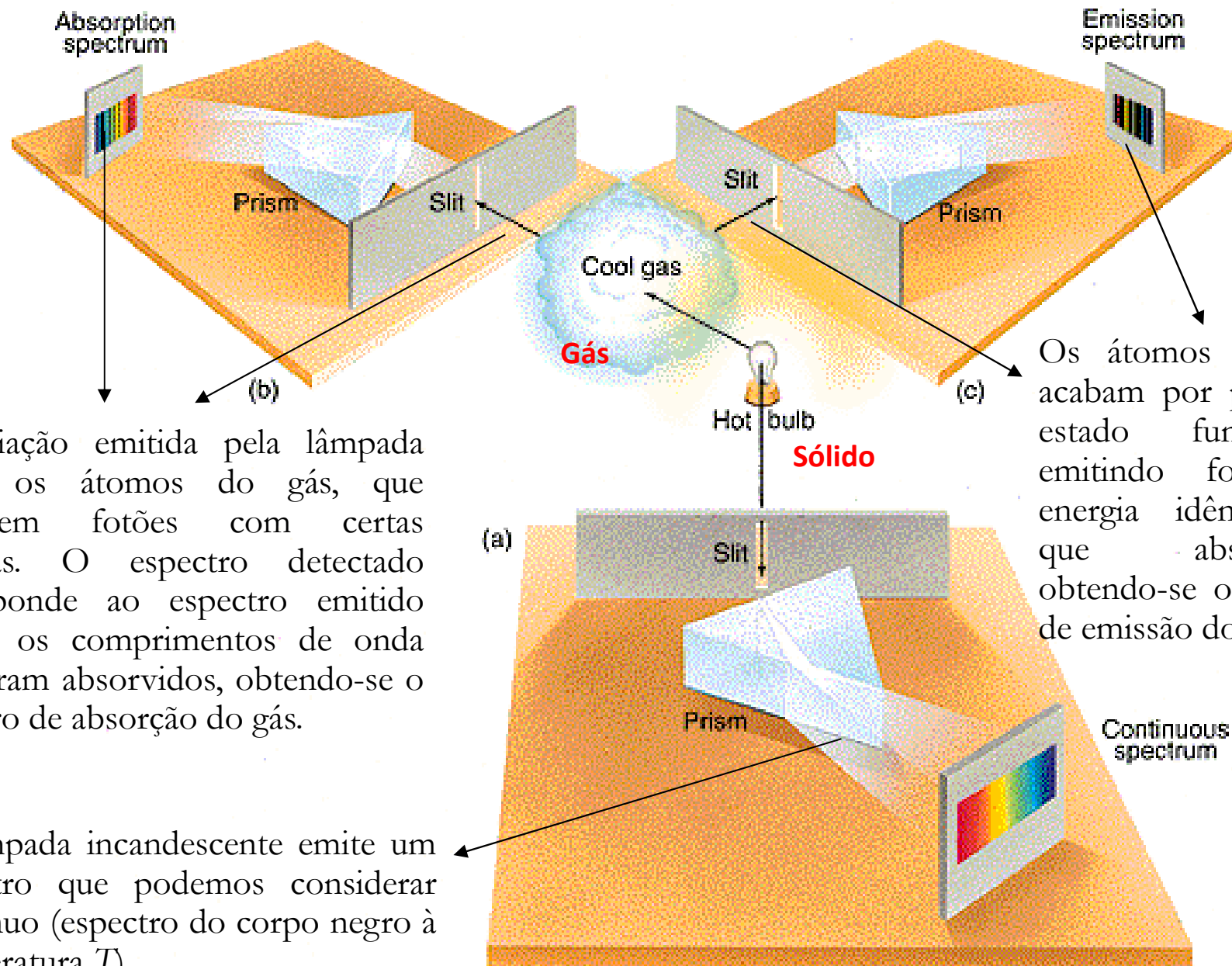
Telescópio



A constelação de Órion



Emissão e absorção de radiação pela matéria



A radiação emitida pela lâmpada excita os átomos do gás, que absorvem fótons com certas energias. O espectro detectado corresponde ao espectro emitido menos os comprimentos de onda que foram absorvidos, obtendo-se o espectro de absorção do gás.

A lâmpada incandescente emite um espectro que podemos considerar contínuo (espectro do corpo negro à temperatura T).

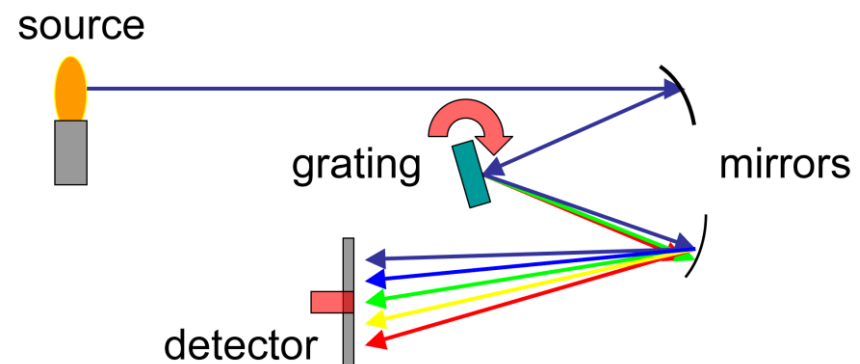
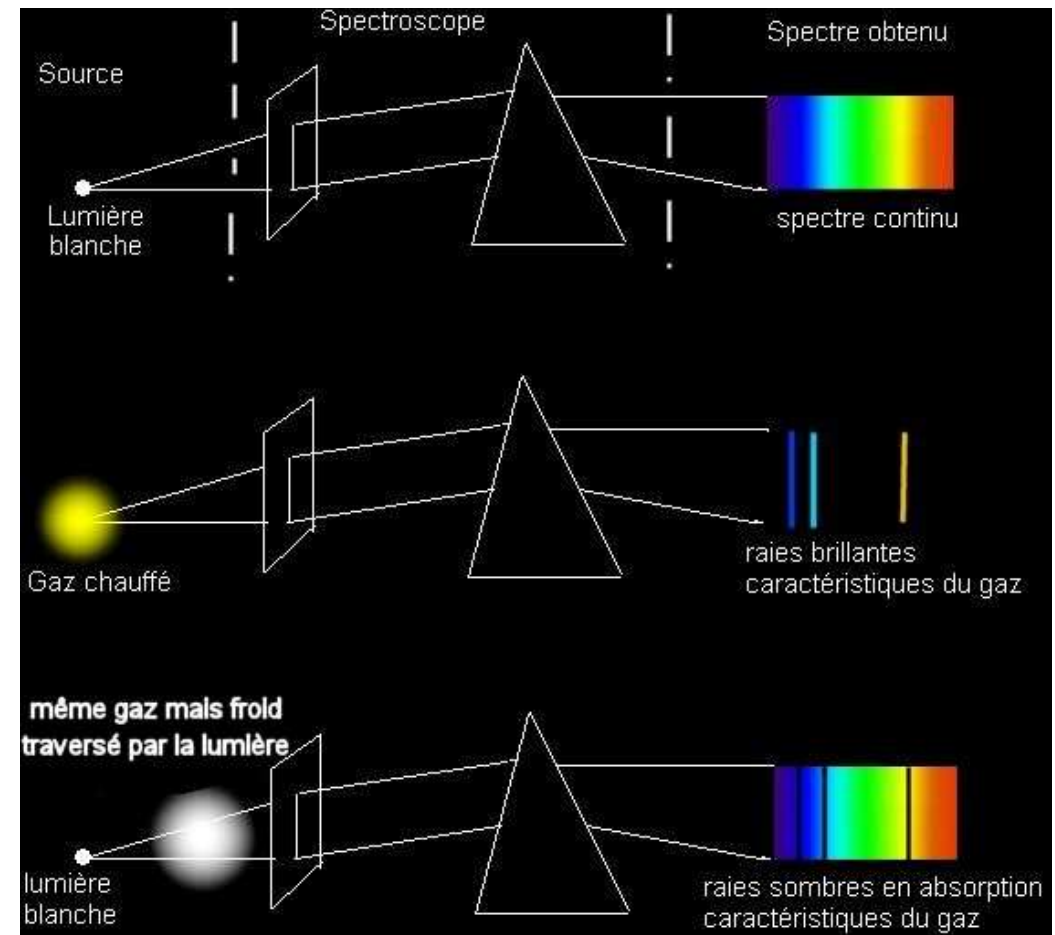
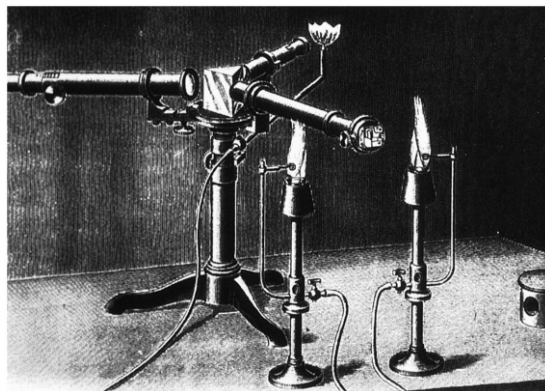
Os átomos excitados acabam por passar ao estado fundamental emitindo fótons de energia idêntica aos que absorveram, obtendo-se o espectro de emissão do gás.

Espectroscopia

Espectroscopia: estudo das radiações luminosas por meio dos espectros (do lat. spectru-, «espectro»+gr. skope,n, «olhar»+ -ia)

Espectroscópio: s. m. instrumento para observar o espectro de qualquer luz (do lat. spectru-, «espectro» + gr. skope,n, «olhar» + -io)

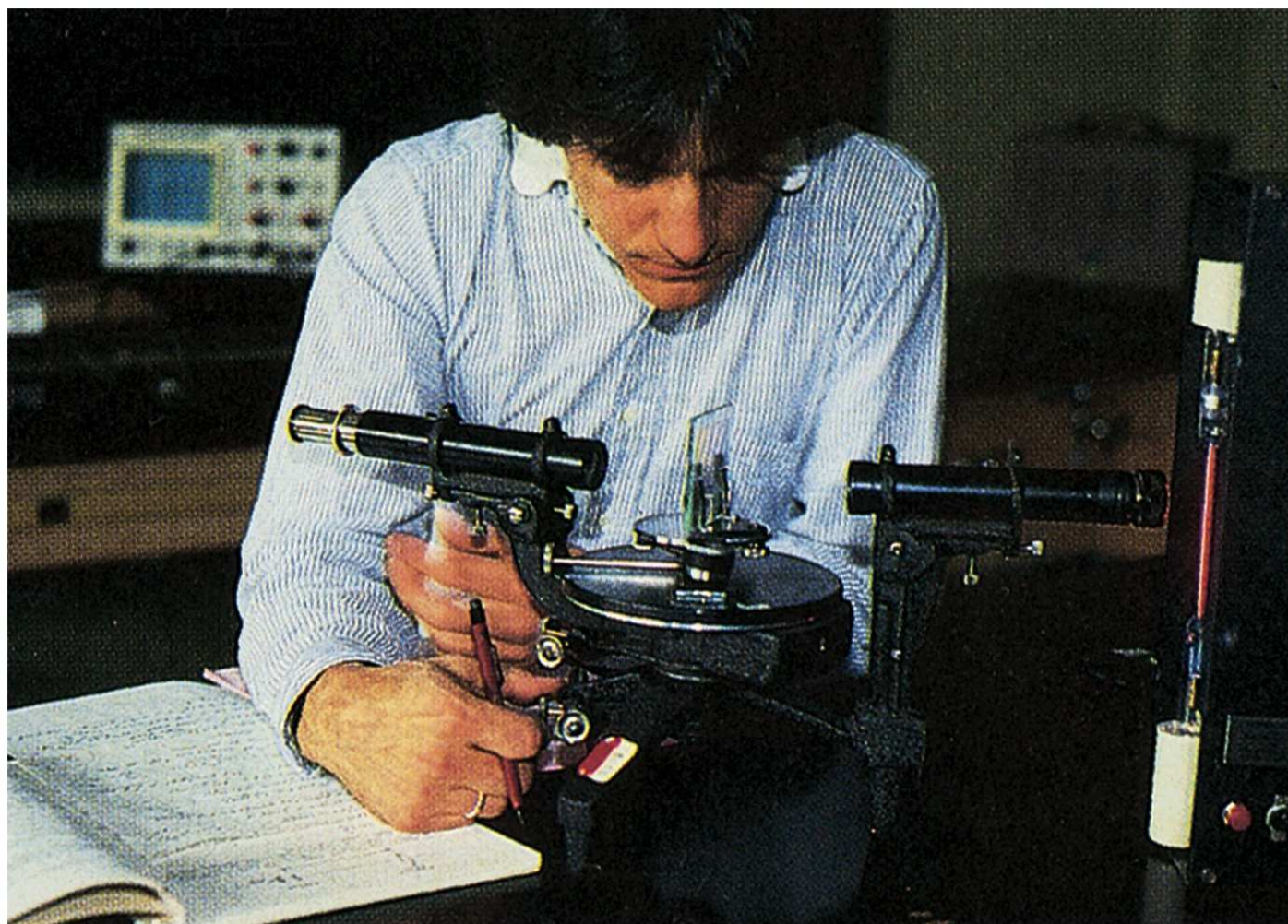
Espectrómetro: s. m. espectroscópio que tem por função medir os comprimentos de onda dos traços de um espectro luminoso. (Do lat. spectru-, «espectro» + gr. métron, «medida»)



Espectrómetro

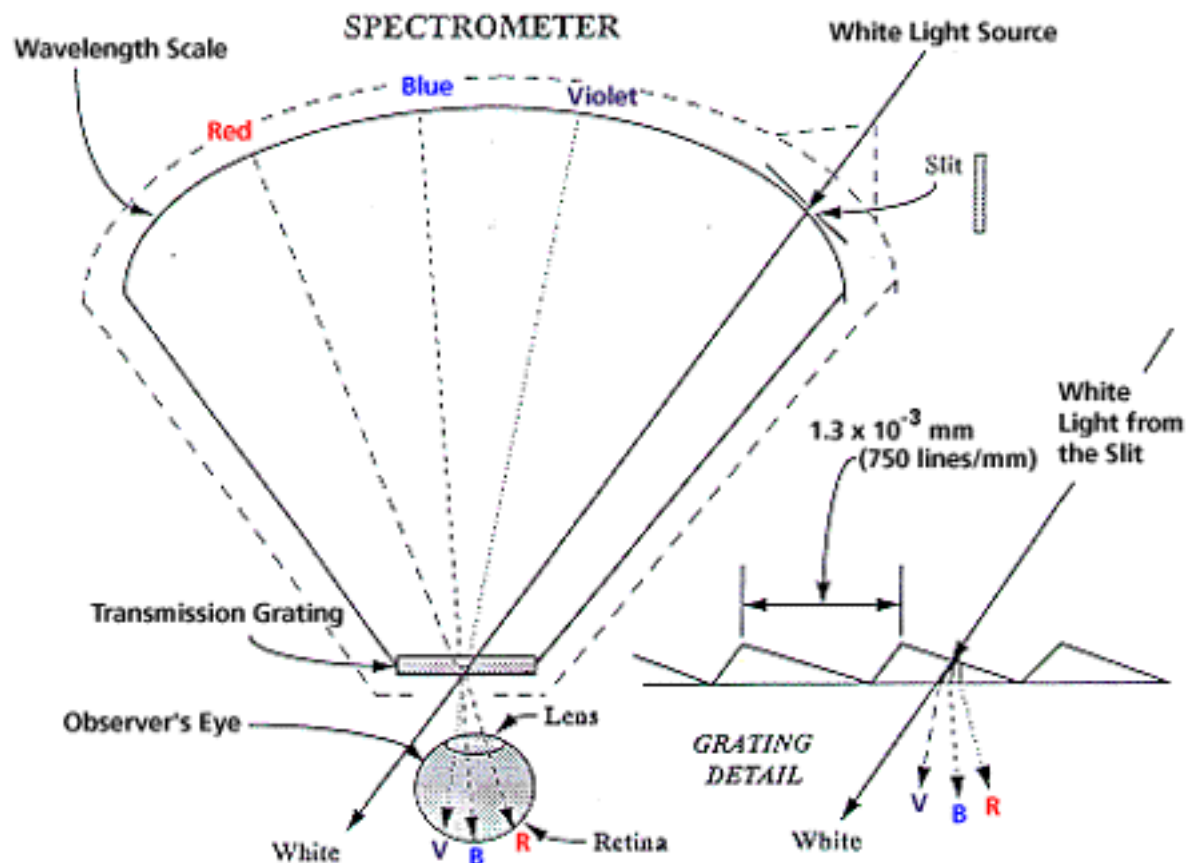
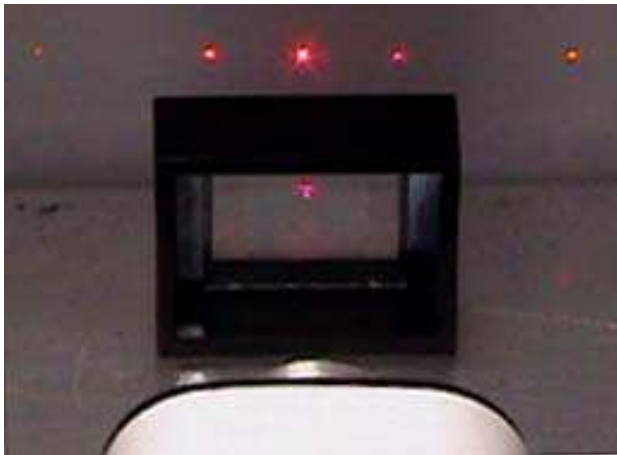
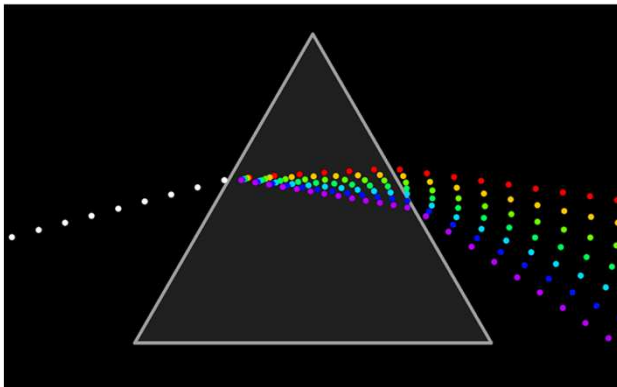
Espectro: resultado da dispersão, por um prisma ou uma rede de difracção, de qualquer radiação composta nas suas radiações simples, como, por ex., a imagem com as cores do arco-íris, que resulta da decomposição de um feixe de luz solar;

Espectrometria s. f.
conjunto das técnicas
para medição da
intensidade e do
comprimento de onda
de radiações do
espectro de uma fonte
luminosa.



Prisma e rede de difracção

Difracção: fenómeno observado quando a luz passa através de uma abertura muito estreita ou próximo do contorno de um obstáculo opaco e que é devido à interferência da luz directa consigo própria; Rede de difracção: qualquer arranjo periódico de objectos difractivos, como um cristal (rede tridimensional), apropriado para a difracção de raios X, ou uma série de riscas paralelas efectuadas por diamante numa superfície de vidro, ou uma reprodução de tais riscas em plástico (rede óptica a uma dimensão).



<http://www.exo.net/~pauld/activities/lasers/laserdiffraction.htm>

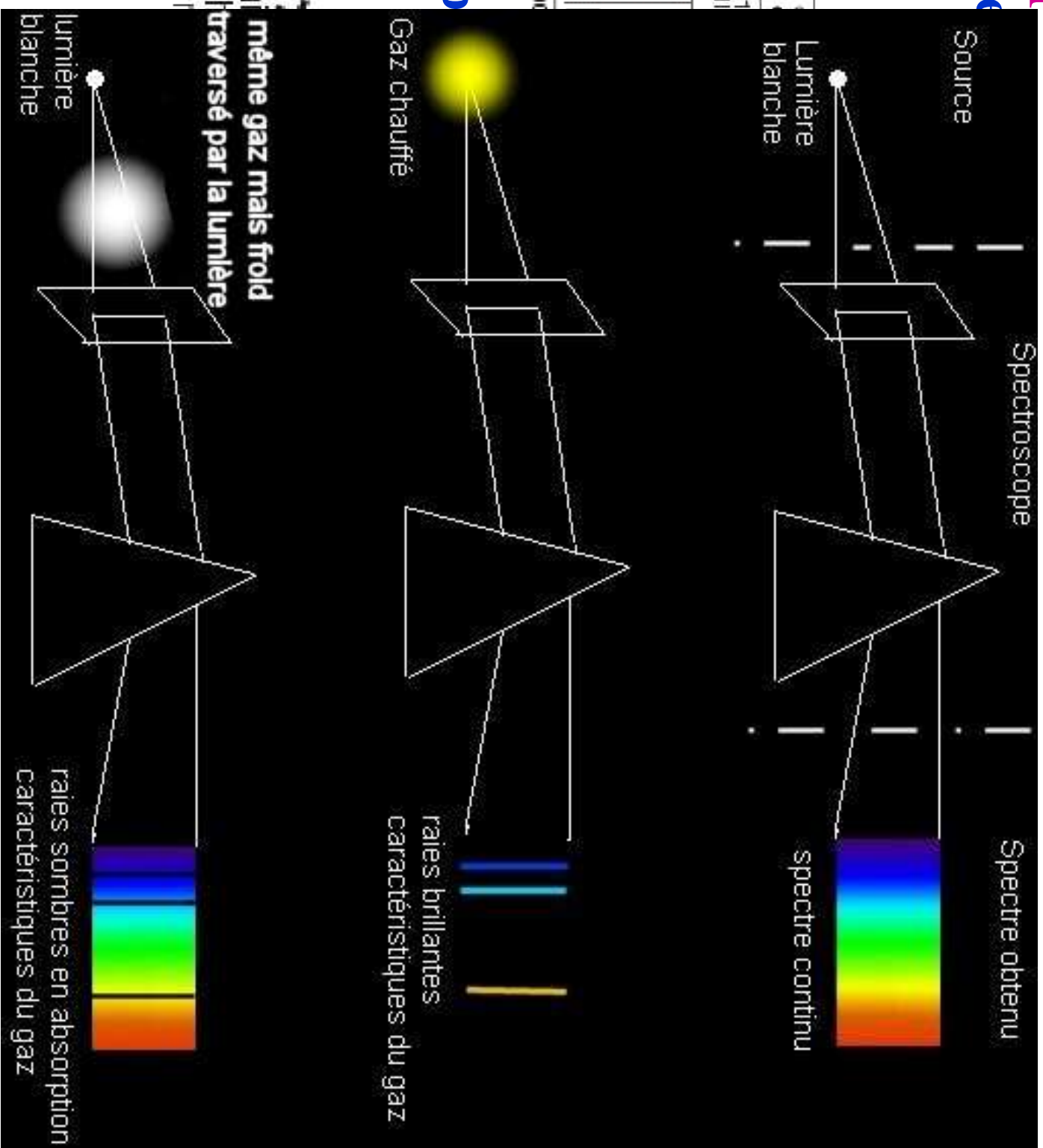
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/gratingcon.html#c1>

http://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction_grating <http://www.youtube.com/watch?v=IKKFPtcaZpQ>

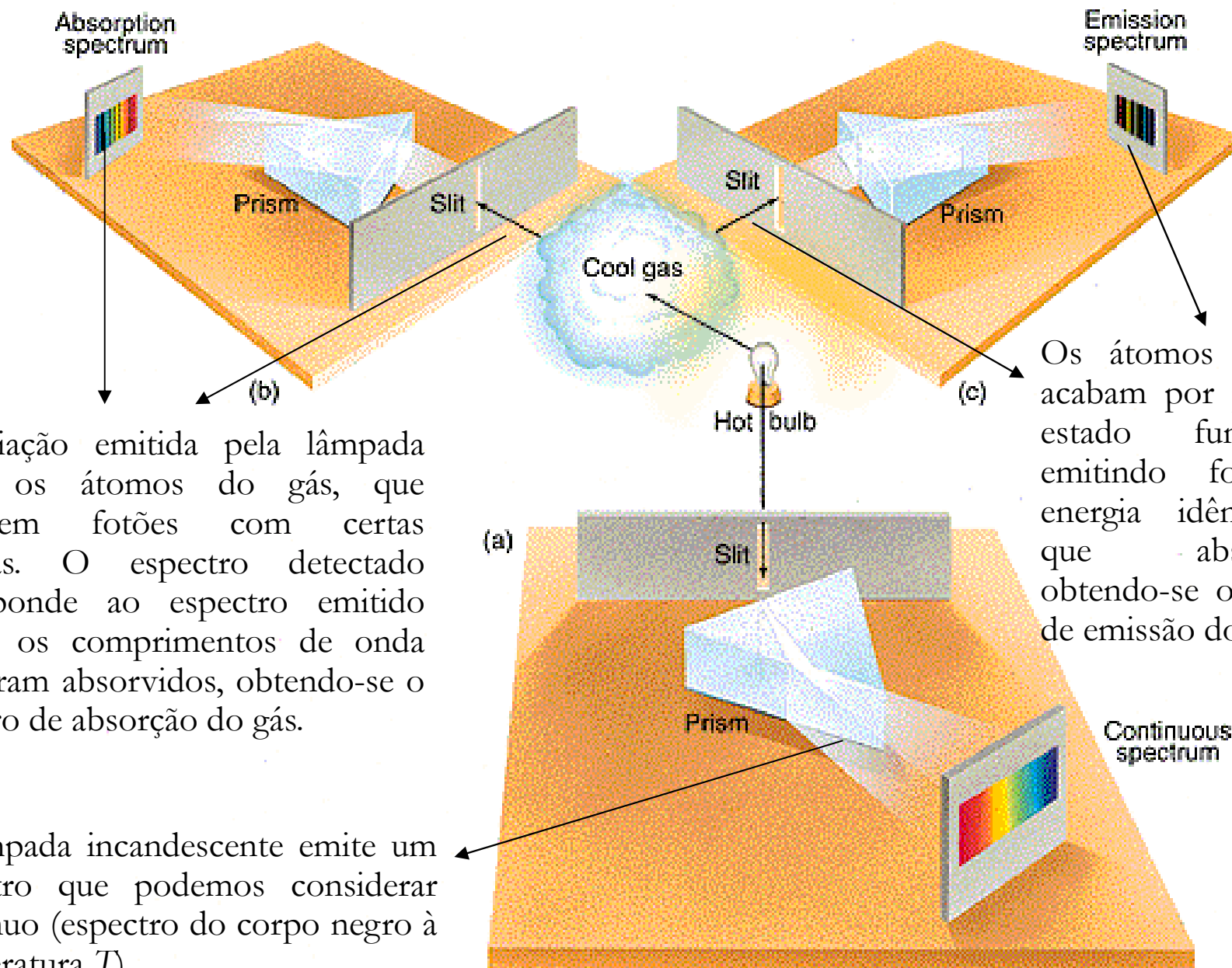
Espectrometria

Esp

Esp



Emissão e absorção de radiação pela matéria

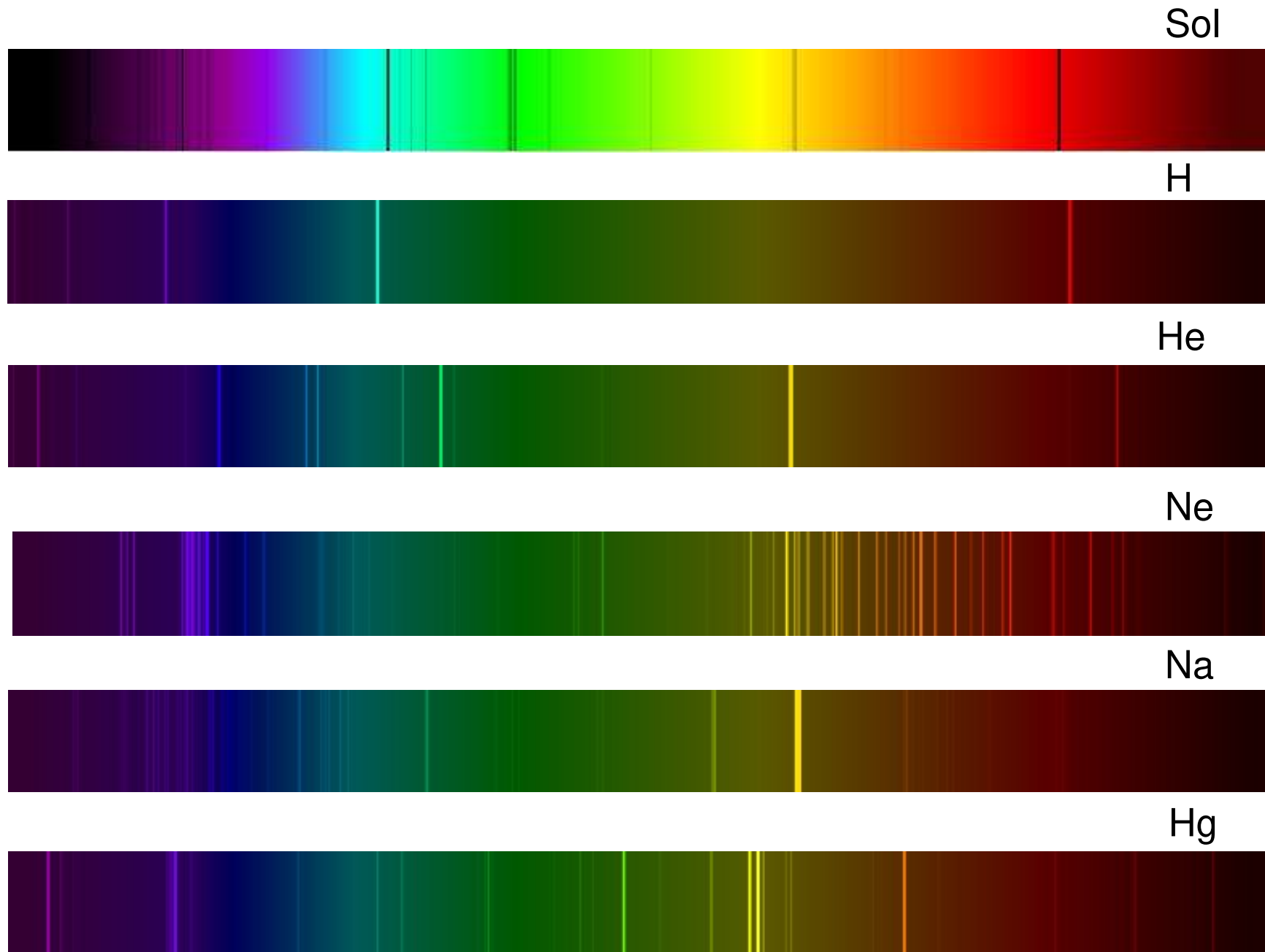


A radiação emitida pela lâmpada excita os átomos do gás, que absorvem fótons com certas energias. O espectro detectado corresponde ao espectro emitido menos os comprimentos de onda que foram absorvidos, obtendo-se o espectro de absorção do gás.

A lâmpada incandescente emite um espectro que podemos considerar contínuo (espectro do corpo negro à temperatura T).

Os átomos excitados acabam por passar ao estado fundamental emitindo fótons de energia idêntica aos que absorveram, obtendo-se o espectro de emissão do gás.

Espectros de emissão do Sol, do H, do He, do Ne, do Na e do Hg



Radiação do Corpo negro

corpo negro: (fís.) o m. q. radiador integral, substância que absorve completamente qualquer radiação calorífica ou luminosa que nele incida (o negro-de-fumo aproxima-se bastante do corpo negro ideal), e emite radiação segundo a [lei de Planck da radiação](#), que exprime a radiância espectral em função do comprimento de onda e da temperatura do corpo:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Emissão de radiação electromagnética por *sólidos*

Temperatura de um corpo vs “cor” do corpo



Color Temperature of a Black-Body Radiator

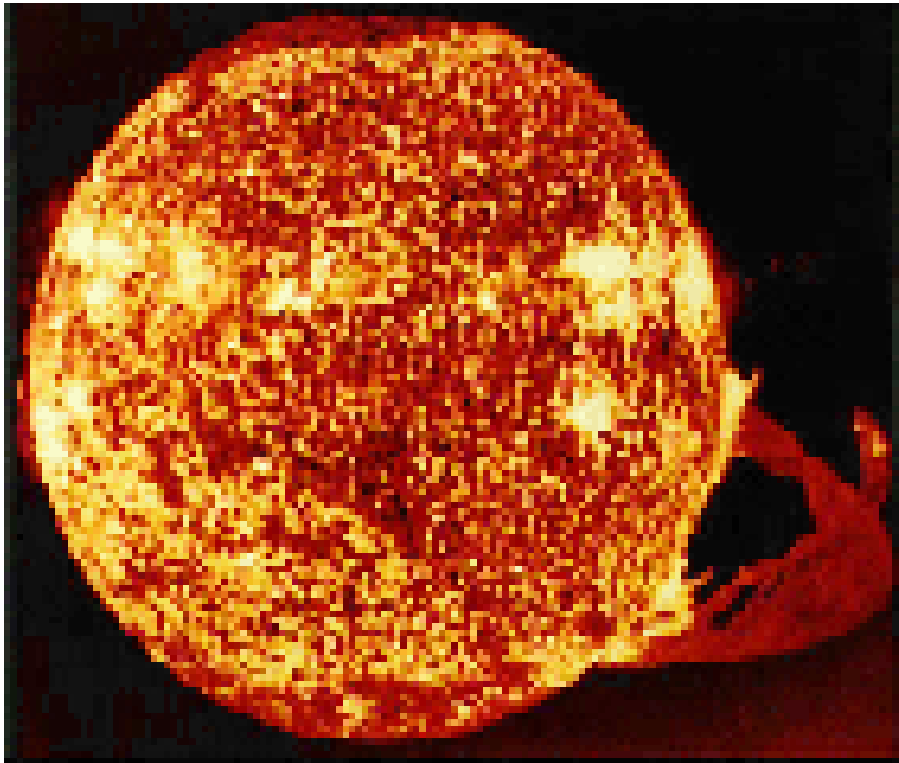


Figure 1

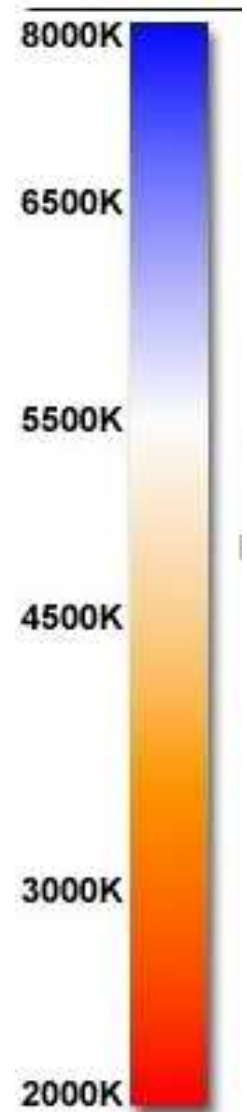


Emissão de radiação electromagnética pelas estrelas

Estrela: (astr.) astro aparentemente fixo que tem luz própria; grande e luminosa esfera de plasma, mantida íntegra pela gravidade. A estrela mais próxima da Terra é o Sol, que é a fonte da maior parte da energia do planeta. Outras estrelas são visíveis da Terra durante a noite, quando não são ofuscadas pela luz do Sol ou bloqueadas por fenómenos atmosféricos.



A cor de uma estrela indica a sua “temperatura”

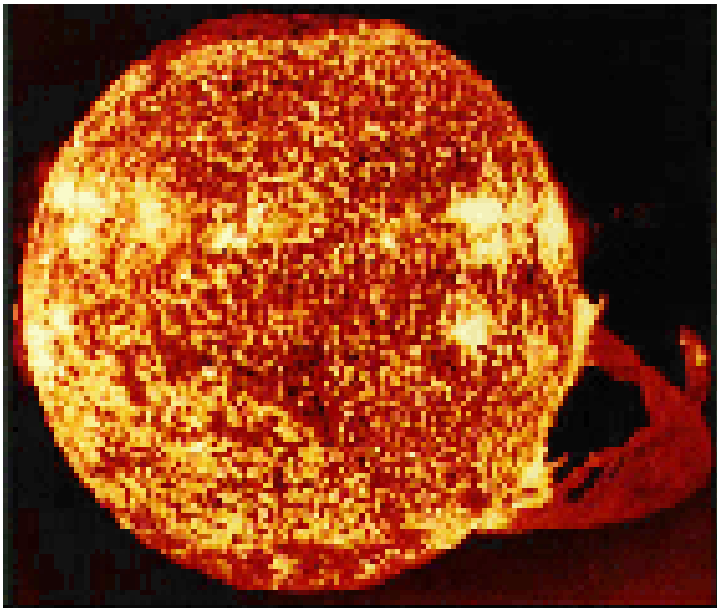


A temperatura da *superfície* do Sol é da ordem de 5800 K.

“A cor de uma estela indica a sua temperatura”

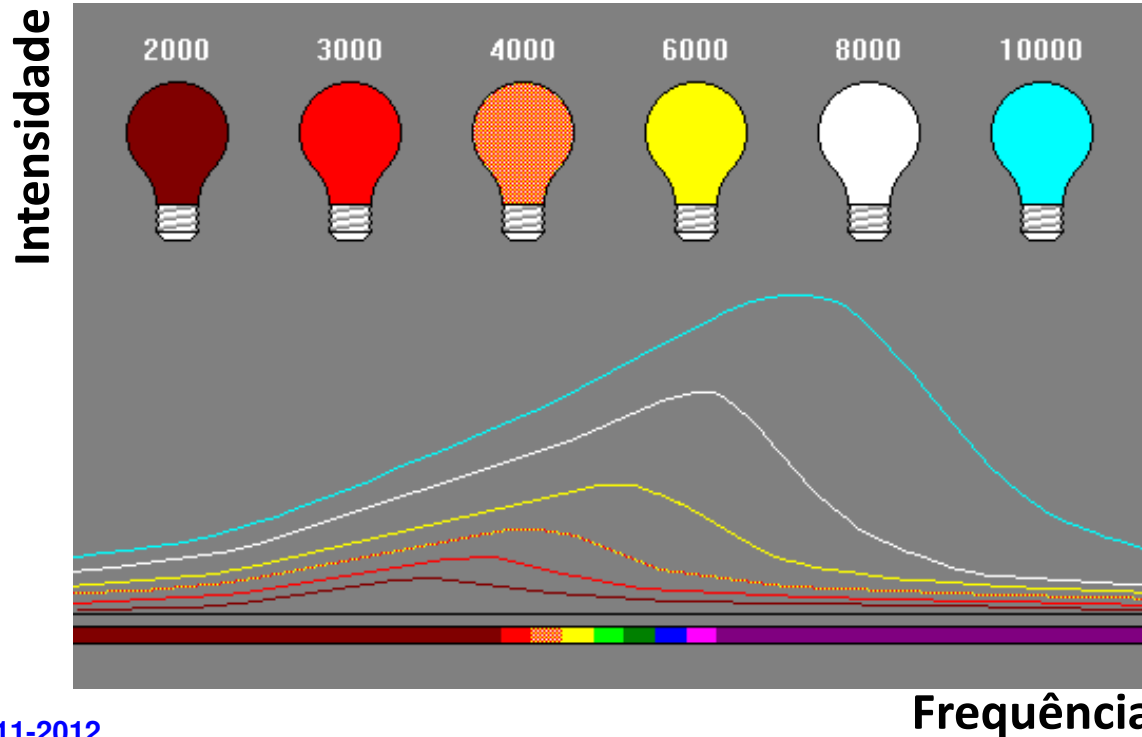
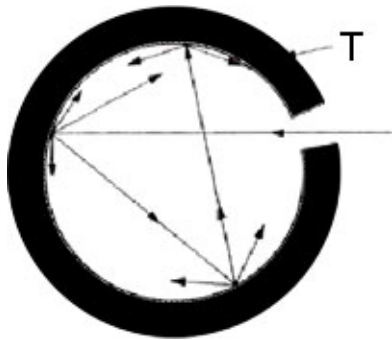
Temperatura de um corpo vs “cor” do corpo

Estrelas



O conceito de “corpo negro”

O modelo mais simples de um corpo negro corresponde a uma cavidade com um pequeno orifício, mantida à temperatura T , que absorve toda a radiação que penetra na cavidade e emite radiação de acordo com a **lei de Planck da radiação**.

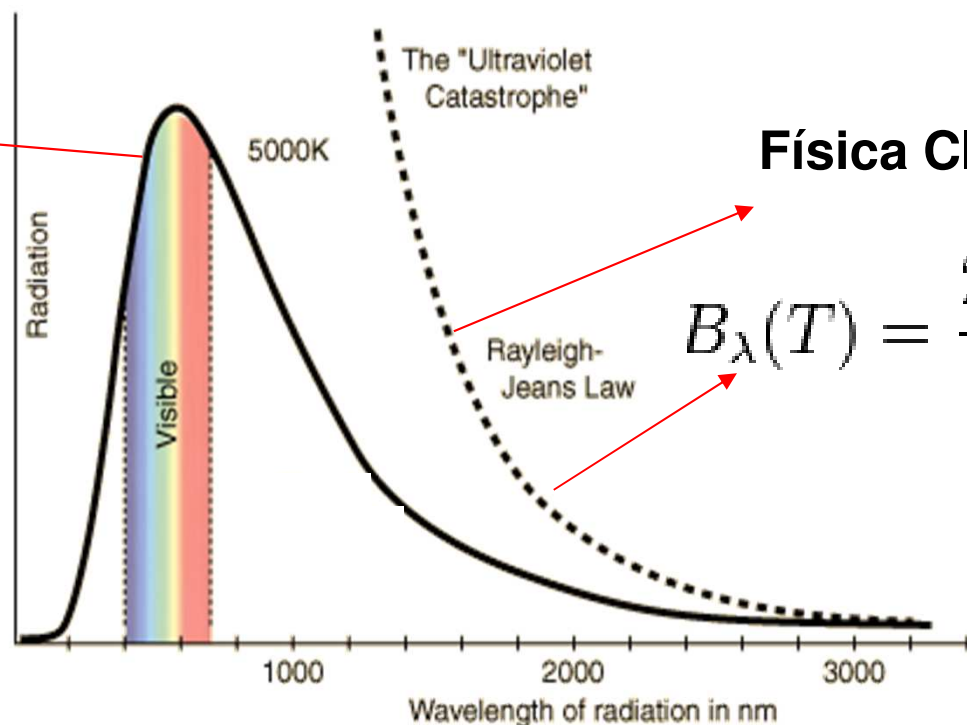


Problema “maior” da Física no início do séc. XX

- **Corpo negro:** radiador integral, substância que absorve completamente qualquer radiação que nele incida (o negro-de-fumo aproxima-se bastante do corpo negro ideal);
- Uma cavidade fechada, a uma dada temperatura (“**corpo negro**”), com uma pequena abertura, emite um espectro de radiação contínuo.

Experimental

Como explicar a distribuição de energia da radiação emitida pelo corpo negro?



Física Clássica

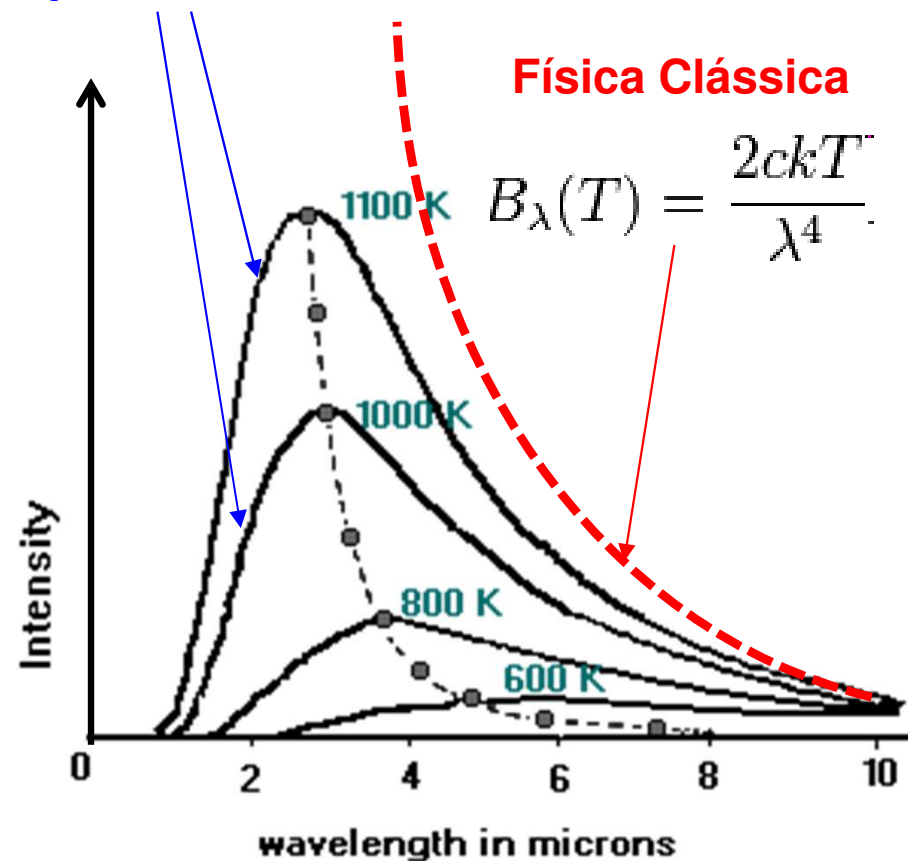
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ckT}{\lambda^4}$$

Problema “maior” da Física no início do séc. XX

Como explicar a distribuição de energia da radiação emitida pelo corpo negro?

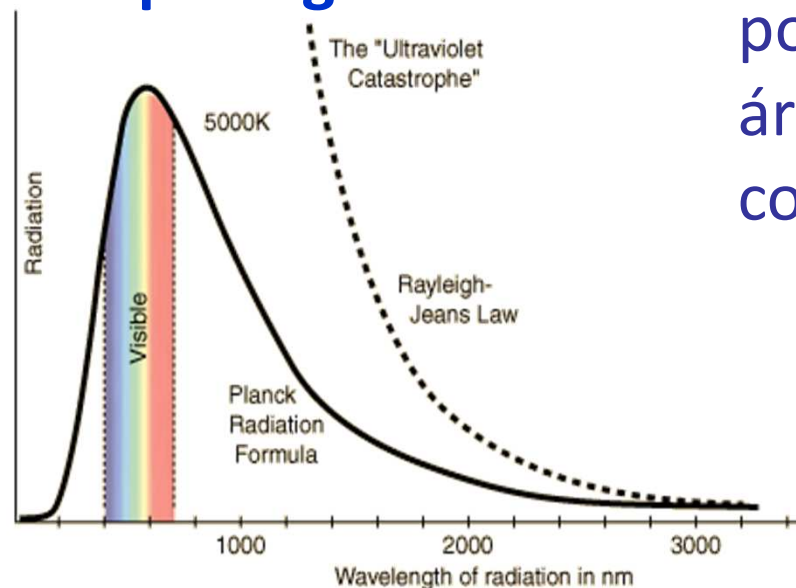
A Física Clássica previa que a cavidade deveria emitir mais radiação de menor comprimento de onda do que de maior comprimento de onda. Porém, não era isso que se observava experimentalmente.

Experimental



Hipótese de Planck

Irradiância espectral do corpo negro



Emitância espectral $S(\lambda)$, $S(\nu)$:
potência radiada por unidade de
área e por unidade de
comprimento de onda/frequência.

Ter presente que

$$\lambda = c / \nu$$

Hipótese quântica (Planck, 1900, de forma *ad hoc*)

A energia electromagnética de frequência ν é emitida/absorvida em “pacotes” (quanta*) de magnitude

$$E = h\nu$$

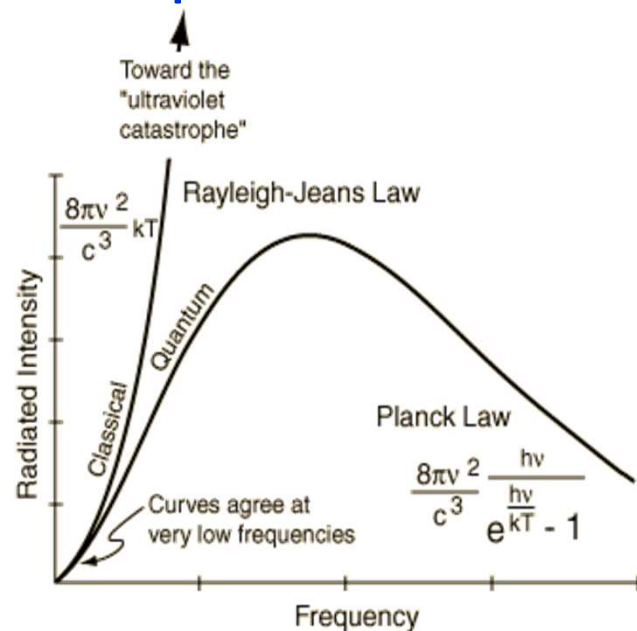
frequency of radiation, sometimes written as f
giving expression $E = hf$.
Quantum energy
of a photon.

$$h = \text{Planck's constant} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule}\cdot\text{sec} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

*Mais tarde
chamados fótons

Hipótese de Planck

Comparação teoria clássica vs teoria quântica



Esta hipótese permitiu a Planck ultrapassar as dificuldades associadas à “catástrofe do ultravioleta”, possibilitando a obtenção de uma expressão que se ajusta aos resultados experimentais: a lei de Planck para a radiação emitida pelo corpo negro

Ter presente que $\lambda = c / \nu$

Energy per unit volume per unit wavelength

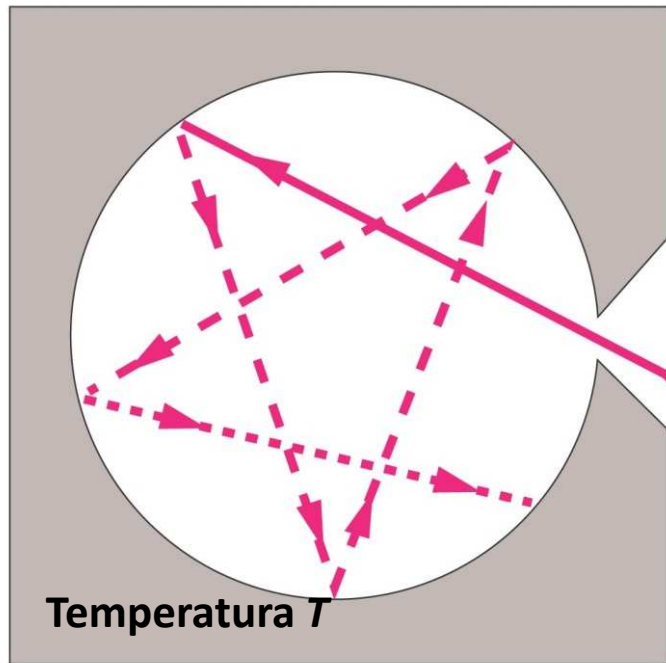
$$S_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Energy per unit volume per unit frequency

$$S_\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Lei de Planck da radiação para o “corpo negro”

O modelo mais simples de um corpo negro corresponde a uma cavidade com um pequeno orifício, mantida à temperatura T , que absorve toda a radiação que penetra na cavidade e emite radiação de acordo com a **lei de Planck da radiação**:



$$I(\nu, T) d\nu = \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

Onde:

$I(\nu, T) d\nu$ é quantidade de energia por unidade de área por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido emitida no intervalo de frequências entre ν e $\nu + d\nu$ por um corpo negro à temperatura T ;

h é a constante de [Planck](#);

c é a [velocidade da luz](#) no vácuo;

k é a [constante de Boltzmann](#);

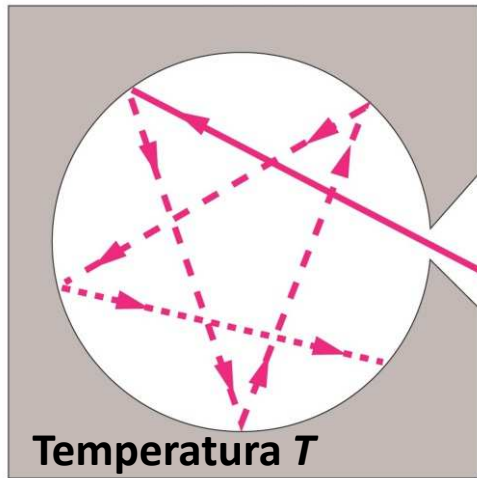
ν é a [frequência](#) da radiação electromagnética;

T é a [temperatura](#) em [kelvins](#).

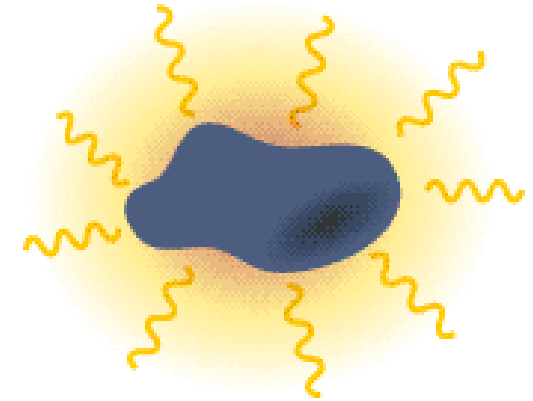
$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

http://webphysics.davidson.edu/Applets/java11_Archive.html

Lei de Planck da radiação para o “corpo negro”



$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



- 1 550°C » Dark Red
- 2 800°C » Cherry Red
- 3 1000°C » Yellow
- 4 1200°C » White

$$I(\nu, T)d\nu = \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

Onde:

$I(\nu, T)d\nu$ é quantidade de energia por unidade de área por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido emitida no intervalo de frequências entre ν e $\nu + d\nu$ por um corpo negro à temperatura T ;

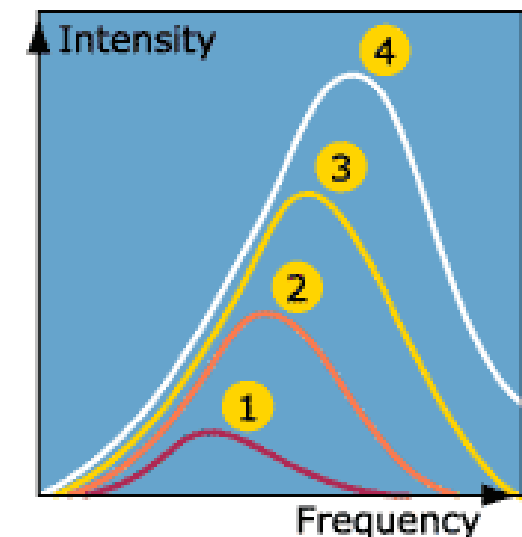
h é a constante de [Planck](#);

c é a [velocidade da luz](#) no vácuo;

k é a [constante de Boltzmann](#);

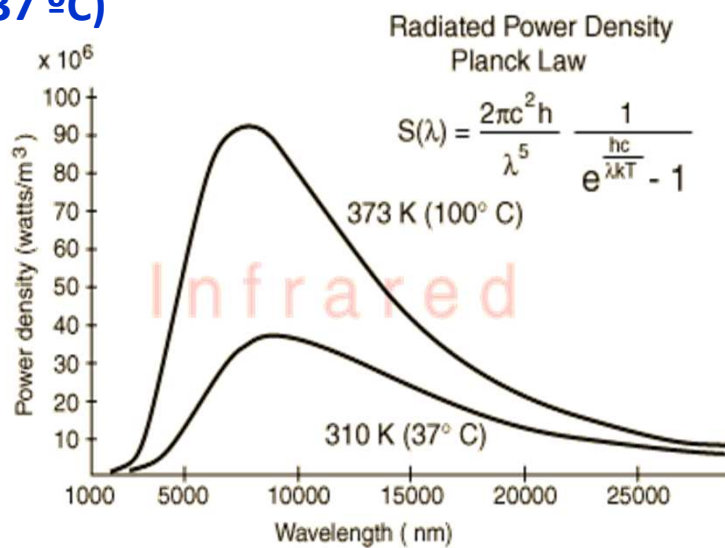
ν é a [frequência](#) da radiação electromagnética;

T é a [temperatura](#) em [kelvins](#).

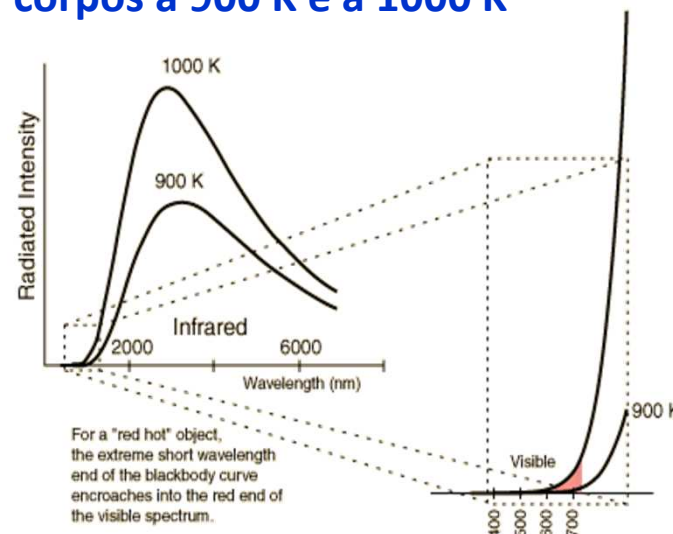


Exemplos de curvas de radiação de “corpos negros”

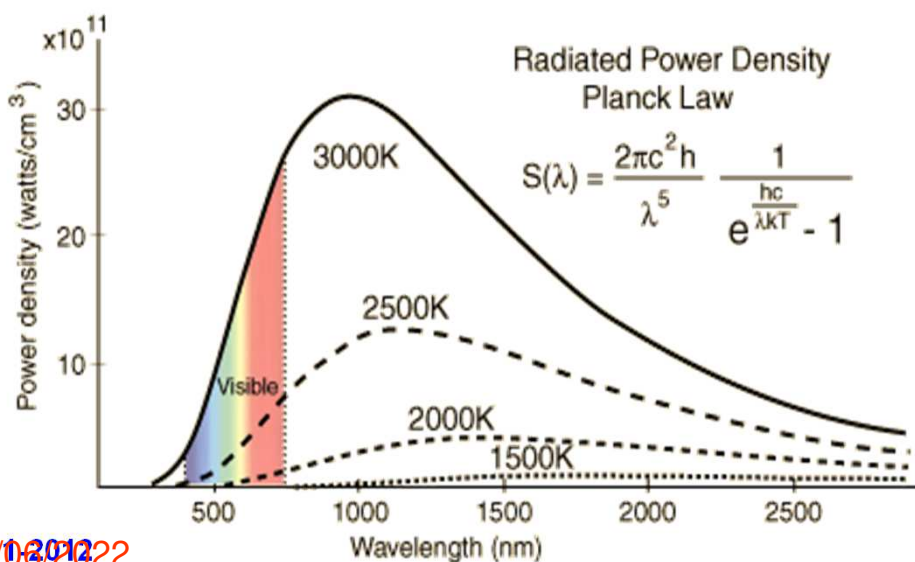
Emitância espectral: corpo a 100 °C e corpo humano (37 °C)



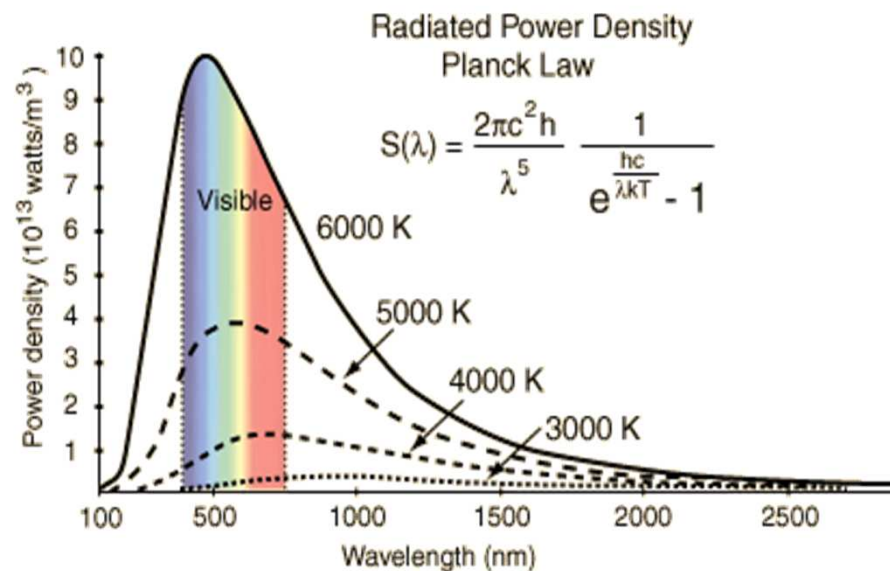
**Emitância espectral
corpos a 900 K e a 1000 K**



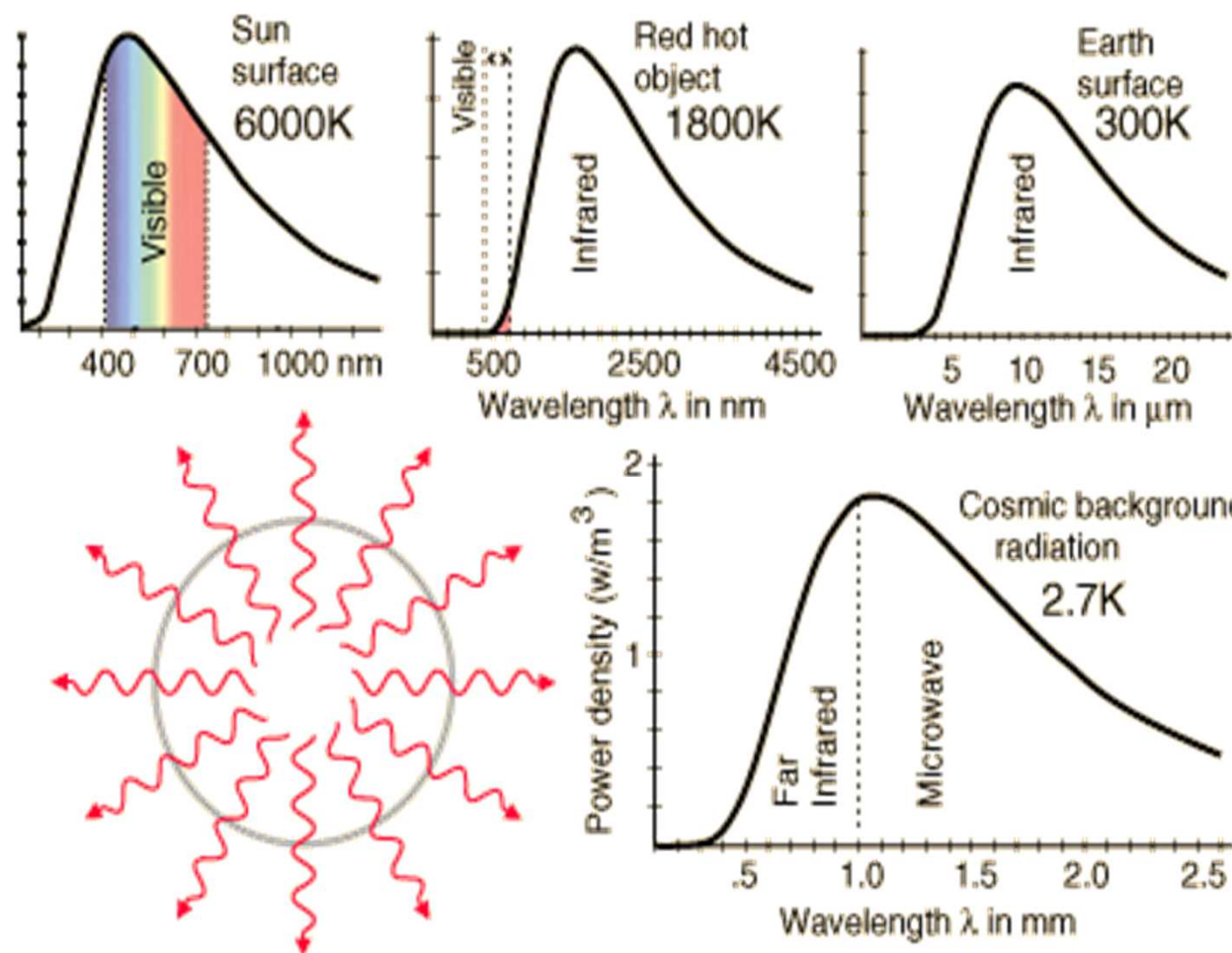
Emitância espectral de um corpo a ~3000 K



Emitância espectral do Sol



+Exemplos de curvas de radiação de “corpos negros”



$$I(\nu, T) d\nu = \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

Onde:

$I(\nu, T) d\nu$ é quantidade de energia por unidade de área por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido emitida no intervalo de frequências entre ν e $\nu + d\nu$ por um corpo negro à temperatura T ;

h é a constante de [Planck](#);

c é a [velocidade da luz](#) no vácuo;

k é a [constante de Boltzmann](#);

ν é a [frequência](#) da radiação electromagnética;

T é a [temperatura](#) em [kelvins](#).

Radiação cósmica de fundo

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ifqr.html>

http://pt.wikipedia.org/wiki/Radia%C3%A7%C3%A3o_c%C3%B3smica_de_fundo

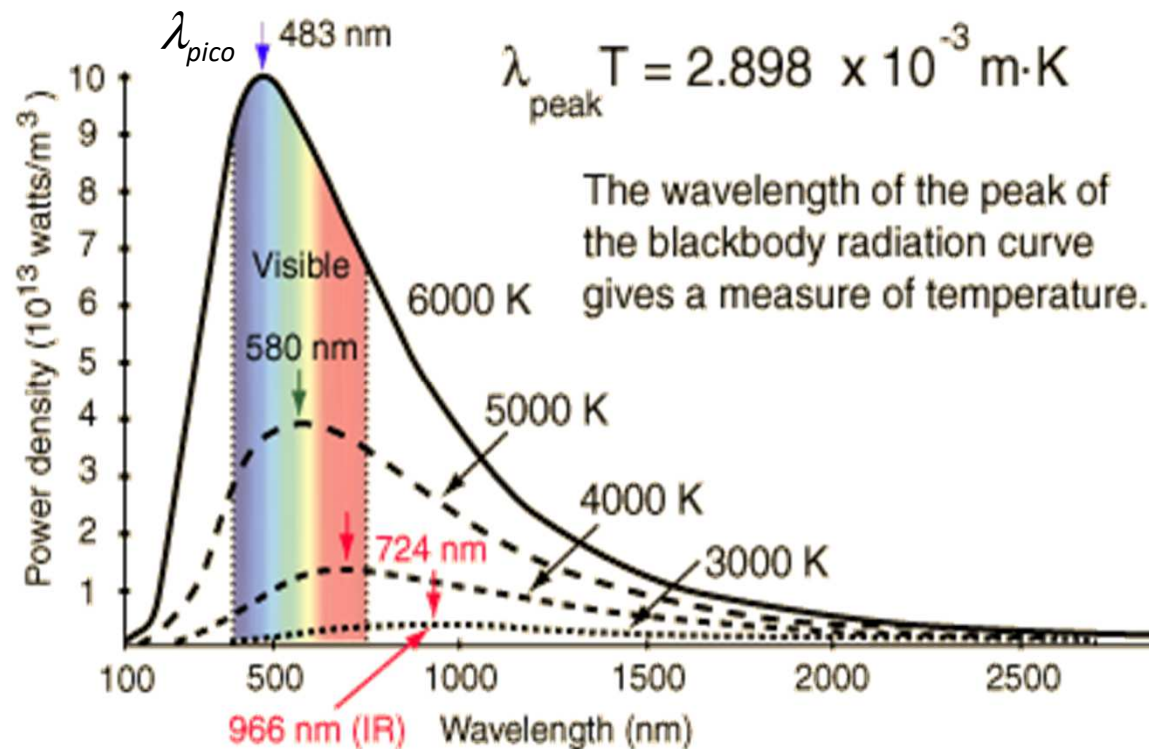
Lei de Wien e a cor/temperatura de um corpo

Lei do deslocamento de Wien ou **lei de Wien** relaciona o comprimento de onda do pico de emissão de um corpo negro e a sua temperatura:

$$\lambda_{pico} \cdot T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Wien

Curva de emitância do Sol



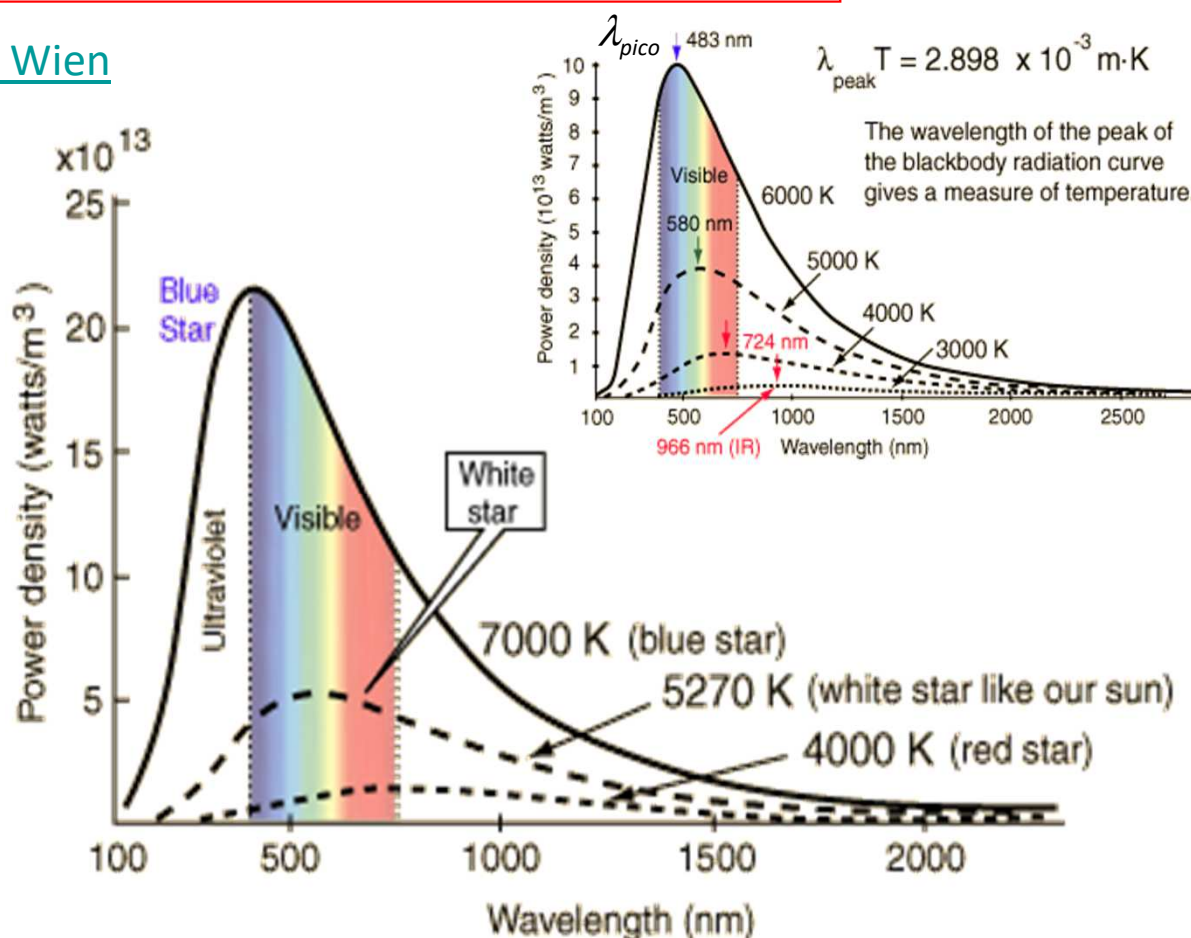
Lei de Wien e a cor/temperatura das estrelas

Lei do deslocamento de Wien ou **lei de Wien** relaciona o comprimento de onda do pico de emissão de um corpo negro e a sua temperatura:

$$\lambda_{pico} \cdot T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Wien

Estrelas azuis, brancas e vermelhas



<http://docs.kde.org/kde3/pt/kdeedu/kstars/ai-colorandtemp.html>

Lei de Stefan-Boltzmann

A **Lei de Stefan-Boltzmann** (também conhecida como **Lei de Stefan**) estabelece que a energia total radiada por unidade de área superficial de um corpo negro na unidade de tempo (radiação do corpo negro), (emitância, densidade de fluxo energético, fluxo radiante, ou potencia emissora), é directamente proporcional à quarta potência da sua temperatura termodinâmica T .

A emitância radiante (potência por unidade de área, P/A) das paredes de uma cavidade, em cujo interior a radiação de corpo negro está em equilíbrio, obtém-se a partir de $S(\lambda)$:

$$\frac{dP}{d\lambda} \frac{1}{A} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \rightarrow \frac{P}{A} = 2\pi hc^2 \int_0^\infty \frac{d\lambda}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \rightarrow x = \frac{hc}{\lambda kT} \quad dx = \frac{-hc}{\lambda^2 kT} d\lambda$$

$$\frac{P}{A} = \frac{2\pi (kT)^4}{h^3 c^2} \int_0^\infty \frac{x^3}{(e^x - 1)} dx \rightarrow \int_0^\infty \frac{x^3}{(e^x - 1)} dx = \frac{\pi^4}{15} \rightarrow \frac{P}{A} = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4$$

A **potência por unidade de área emitida pela superfície de um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo:**

$$\frac{P}{A} = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Lei de Stefan-Boltzmann

A potência por unidade de área emitida pela superfície de um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo

$$\frac{P}{A} = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4$$

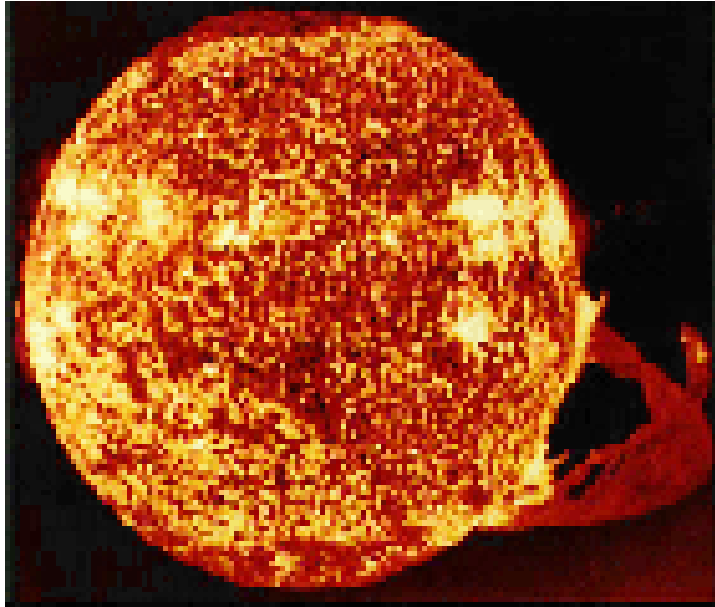
$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Exercícios de aplicação da lei de Stefan-Boltzmann:

1. Durante a noite, a superfície da Terra perde energia por radiação. Assuma que a temperatura do solo é 10 °C, e que este se comporta como um corpo negro. Qual é a taxa de perda de energia por metro quadrado? Se a noite estiver clara, o solo arrefece mais fortemente, podendo formar-se geada, do que no caso de uma noite com elevada nebulosidade, formando-se «apenas» orvalho. Porquê?
2. Os astrónomos às vezes determinam o tamanho de uma estrela pela lei de Stefan-Boltzmann. Determine o raio da estrela Capela a partir dos seguintes dados: fluxo da luz da estrela que chega à Terra $1,2 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$; distância à estrela $4,3 \times 10^{17} \text{ m}$; temperatura na «superfície» da estrela 5200 K. Assuma que a estrela se comporta como um corpo negro.

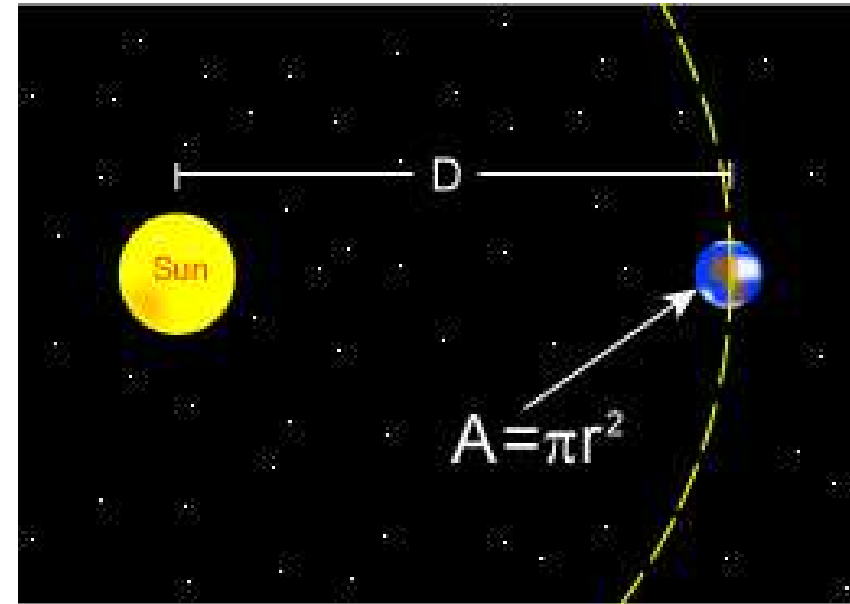
Emissão de radiação electromagnética pelo Sol

$$T_s = 5800 \text{ K}$$

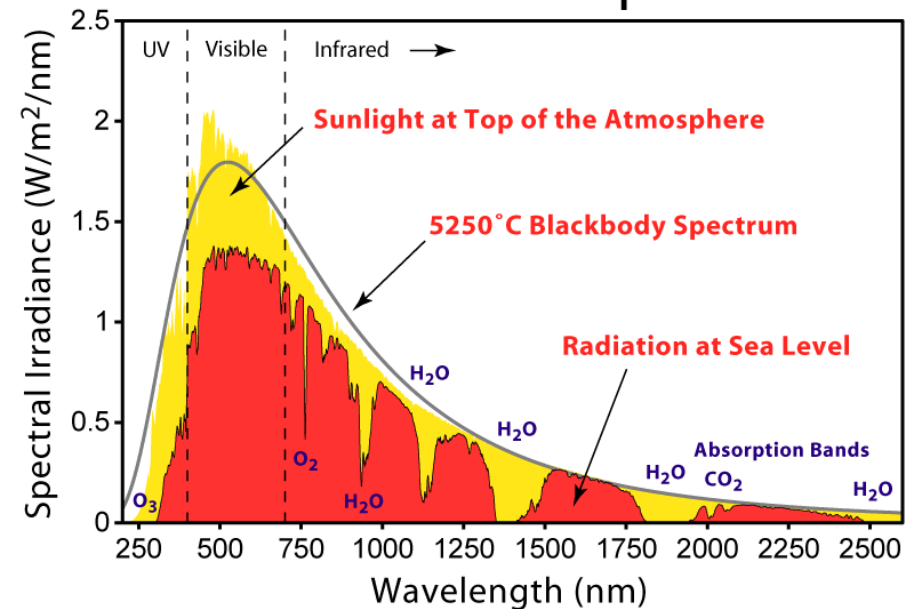


A temperatura da *superfície* do Sol é da ordem de 5800 K.

Vídeo: experiência de William Herschel – determinação da potência emitida pelo Sol;

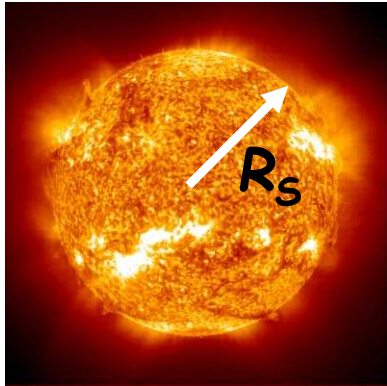


Solar Radiation Spectrum



O Sol como exemplo de um corpo negro

$$T_s = 5800 \text{ K}$$



Potência emitida pelo

Sol (P_s):

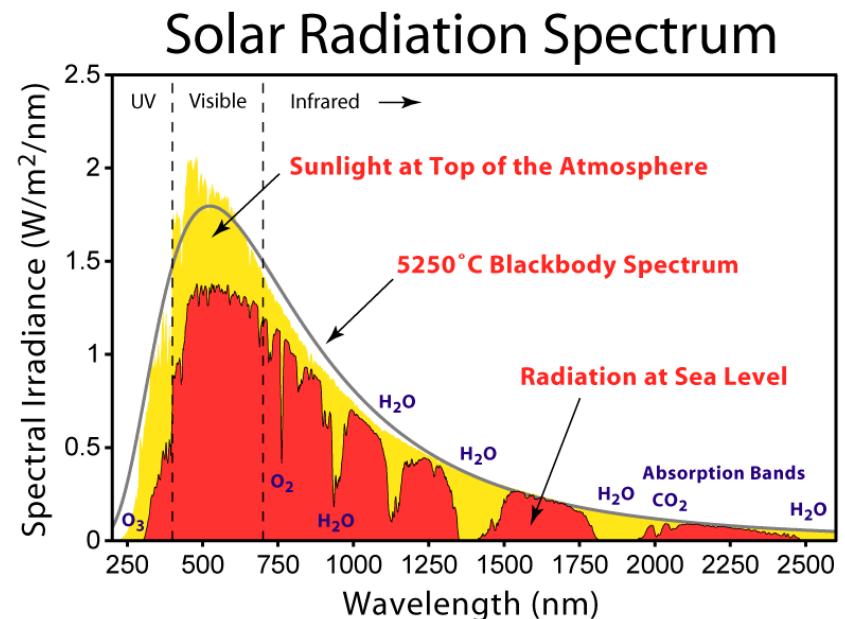
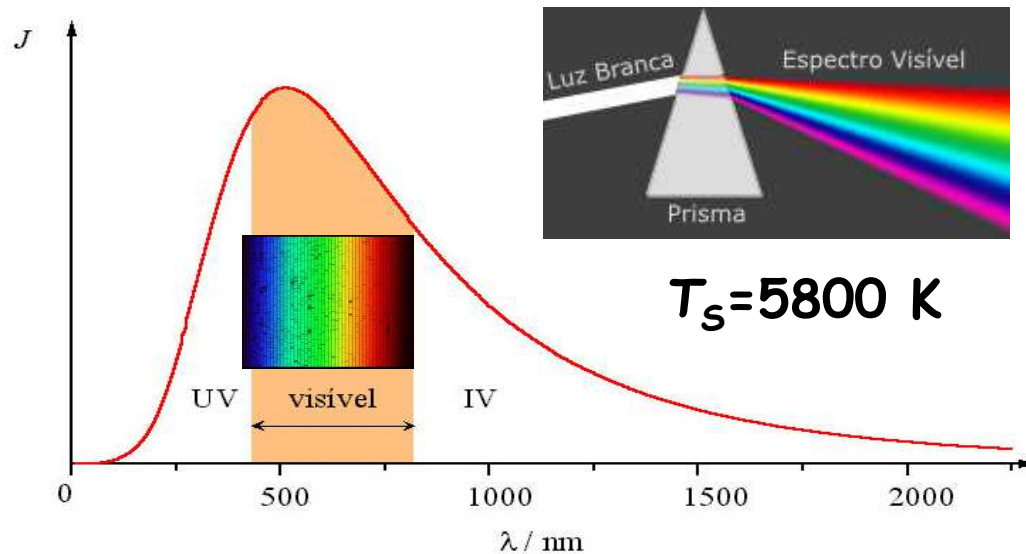
$$P_s = \sigma T_s^4 (4\pi R_s^2)$$

$$P_s = 3.839 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$(R_s = 700 \text{ Mm})$$

$$\sigma = 5,6 \times 10^{-8} \text{ J/(s m}^2 \text{K}^4)$$

Constante solar: quantidade de energia que atinge o limite superior da atmosfera por unidade de área, perpendicularmente aos raios solares, por unidade de tempo, cujo valor médio é: $1,4 \text{ kW/m}^2$.



Efeito Fotoeléctrico

O **efeito fotoeléctrico** corresponde à **emissão de** electrões por um material, geralmente um metal, quando exposto a radiação electromagnética (REM) de frequência suficientemente alta. O valor mínimo da frequência da REM que produz emissão de electrões depende do material.

Este efeito só foi completamente explicado por Einstein em 1905, usando o conceito de *quantum* de energia de REM inicialmente proposto, em 1900, por Planck para explicar a emissão de radiação electromagnética pelo corpo negro.

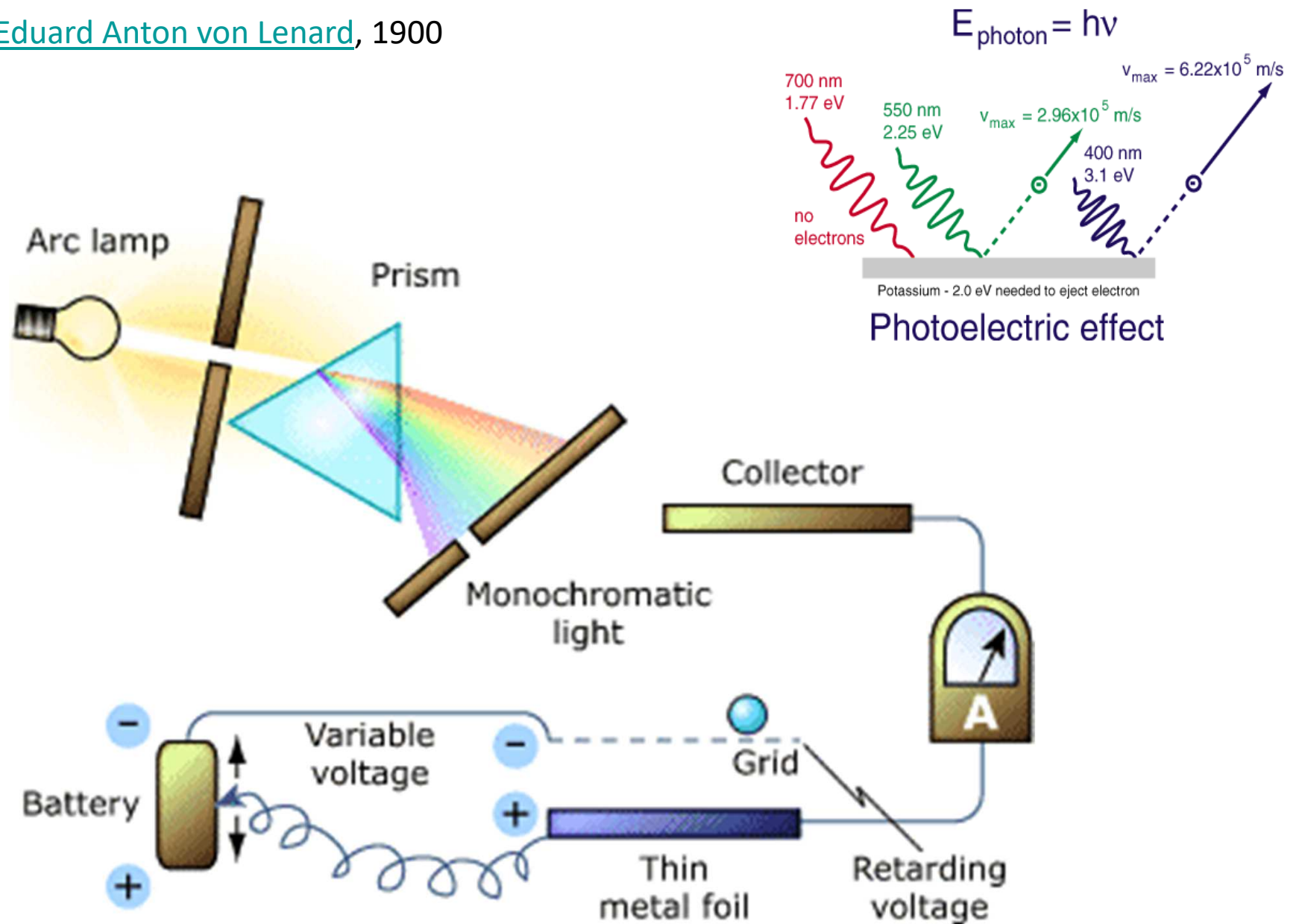
A explicação do efeito fotoeléctrico teve como consequência aquilo que hoje designamos por **dualidade onda-corpúsculo** da luz (REM).

Efeito fotoelétrico

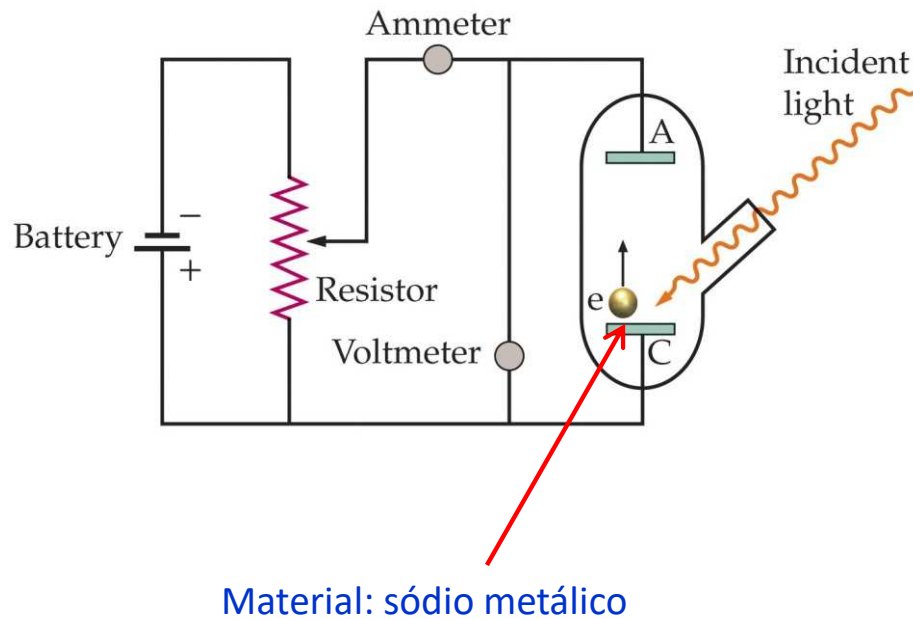
Heinrich Hertz, 1887

Philipp Eduard Anton von Lenard, 1900

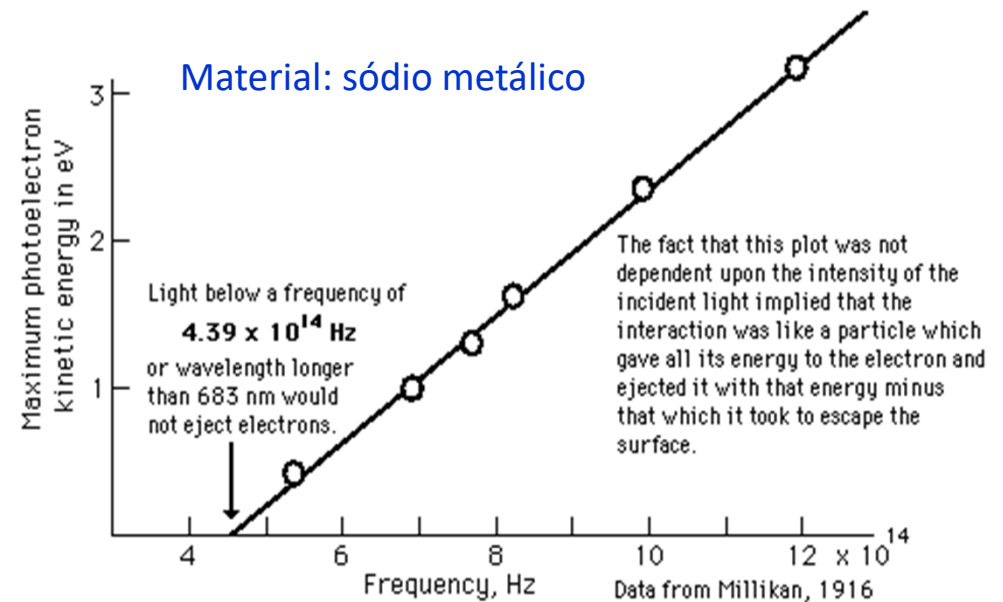
Caso do potássio metálico



Efeito fotoelétrico: resultados experimentais



Energia cinéticas dos electrões ejectados em função da frequência da radiação incidente

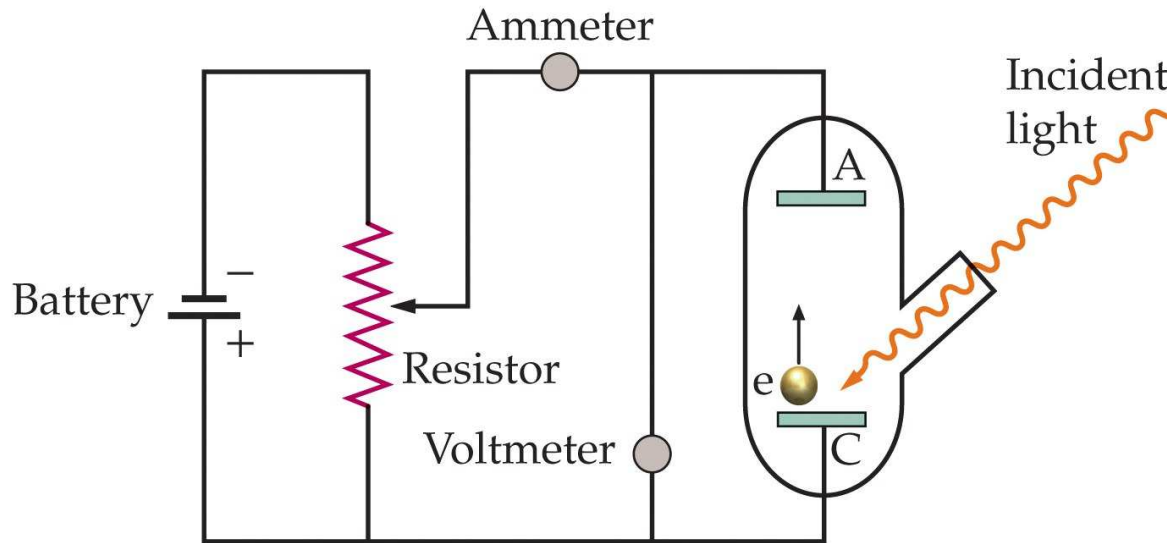


electrão-volt (eV): unidade de energia largamente utilizada em física atómica e que é a energia adquirida por um electrão quando acelerado por uma diferença de potencial de um volt num campo eléctrico.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Efeito fotoelétrico: potencial de paragem

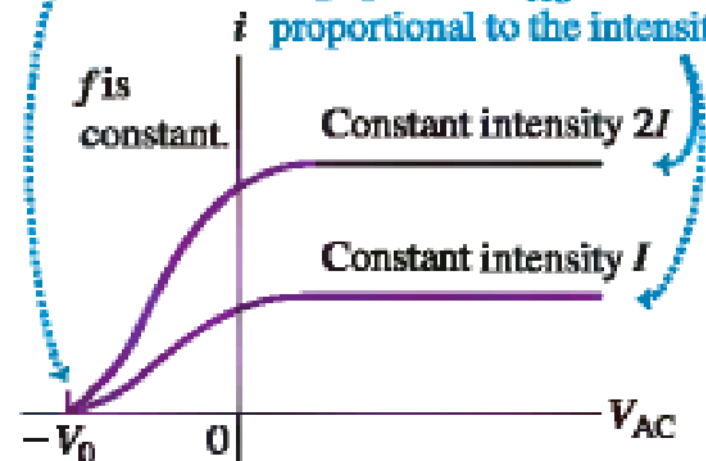
Esquema de uma montagem para observação e caracterização do efeito fotoelétrico



38.4 Photocurrent i for a constant light frequency f as a function of the potential V_{AC} of the anode with respect to the cathode.

The stopping potential V_0 is independent of the light intensity ...

... but the photocurrent i for large positive V_{AC} is directly proportional to the intensity.

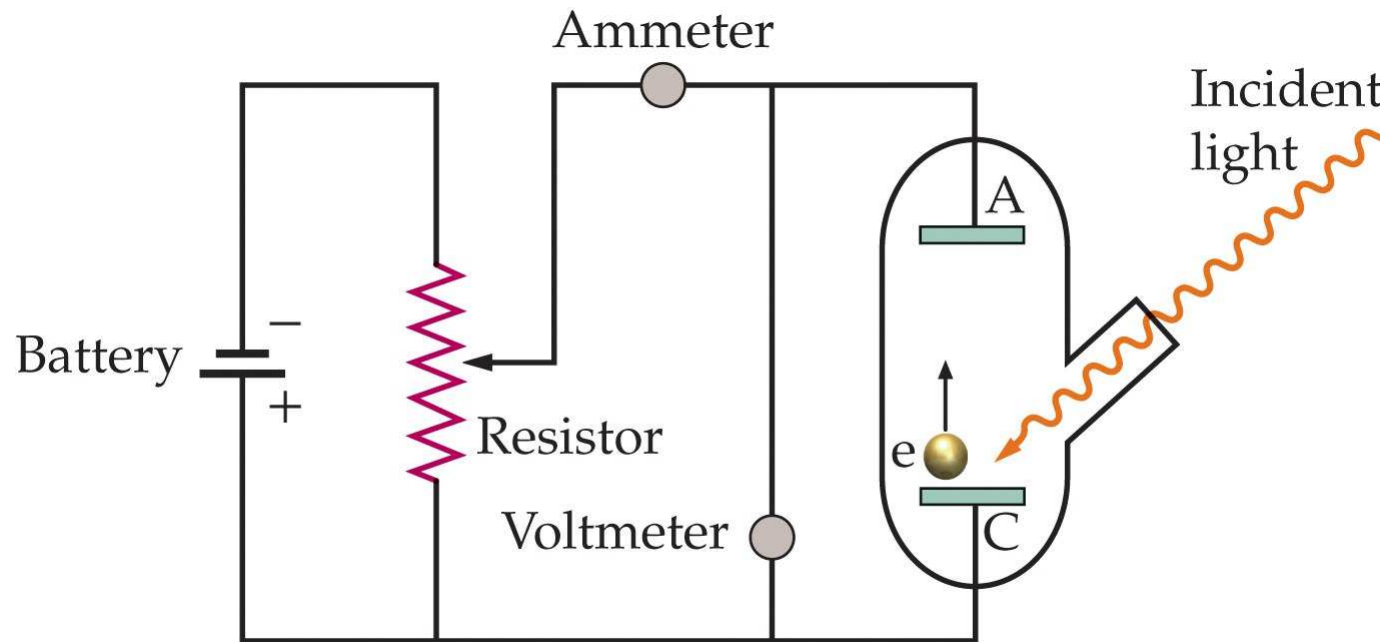


No circuito acima, se a radiação incidente provocar o efeito fotoelétrico há corrente eléctrica a passar pelo amperímetro enquanto a tensão entre os terminal C e A, $V_{CA} = -V_{AC}$, for superior a um dado valor V_0 , designado potencial de paragem, que é função do material e da frequência da radiação incidente.

A corrente anula-se quando $V_{CA} = -V_{AC} \geq V_0$.

Efeito fotoelétrico

Esquema de uma montagem para observação e caracterização do efeito fotoelétrico



- Um facto experimental de difícil explicação, assumindo a validade da teoria ondulatória da luz (Física Clássica), era o aumento da intensidade da luz, ao contrário do esperado, não originar electrões com maior energia cinética mas um maior número de electrões ejectados do material.
- A interpretação corpuscular da luz permite explicar porque é que o aumento da intensidade da luz origina maior número de electrões ejectados. Havendo mais fotões *colidindo* com o material, maior é a probabilidade de mais electrões serem ejectados devido à absorção de mais fotões.

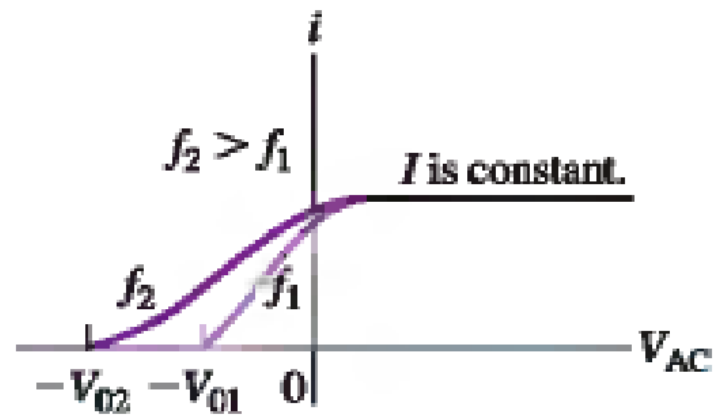
Wilhelm Hallwachs Alexandre Edmond Becquerel, 1839
<http://www.acolytescience.co.uk/origins/herz.html>

Philipp Eduard Anton von Lenard, 1900
Willoughby Smith, 1873 Heinrich Hertz, 1887

Efeito fotoelétrico: potencial de paragem

Intensidade de corrente eléctrica em função da frequência da radiação incidente.

38.5 Photocurrent i for two different light frequencies f_1 and f_2 as functions of the potential V_{AC} of the anode with respect to the cathode.

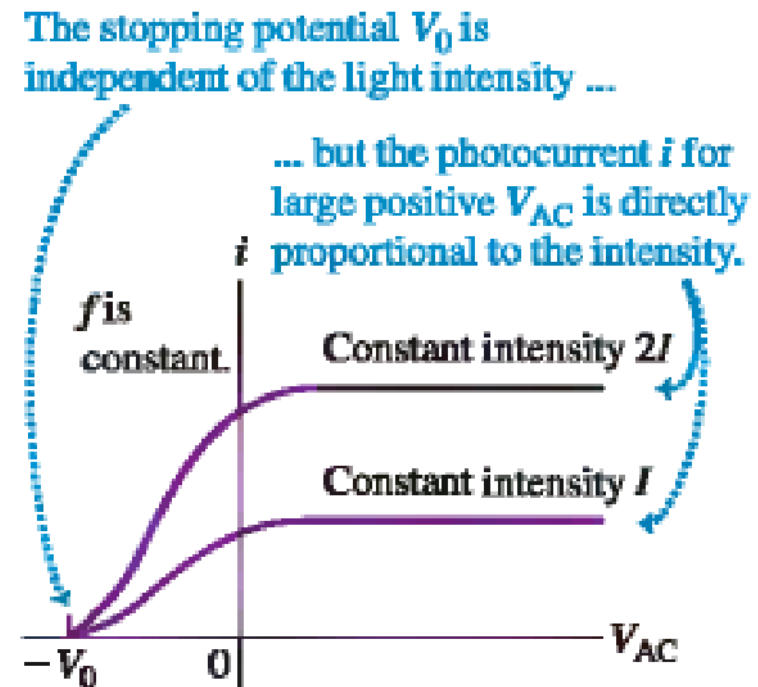


The stopping potential V_0 (and therefore the maximum kinetic energy of the photoelectrons) increases linearly with frequency: since $f_2 > f_1$, $V_{02} > V_{01}$.

Wilhelm Hallwachs Alexandre Edmond Becquerel, 1839
<http://www.acolytescience.co.uk/origins/herz.html>

Intensidade de corrente eléctrica em função da intensidade da radiação incidente.

38.4 Photocurrent i for a constant light frequency f as a function of the potential V_{AC} of the anode with respect to the cathode.



Philipp Eduard Anton von Lenard, 1900
Willoughby Smith, 1873 Heinrich Hertz, 1887

Explicação do efeito fotoelétrico (Einstein)

Equações de Einstein para o efeito fotoelétrico

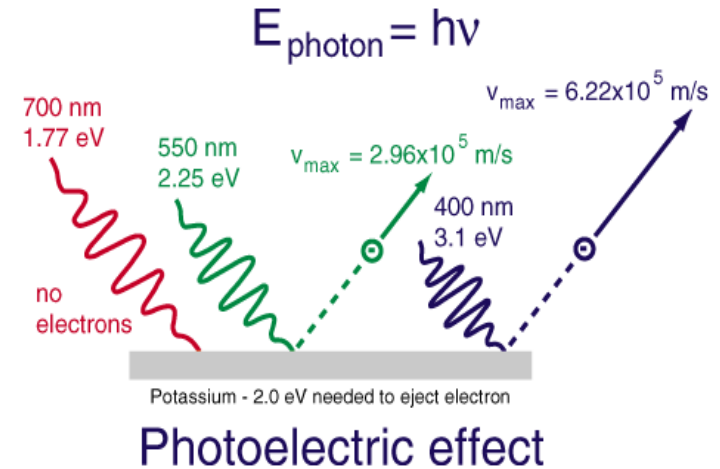
$$E_{c,máx} = h\nu - \phi, \quad E_{c,máx} = \frac{1}{2} m_e v_{e,máx}^2$$

$$eV_{0,p} = E_{c,máx} = h\nu - \phi$$

ϕ : função de trabalho

Potencial de paragem para o potássio

Caso do potássio metálico



O mínimo de energia requerida para ejectar um electrão de uma superfície designa-se **função de trabalho** de extracção do material, ϕ .

O limiar de energia para o sódio metálico corresponde ao comprimento de onda 683 nm (ver no gráfico anterior o valor da frequência limiar), obtendo-se através da relação de Planck, $E=h\nu$, o valor da função de trabalho para o sódio igual a 1,82 eV.

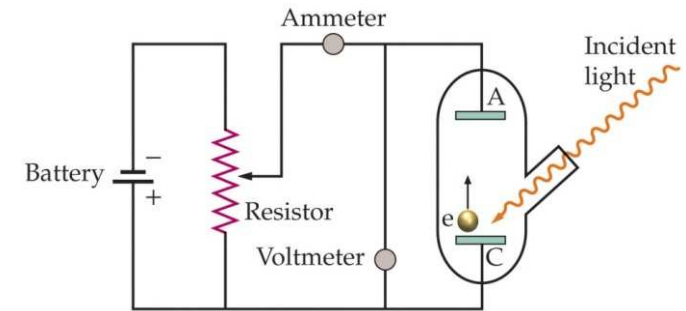
Conclusões surpreendentes:

- A radiação electromagnética quando interage com matéria comporta-se como um fluxo de partículas (fotões).
- A radiação electromagnética tem um carácter dual: uma vez comporta-se como uma onda e outras como um fluxo de partículas (fotões).

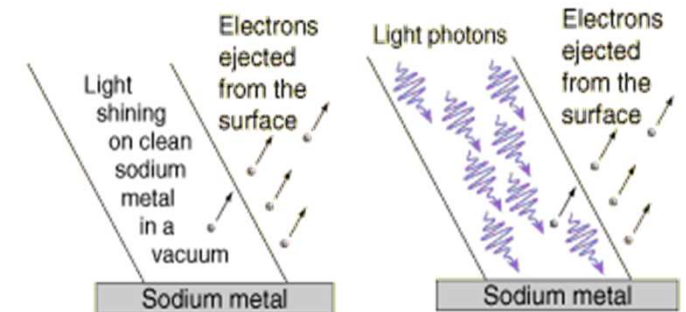
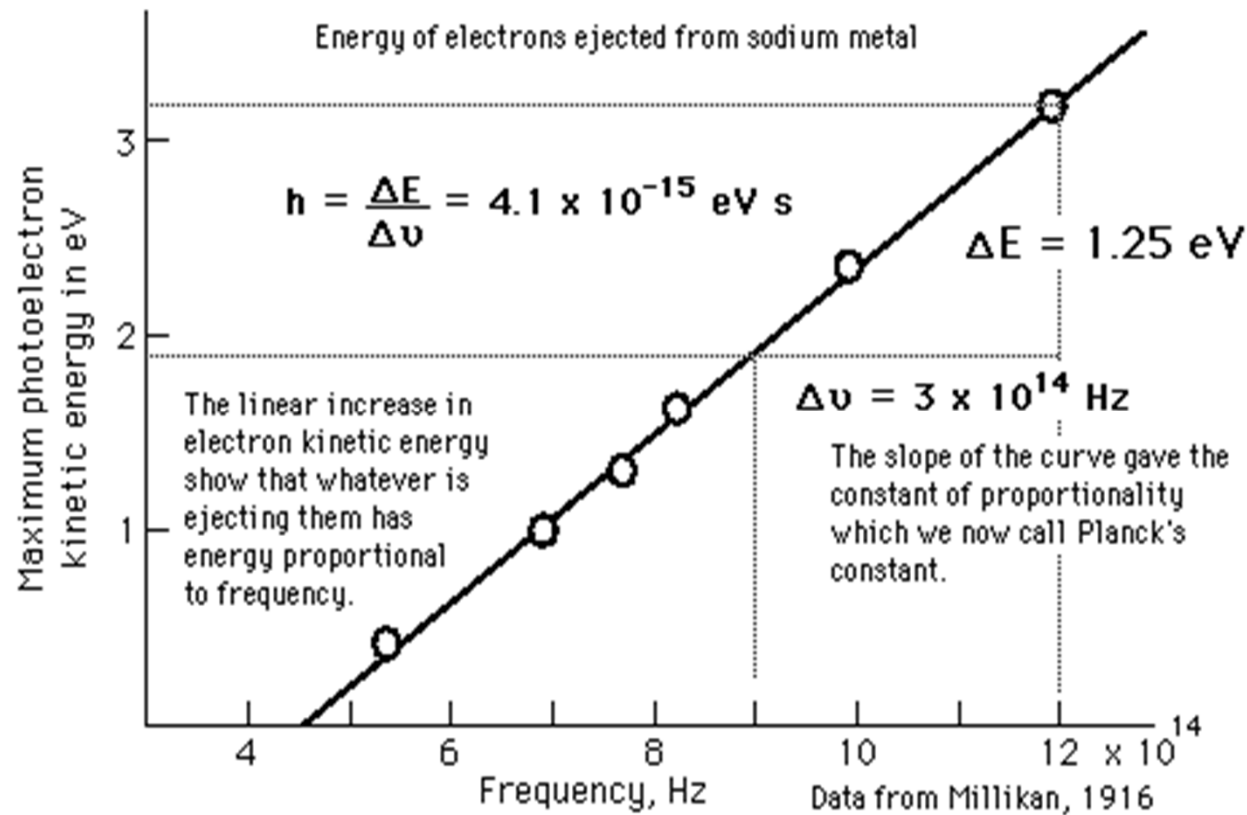
Efeito fotoelétrico: determinação de h

Relação de Planck: $E = h\nu$

Energia cinéticas dos electrões ejectados em função da frequência da radiação incidente



Material: sódio metálico



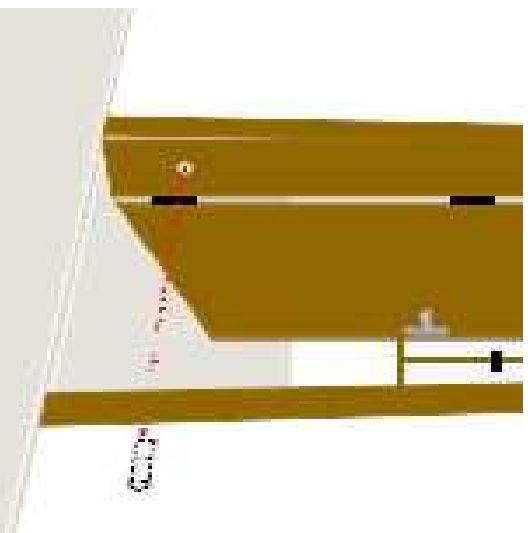
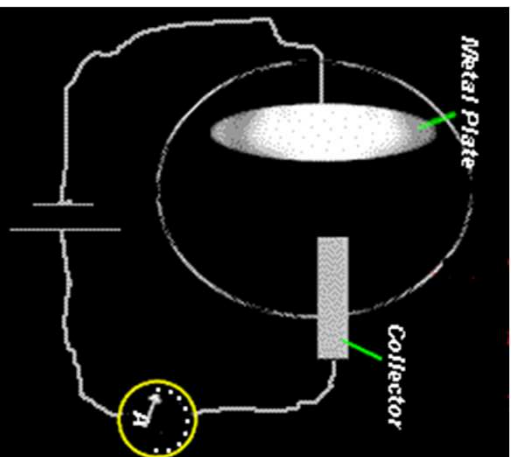
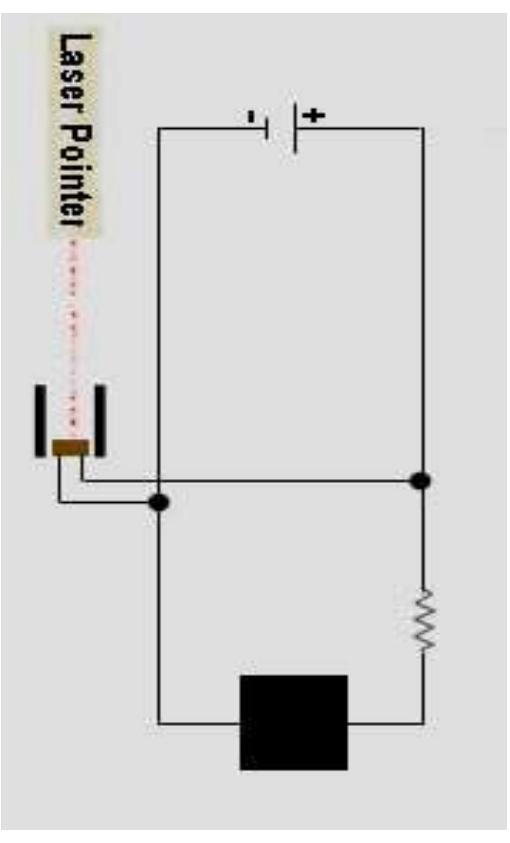
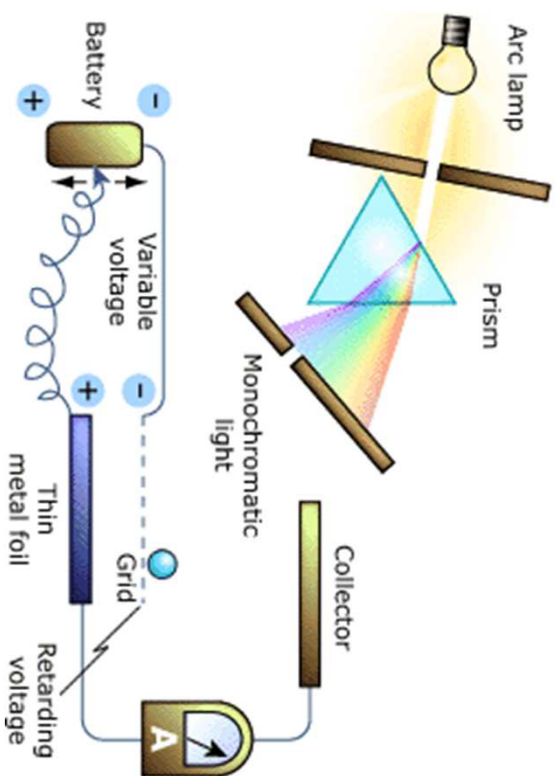
Photon energy

$$E = h\nu$$

explains the experiment and shows that light behaves like particles.

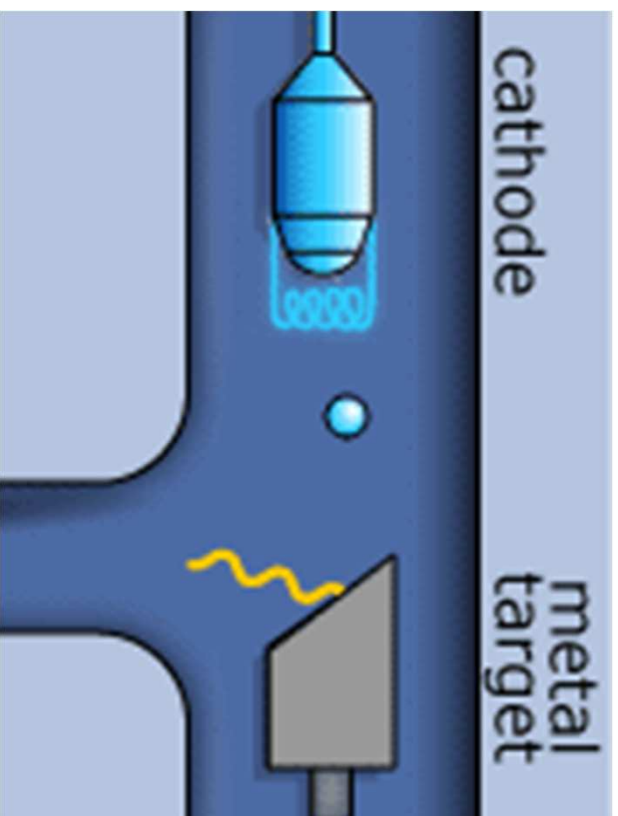
$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Aplicações do efeito Fotoeléctrico

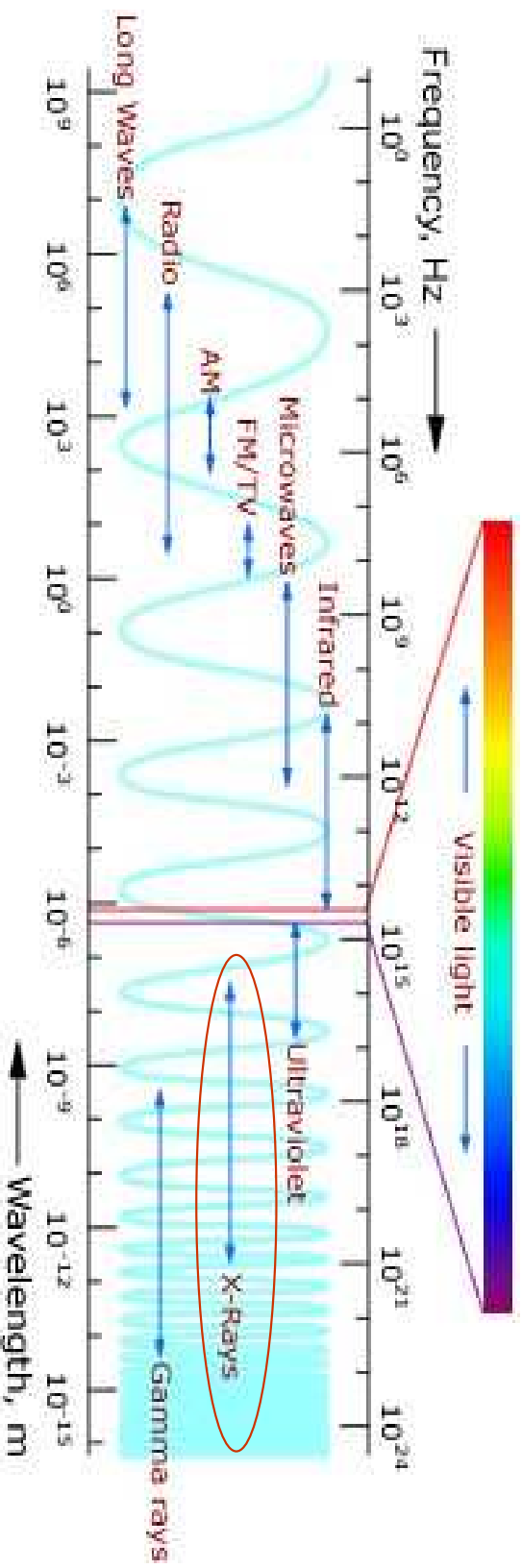


Produção de raios X

Produção de raios X

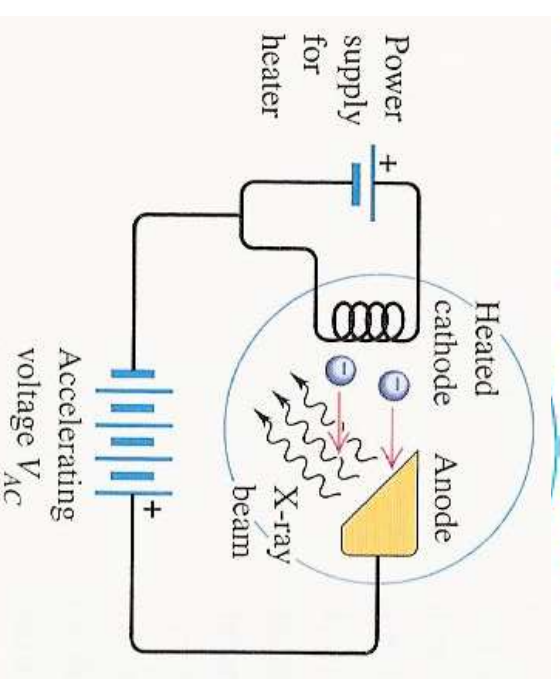


$$eV_{AC} = hf_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \quad (\text{bremsstrahlung})$$

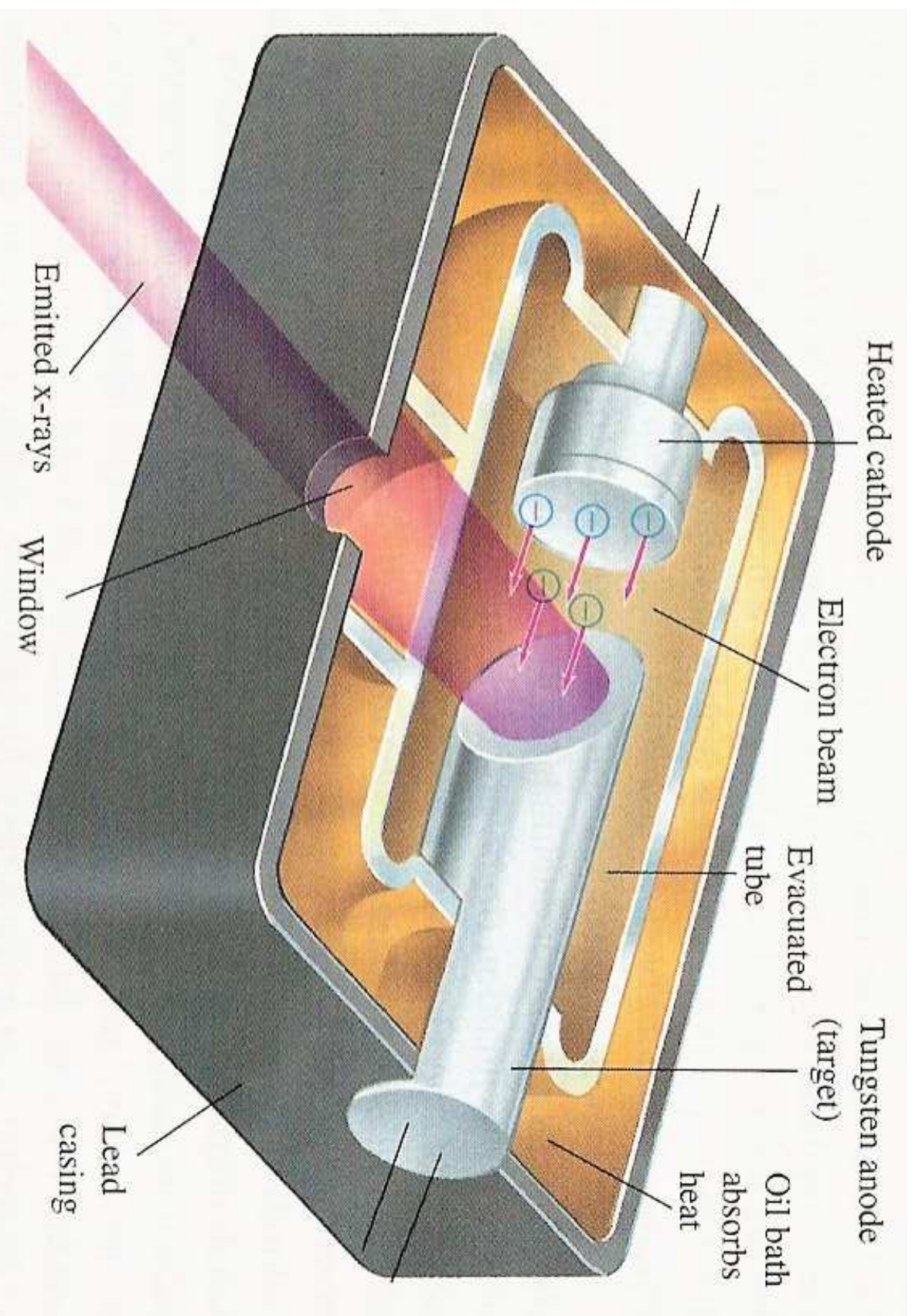


38.25 An apparatus used to produce x rays, similar to Röntgen's 1895 apparatus.

Electrons are emitted thermionically from the heated cathode and are accelerated toward the anode; when they strike it, x rays are produced.



Produção de raios X



Massa e energia segundo a Relatividade

A energia total de uma partícula com massa em repouso m_0 e a grandeza do seu momento p estão relacionadas

$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + (pc)^2$$

Equivalência entre massa e energia (Einstein): $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

Para os quanta de luz (fótons), tem-se

$$E = pc = hf = hc / \lambda$$

O quanta de luz não existem em repouso, i.e., $m_0=0$

O momento $\vec{p}$ (vector) de uma partícula com massa em repouso m_0 , movendo-se com uma velocidade $\vec{v}$ (vector), define-se como:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Segunda lei de Newton: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

A energia cinética de uma partícula com massa em repouso m_0 , movendo-se com uma velocidade v , define-se como:

$$E_C = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} - m_0 c^2$$

A energia total de uma partícula com massa em repouso m_0 , movendo-se com uma velocidade v , também se pode obter usando a relação:

$$E = E_C + E_R = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Na expressão anterior E_R representa a energia da partícula em repouso: $E_R = m_0 c^2$.

$$E_R = m_0 c^2$$

Efeito de Thomson

Efeito de Thomson

O processo de espalhamento de fótons sem a alteração de seu comprimento de onda designa-se espalhamento Thomson, em homenagem ao físico que desenvolveu por volta de 1900 uma teoria clássica de espalhamento de raios-X por átomos.

Thomson considerou os raios-X como sendo um feixe de ondas electromagnéticas cujo campo eléctrico oscilante interage com as cargas dos electrões do alvo. Essa interacção faz com que o electrão oscile.

Como resultado de suas acelerações, os electrões vão irradiar ondas electromagnéticas com a mesma frequência e a mesma fase das ondas incidentes.

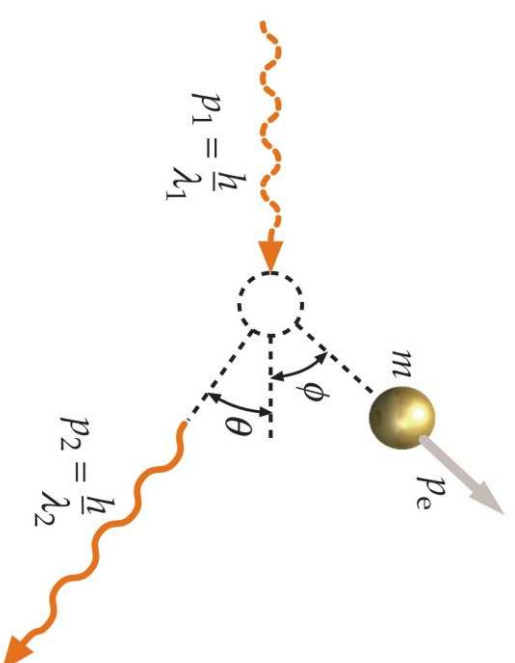
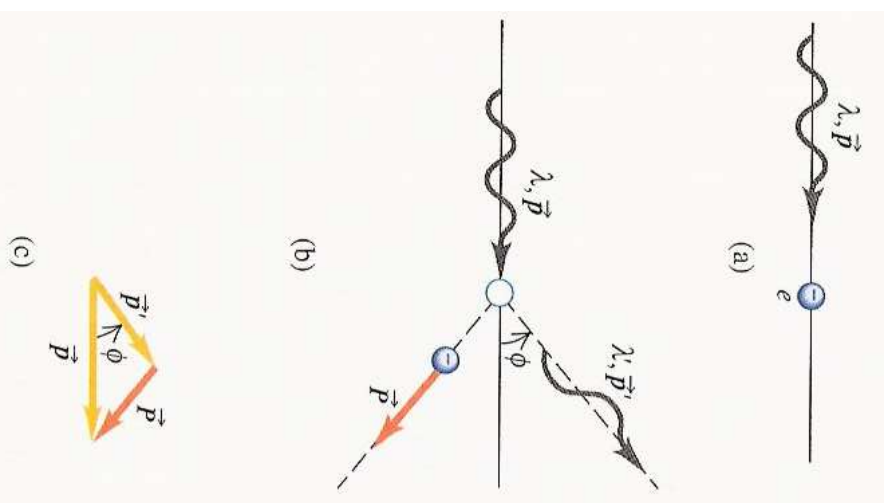
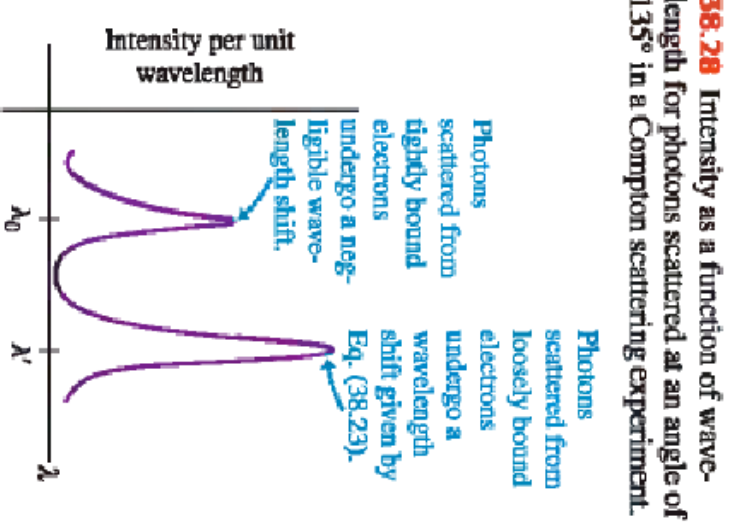
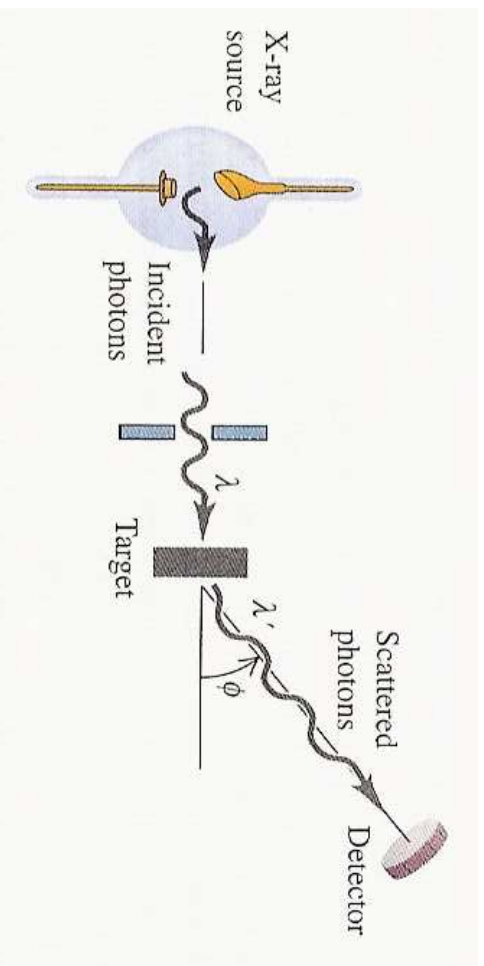
Portanto, os electrões atómicos absorvem energia do feixe de raios-X incidente e o espalham em todas as direcções, sem modificar seu comprimento de onda.

Efeito de Compton

O **efeito Compton** ou **espalhamento de Compton**, corresponde à emissão de um fóton de um fóton de [raio-X](#) ou de [raio gama](#) com energia inferior (maior [comprimento de onda](#)) à do fóton de [raio-X](#) ou de [raio gama](#) incidente em certos meios materiais. **Espalhamento Inverso de Compton** também existe, onde o fóton espalhado tem maior energia (menor comprimento de onda) que o fóton incidente na matéria. Este efeito foi observado por [Arthur Holly Compton](#) em [1923](#), sendo-lhe atribuído o [Prêmio Nobel de Física](#) em [1927](#).

O efeito é importante porque ele demonstra que a luz não pode ser explicada meramente como um fenómeno ondulatório. A explicação do espalhamento de Compton **é simples se se considerar que** a luz quando interage com a matéria comporta-se como um feixe de partículas. A experiência de Compton convenceu físicos que a luz em certas circunstância comporta-se como uma corrente de partículas cuja energia é proporcional à frequência, confirmando assim a proposta de Einstein.

Efeito Compton



Efeito de Compton

Na interacção há conservação da energia e de momento:

$$h\frac{c}{\lambda_i} + E_i^{\text{el}} = h\frac{c}{\lambda_f} + E_f^{\text{el}}$$

$$\vec{p}_i^{\text{fo}} + \vec{p}_i^{\text{el}} = \vec{p}_f^{\text{fo}} + \vec{p}_f^{\text{el}}$$

Após algum cálculo obtém-se:

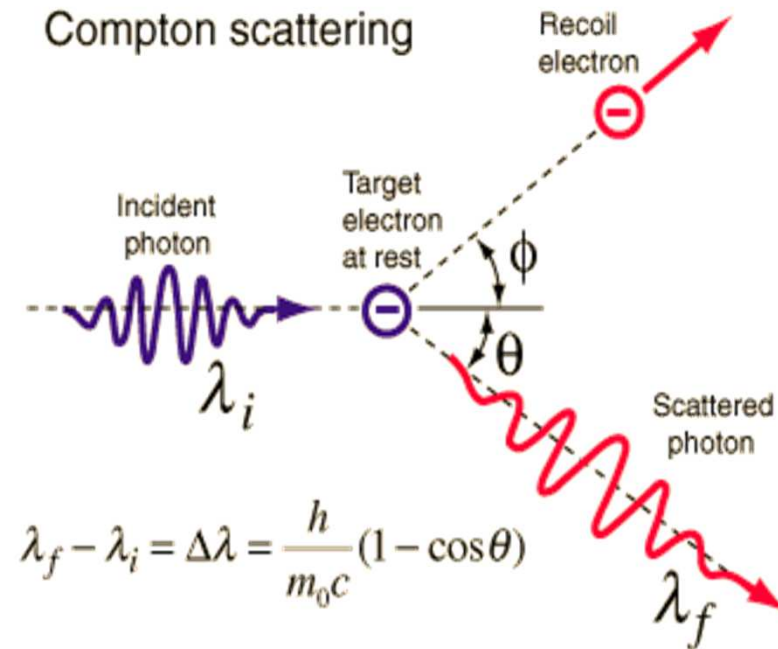
$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_f - \lambda_i = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

Comprimento de onda de Compton:

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c}$$

Ter presente que o fóton espalhado não é o mesmo que o fóton incidente: o fóton incidente é absorvido pelo átomo, sendo emitido um novo fóton com energia menor que o fóton incidente. Tanto quanto se sabe um fóton não pode «perder» parte da sua energia.



$$\tan \phi = - \left[\left(1 + \frac{h\nu_i}{m_0 c^2} \right) \tan \left(\frac{1}{2} \theta \right) \right]^{-1}$$

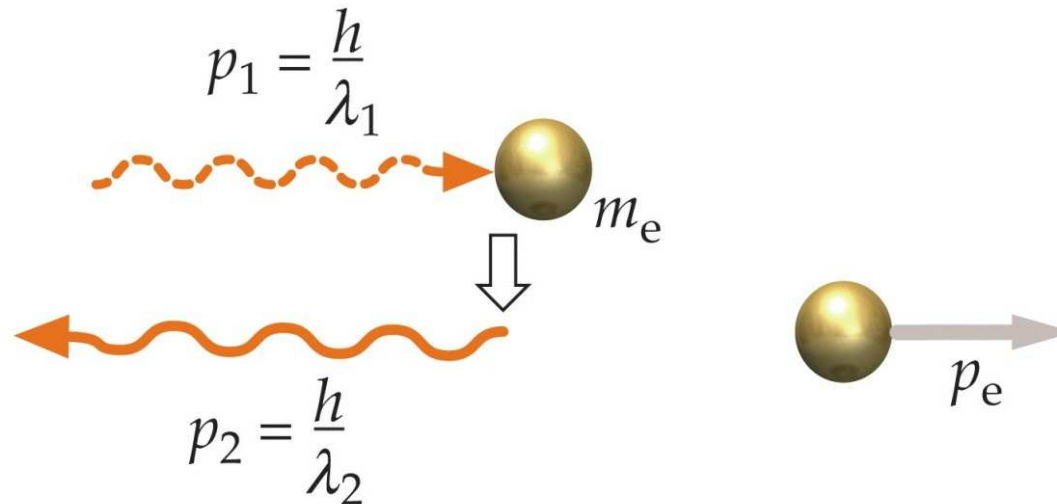
A. H. Compton e A. W. Simon, *Phys. Rev.*, 97, 1710, 1925.

Efeito de Compton: exercício

Um fóton de raios x de comprimento de onda 6 pm colide frontalmente com um electrão, inicialmente em repouso.

- a) Qual é a energia cinética do fóton incidente?
- b) Em que direcção e sentido é emitido o fóton resultado da colisão? E o electrão?
- c) Qual o aumento de comprimento de onda do fóton emitido?
- d) Qual é a energia cinética do fóton espalhado?
- e) Qual é a energia cinética do electrão?

R: a)



R: c) 4.86 pm ($\lambda_2=10.86$ pm)

R: e) 93 keV

Nota: como a energia cinética do electrão é 93 keV, cerca de 18% da energia em repouso do electrão ($E_0=m_e c^2=511$ keV, não é válida expressão clássica da energia cinética $E_c=\frac{1}{2}m_e v^2$). Qual seria a velocidade do electrão se se aplicasse a formula não relativista da inércia cinética?

Resumo das principais formas de interacção entre a radiação e a matéria

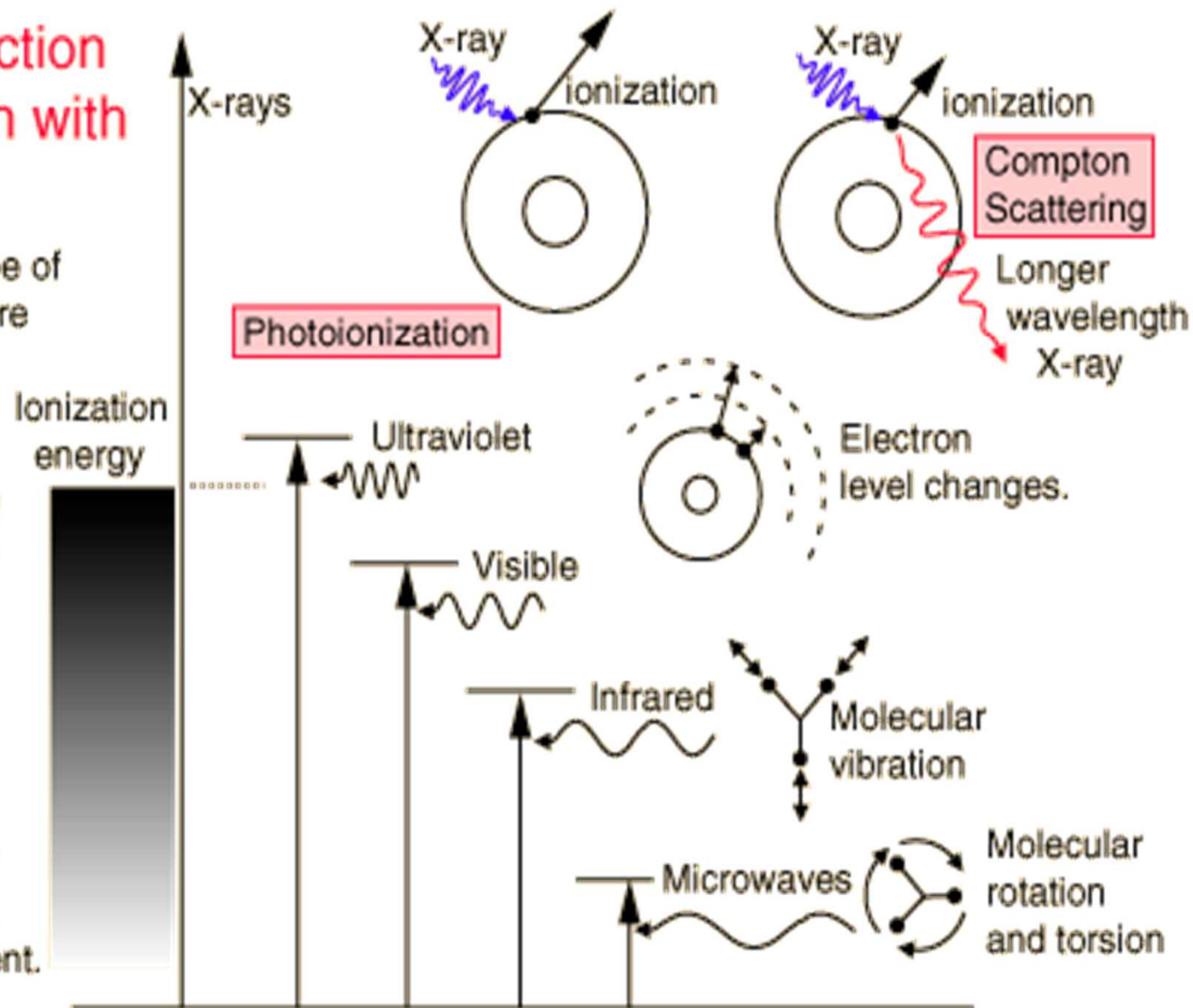
Resumo das principais formas de interacção entre a radiação e a matéria

The interaction of radiation with matter.

Click on any type of radiation for more information.

Large number of available energy states, strongly absorbed.

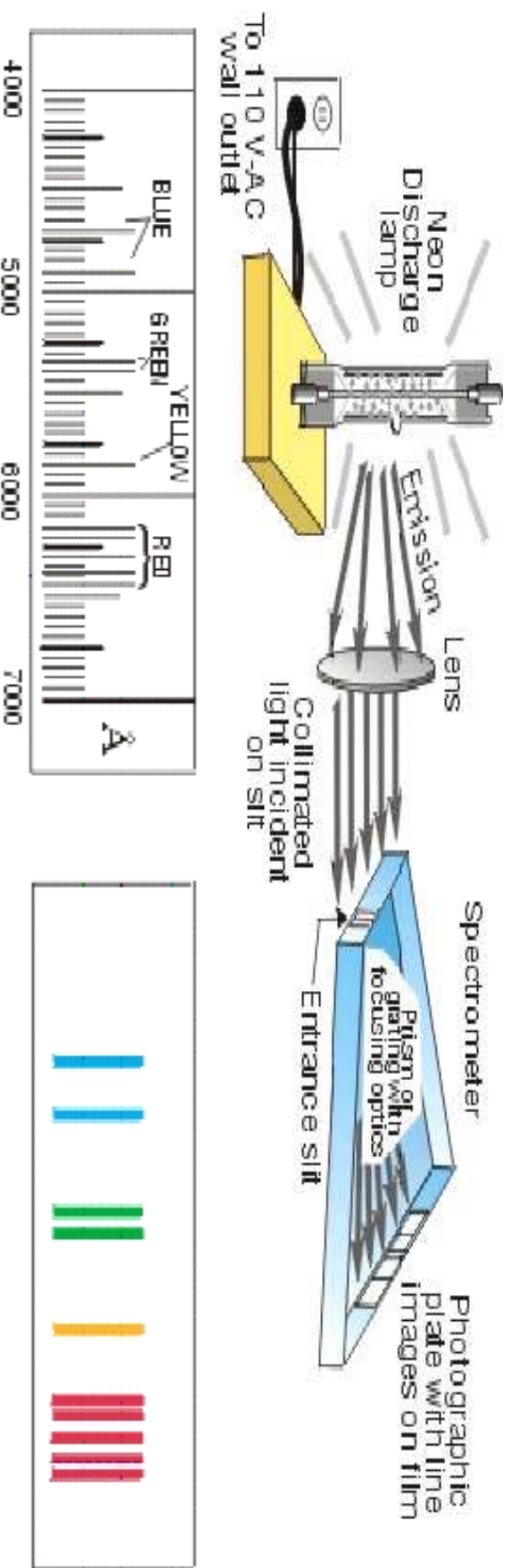
Small number of available states, almost transparent.



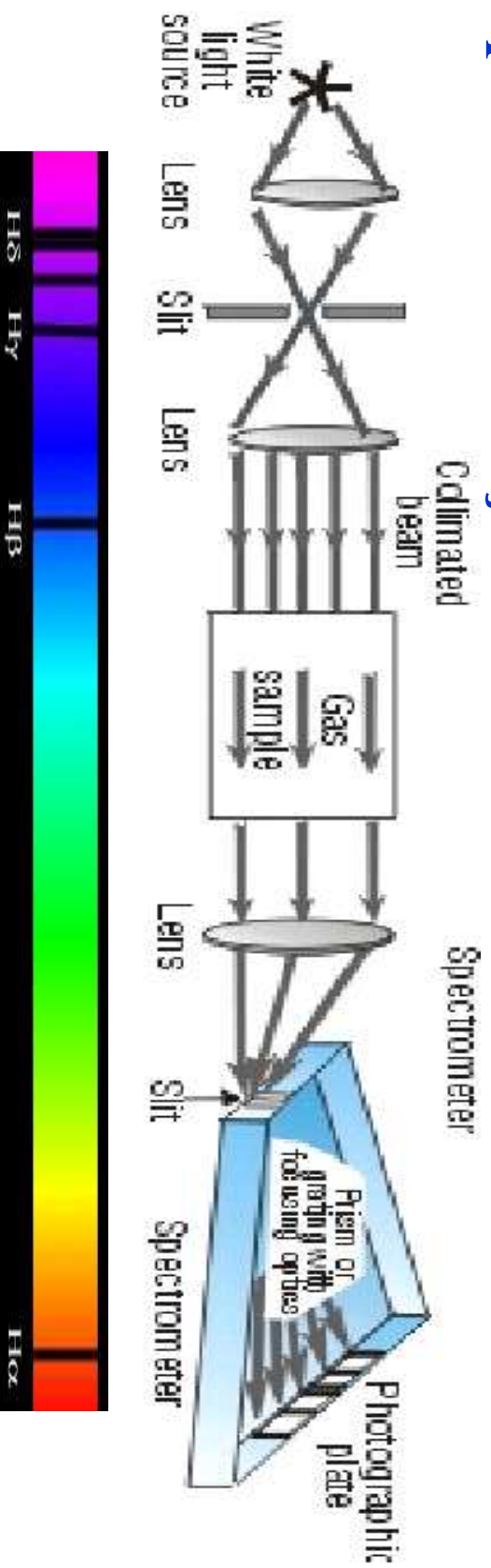
Espectros de emissão e absorção atômicos

Espectroscopia

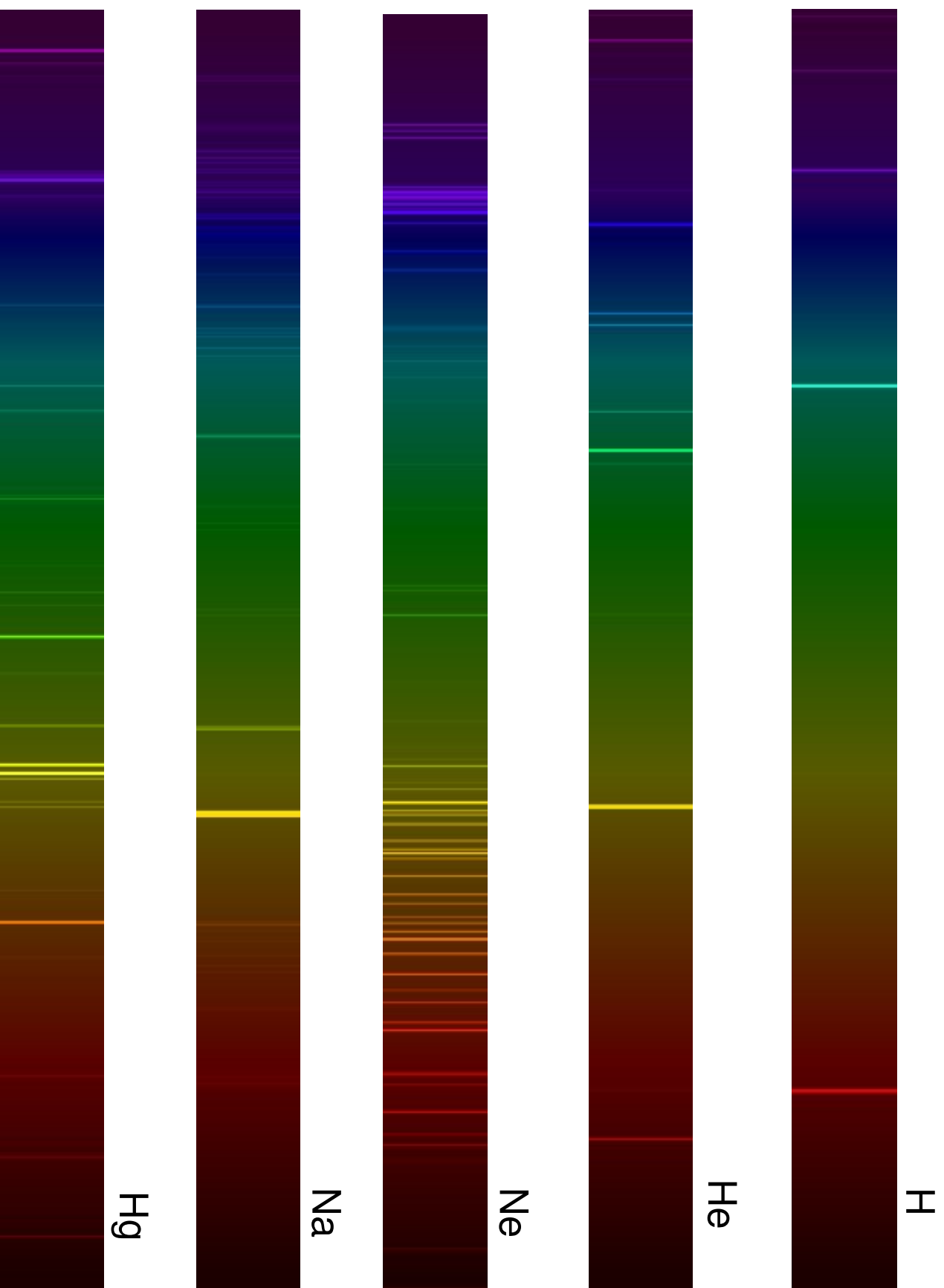
Espectro de Emissão



Espectro de Absorção



Espectros de emissão do H, do He, do Ne, do Na e do Hg



Espectro do Átomo de hidrogénio – *série de Balmer*



Principais riscas da série de Balmer no visível

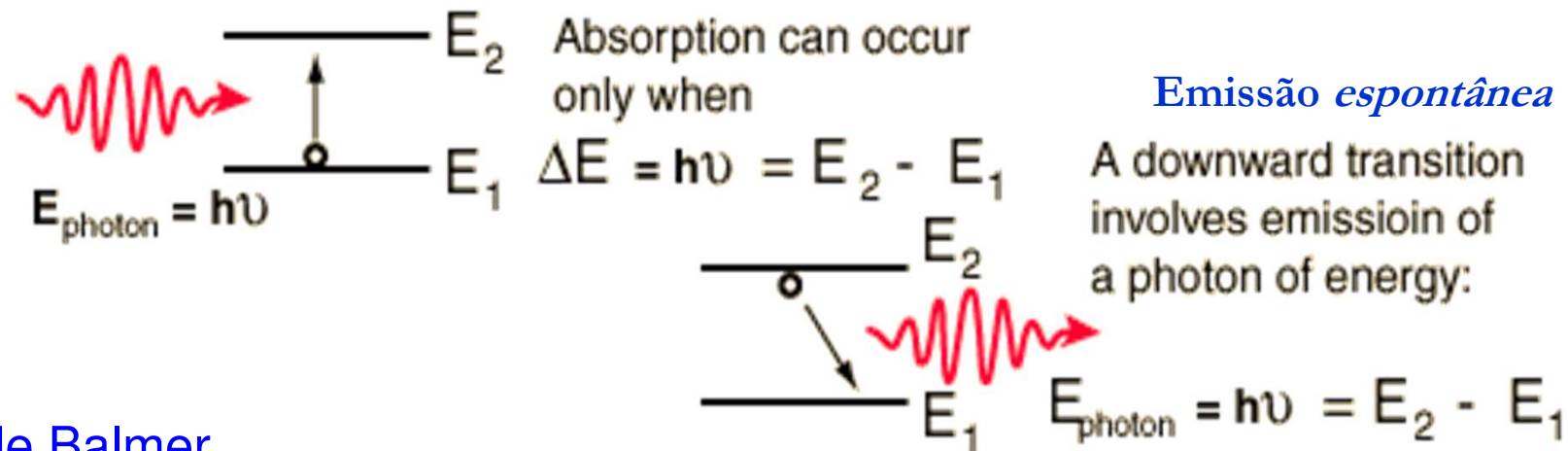
Comp. de onda - intensidade relativa - transição – cor

410,174 nm	15	6-2	violeta
434,047 nm	30	5-2	violeta
486,133 nm	80	4-2	ciânico
656,2852 nm	180	3-2	vermelho

Série de Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, \dots$$

Espectro do Átomo de hidrogénio *segundo* Bohr



Série de Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 3, 4, \dots$$

Na série de Balmer, se fizermos $E_i = -hcR_y/n^2$ e $E_f = -hcR_y/2^2$, obtém-se que a energia do átomo no estado n é dada por

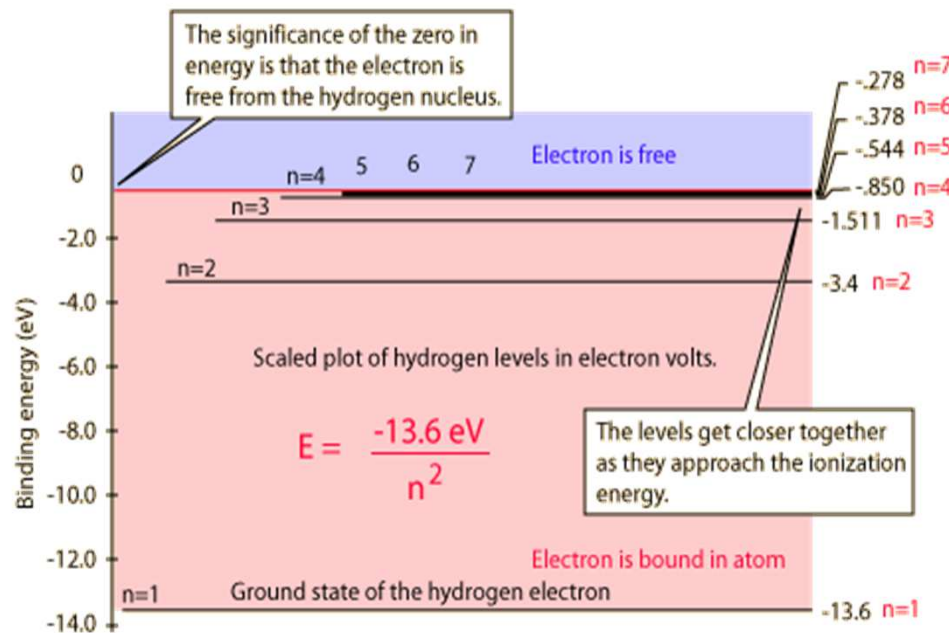
$$E_n = -hcR_y/n^2 = -E_0/n^2.$$

$$R_y = \frac{E_0}{hc} \text{ é a constante de Rydberg para o H.}$$

Espectro do Átomo de hidrogénio *segundo* Bohr



Níveis de energia do átomo de hidrogénio



Fórmula de Balmer-Rydberg

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \text{ ou } hf = E_0 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$E_0 = -hcR_y, \quad E_0 = 13,6 \text{ eV.}$$

No caso do átomo de Hidrogénio, energia do átomo no estado n é dada por $E_n = -hcR_y/n^2 = -E_0/n^2$, com $E_0 = 13,6 \text{ eV}$.

Série de Balmer no visível

Comprimento de onda - intensidade relativa - transição – cor

383,5384 nm	5	9-2	violeta
388,9049 nm	6	8-2	violeta
397,0072 nm	8	7-2	violeta
410,174 nm	15	6-2	violeta
434,047 nm	30	5-2	violeta
486,133 nm	80	4-2	ciânico
656,272 nm	120	3-2	vermelho
656,2852 nm	180	3-2	vermelho

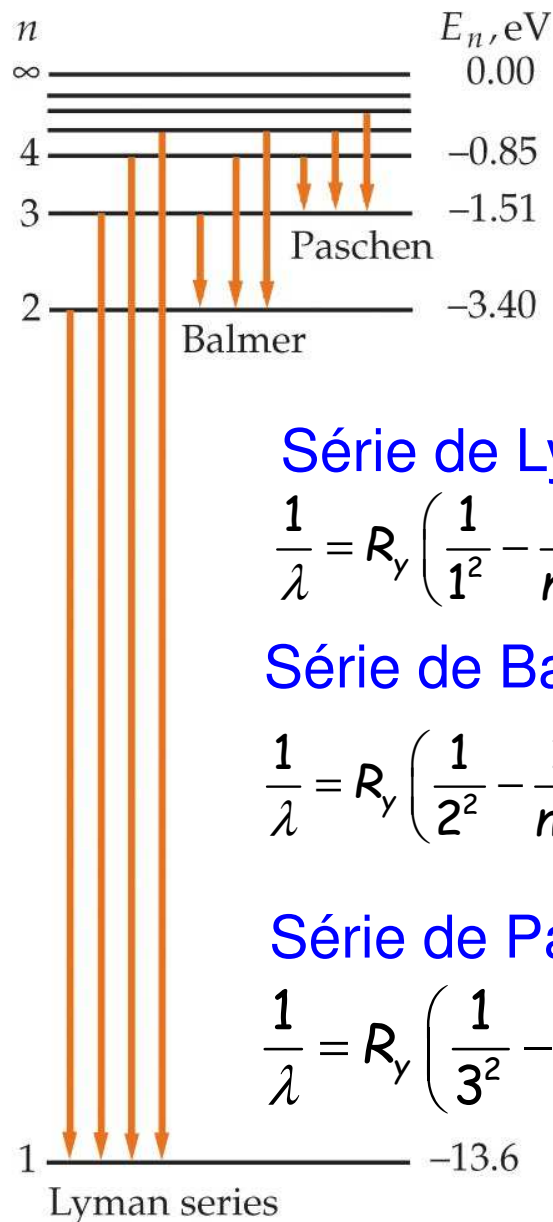
A risca vermelha do deutério é medida a 656,1065 nm (diferença de 0,1787 nm)

«Classificação» das cores espectrais:

Violeta (380 nm – 435 nm);
 Azul (435 nm – 500 nm),
 Ciânico (500 nm – 520 nm);
 Verde (520 nm – 565 nm);
 Amarelo (565 nm – 590 nm);
 Laranja (590 nm – 625 nm);
 Vermelho (625 nm – 740 nm);
 Raios x (<10 nm);
 Ultravioleta (10 nm – 400 nm);
 Visível (400 nm – 750 nm);
 Infravermelho (>750 nm)

Principais séries do espectro do *hidrogénio*

$$hf = |E_f - E_i|$$



Série de Lyman

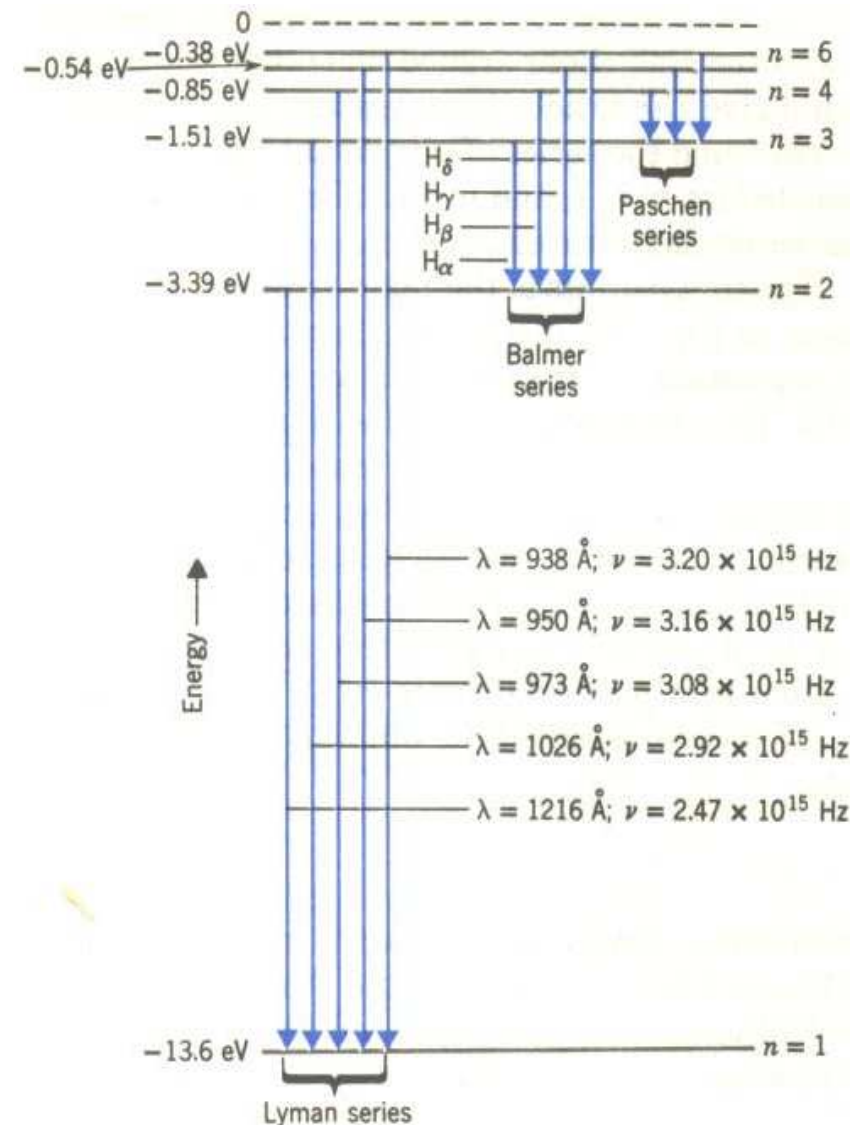
$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 2, 3, \dots$$

Série de Balmer

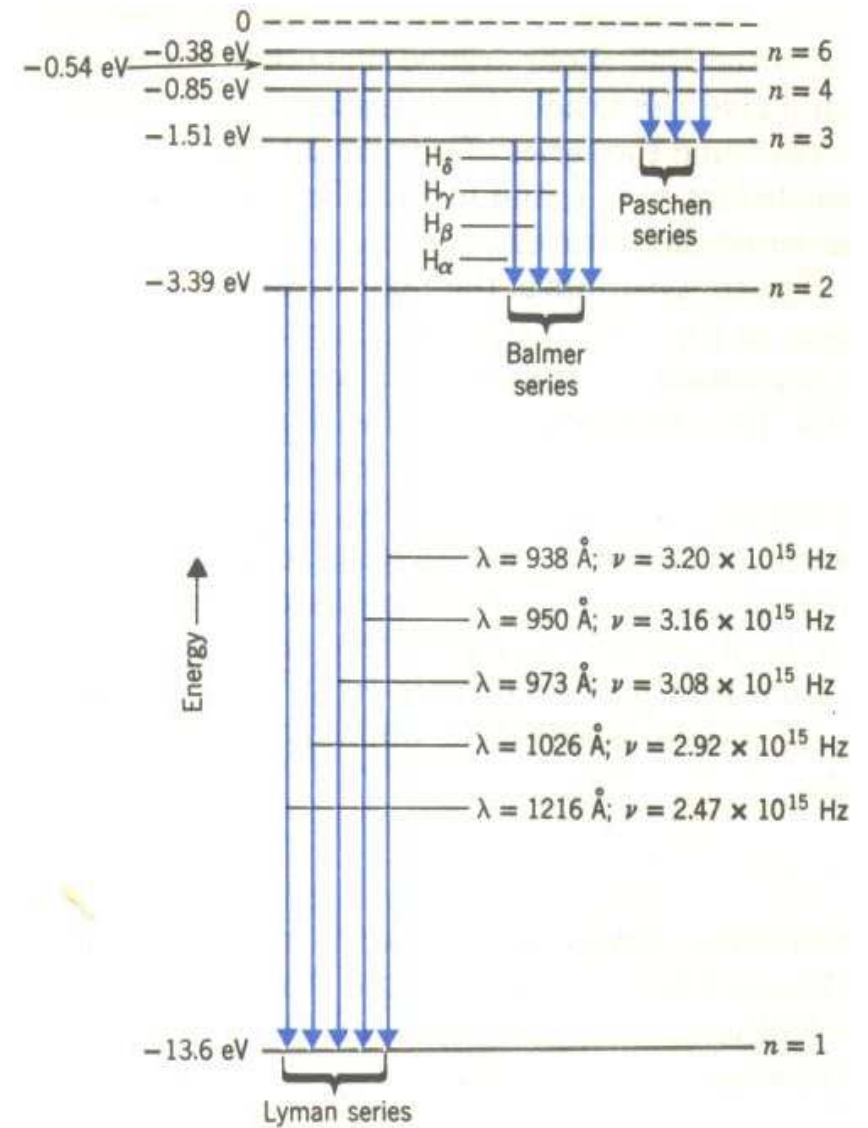
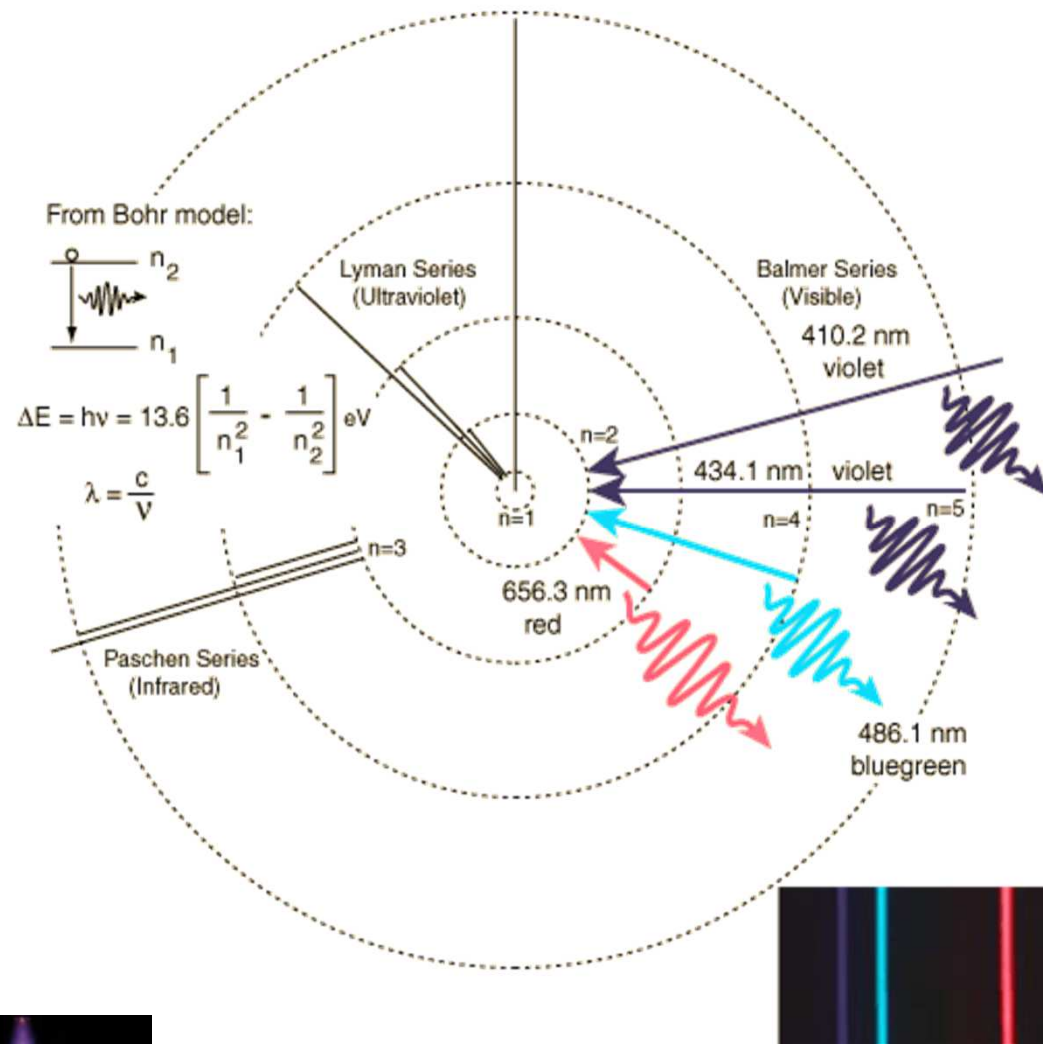
$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 3, 4, \dots$$

Série de Paschen

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 4, 5, \dots$$



Espectro do átomo de hidrogénio



Níveis de energia do Hidrogénio e do ião Hélio

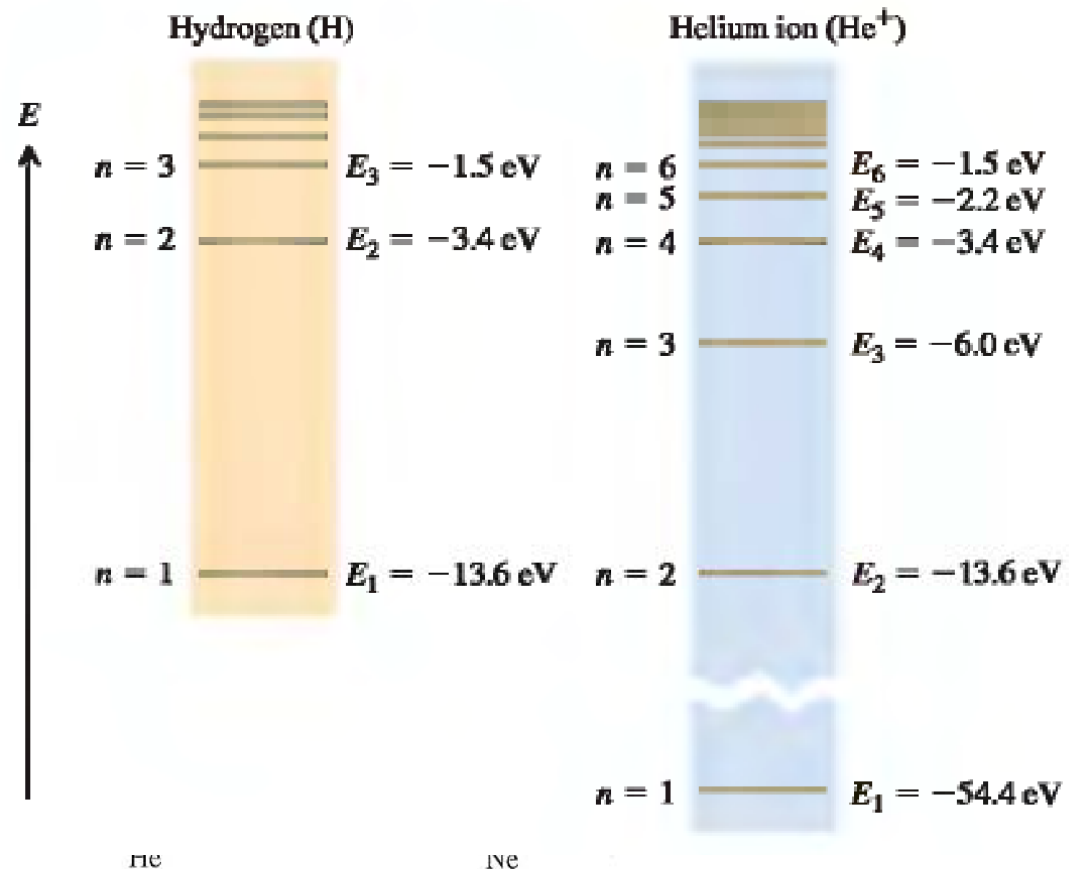
Fórmula de Balmer-Rydberg
para o H

$$\frac{1}{\lambda} = R_{y,H} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\text{ou } hf = E_{0,H} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

$$\text{com } E_{0,H} = -13.6 \text{ eV}$$

Porquê 13,6 eV?



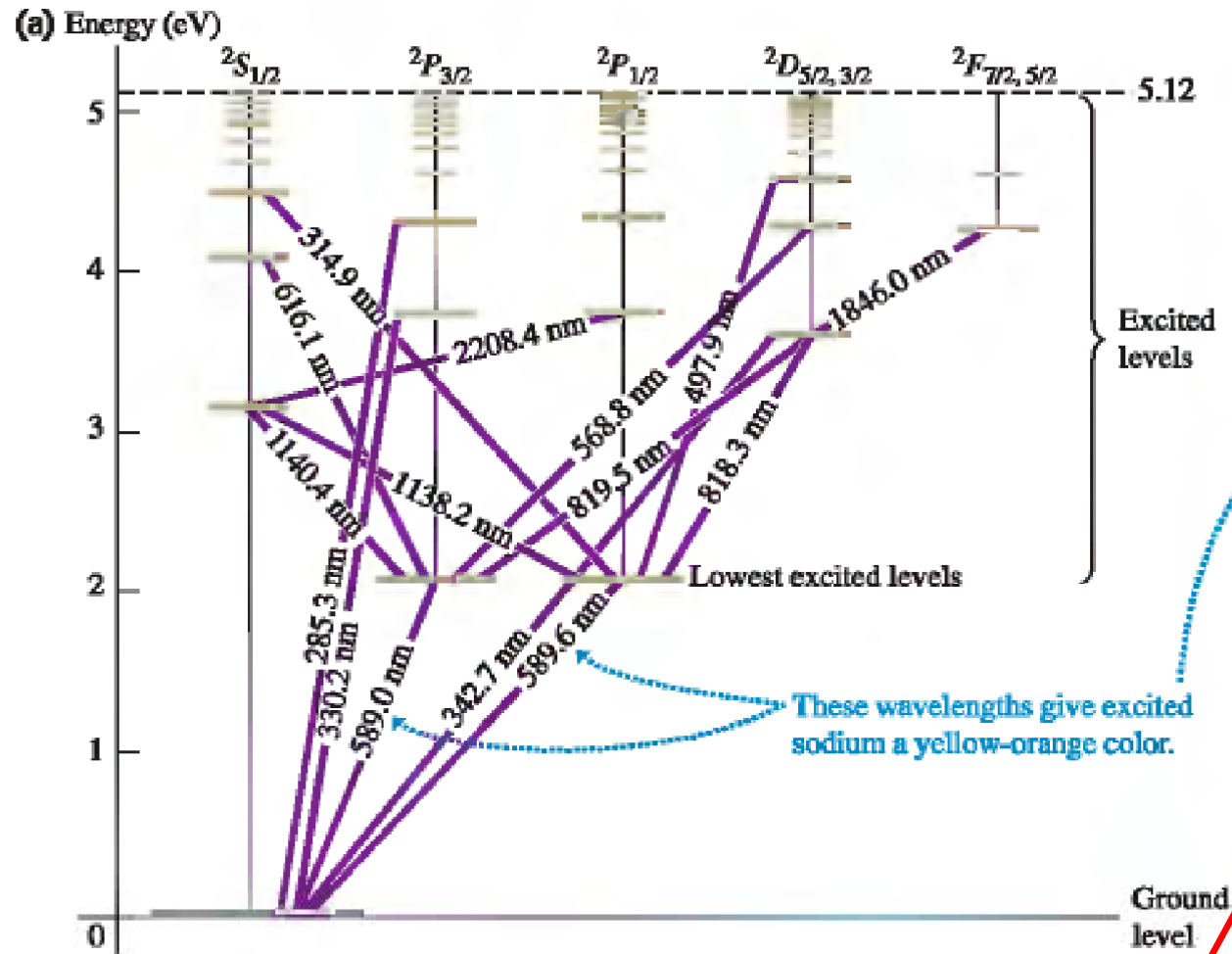
Fórmula de Balmer-Rydberg para o He^+

$$\frac{1}{\lambda} = R_{y,\text{He}^+} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \text{ ou } hf = E_{0,\text{He}^+} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ com } E_{0,\text{He}^+} = -54.4 \text{ eV}$$

Porquê -54,4 eV?

Níveis de energia do Sódio (átomo *poli*-electrónico)

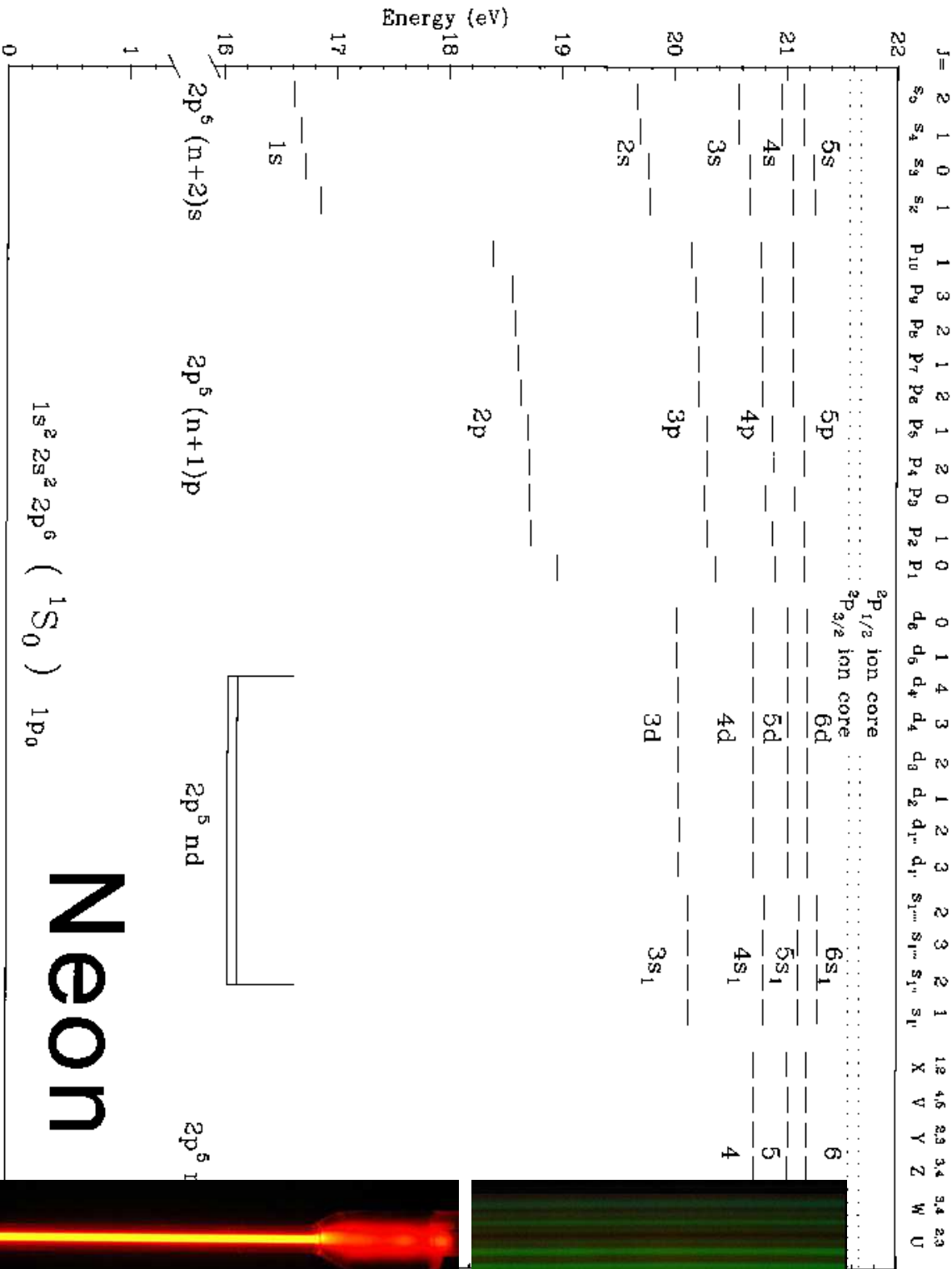
38.10 (a) Energy levels of the sodium atom relative to the ground level. Numbers on the lines between levels are wavelengths. The column labels, such as $2S_{1/2}$, refer to some quantum states of the valence electron (to be discussed in Chapter 41). (b) When a sodium compound is placed in a flame, sodium atoms are excited into the lowest excited levels. As they drop back to the ground level, the atoms emit photons of yellow-orange light with wavelengths 589.0 and 589.6 nm.



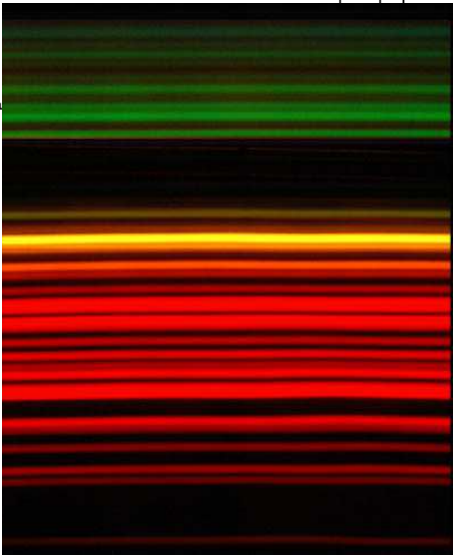
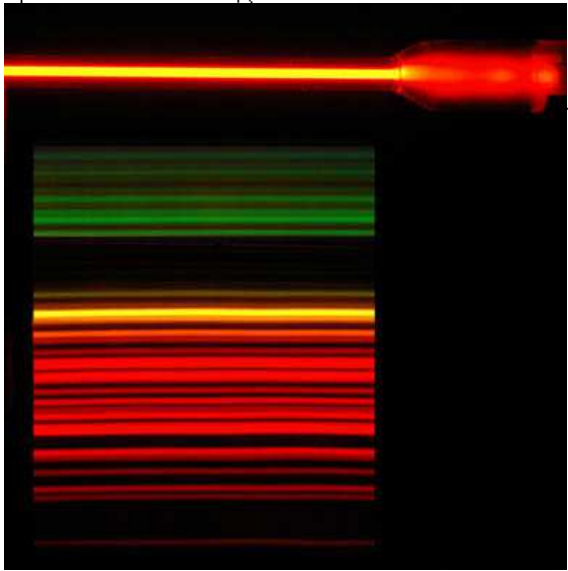
Ver trabalho prático



Níveis de energia do Néon (átomo poli-electrónico)



Neon



Níveis de energia do mercúrio (Hg)

Hg

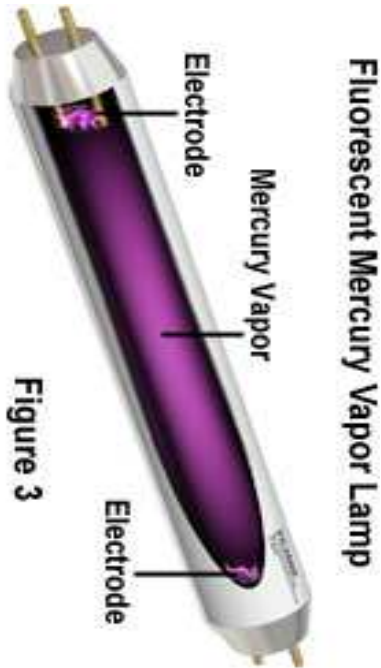
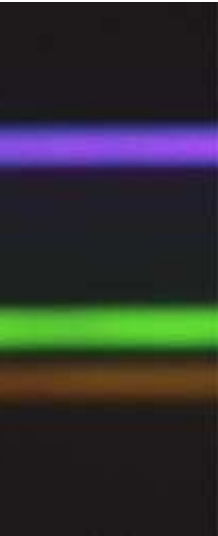
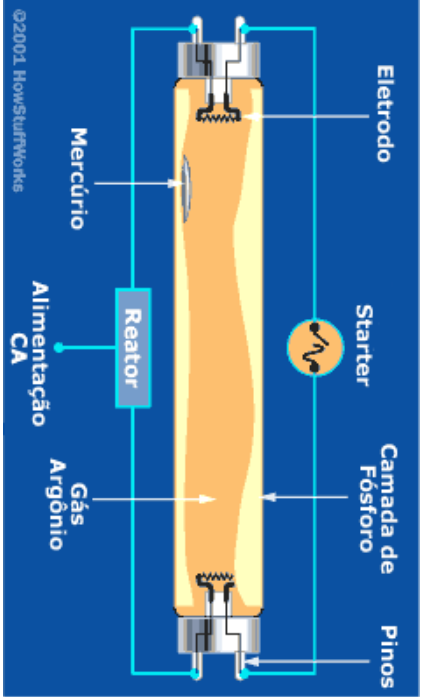


Figure 3



Ver trabalho prático

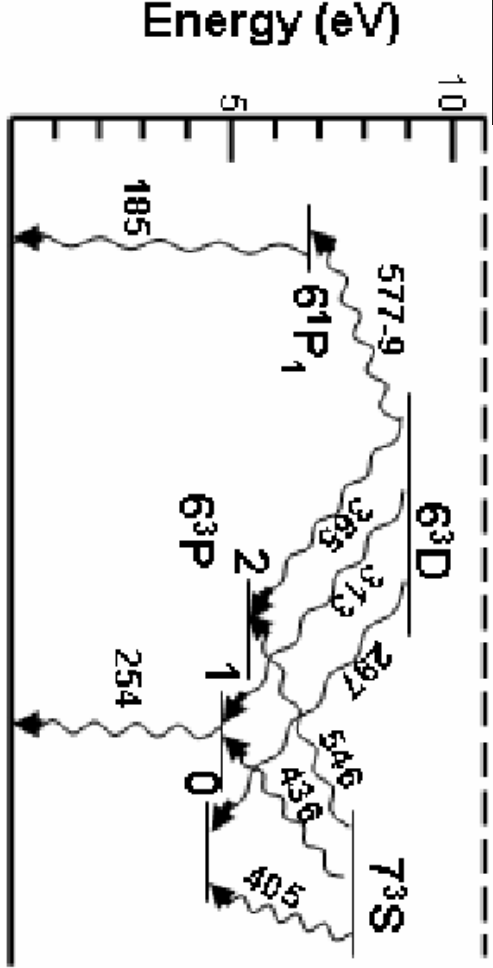
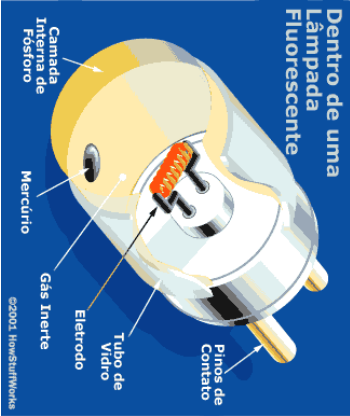
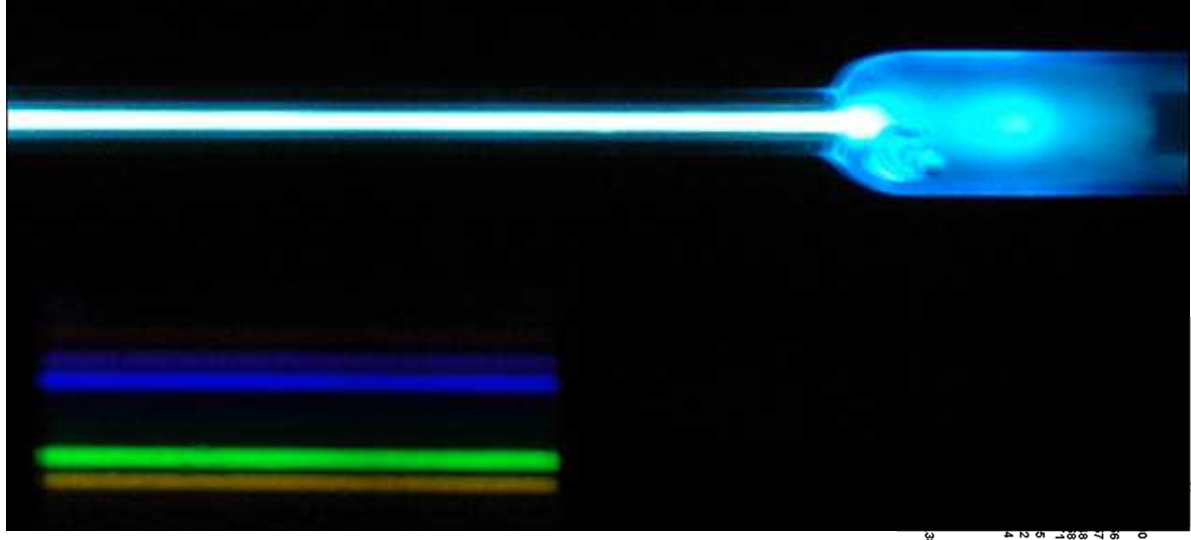


Fig. 7 Energy level diagram for mercury

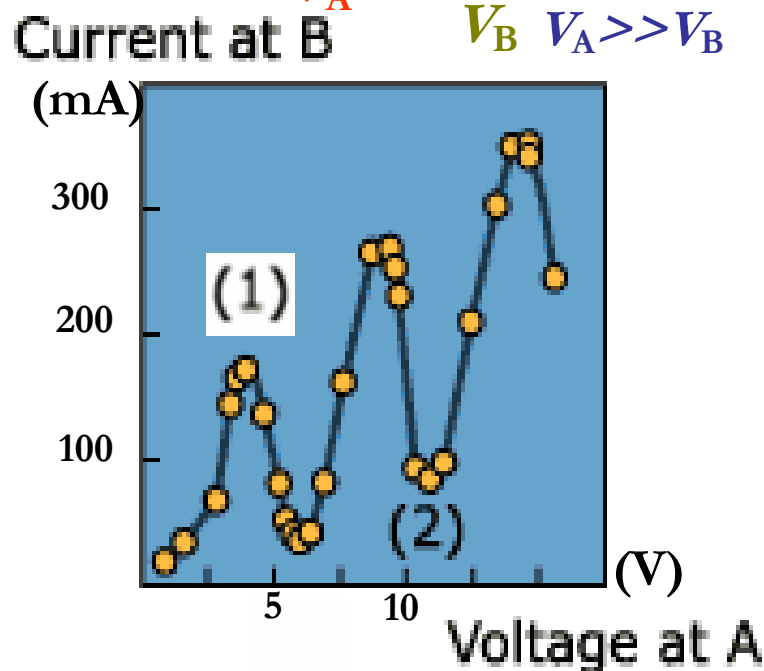
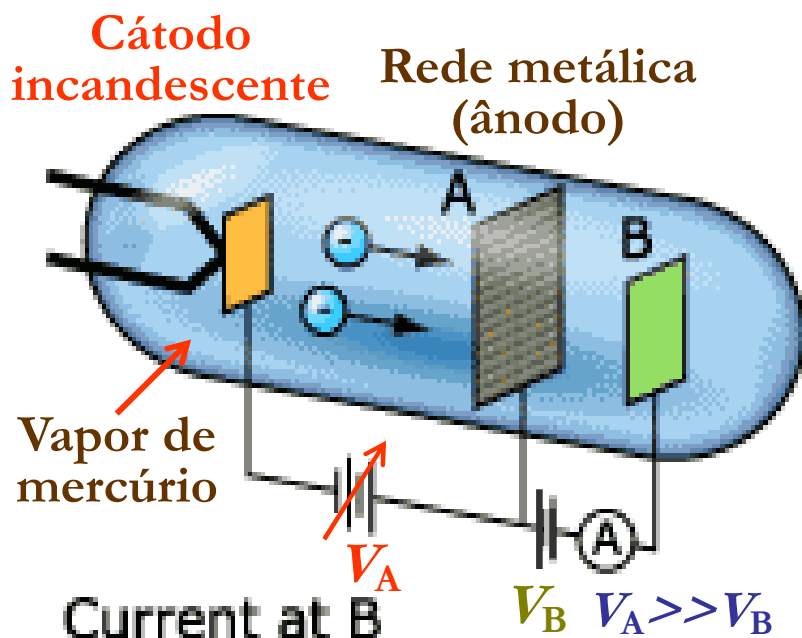
(All wavelengths given in nanometers.)



Experiência de Franck-Hertz

Experiência de Franck-Hertz

Modelo de Bohr, 1913 Experiência de Franck-Hertz, 1914 (absorção ressonante)



Nesta experiência, os electrões são acelerados pela tensão V_A :

à medida que a tensão entre o cátodo e o ânodo sobe, a corrente de A para B aumenta marcadamente até se atingir a tensão 4,9 V, diminuindo acentuadamente logo que a tensão ultrapassa este valor;

o mesmo acontece quando $V_A \approx 9,8$ V, 14,7 V, etc.: 4,9 eV corresponde à energia da risca 253,7 nm ($E_2 - E_1 = hc/\lambda e = 4,9$ eV). Para vapor de sódio, observa-se a risca amarela 589 nm, quando $V_A \approx 2,1$ V.

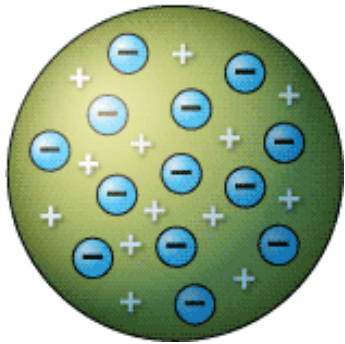
Observa-se emissão de radiação quando a energia cinética dos electrões é superior às energias de excitação ΔE_{exci} dos átomos do gás (valores de eV_A a partir dos quais há diminuição de corrente).

Estrutura Atómica

Modelos atómicos

(de Thomson a Sommerfeld)

Modelos do átomo e experiência de Rutherford



Modelo de Thomson - Hipóteses de Thomson (1897):

- Os raios catódicos são partículas com carga negativa
 - Estas partículas são constituintes dos átomos
 - Estes corpúsculos são os únicos constituintes dos átomos.
- (Para Thomson a carga positiva do átomo não “tinha massa”).

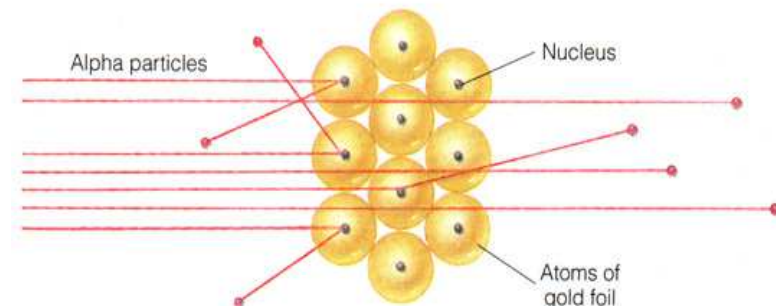
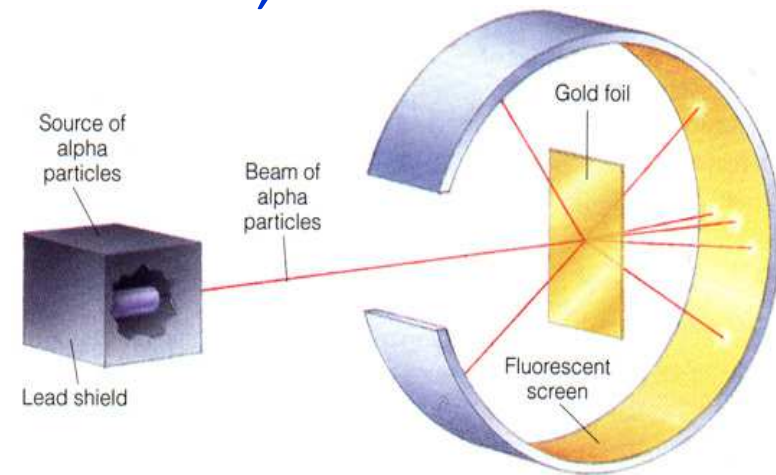
Experiência de Rutherford, Geiger e Marsden, 1909, 1911-1913

$$r_{\text{nucl}} = r_0 \sqrt[3]{A}, \quad r_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m},$$

$A \equiv$ número de massa,

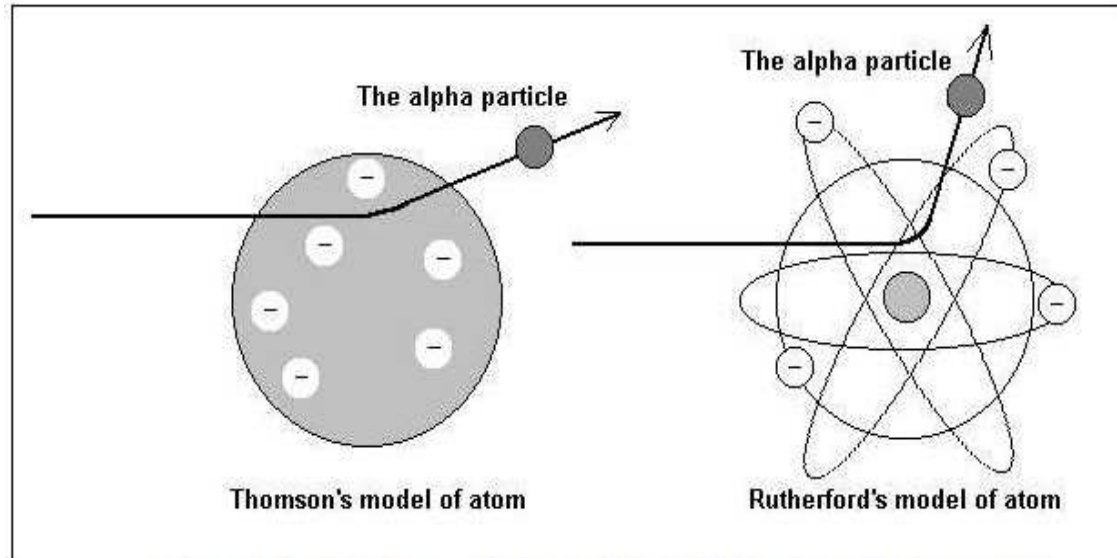
Densidade do núcleo:

$$\rho_{\text{nucl}} \approx 2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

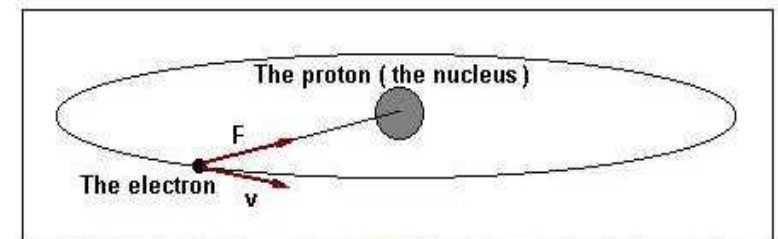
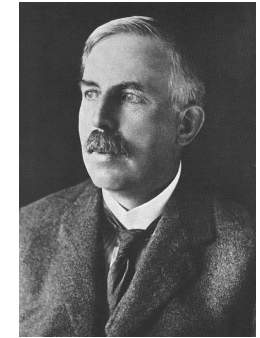


«Falhanço» do modelo de Rutherford

Modelo de Rutherford do átomo

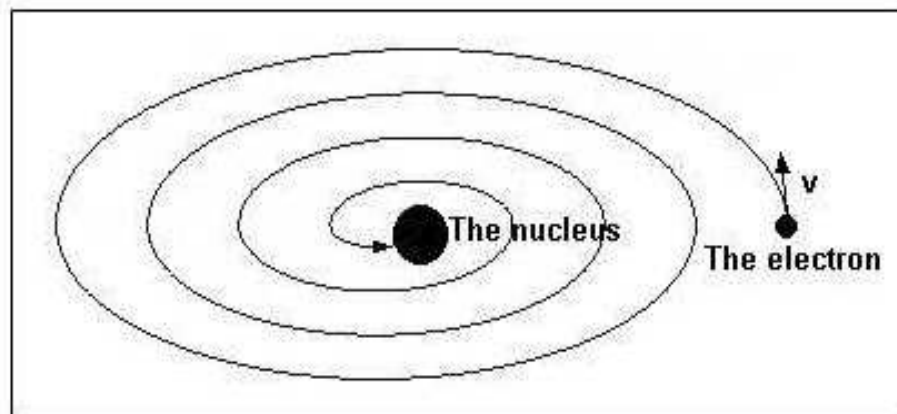


The models of the Thomson's atom and Rutherford's atom; and the expected aberrations of alpha particle in both cases.



The Rutherford's atomic model. The electron circulating on the orbit around the nucleus with the velocity v is attracted by it with the force F

Falhanço do modelo de Rutherford: o electrão acabaria por «cair» no núcleo



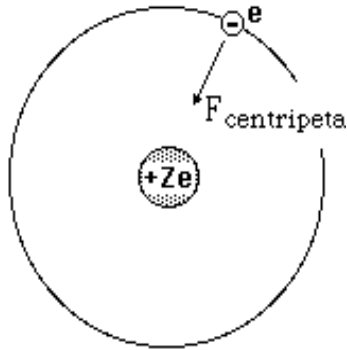
In the planetary model of atom, the electron should emit energy and spirally fall on the nucleus.



Proposta de Bohr para o modelo do átomo

Órbita «clássica» do electrão e a quantização do momento angular (L)

Seja um átomo com Z prótons no núcleo e com apenas 1 electrão orbitando o núcleo



1º postulado de Bohr: a órbita do electrão obedece às leis de Newton

$$m_e a \equiv \frac{m_e v_e^2}{R} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{eZe}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad \text{e} \quad E_C = \frac{m_e v_e^2}{2} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

$$U = E_P = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R} \therefore E_T = E_C + U = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 R} \quad (\text{ver aula tórica } Z=1)$$

A energia total do sistema electrão ($-e$) + núcleo ($+Ze$) é negativa porque se trata de um estado ligado – para separar os componentes do sistema é necessário fornecer energia ao sistema.

2º postulado de Bohr: quantização do momento angular

$$L \equiv R m_e v_e = n\hbar; \text{ obtém-se } R_n = \frac{1}{m_e v_e} n\hbar = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Z m_e e^2} n^2 = R_0 \frac{n^2}{Z} \quad (\text{ver aula tórica } Z=1)$$

Pode escrever a energia da órbita com número quântico principal n , como:

$$E_n = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 R_n} = -\frac{Z^2 m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -E_0 \frac{Z^2}{n^2} \quad (\text{ver aula tórica } Z=1)$$

O parâmetro n designa-se **número quântico principal**. Para o caso do átomo de hidrogénio $R_0=52,9$ pm. Este valor corresponde ao raio de Bohr para o átomo de hidrogénio.

Proposta de Bohr para o modelo do átomo

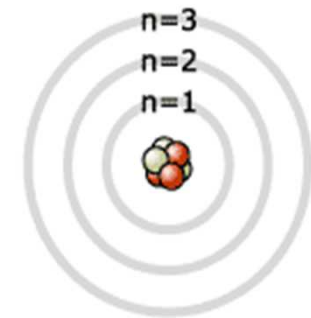
3º postulado: nas órbitas estacionárias o sistema não perde energia (não emite radiação)

4º postulado: o sistema pode alterar a sua energia emitindo ou absorvendo um *quantum* de energia:

(ver aula tórica para $Z=1$)

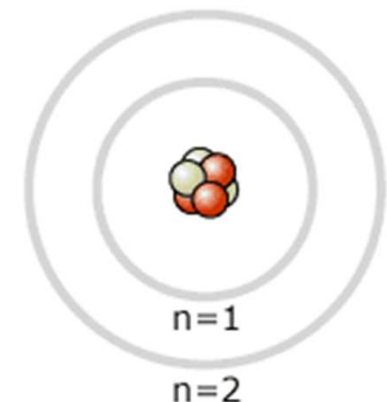
$$\Delta E_{fi} = E_{n_f} - E_{n_i} = -E_0 \frac{Z^2}{n_f^2} + E_0 \frac{Z^2}{n_i^2} = Z^2 E_0 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) = h\nu$$

$$\rightarrow \nu_{fi} = \frac{Z^2 E_0}{h} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\lambda_{fi}} = \frac{Z^2 E_0}{hc} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$



Convenção: a emissão de energia pelo sistema quando altera a sua configuração corresponde a valores positivos de ΔE , de ν e de λ ; a absorção a valores negativos.

Estes postulados são apresentados de forma *ad hoc*, isto é, adrede – “calham bem” – para a explicação dos fenómenos; não resultam dos princípios de uma teoria.



Modelo de Bohr para átomos hidrogenóides

Na Figura faz-se a comparação entre os níveis de energia do hidrogénio atómico e os do ião He^+ ($Z=2$, onde Z representa o nº atómico do elemento). Como se pode ver, a estrutura de níveis é a mesma.

$$E_0(\text{J}) = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = \frac{k_e^2 e^4 m_e}{2\hbar^2} \quad \text{ou} \quad E_0(\text{eV}) = \frac{m_e e^3}{8\epsilon_0^2 h^2} = \frac{k_e^2 e^3 m_e}{2\hbar^2}$$

Fórmula de Balmer-Rydberg para o H ($Z=1$)

$$\frac{1}{\lambda} = R_{y,H} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\text{ou } hf = E_{0,H} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

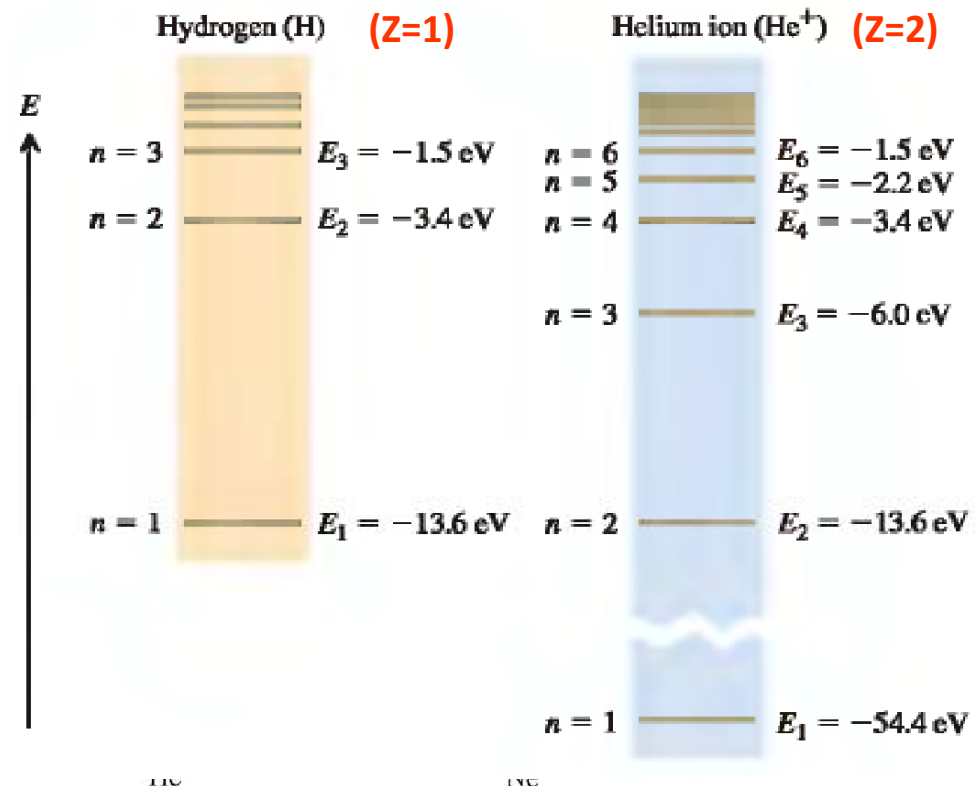
$$\text{com } E_{0,H} = -E_0 = -13.6 \text{ eV}$$

Fórmula de Balmer-Rydberg para o He^+ ($Z=2$)

$$\frac{1}{\lambda} = R_{y,\text{He}^+} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\text{ou } hf = E_{0,\text{He}^+} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

$$\text{com } E_{0,\text{He}^+} = E_{0,H} Z^2 = -13.6 \times 4 = -54.4 \text{ eV}$$



Proposta de de Broglie: natureza ondulatória da matéria

O *dilema* onda – corpúsculos estendeu-se à matéria quando, em 1924, de Broglie propôs a hipótese segundo a qual o dualismo onda e corpúsculo que se observa na luz poderá também ocorrer na matéria.

Assim, a uma partícula material corresponderá uma *onda de matéria*, como a um quantum de luz corresponde uma onda luminosa, sendo a conexão entre os dois aspectos «opostos» dada pela relação $E=hf$.

Como, sob o ponto de vista da teoria da relatividade, energia e momento linear são entidades da mesma espécie (o momento linear é a parte espacial de um *quadrivector relativístico*, cuja componente temporal é a energia), parece óbvia a sugestão de de Broglie de escrever, por coerência,

$$p=mv=h\kappa=h/\lambda,$$

onde $\kappa=1/\lambda$ representa o número de ondas por unidade de comprimento (assim como $f=1/T$ corresponde ao número de vibrações por unidade de tempo). Ter presente que aqui, E e p referem-se a uma massa pontual; f e κ , pelo contrário, reportam-se a uma onda infinitamente extensa no espaço e no tempo.

A teoria ondulatória da matéria e o modelo de Bohr do átomo

Guitarra, ondas *electrónicas* e os raios de Bohr no átomo de hidrogénio

Perguntar porque é que só existem determinados estado possíveis num átomo, é semelhante a perguntar como é que uma guitarra sabe que altura de som (frequência) deve produzir quando as suas cordas são percutidas.

Electron wave resonance

$$n=1$$

$$\lambda_1 = 2\pi r_1$$

$$n=2$$

$$2\lambda_2 = 2\pi r_2$$

$$n=3$$

$$3\lambda_3 = 2\pi r_3$$

String resonance modes

$$n=1$$

$$\lambda = 2L$$

$$n=2$$

$$\lambda = L$$

$$n=3$$

$$\lambda = \frac{2L}{3}$$

Electron wave resonance

$$n=1$$

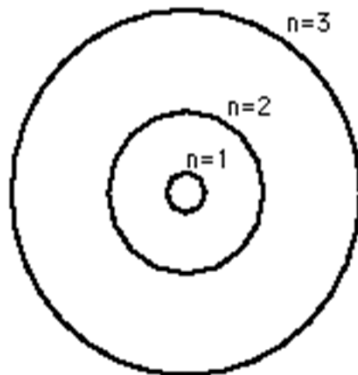
$$\lambda_1 = 2\pi r_1$$

$$n=2$$

$$2\lambda_2 = 2\pi r_2$$

$$n=3$$

$$3\lambda_3 = 2\pi r_3$$



$$r_n = n^2 r_1 = n^2 a_0$$

For a hydrogen atom:

Electron wave resonance

$$n=1$$

$$\lambda_1 = 2\pi r_1 = 6.28 a_0$$

$$n=2$$

$$2\lambda_2 = 2\pi r_2$$

$$\lambda_2 = 12.57 a_0$$

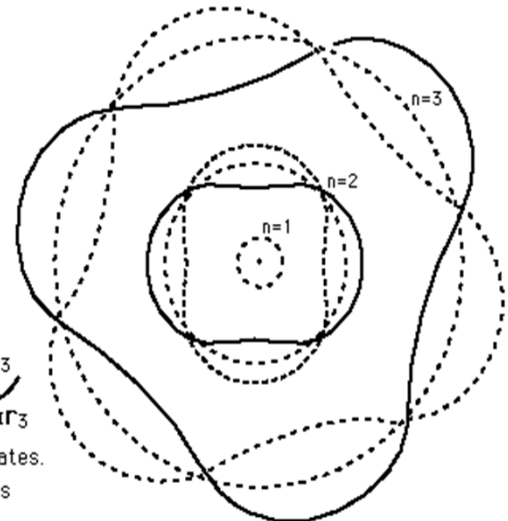
$$n=3$$

$$3\lambda_3 = 2\pi r_3$$

$$\lambda_3 = 18.85 a_0$$

Wavelengths for hydrogen states.

$a_0 = 0.529 \text{ \AA} = \text{Bohr radius}$



Niels Bohr



“Niels Bohr deve ser um cérebro de primeira linha, extremamente crítico e visionário, que nunca perde o rasto do objectivo essencial.” Einstein, 1919 (bilhete-postal a Planck)

“É verdadeiramente um homem de génio. ... Tenho uma confiança total na sua maneira de pensar.” Einstein, 1922

Que esta insegura e contraditória fundamentação [a da Física entre os anos de 1910 e 1920] tivesse sido suficiente para permitir que um homem como Bohr, de instinto e tacto únicos, descobrisse as leis supremas das riscas espectrais e das camadas electrónicas dos átomos conjuntamente com os seus significados para a química, pareceu-me um milagre; e ainda hoje me parece um milagre. É a forma mais elevada de musicalidade na esfera do pensamento.” Einstein (P. A. Schilpp), 1949

[A. Pais]



Debates Bohr–Einstein a propósito da Mecânica Quântica

Einstein liked inventing phrases such as "God does not play dice," "The Lord is subtle but not malicious."

On one occasion Bohr answered, "Einstein, stop telling God what to do."

<http://www.aip.org/history/einstein/ae63.htm>

Natureza Ondulatória da Matéria

Ondas de de Broglie

De acordo com a hipótese de de Broglie, a uma partícula pontual, com momento p na direcção do eixo dos xx e energia E , deve associar-se uma onda infinitamente extensa da forma: $u(x,t)=A\cos(\omega t-kx)$,

Onde E e p estão relacionados com f e λ por meio das relações $E=\hbar\omega=hf$ e $p=\hbar k=h/\lambda$, onde $\omega=2\pi f$, $k=2\pi/\lambda$, e $\hbar=h/2\pi$ ($\hbar$ designa-se h traçado ou constante de Planck reduzida).

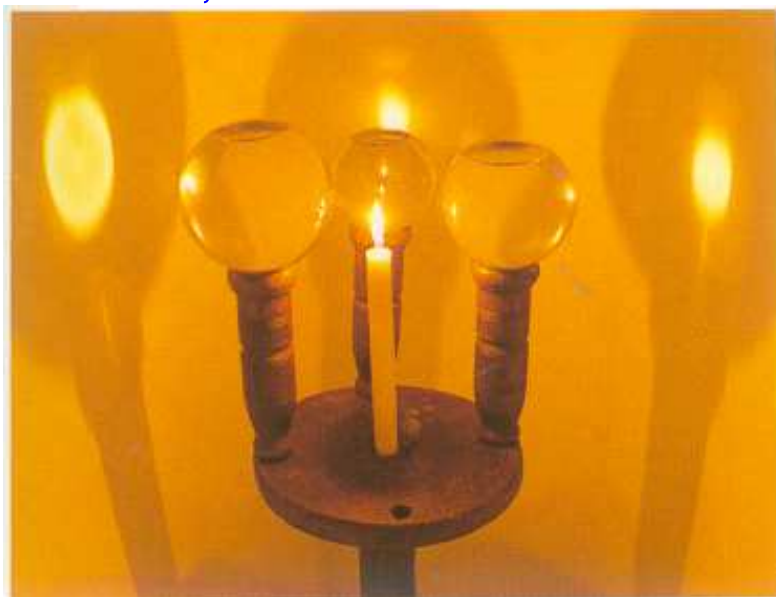
Esta onda propaga-se no espaço velocidade de fase $V_f=\omega/k$. (a velocidade de fase de uma onda não se pode determinar experimentalmente - é uma concepção artificial).

Fisicamente apenas faz sentido falar na velocidade de grupo V_g da onda, dada por $V_g=(d\omega/dk)_{\phi=\text{const}}$, que corresponde à velocidade com que se pode transmitir energia (informação): V_g é sempre inferior à velocidade da luz no vácuo para partículas com massa de repouso não nula; para os fótons V_g pode ser igual a c .

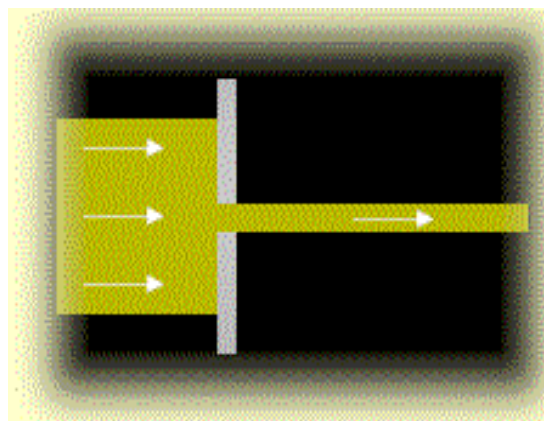
Revisão: dualidade onda-partícula da luz

Teoria corpuscular da luz (feixe de partículas)

Newton, ~1660

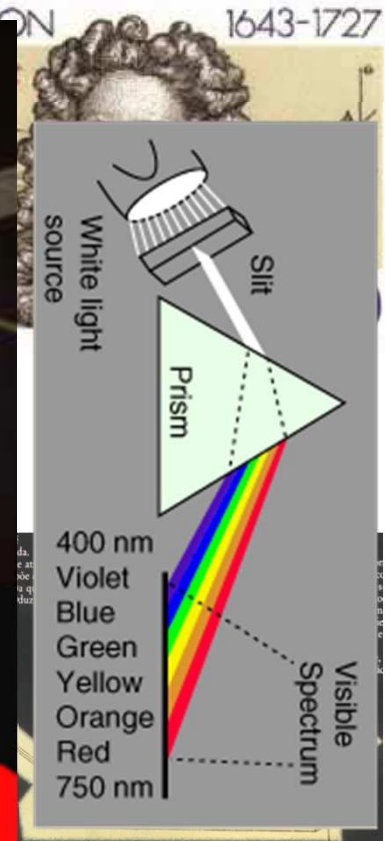
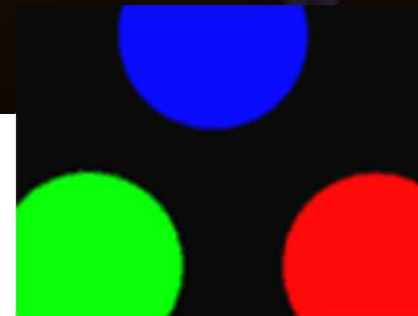


Partículas de diferentes cores



Luz branca – feixe de partículas de *cores diferentes*

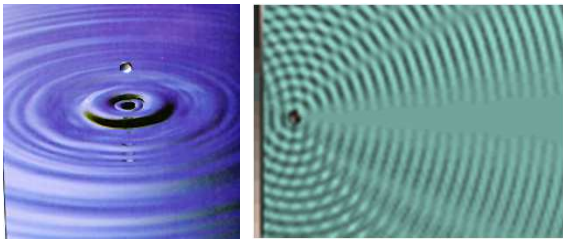
(Isaac Newton, ~1670)



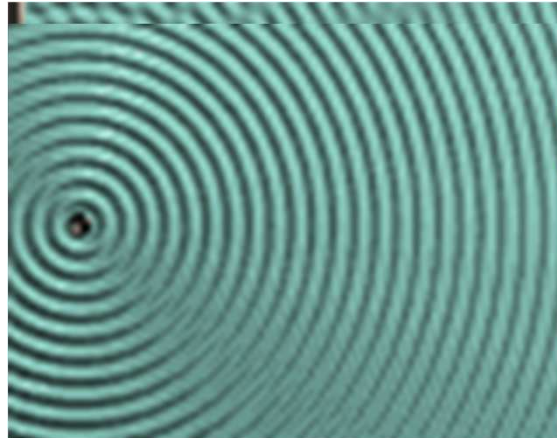
Teoria ondulatória da luz (Christiaan Huygens, ~1670)

Ondas na água

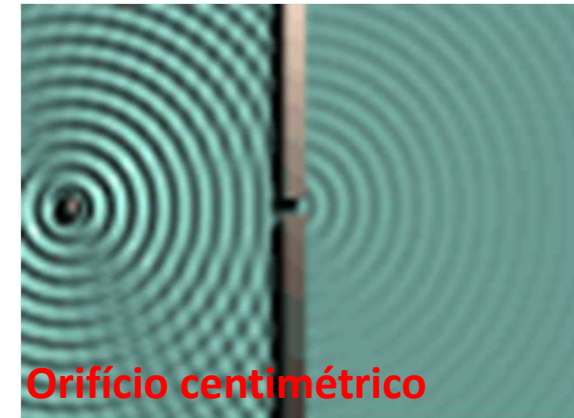
Comprimento de onda: de alguns centímetros a vários metros



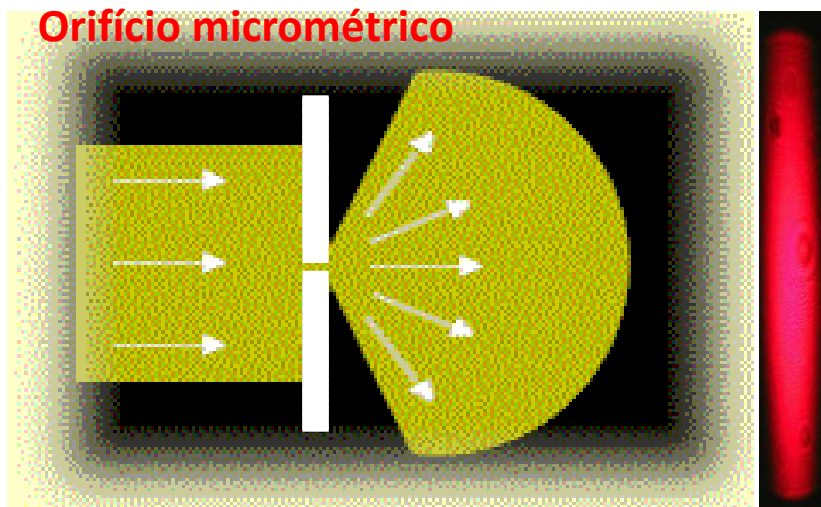
Ondas na água



Difracção (água)

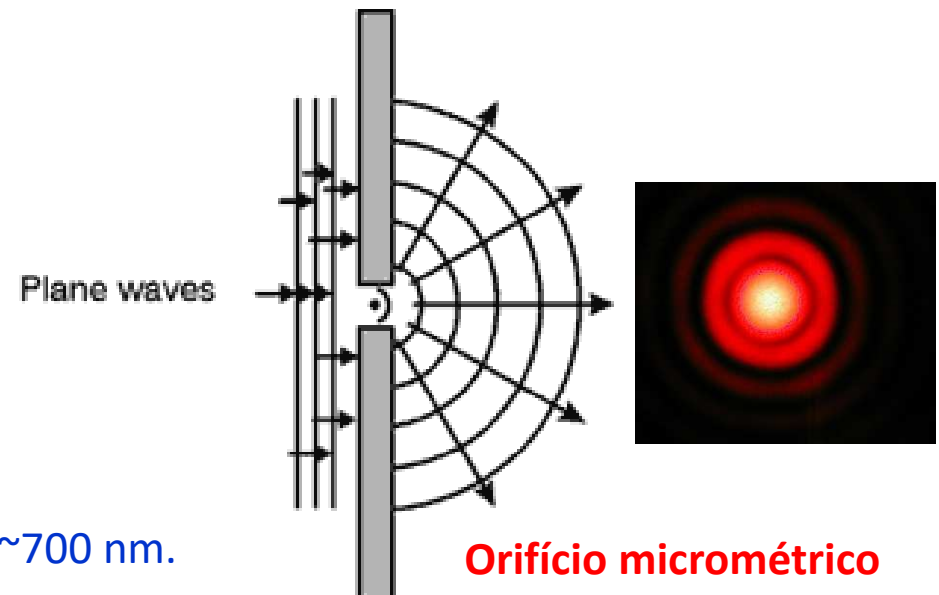


Difracção da luz numa fenda



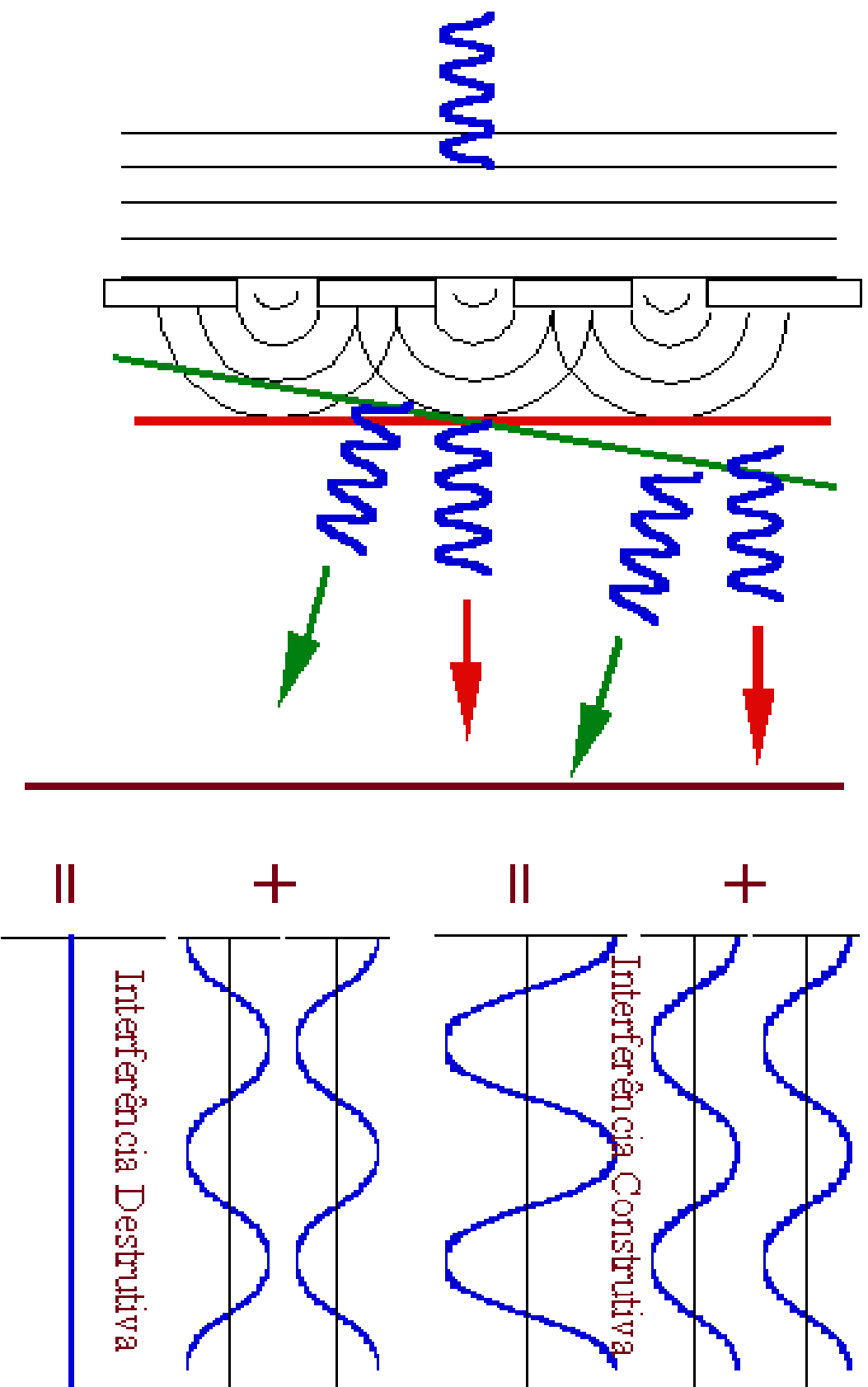
Comprimento de onda da luz visível: de ~400 nm a ~700 nm.

Difracção da luz num orifício circular



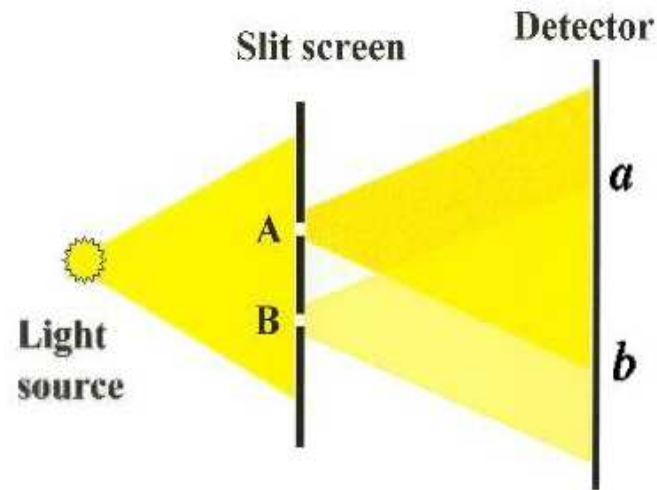
Ver: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Difracção%20da%20Luz%20-%20201%20fenda.wmv>

Revisão: Interferência construtiva e destrutiva

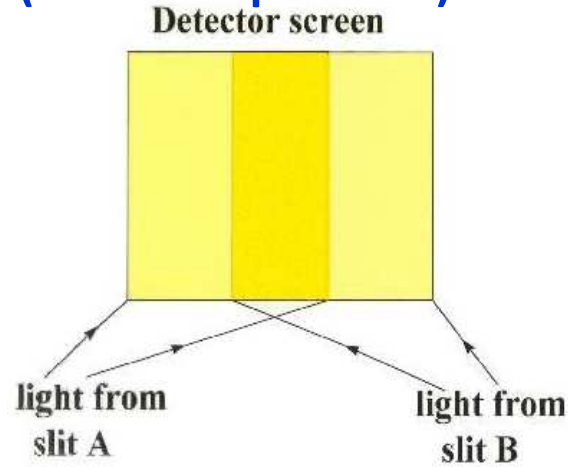


Experiência da dupla fenda e interferência

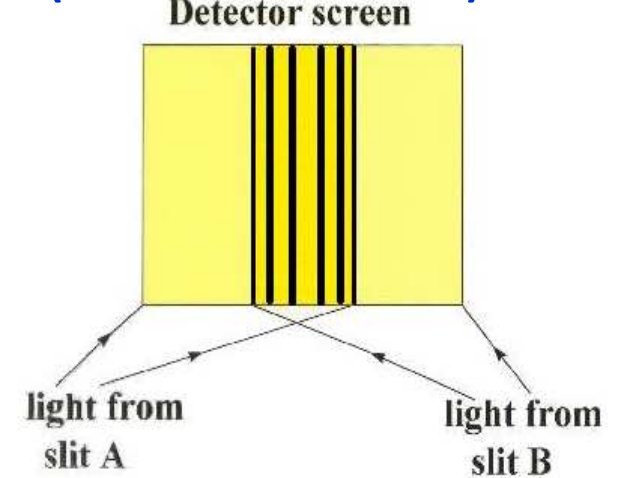
(Young, ~1800)



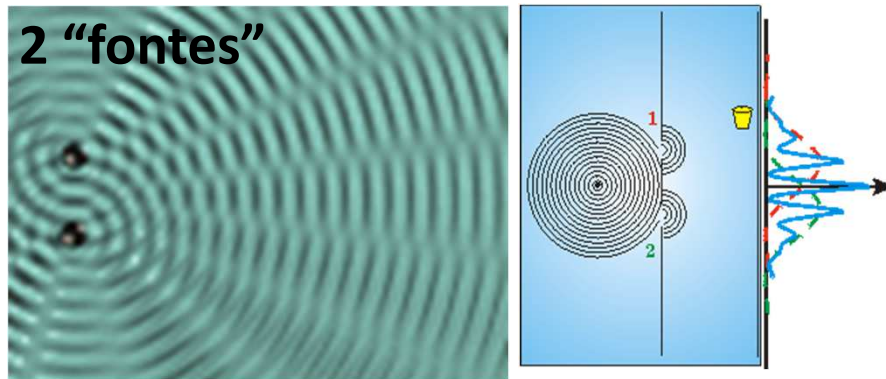
(Teoria corpuscular).



(Teoria ondulatória)



Interferência (água)



Interferência da luz

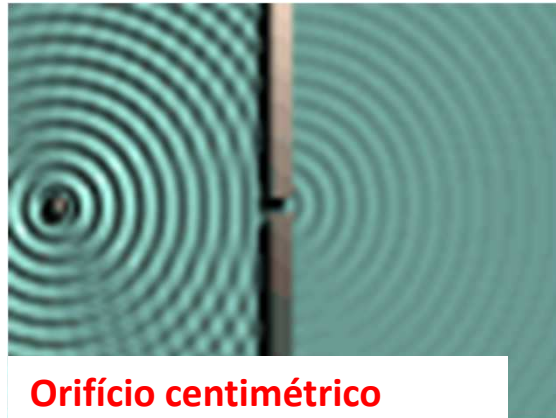


Ver interferência: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/DoubleSlit.swf>

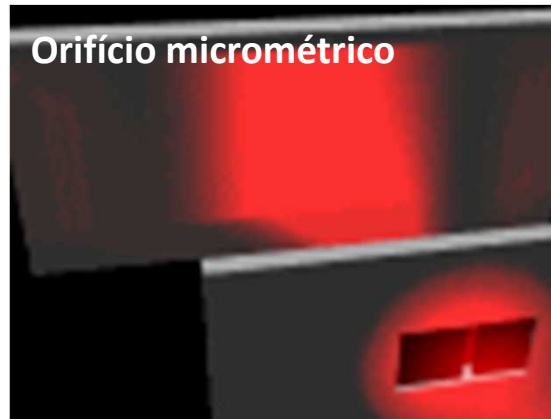
A reflexão e a refração da luz podem ser explicadas quer pela teoria ondulatória quer pela teoria corpuscular, mas os fenómenos de interferência, difracção e polarização não são explicados pela teoria corpuscular. Por outro lado, o efeito fotoeléctrico não tem explicação ondulatória.

De facto, quando se propaga a luz comporta-se como uma onda electromagnética ...

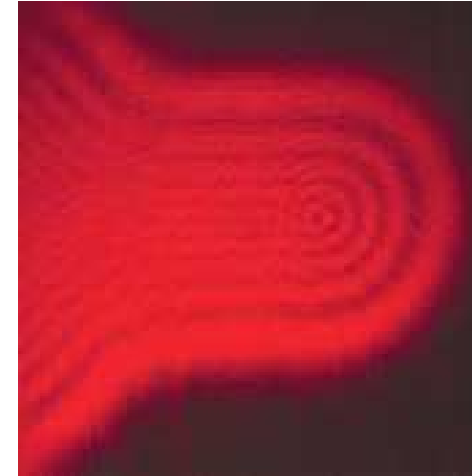
Difracção (água)



Difracção da luz



Difracção



Ver : <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Difracção%20da%20Luz%20-%201%20fenda.wmv>

Interferência (água)



Interferência da luz



Padrão de cores devido à interferência

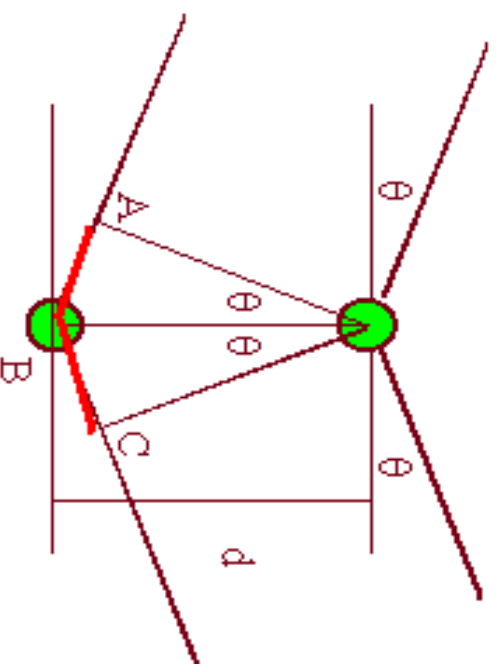
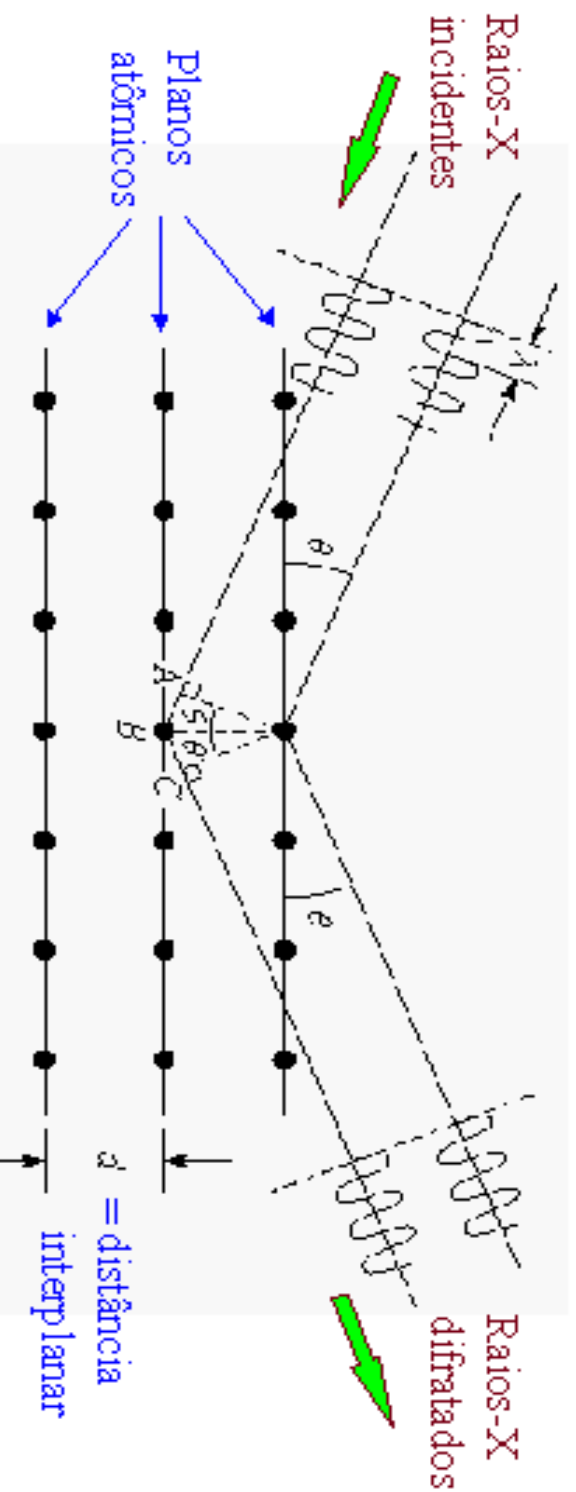


Ver interferência: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/DoubleSlit.swf>

Difracção dos raios x em cristais

61

A lei de Bragg



Diferença de caminho dos dois raios:

$$AB + BC = 2d \sin \theta$$

Condição para interferência construtiva

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

onde n é um número inteiro e

λ é o comprimento de onda do raio-x

A lei de Bragg (cont.)

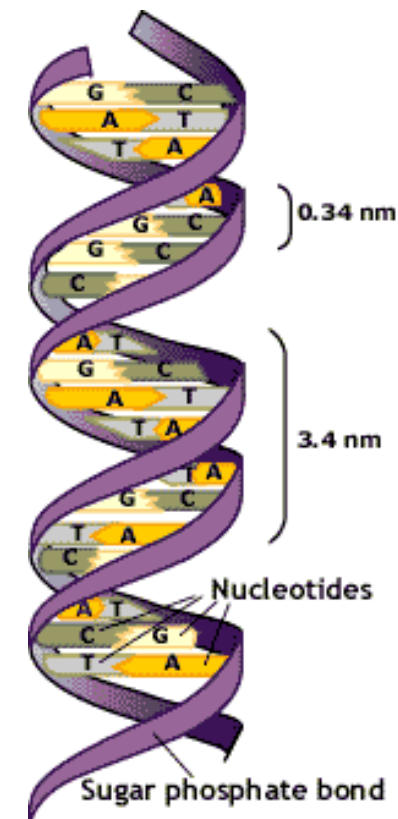
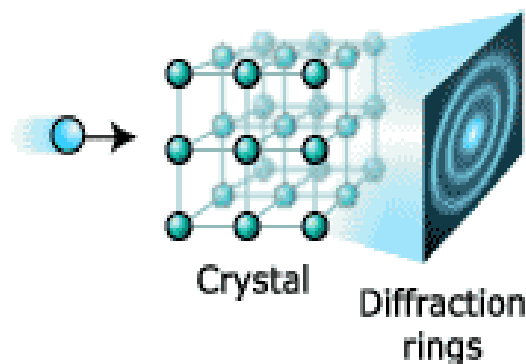
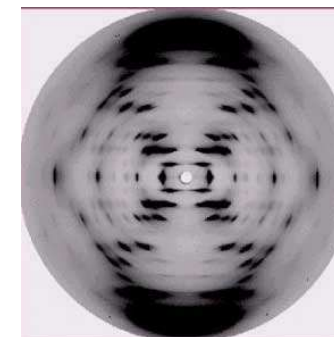
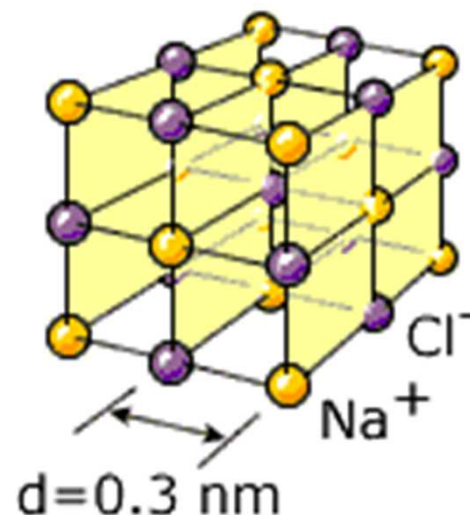
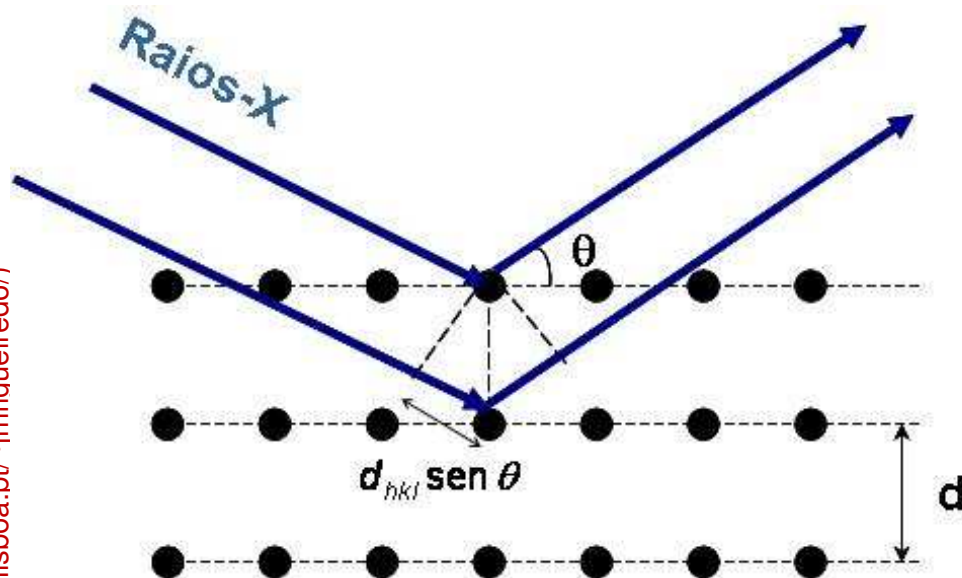
- A lei de Bragg relaciona quatro variáveis:

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

- ↪ λ - o comprimento de onda dos raios-X
 - pode assumir apenas um valor (monocromático)
 - pode assumir muitos valores - raios-X “brancos” (policromáticos)
- ↪ d - o espaçamento entre os planos
 - pode assumir diferentes valores, em função do conjunto de planos que difrata o feixe de raios-X
- ↪ θ - o ângulo de incidência dos raios-X
 - pode variar continuamente dentro de uma faixa
 - pode variar aleatoriamente em função da posição relativa dos diversos mono-cristais que formam uma amostra poli-cristalina
- ↪ n - a ordem da difração

Difracção dos Raios X

Ver http://w3.ualg.pt/~jlongras/sim01_raiox.swf

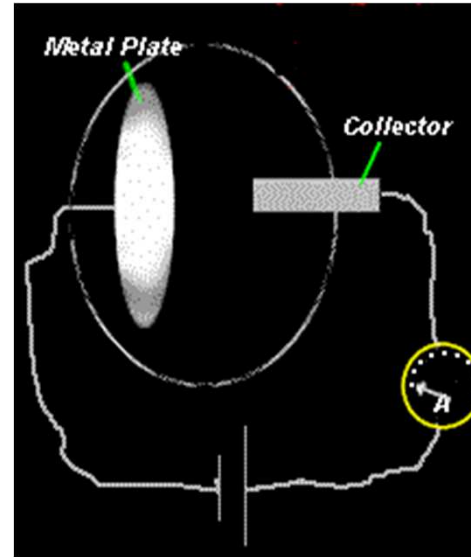
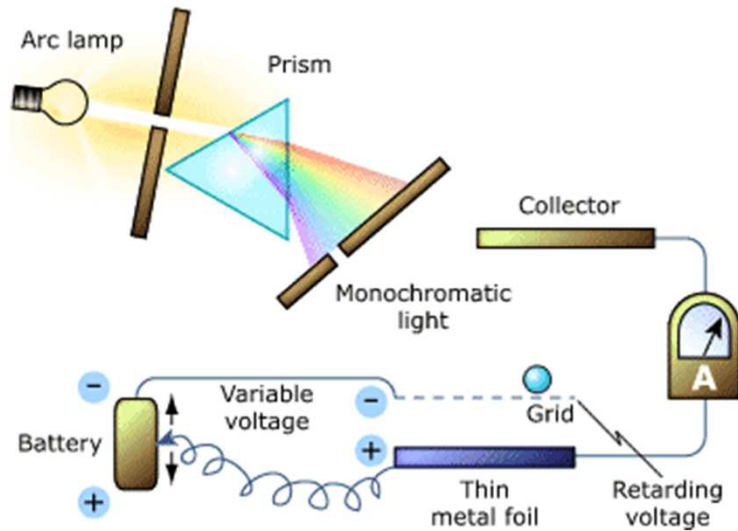


Ver http://w3.ualg.pt/~jlongras/cristal_proteina.swf

Relação de Bragg para a difracção dos raios x: $2d\sin\theta = m\lambda$, onde θ representa o ângulo entre o feixe espalhado e a perpendicular aos planos de atómicos.

Mas quando interage com a matéria, a luz comporta-se como sendo um feixe de partícula ... os fótons

Efeito fotoelétrico: os fótons “arrancam” electrões de alguns materiais



Quando a luz incide na placa metálica, alguns electrões dos átomos da superfície são arrancados, sendo atraídos para o colector que está a um potencial positivo relativamente à placa metálica, criando-se uma corrente eléctrica no circuito (ver ponteiro do amperímetro).

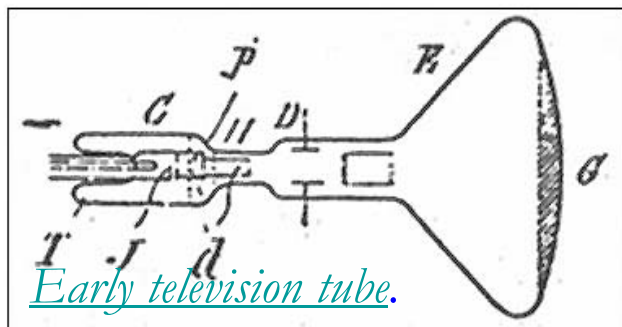
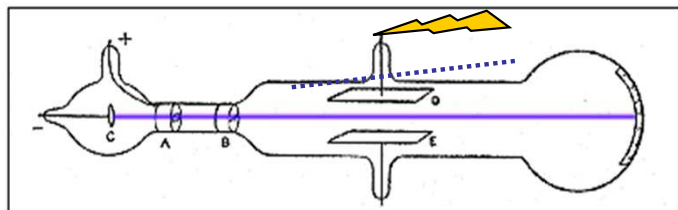
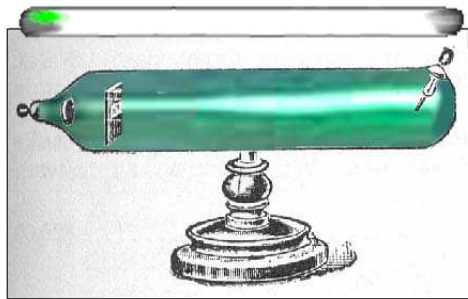
Este efeito é usado nas lojas e elevadores



O **fóton** é o «quantum» de radiação electromagnética (luz) cuja energia é igual ao produto da frequência da radiação pela constante de Planck $h\nu$, onde ν é a frequência da radiação e h é a constante de Planck, uma constante universal (do gr. phōs, photós, «luz» + -ão).

Dualidade onda-partícula da matéria

Revisão: Descoberta do electrão



Raios precedentes do cátodo que provocam o aparecimento de uma fluorescência no vidro da parede oposta do tubo.

Em certas circunstâncias estes raios são visíveis directamente sob a forma de um traço azulado que atravessa o todo a partir do cátodo. Estes raios chamam-se raios catódicos.

Estes raios podem ser deflectidos da sua trajectória rectilínea por campos externos, eléctricos ou magnéticos, de tal modo que permitem deduzir que os raios são formados por partículas carregadas negativamente que se movem rapidamente (Jean Perrin, 1895): estas partículas foram designadas **electrões**.

A velocidade e a carga específica (a razão entre a carga e a massa, e/m) destas partículas podem ser determinada, obtendo-se $e/m_0 \approx 1,76 \times 10^{11}$ C/kg (J. J. Thomson, 1897).

Experiência da gota de óleo de Millikan

Determinação da carga do electrão - Quantização da carga eléctrica, 1909

Esta experiência permite determinar o valor da carga eléctrica elementar e . Se conhecermos e , podemos determinar o número de Avogadro N_A .

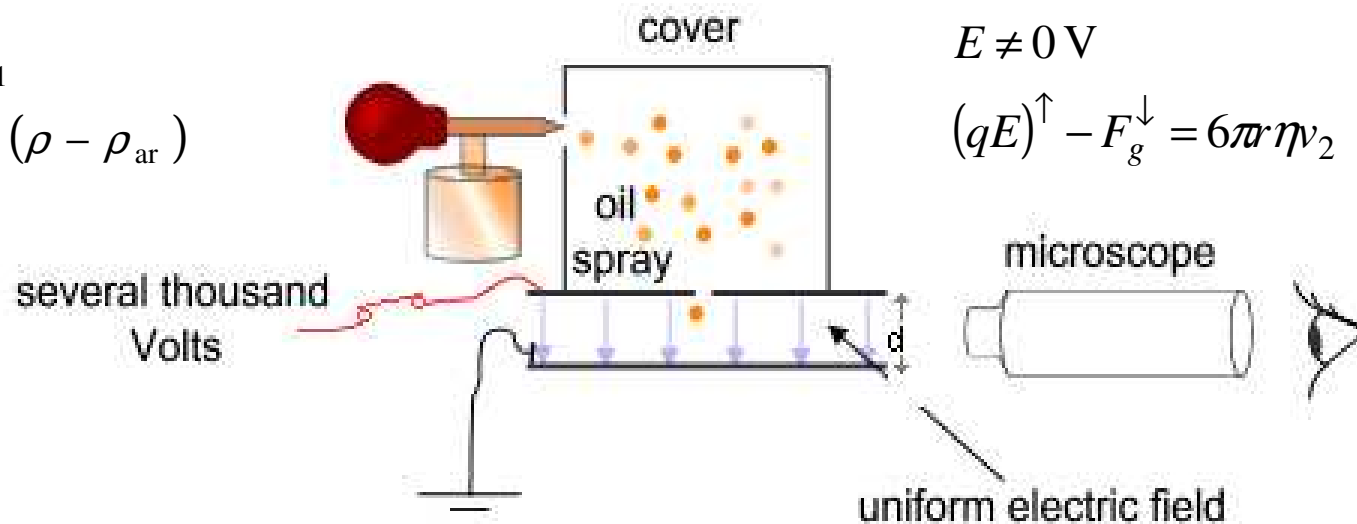
Já se sabia, desde a descoberta de Faraday da unidade electrolítica – o faraday – que $eN_A = F = 96520$ C. Millikan considerou que se a electricidade for realmente constituída por quanta elementares, a carga total de um corpo deve ser um múltiplo inteiro da carga e .

Para se poder verificar facilmente isto é necessário usar corpos com carga total correspondente a poucos quanta.

$$E = 0 \text{ V}$$

$$F^{\uparrow} = 6\pi r \eta v_1$$

$$F_g^{\downarrow} = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho - \rho_{\text{ar}})$$



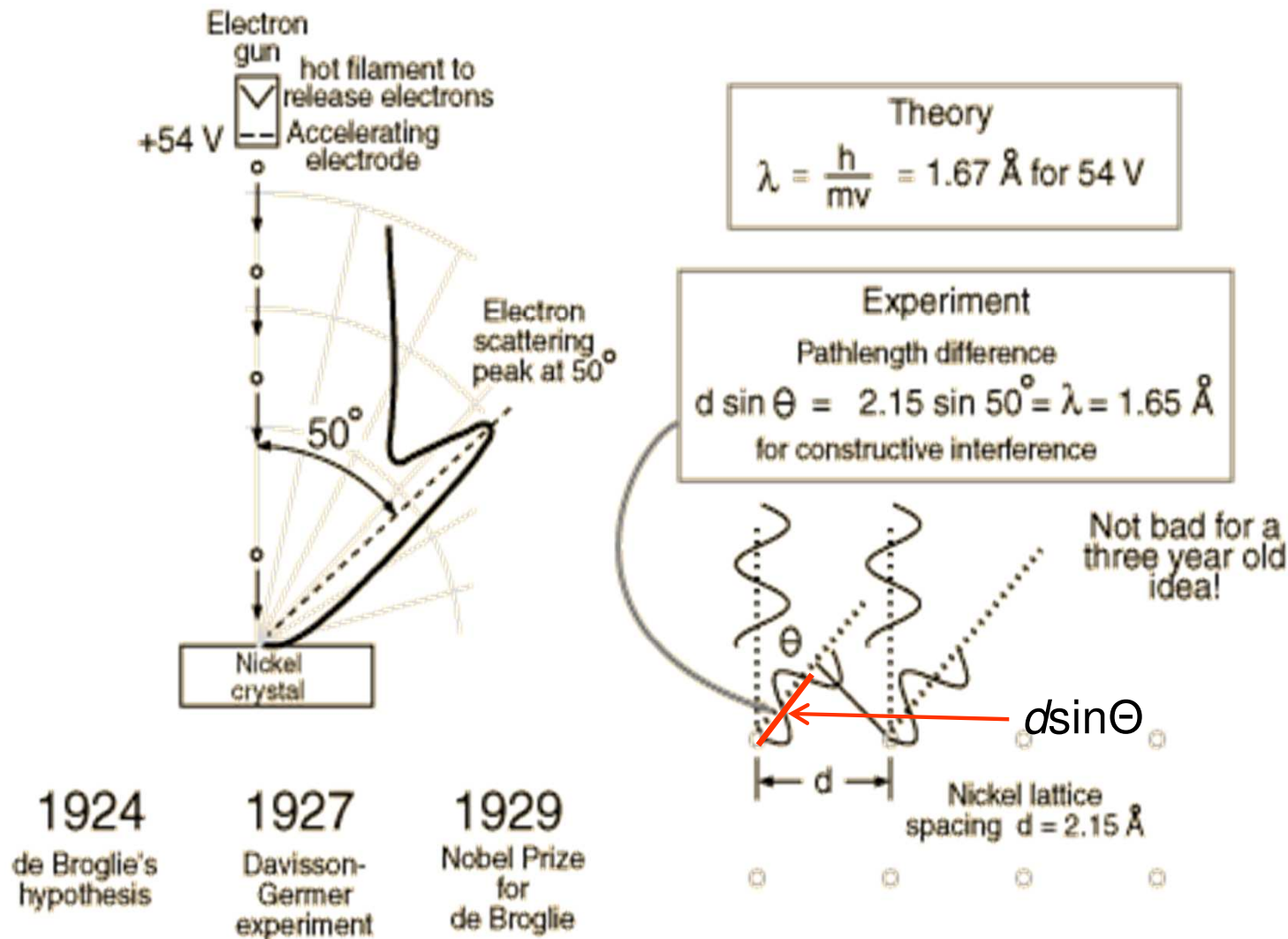
$$E \neq 0 \text{ V}$$

$$(qE)^{\uparrow} - F_g^{\downarrow} = 6\pi r \eta v_2$$

Millikan verificou que a carga eléctrica das gotas era sempre um múltiplo inteiro de uma unidade fundamental $e = 1,601 \times 10^{-19}$ C.

Ver On the elementary electrical charge and the Avogadro constant, R. A. Millikan, The Physical Review, Vol. II (2), pp. 109-143.

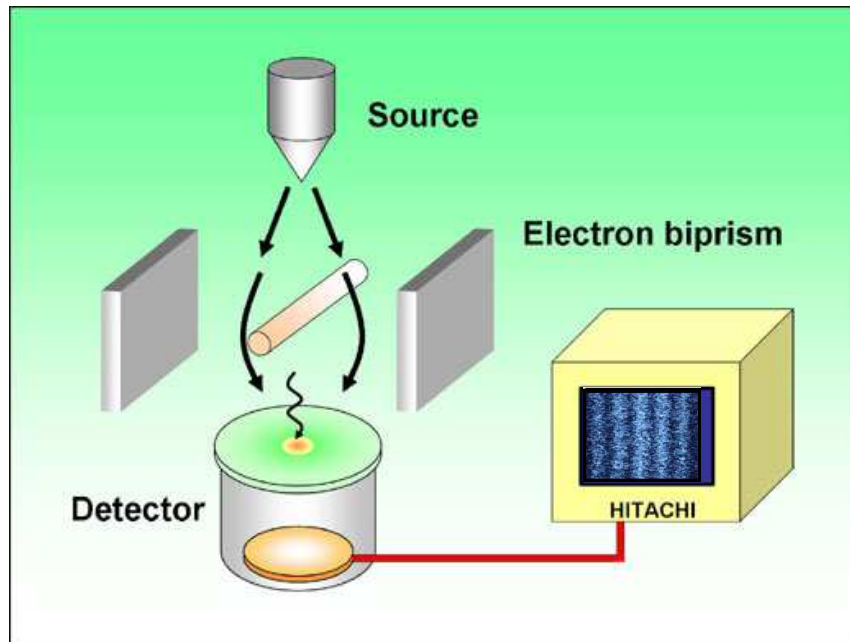
Experiência de Davisson-Germer



Relação de Bragg para a difracção de electrões: $d \sin \theta = m \lambda$, onde θ representa o ângulo entre o feixe espalhado e a perpendicular aos planos de atómicos.

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1937/davisson-lecture.pdf
2011-2012

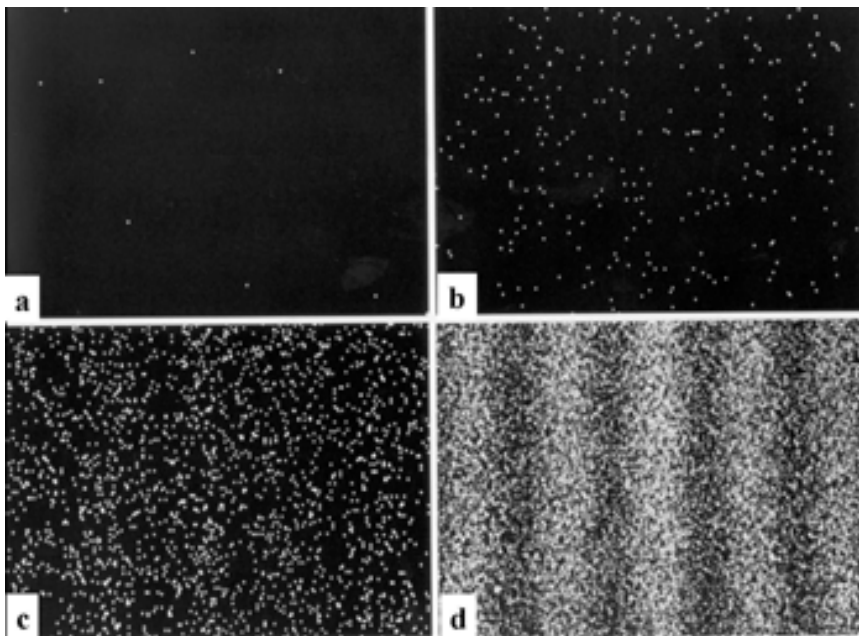
Esperimento di interferenza con elettroni (Akira Tonomura, 1973)



Filmato (richiede QuickTime) 2

<http://www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm>

- Gli elettroni emessi da una sorgente sono inviati a un “bi-prisma”. Gli elettroni possono passare ai due lati del filamento centrale che li focalizza sul piano del rivelatore in basso.
- Anche quando arrivano solo 10 electroni/sec, l’accumulazione di singoli electroni forma una figura di interferenza.



Elettroni accumulati sullo schermo:

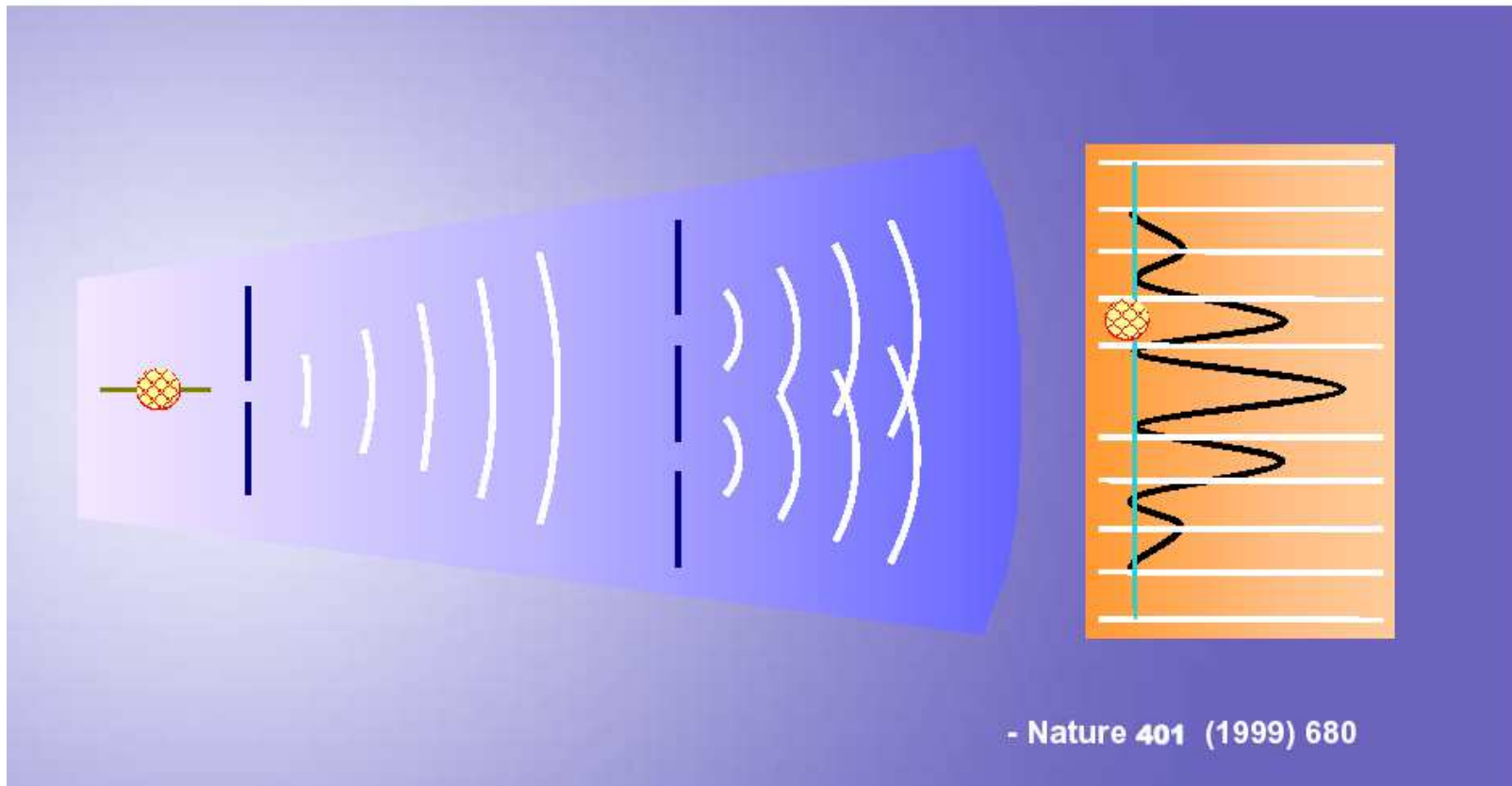
- (a) 8 electrons,
- (b) 270 electrons,
- (c) 2000 electrons,
- (d) 6000.

Il tempo di esposizione dall’inizio alla fase (d) è di 20 minuti.

Dualidade onda partícula observada com a molécula de futebuleno (C_{60})

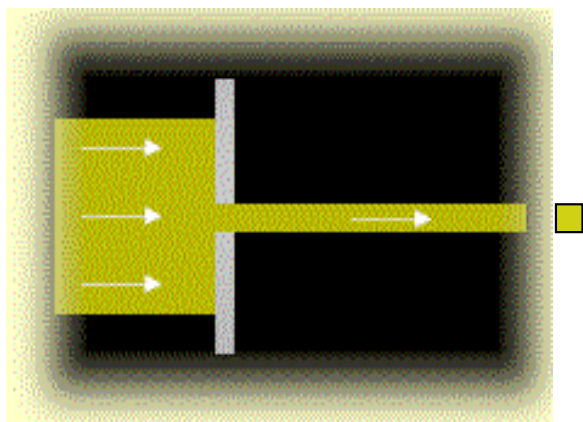
Wave-particle Duality of C_{60} Molecules

Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Vos-Andreae,
Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw & Anton Zeilinger

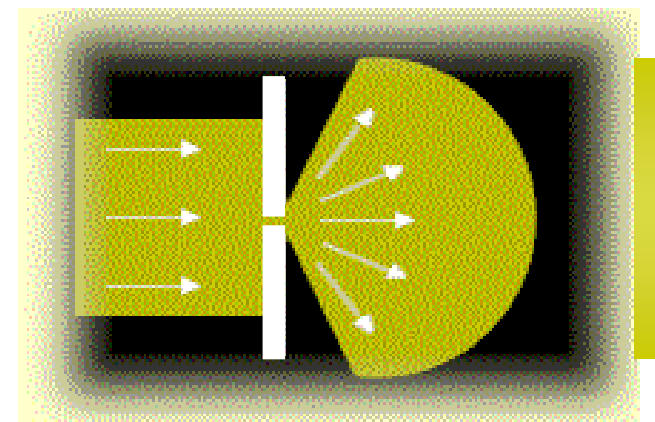


Conclusão: o electrão, ..., os átomos, ..., também se comportam como ondas

Se o orifício não for muito estreito, temos um feixe bem definido

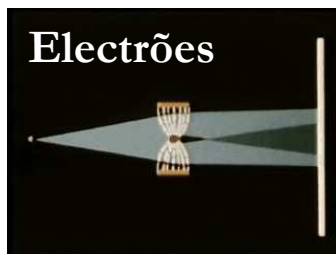
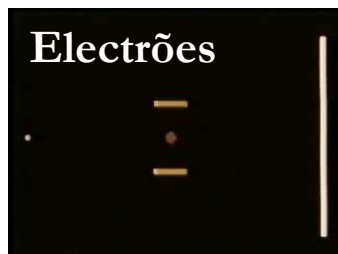
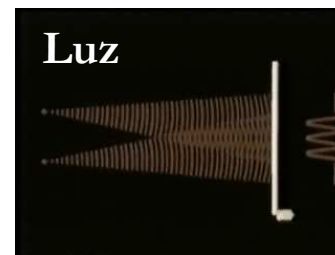
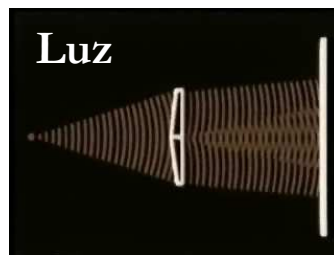
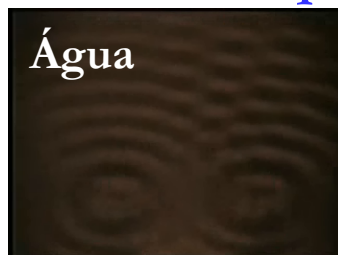


Se o orifício for muito estreito observa-se o padrão de difracção



Orifício nanométrico

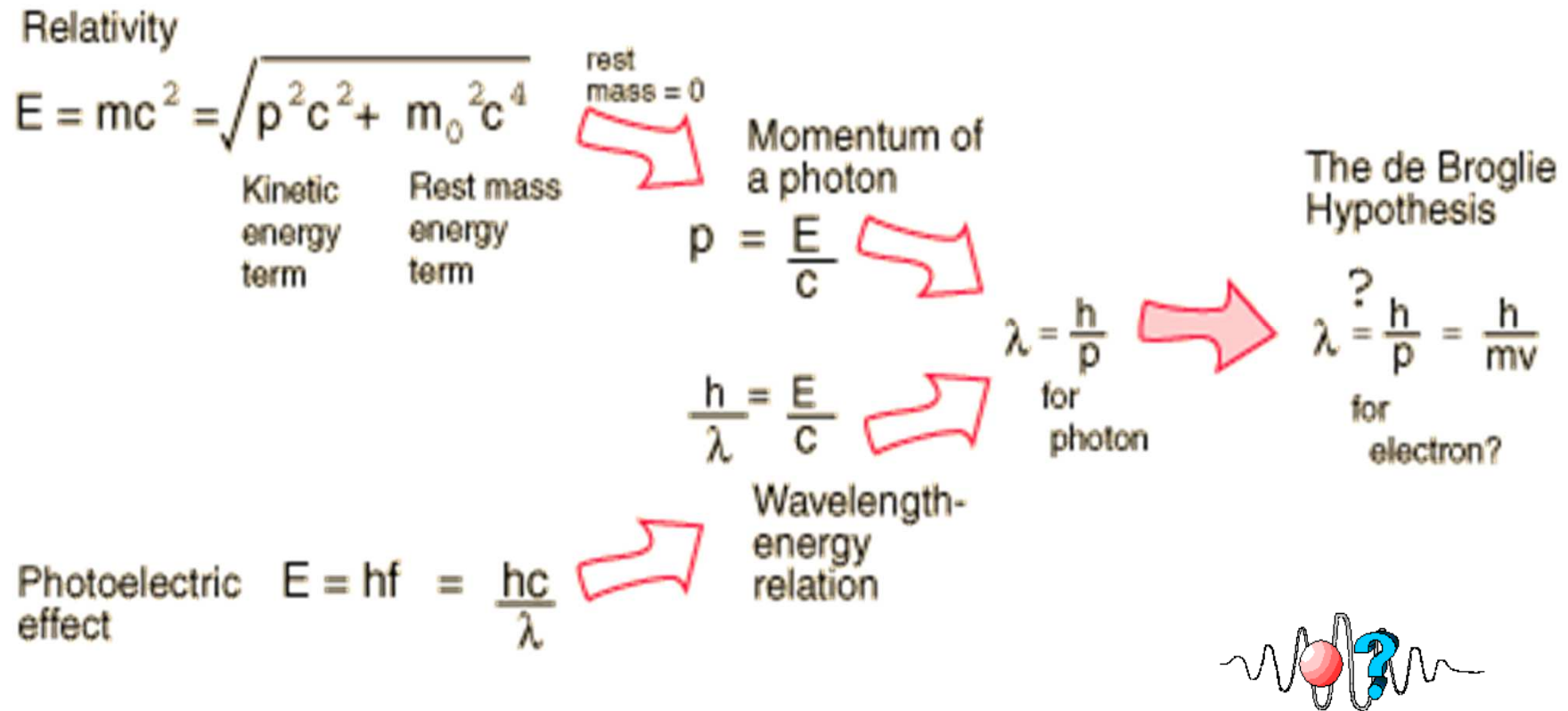
Interferência quântica de electrões isolados



Ver: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Electron%20Double%20Slite%20Experiments.wmv>

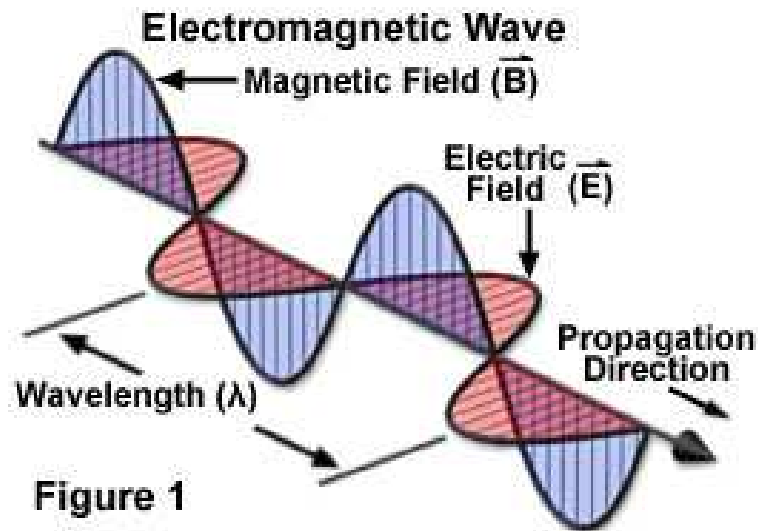
2011-2012

Mas de que onda se trata?

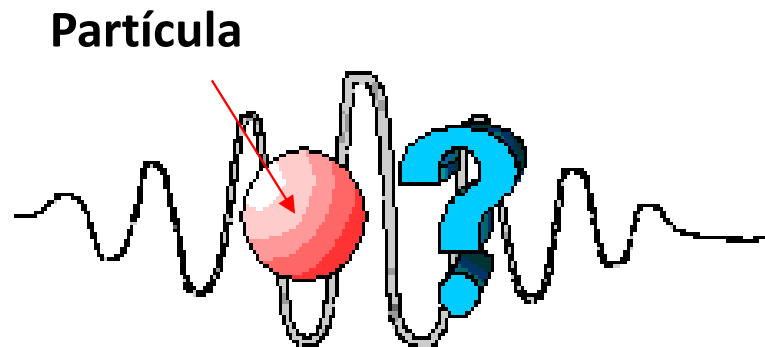


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Electron%20Double%20Slite%20Experiments.wmv>

O campo electromagnético e a função de onda



A grandeza física envolvida nos processos de difracção e de interferência é, no caso dos raios - x, o campo electromagnético, ao passo que, no caso de feixes corpusculares, é **a função de onda associada às partículas** que os constituem. No entanto, a intensidade medida pelos detectores é proporcional ao quadrado do módulo do campo electromagnético (no caso dos raios x), ou da função de onda (no caso dos feixes de electrões ou de neutrões).



Trem de ondas associado

Trem de ondas (do inglês, “wave train”) associado a feixe molecular ou electrónico

Princípio da complementaridade

Princípio da complementaridade

Origem: Wikipédia, a enciclopédia livre.

Ir para: [navegação](#), [pesquisa](#)

O **princípio da complementaridade** foi enunciado por [Niels Bohr](#) em 1928 e assevera que a natureza da matéria e energia é dual e os aspectos ondulatório e corpuscular não são contraditórios, mas complementares. Daí vem o nome do princípio. Isto significa que a natureza corpuscular e ondulatória são ambas detectáveis *separadamente* e surgem de acordo com o tipo de experiência. Assim, na [experiência da dupla fenda](#) a natureza evidenciada da luz é ondulatória, ao passo que na experiência do [efeito fotoelétrico](#), a natureza que ressalta é a corpuscular, como demonstrou [Einstein](#). Argumentos similares valem também para a matéria. Assim, o princípio da complementaridade atesta a ambiguidade e natureza dual da matéria e energia.

Princípio da complementaridade

Para Bohr, os aspectos corpuscular e ondulatório são complementares: se demonstrarmos o carácter corpuscular de uma experiência, não será possível verificar ao mesmo tempo o seu carácter ondulatório, e inversamente. O **princípio da complementaridade** foi enunciado por Niels Bohr em 1928 e assevera que a natureza da matéria e energia é dual e que os aspectos ondulatório e corpuscular não são contraditórios, mas complementares. Daí vem o nome do princípio.

Isto significa que a natureza corpuscular e ondulatória são ambas detectáveis *separadamente* e surgem de acordo com o tipo de experiência.

Por exemplo: Na experiência da dupla fenda a natureza evidenciada da luz é ondulatória, ao passo que na experiência do efeito fotoeléctrico, a característica que ressalta é a corpuscular, como demonstrou Einstein. Argumentos similares valem também para a matéria. Assim, o princípio da complementaridade atesta a ambiguidade e natureza dual da matéria e energia.

Ter presente que falar de uma **partícula** só tem significado se pudermos especificar experimentalmente **pelo menos dois pontos da sua trajectória** e, do mesmo modo, para uma onda, só quando forem observados **pelo menos dois máximos de interferência**.

A lei da causalidade, segundo a qual o curso dos eventos num sistema isolado é completamente determinado pelo estado do sistema num instante anterior, perde a sua validade, pelo menos no sentido da Física Clássica.

http://pt.wikipedia.org/wiki/Princ%C3%ADpio_da_complementaridade

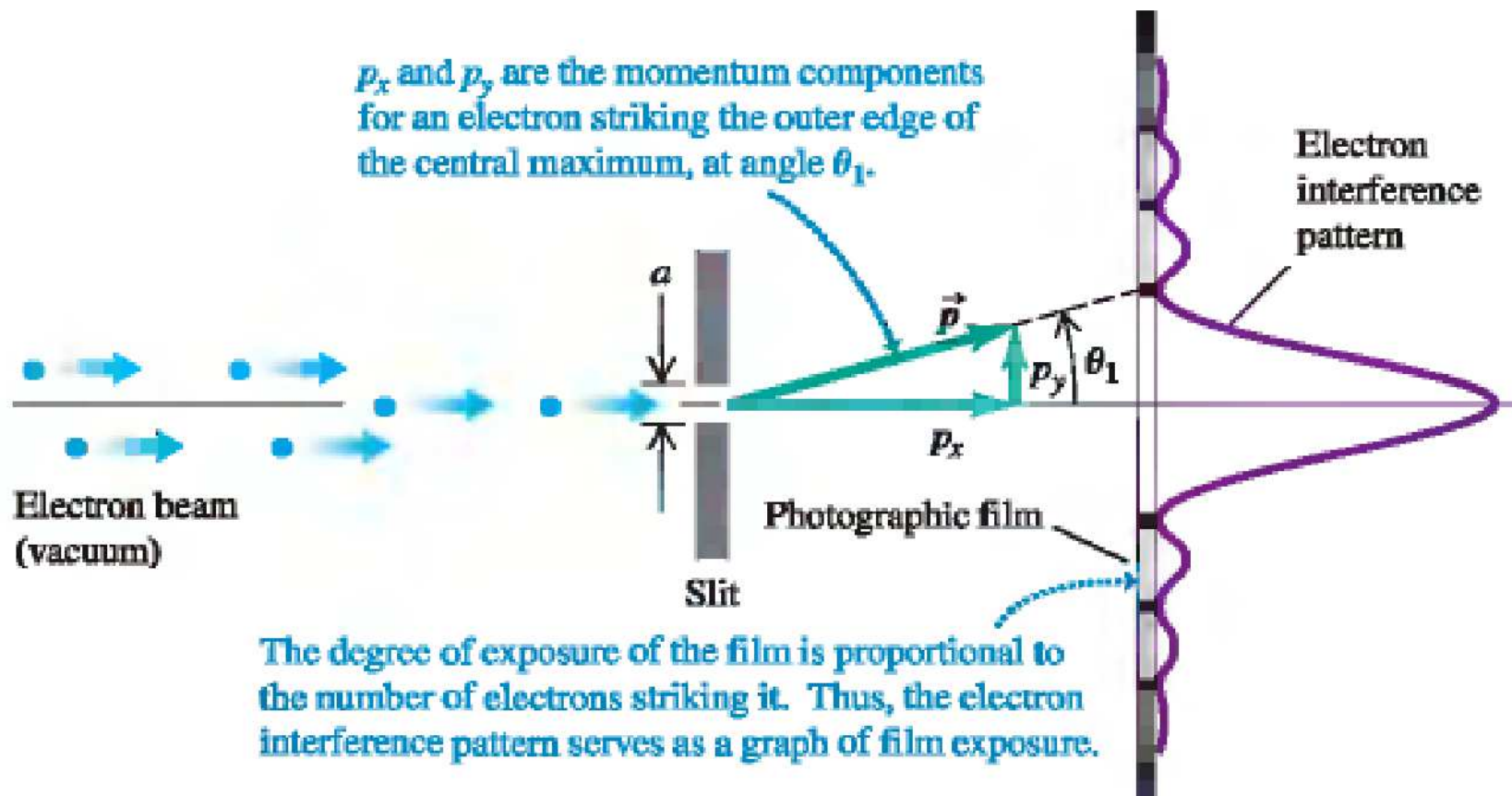
Princípio de incerteza de Heisenberg

Princípio da incerteza: (fís.) princípio segundo o qual não é possível conhecer simultaneamente a posição e a velocidade (ou quantidade de movimento) de uma partícula (princípio formulado por W. Heisenberg, físico alemão, 1901-1976). (De in- + certeza)

http://pt.wikipedia.org/wiki/Princ%C3%ADpio_da_incerteza_de_Heisenberg

http://pt.wikipedia.org/wiki/Werner_Karl_Heisenberg

Princípio de incerteza de Heisenberg



Usando a relação $\sin\theta = \lambda/a$, da teoria ondulatória, e a relação de de Broglie $p = h/\lambda$, resulta:

$$\Delta p_y \sim p_y \sim p \sin\theta = (h/\lambda)(\lambda/a) \sim h/\Delta y \quad \text{ou} \quad \Delta p_y \Delta y \sim h \quad (\text{mostra-se que } \Delta p_y \Delta y \geq \hbar/2).$$

Da expressão verifica-se que o produto das incertezas Δy e Δp_y é da ordem de grandeza da constante de Planck: **princípio de incerteza de Heisenberg**.

Princípio de incerteza de Heisenberg

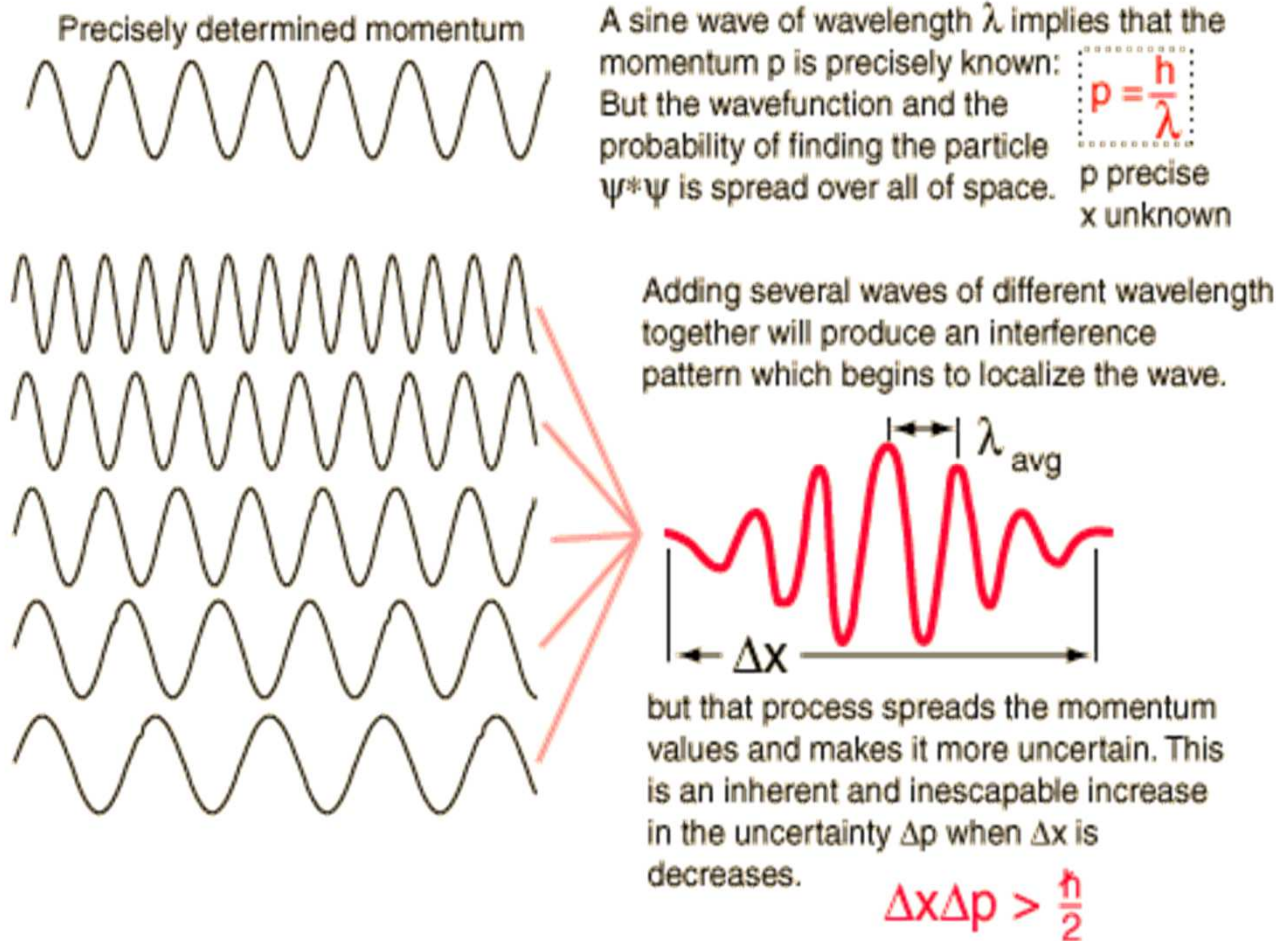
Na **Física Clássica** está implícita a ideia de que qualquer grandeza associada ao movimento de uma partícula pode ser medida e descrita de modo exacto. Por exemplo, pode-se medir simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula sem perturbar o seu movimento. De acordo com a teoria quântica, o acto de medir *perturba* a partícula, alterando o seu movimento.

Para compreender este facto, considere-se, como exemplo, a tarefa de **fotografar** o electrão no átomo de hidrogénio. Devido ao fenómeno de difracção dois pontos separados de uma distância D apenas podem ser resolvidos, ou seja, observados como distintos, se a observação for realizada usando radiação electromagnética de comprimento de onda λ menor ou da ordem da distância D entre os pontos.

Tendo em conta que o raio de Bohr para o electrão no átomo de hidrogénio é $\sim 0,05$ nm, para *fotografá-lo* é necessário, portanto, usar radiação electromagnética com comprimento de onda $\lambda \sim 0,05$ nm. Tomando $c \sim 300$ Mm/s e $h \sim 4,14 \times 10^{-15}$ eVs e levando em conta as expressões $v = c/\lambda$ e $E = hv$, segue-se que a radiação electromagnética em questão deve ter a energia $E \sim 2,5 \times 10^4$ eV.

Como a energia de *ligação* do electrão no átomo de hidrogénio é $\sim 13,6$ eV, *bombardear* esse electrão com radiação electromagnética de energia 10^4 eV, para *medir (determinar)* a sua posição, altera completamente a sua velocidade.

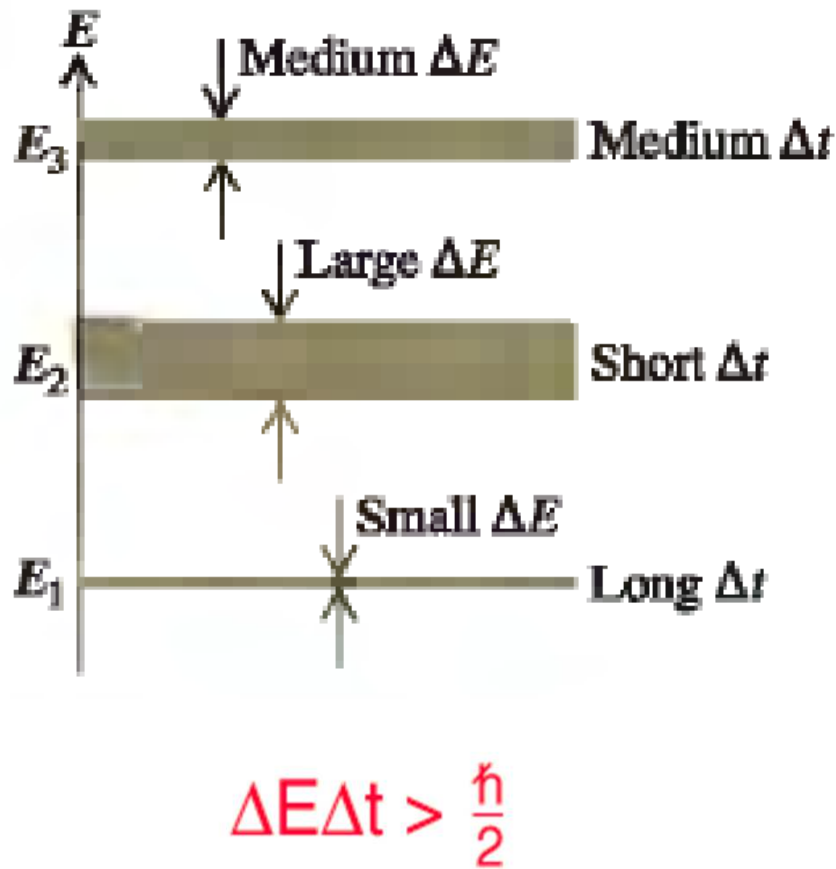
Relações de incerteza de Heisenberg



Para uma partícula com movimento segundo x , y e z

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \wedge \quad \Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2} \quad \wedge \quad \Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}$$

Relações de incerteza de Heisenberg para a energia



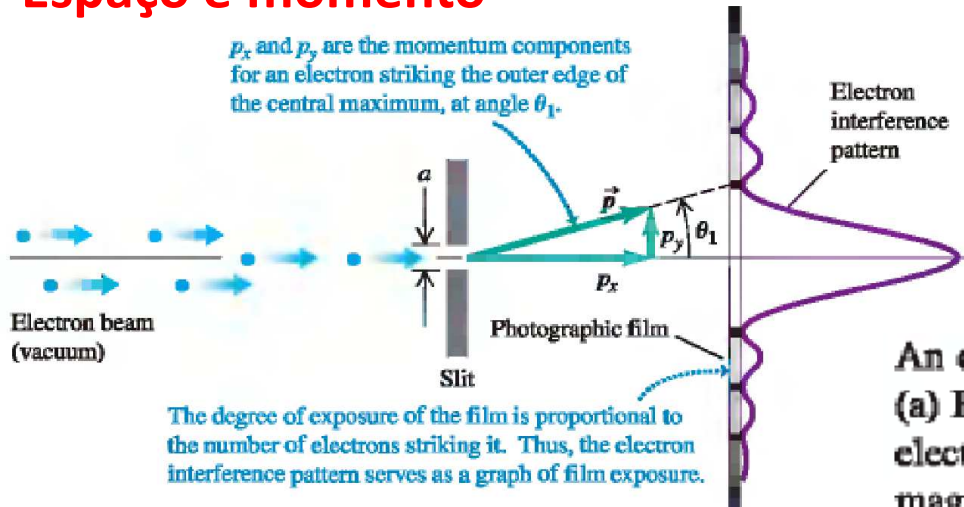
Um estado de energia perfeitamente definido ($\Delta E=0$) tem um tempo médio de vida τ infinito (estado ligado), como é, por exemplo, o estado fundamental de um átomo.

Considere-se agora um átomo num estado excitado. Se identificarmos Δt com o tempo de vida médio τ do átomo nesse estado, verifica-se que a energia do estado está, grosso modo, compreendida entre os seguintes valores: $E-\Delta E/2$ e $E+\Delta E/2$, com $\Delta E \sim \hbar/(2\tau)$.

Imagine-se, a título de exemplo, que se pretende medir a energia E de um estado possível de um átomo. Se o intervalo de tempo disponível para medir a energia é Δt , então a incerteza na medida da energia do estado E satisfaz a seguinte relação: $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$.

Relações de incerteza de Heisenberg

Espaço e momento

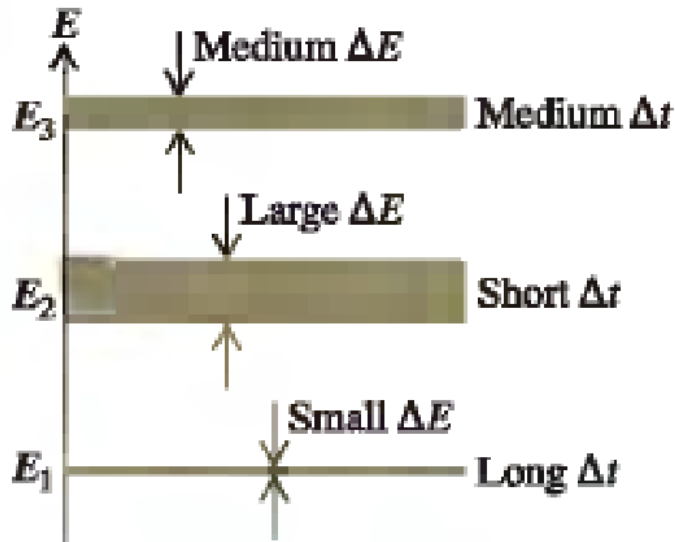


$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}$$

An electron is confined within a region of width 1.0×10^{-10} m. (a) Estimate the minimum uncertainty in the x-component of the electron's momentum. (b) If the electron has momentum with magnitude equal to the uncertainty found in part (a), what is its kinetic energy? Express the result in joules and in electron volts.

Energia e tempo

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

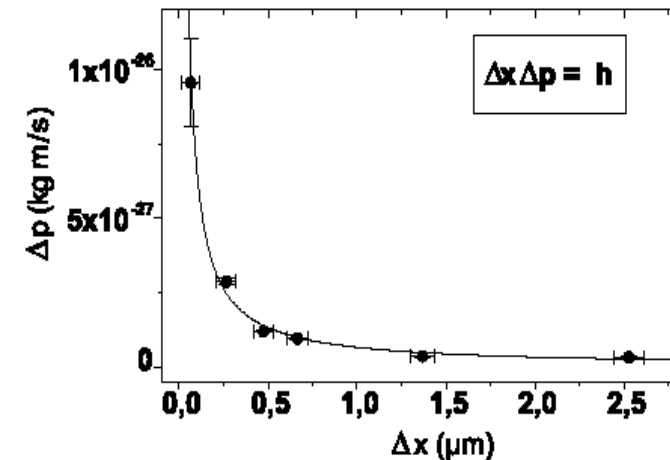
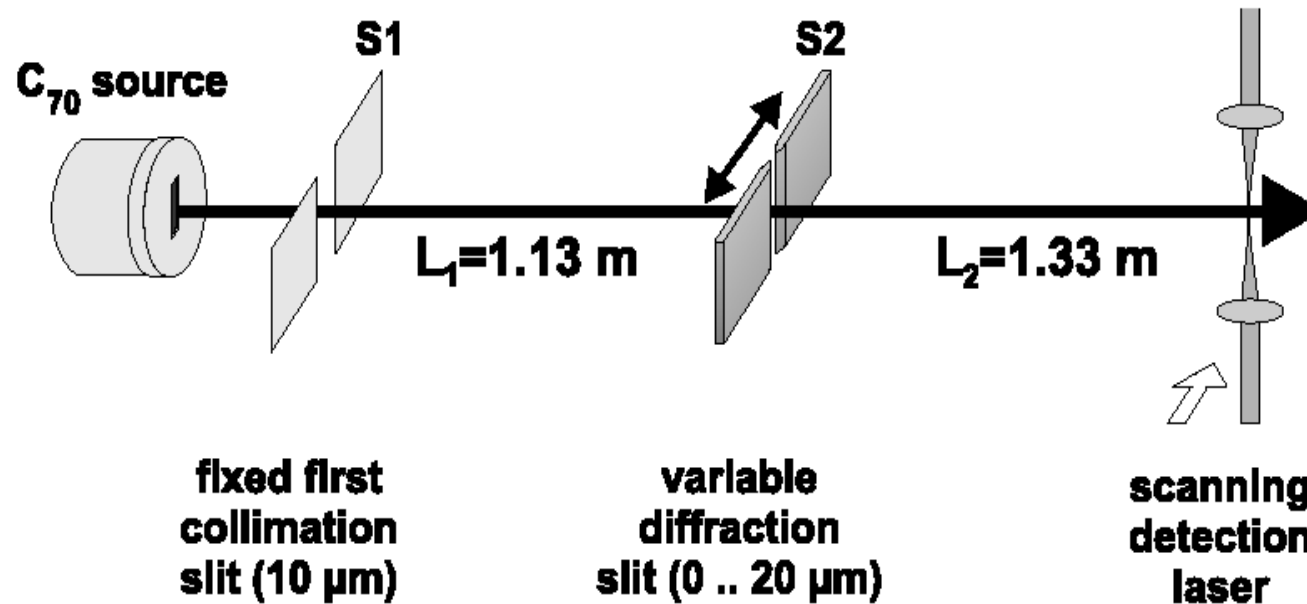


Um sistema com um estado excitado metaestável permanece muito mais tempo nesse que nos outros estados excitados (ver adiante funcionamento dos lasers) e, portanto, a dispersão de energia desse estado é muito menor que nos outros estados.

A sodium atom is in one of the states labeled "Lowest excited levels" in Fig. 38.10 (Section 38.3). It remains in that state for an average time of 1.6×10^{-8} s before it makes a transition back to a ground state, emitting a photon with wavelength 589.0 nm and energy 2.105 eV. What is the uncertainty in energy of that excited state? What is the wavelength spread of the corresponding spectrum line?

Verificação experimental do princípio de incerteza

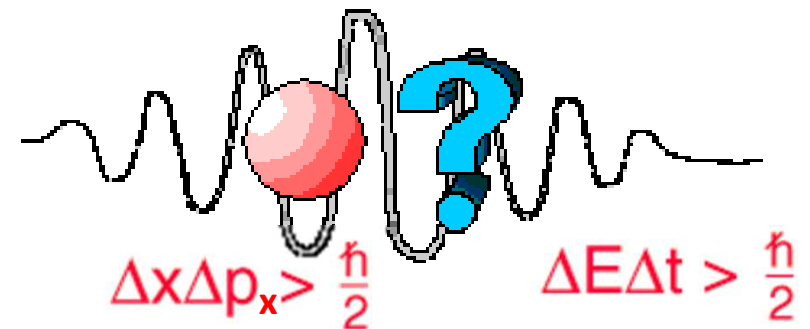
Um feixe térmico efusivo de C_{70} é produzido por sublimação de pó de fulereno a 900 K. O feixe é «estreitado» usando a fenda S1 (10 μm) e difractado pela fenda S2. A largura da fenda S2 pode ser variada, com exactidão entre ± 30 nm para larguras inferiores a 1 μm (usando um sistema da Piezosysteme Jena).



Princípio da incerteza: ideias a reter

- Na **Física Clássica** está implícita a ideia que qualquer grandeza associada ao movimento de uma partícula pode ser medida e descrita de modo exacto. Pode-se medir simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula com infinita precisão, e , portanto, saber o seu passado e o seu futuro.
- De acordo com o **princípio de incerteza** da **Física Quântica**, proposto por Werner Heisenberg, não podemos **conhecer** com exacta precisão e simultaneamente a velocidade e a posição de uma partícula.
- **Importante:** A restrição “imposta” pelo princípio da incerteza não resulta de uma *imperfeição* devida aos instrumentos ou à qualidade dos métodos experimentais usados. É uma das propriedades inerentes à descrição quântica da natureza. Mesmo com instrumentos *perfeitos* a *incerteza* é intrínseca à natureza das coisas.

Se conhecermos a velocidade com infinita precisão não podemos saber a posição; se soubermos a posição com infinita precisão não conheceremos a velocidade.

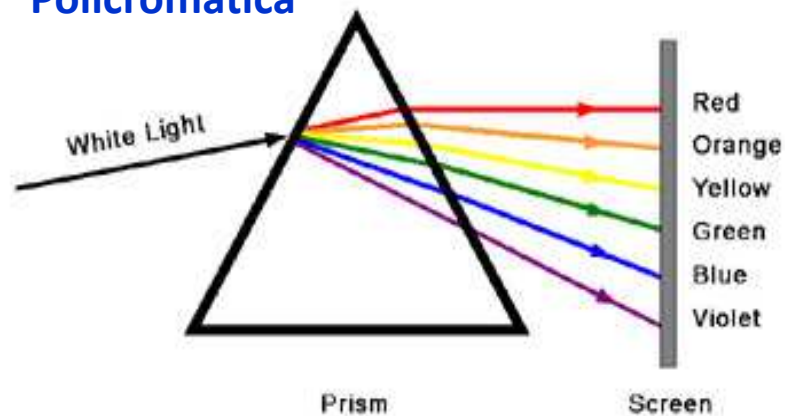


O Laser

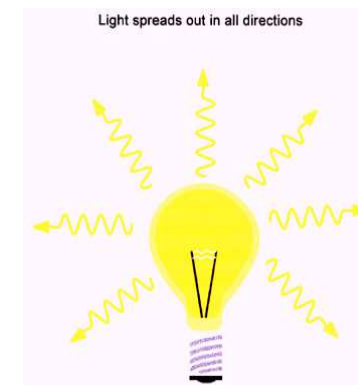
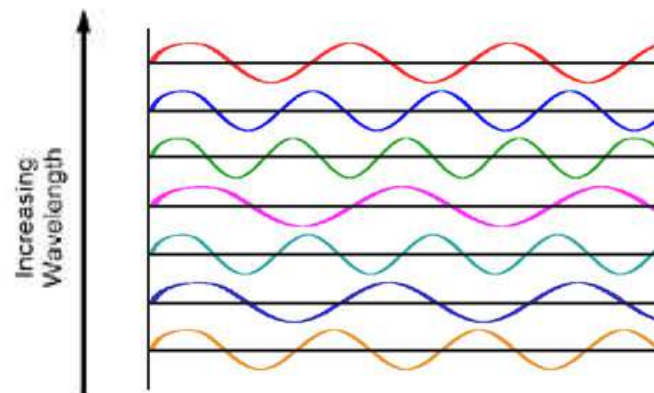
Laser: acrónimo de L[ight] A[mplification] (by) S[timulated] E[mission] (of) R[adiation], **amplificação de luz por meio de emissão estimulada de radiação**; dispositivo gerador de um feixe de radiação electromagnética intensa, quase monocromática, possuindo múltiplas aplicações nos campos da indústria, da investigação e tecnologia, da Medicina e militar.

Luz “comum”

Policromática

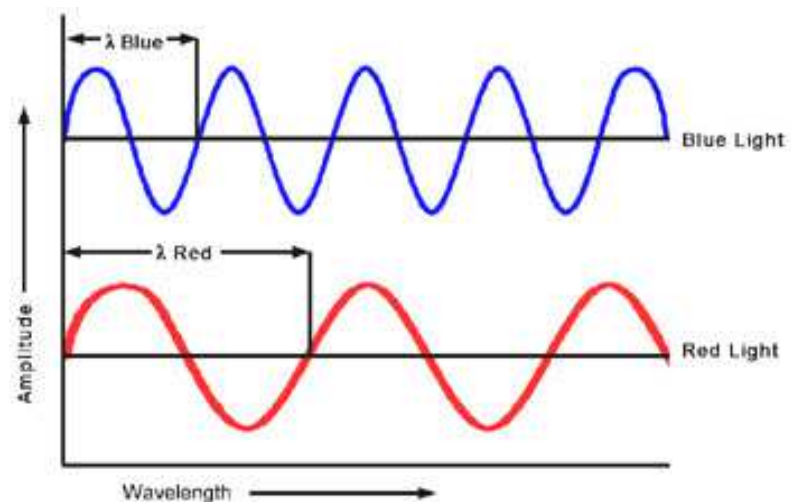


Incoerência temporal (fases diferentes) e é “pouco” direccional (“muito” divergente)

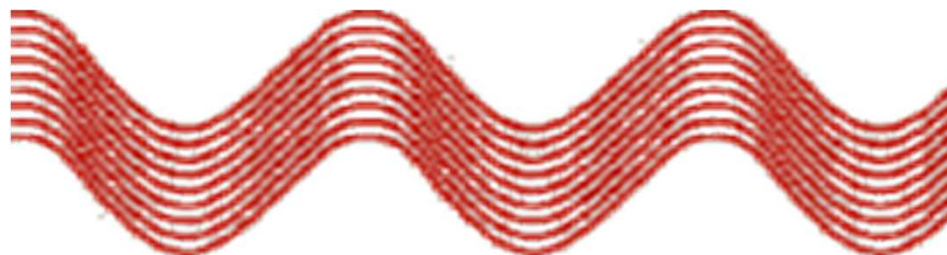


Luz laser

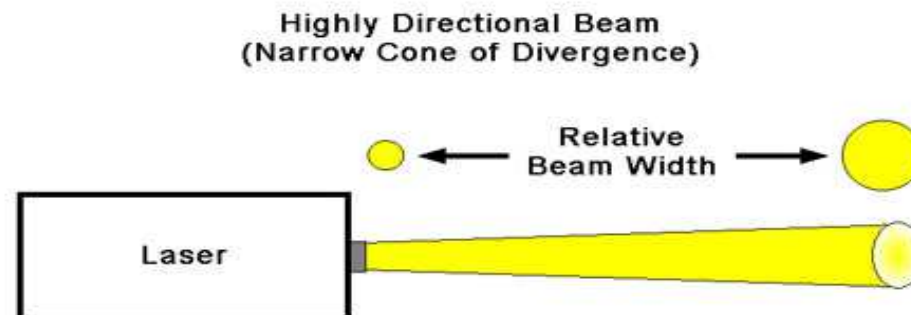
Quasi-monocromática



“Elevada” coerência temporal (mesma fase)



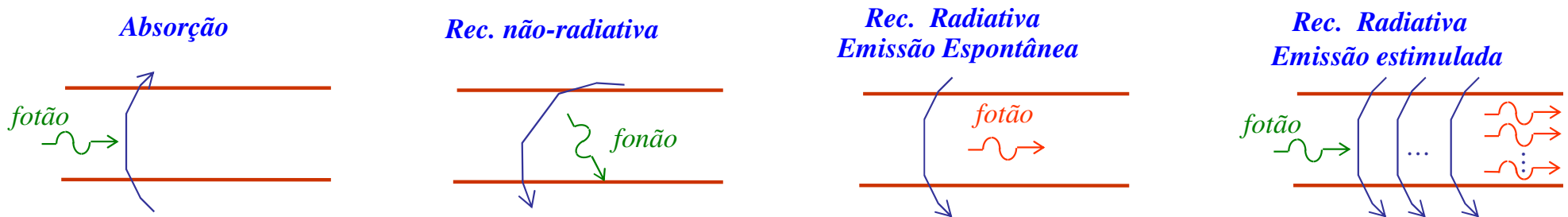
Em geral, é “altamente” direccional (pouco divergente; limitada pelo fenómeno da difracção)



Processos de emissão e absorção de radiação

Designa-se genericamente por **luminescência**, a emissão de luz por um corpo, motivada por qualquer causa que não seja elevação de temperatura. Há várias *formas* de luminescência, dependendo da fonte de excitação: electroluminescência, fotoluminescência, luminescência catódica, fluorescência, fosforescência.

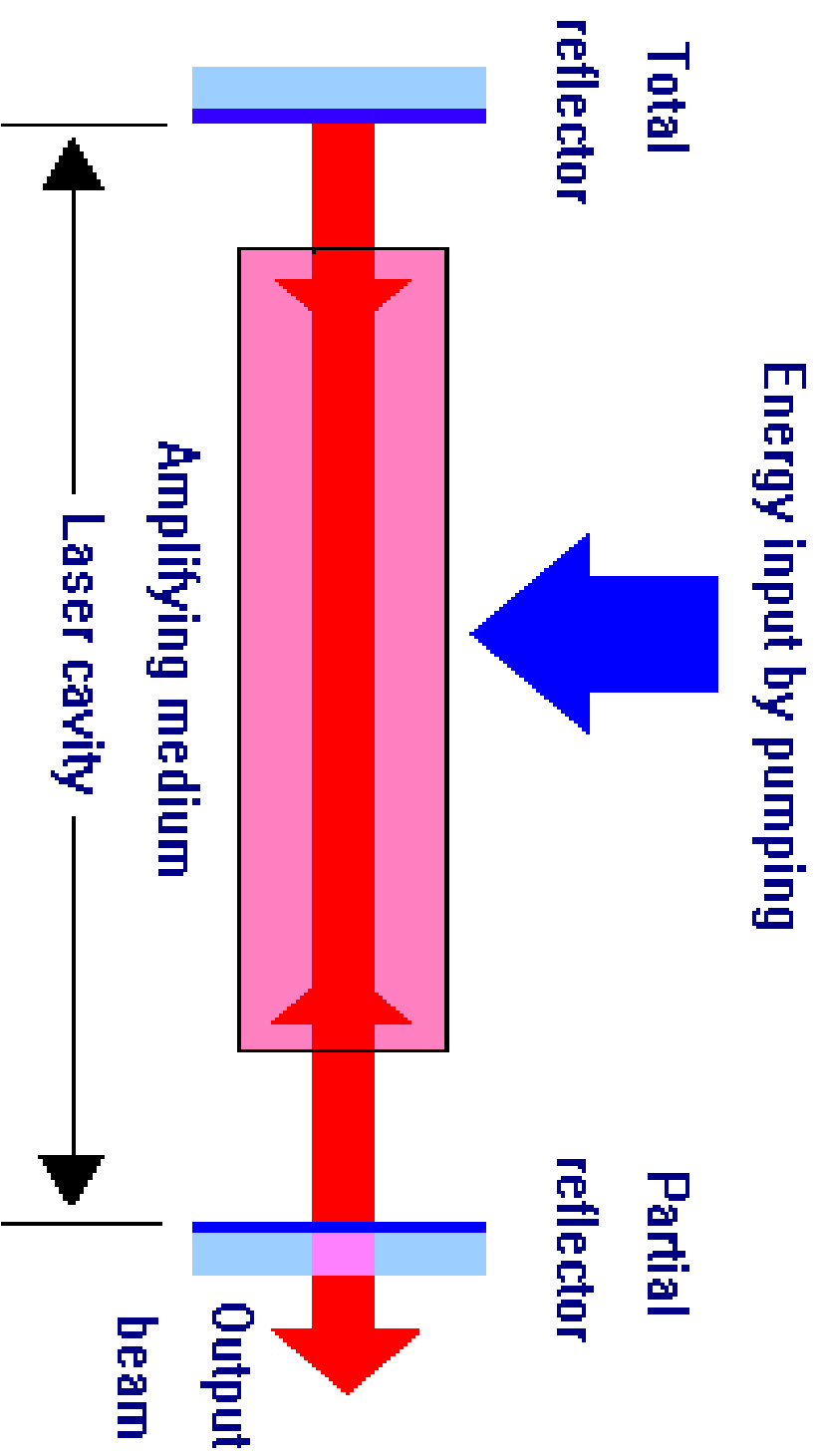
Electroluminescência: emissão de luz induzida por acção de um campo eléctrico.



Emissão Espontânea: fenómeno de recombinação radiativa com características aleatórias, i.e., a direcção e a fase dos fótons gerados é incoerente (**Díodos Emissores de Luz, LEDs**).

Emissão Estimulada: fenómeno de recombinação radiativa induzido pela densidade de potência luminosa de c.d.o. $\lambda \sim hc/E_g$ existente num dado ponto do cristal, num processo em que cada fóton incidente dá origem a um segundo fóton, sem que o primeiro seja absorvido ou as suas propriedades alteradas, resultando em **amplificação da radiação incidente** (**Lasers, Díodos Lasers, amplificadores ópticos**). Na emissão estimulada, a radiação *excitadora* e a estimulada têm as mesmas características, a radiação produzida diz-se **coerente**.

“Constituintes” de um laser

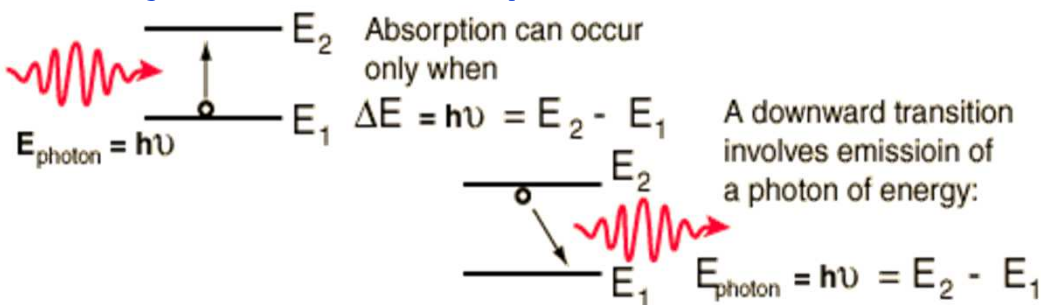


Processos *essenciais* à acção laser

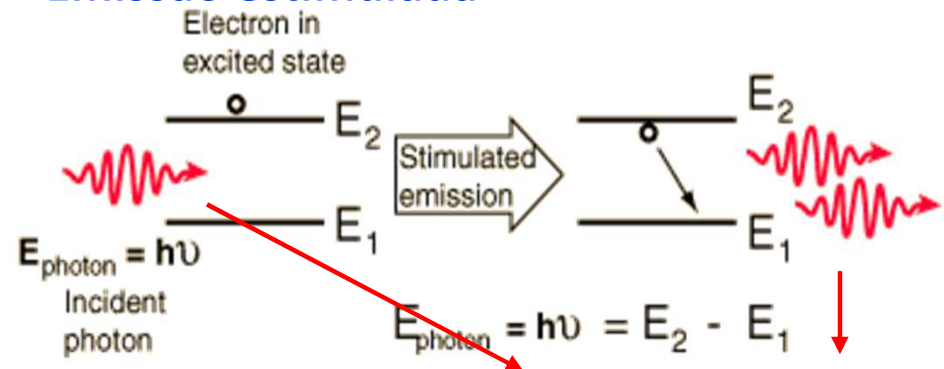
Laser: acrónimo de L[ight] A[mplification] (by) S[timulated] E[mission] (of) R[adiation], amplificação de luz por meio de emissão estimulada de radiação; dispositivo gerador de um feixe de radiação electromagnética intensa, quase monocromática.

Maser: amplificador de micro-ondas, baseado na emissão estimulada de radiação por um sólido (de *microwave amplification by stimulated emission of radiation*).

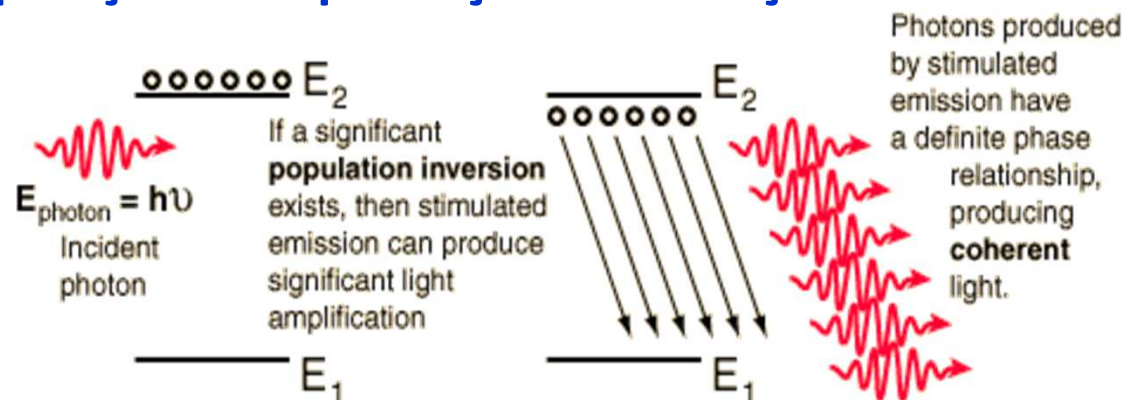
Absorção e emissão espontânea



Emissão estimulada



Inversão de população e amplificação de radiação



Um fotão dá origem a dois fotões “iguais”, com as mesmas características.

Em geral, a *acção* laser envolve pelo menos três níveis de energia (ver nas páginas seguintes os diagramas de energia dos lasers de He-Ne e de rubi).

Lasers de Rubi

O **laser de rubi** foi o primeiro laser a ser demonstrado. Trata-se de um laser de estado sólido, isto é, o meio activo – meio laser – é um cristal de rubi.

Neste laser o bombeamento é óptico. Devido à baixa eficiência do processo laser, o laser de rubi é pulsado, isto é, emite pulsos de luz, em vez de um feixe contínuo.

The Nobel Prize in Physics 1964

Stimulated Optical Radiation in Ruby,

T. H. Maiman, *Nature*, 6-8-1960

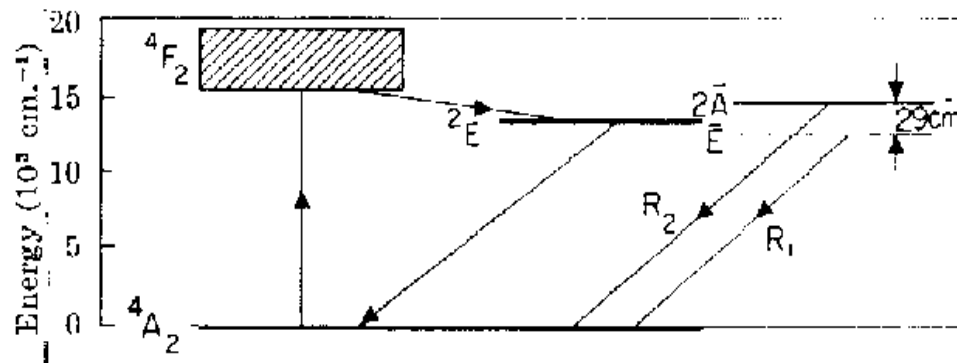
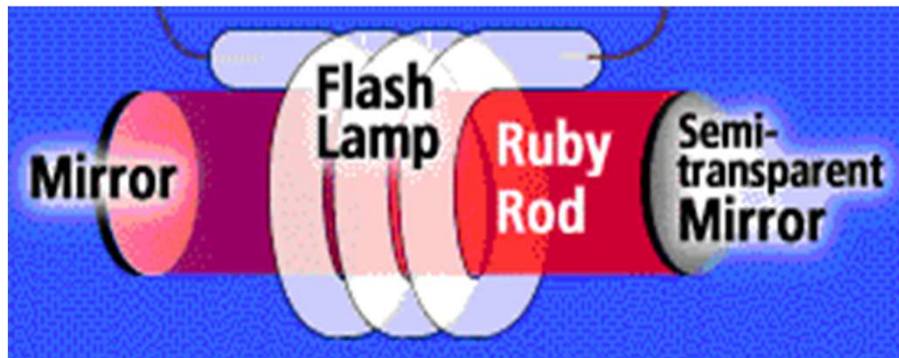
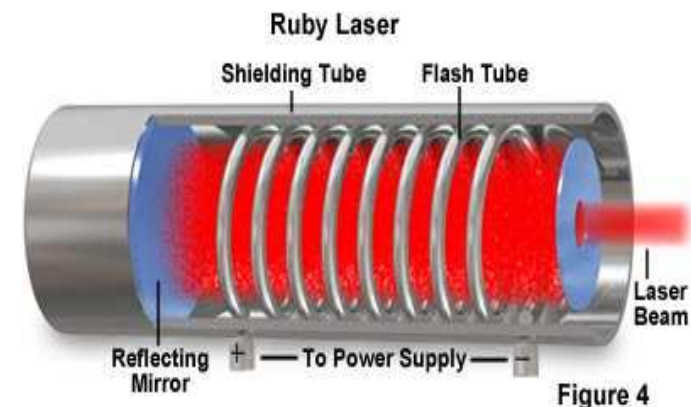
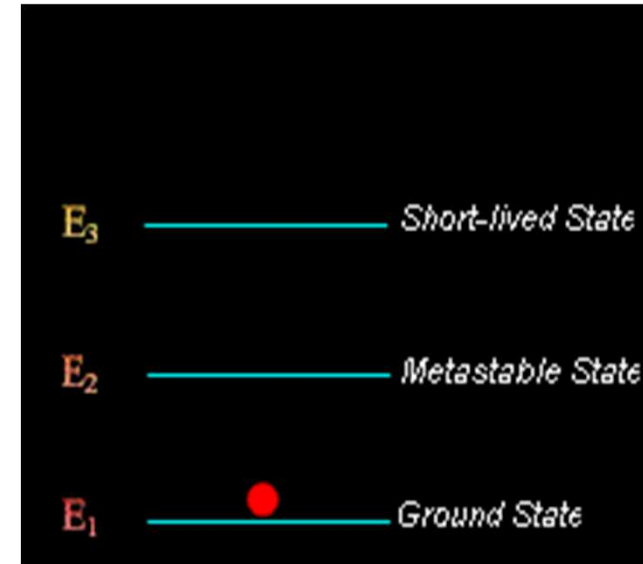


Fig. 1. Energy-level diagram of Cr³⁺ in corundum, showing pertinent processes



Pode ver algumas animações relacionadas com lasers em http://w3.ualg.pt/~jlongras/lope/Lasers_e_Optoelectronica.html.

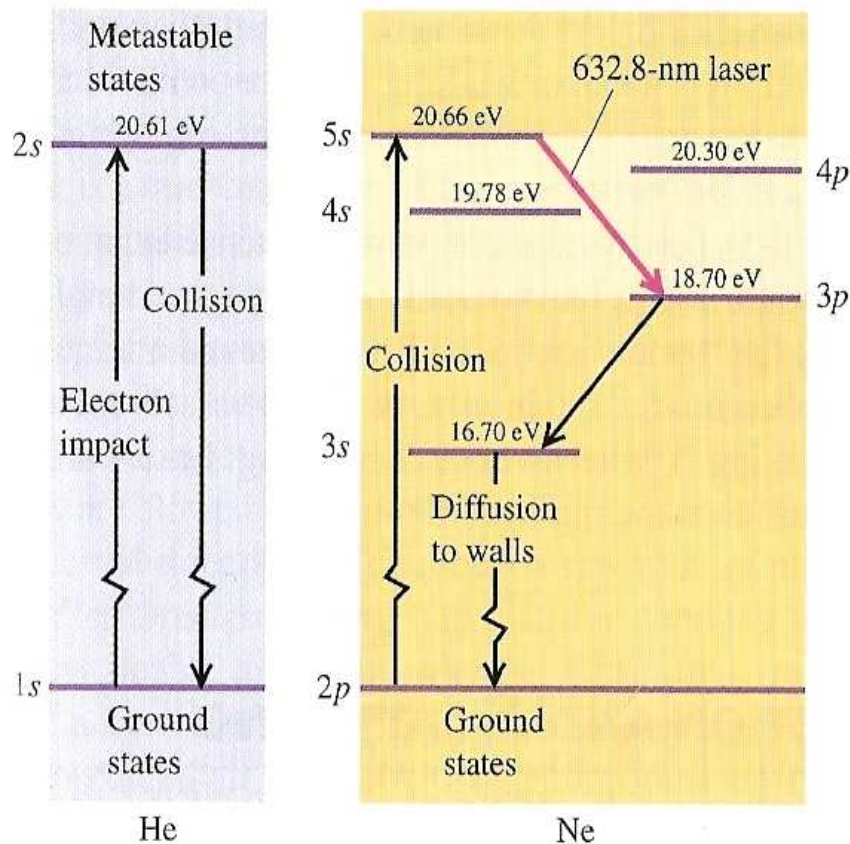


Laser de Hélio – Néon

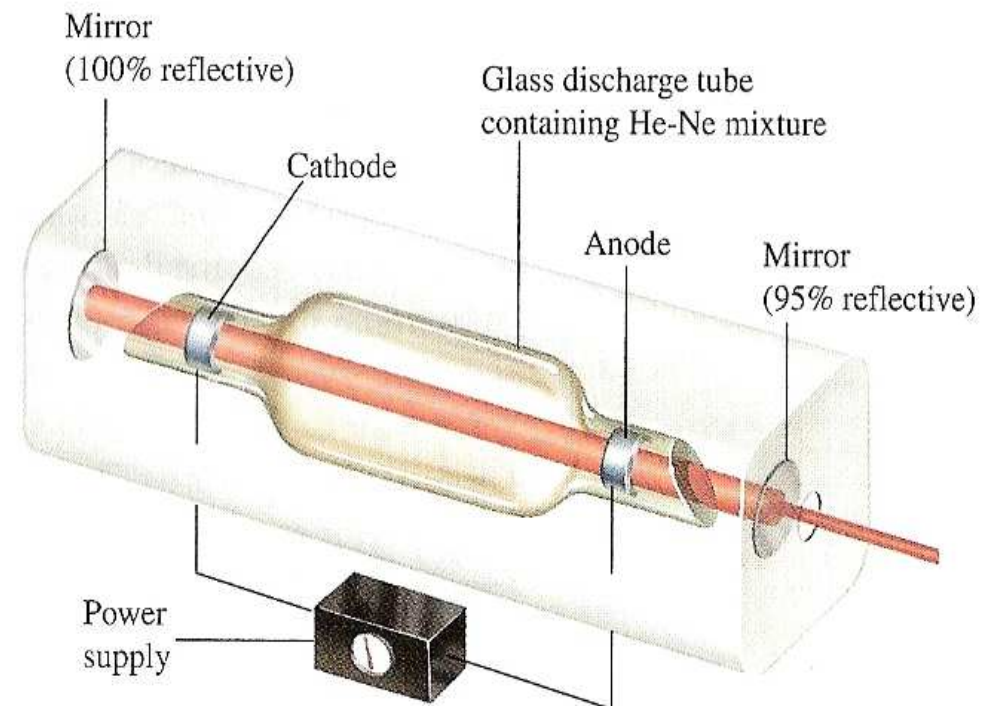
O laser de hélio néon corresponde a um tubo contendo uma mistura destes dois gases, que são sujeitos a descargas eléctricas, produzindo radiação laser: radiação electromagnética intensa, coerente e *quasi*-monocromática.

A descarga eléctrica excita os átomos de hélio que transferem por colisão o excesso de energia para os átomos de néon, que ao voltarem ao estado fundamental emitem radiação electromagnética na banda visível e na banda do infravermelho.

Um filtro especial inserido entre os espelhos selecciona o comprimento de onda de emissão.



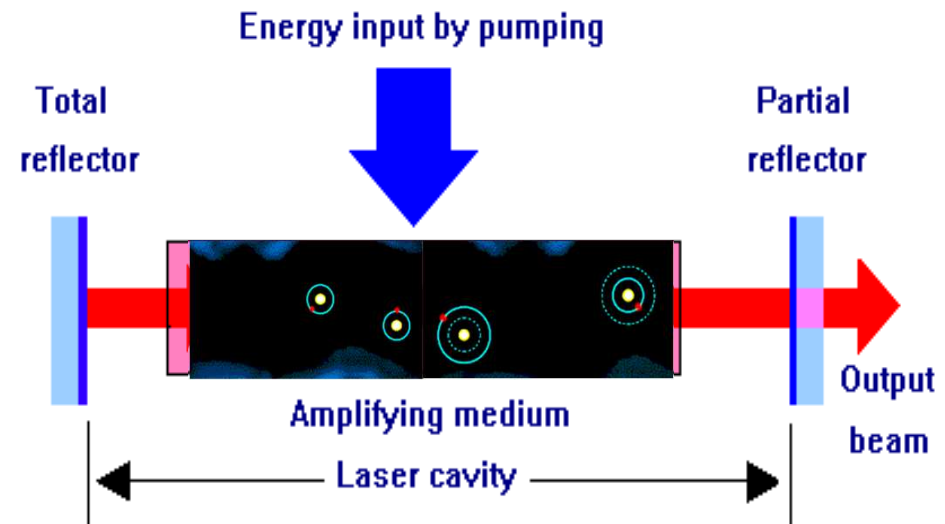
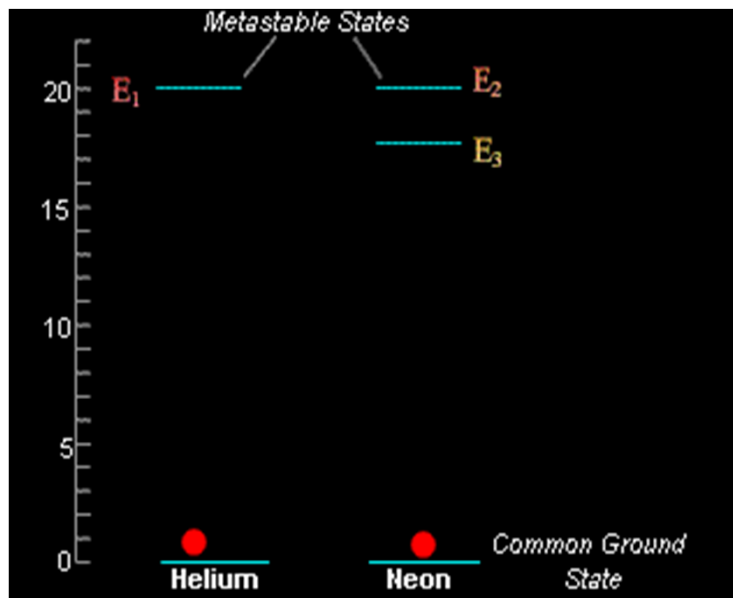
O bombeamento do laser é eléctrico (descarga eléctrica).



Laser de Hélio – Néon

«Bombeamento» e mecanismo de re-alimentação

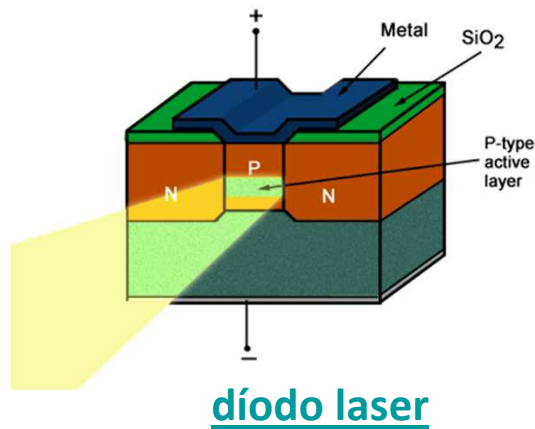
O bombeamento do laser de He-Ne é realizado através de uma descarga eléctrica.



A emissão laser (amplificação de luz) *estacionária* envolve pelo menos a participação de três níveis de energia. (ver, por exemplo, *Óptica*, E. Hecht; F.C. Gulbenkian, pp. 605-622).

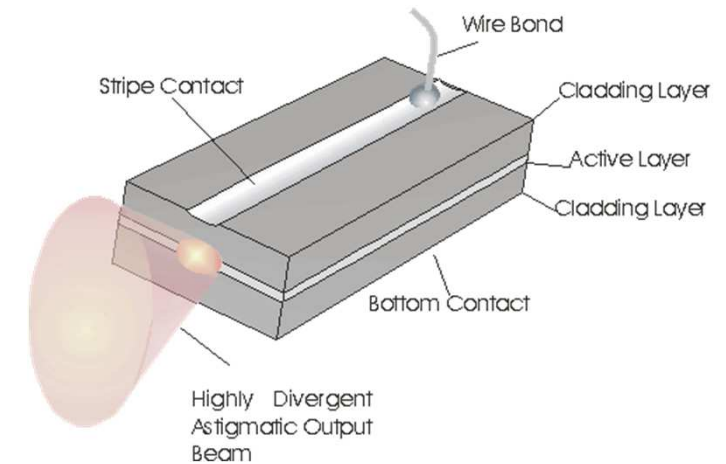
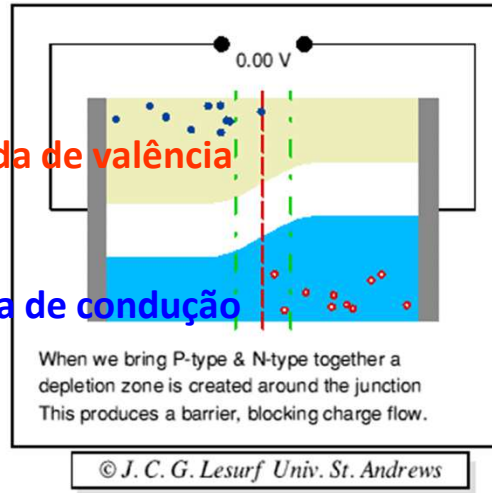
Laser de díodo (LD)

The Nobel Prize in Physics 2000

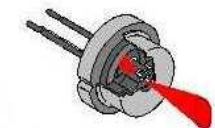
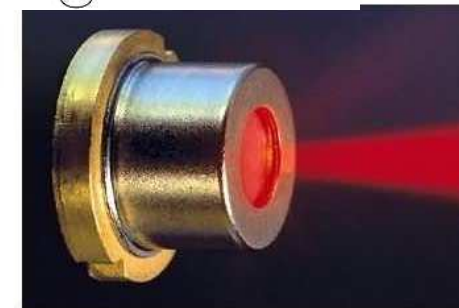
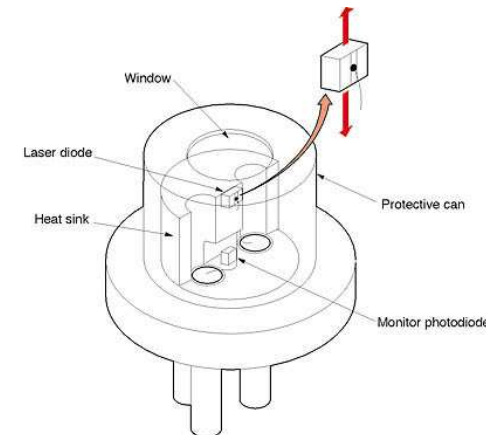
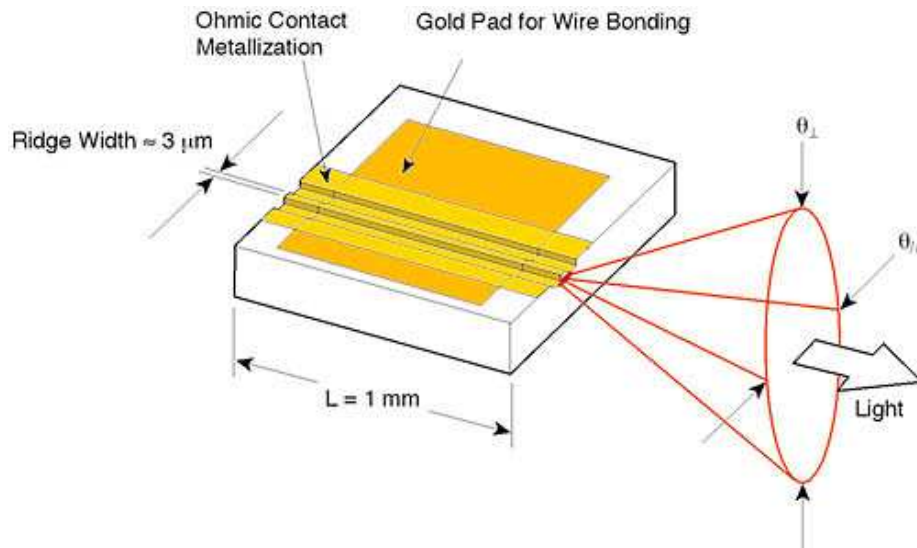


Banda de valência

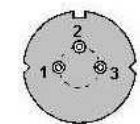
Banda de condução



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/laser.mov>



LASER DIODE HEAD



1: LD - Laser Diode
2: COM
3: PD - Photo Diode

O que distingue um laser de díodo de um díodo emissor de luz (LED)?

http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode

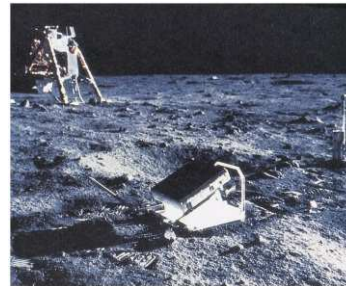
Exemplos de aplicações: metrologia, medicina, etc.

Construção de túneis, etc.

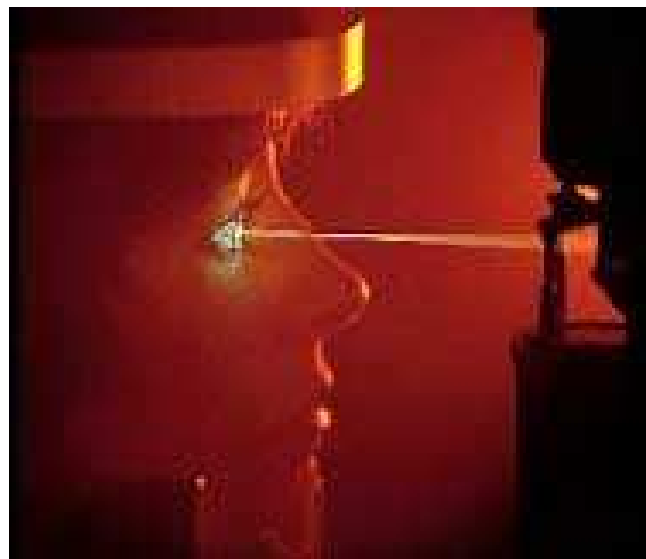


Medir a distância da Terra à Lua usando laser

Precisão de poucos centímetros. Ter em atenção que a distância da Terra à Lua é de cerca de 380 000 km.

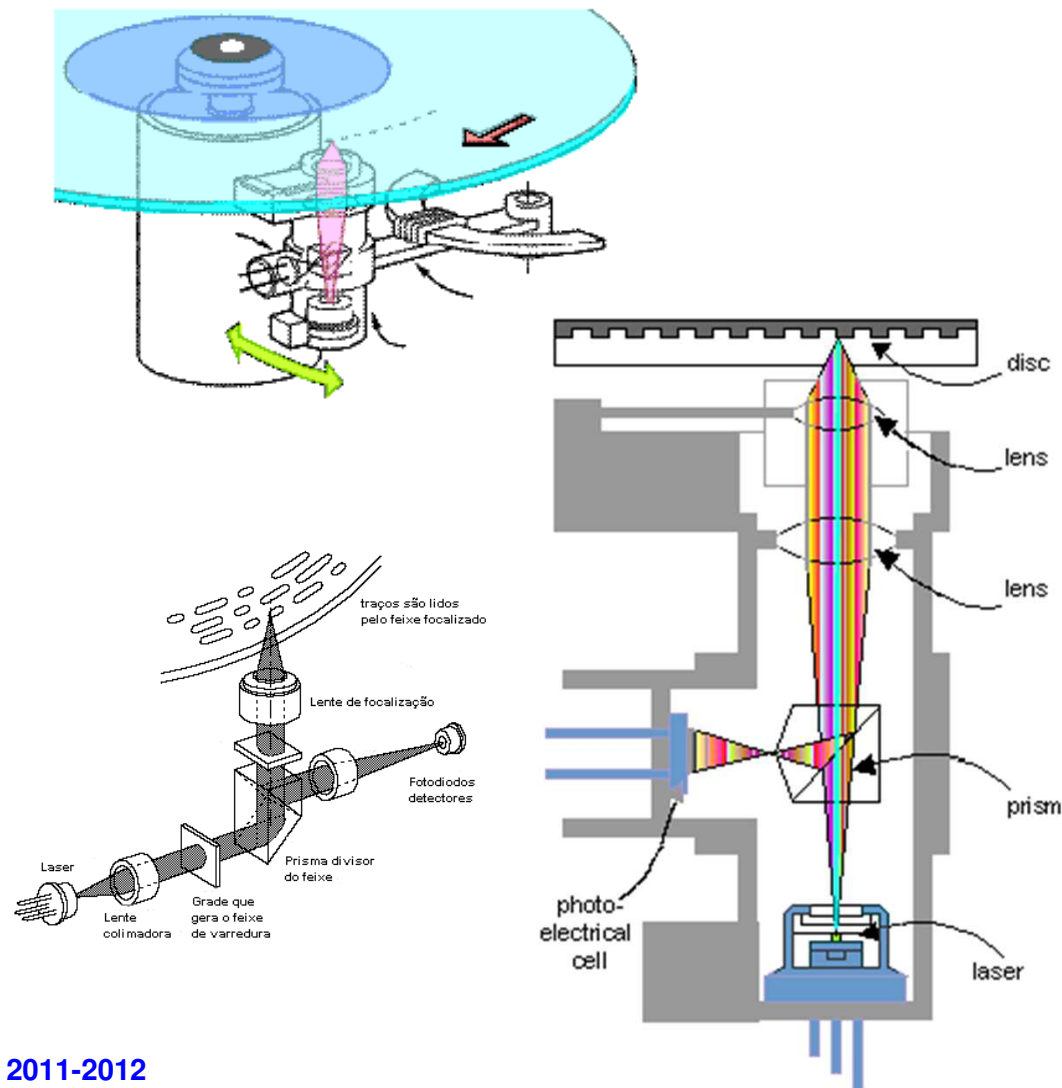


Medicina

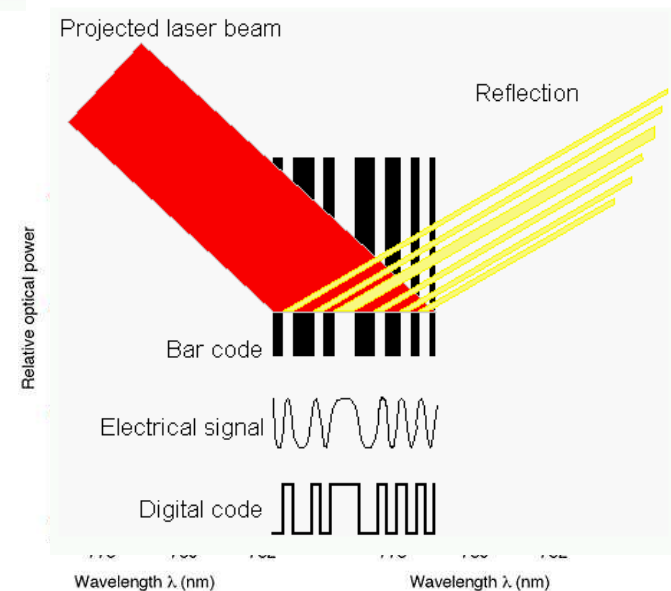
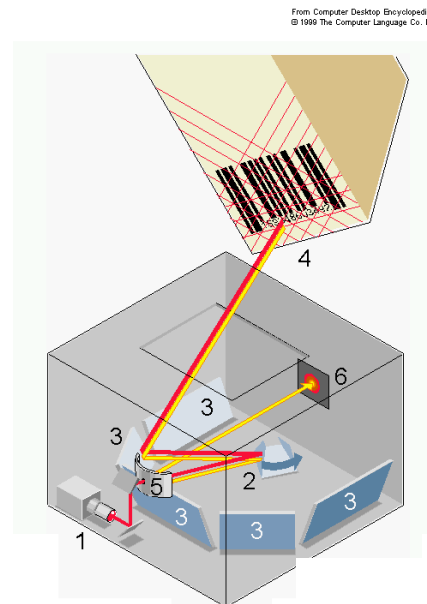


Leitores de CD e DVD

Os leitores tradicionais de CD/DVD usam lasers que emitem no infravermelho próximo ou no vermelho. O *blue ray* usa lasers que emitem no verde e/ou azul.

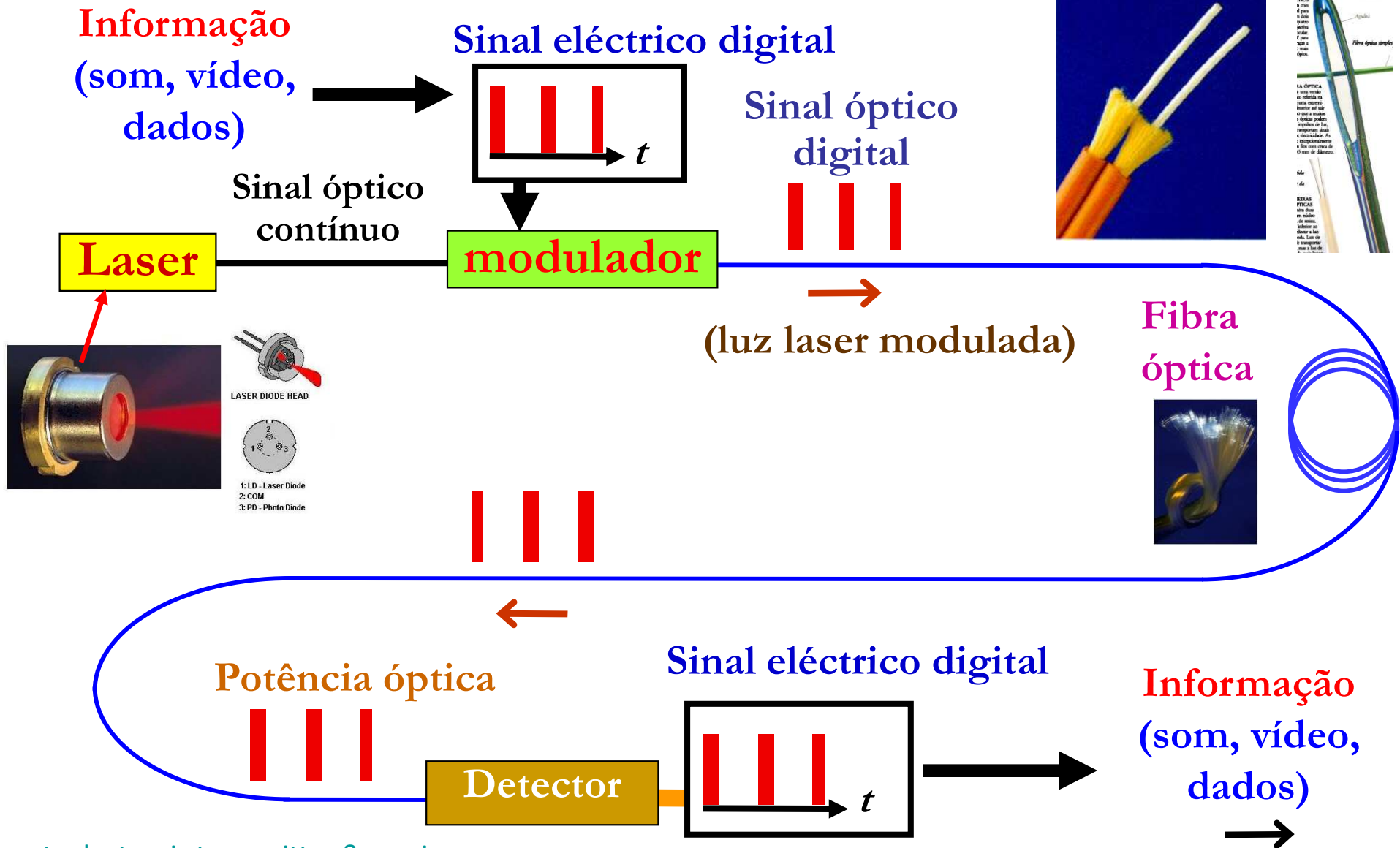


Leitores de código de barras



Comunicações

Sistema de comunicação por fibra óptica de apenas um comprimento de onda.



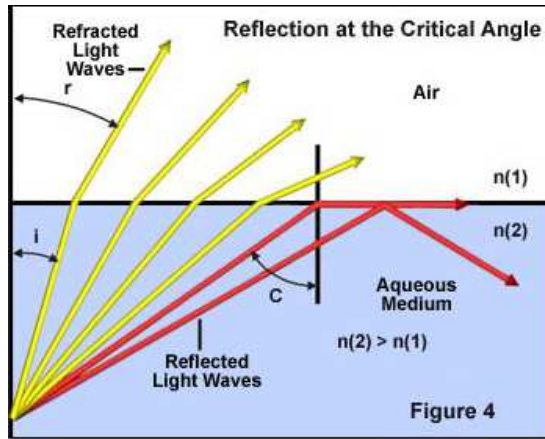
[optoelectronic transmitter & receivers](http://w3.ualg.pt/~jlongras/TxRxOp.mov)

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/TxRxOp.mov>

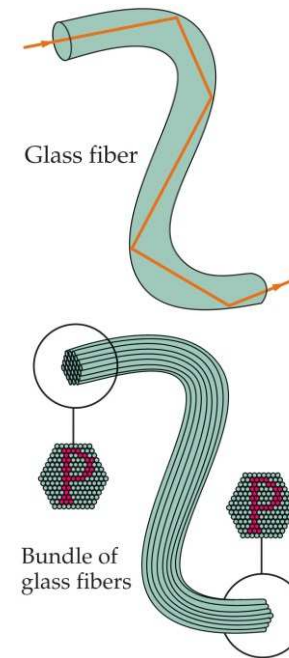
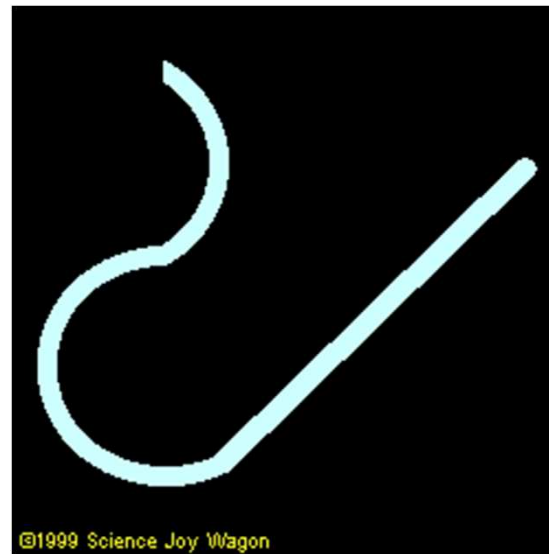
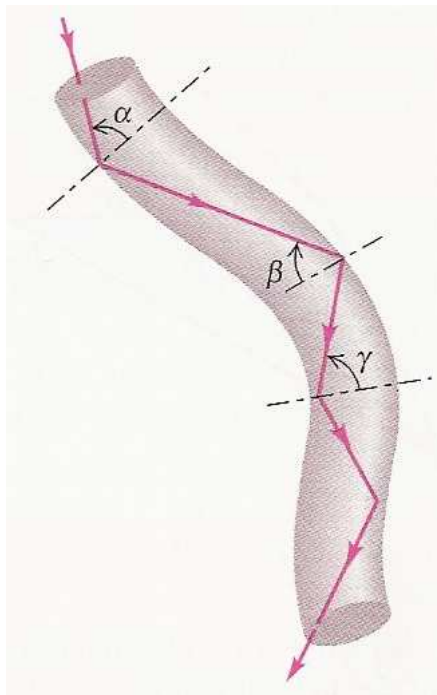
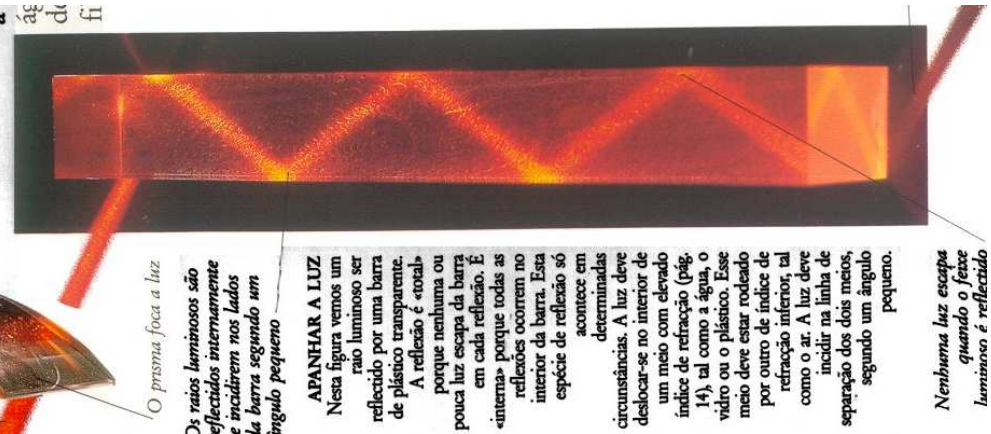
[fibra-óptica](http://w3.ualg.pt/~jlongras/fibra-optica.wmv)

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/fibra-optica.wmv>

Reflexão interna total e fibras ópticas: *guiagem* da luz



Se o mergulhador continuar a atingir a superfície de água, atingirá o «ângulo crítico» e a luz será reflectida de volta para a água.



http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber

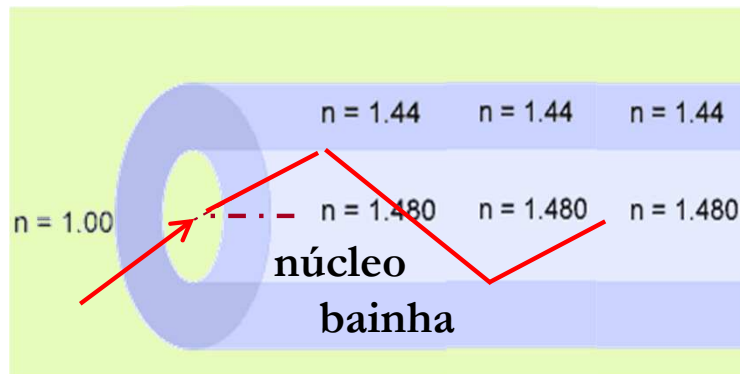
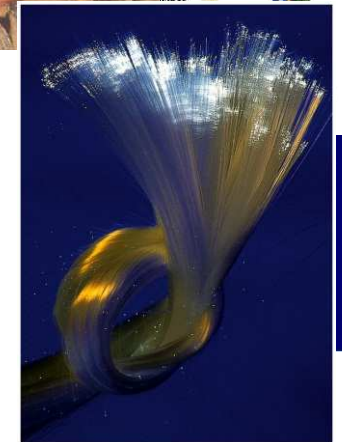
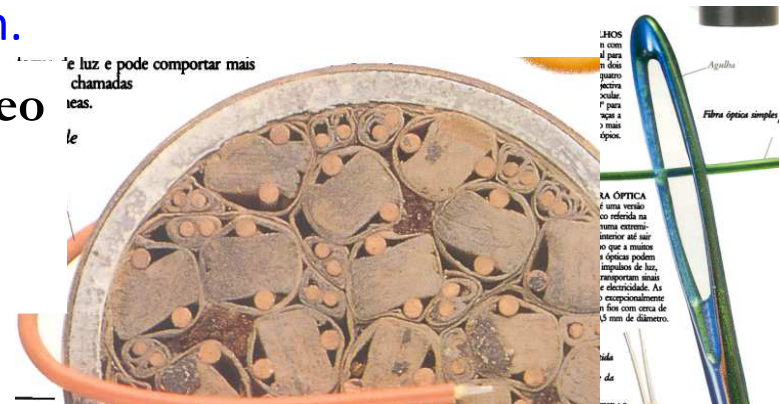
Fibras ópticas usadas em telecomunicações são fibra monomodo

Prémio Nobel da Física 2009

Fibras cujo diâmetro do núcleo é da ordem de $10\text{ }\mu\text{m}$.

Camada que reflecte a luz que viaja no núcleo
(bainha, $\sim 125\text{ }\mu\text{m}$)

Cabo de fibra óptica para telecomunicações

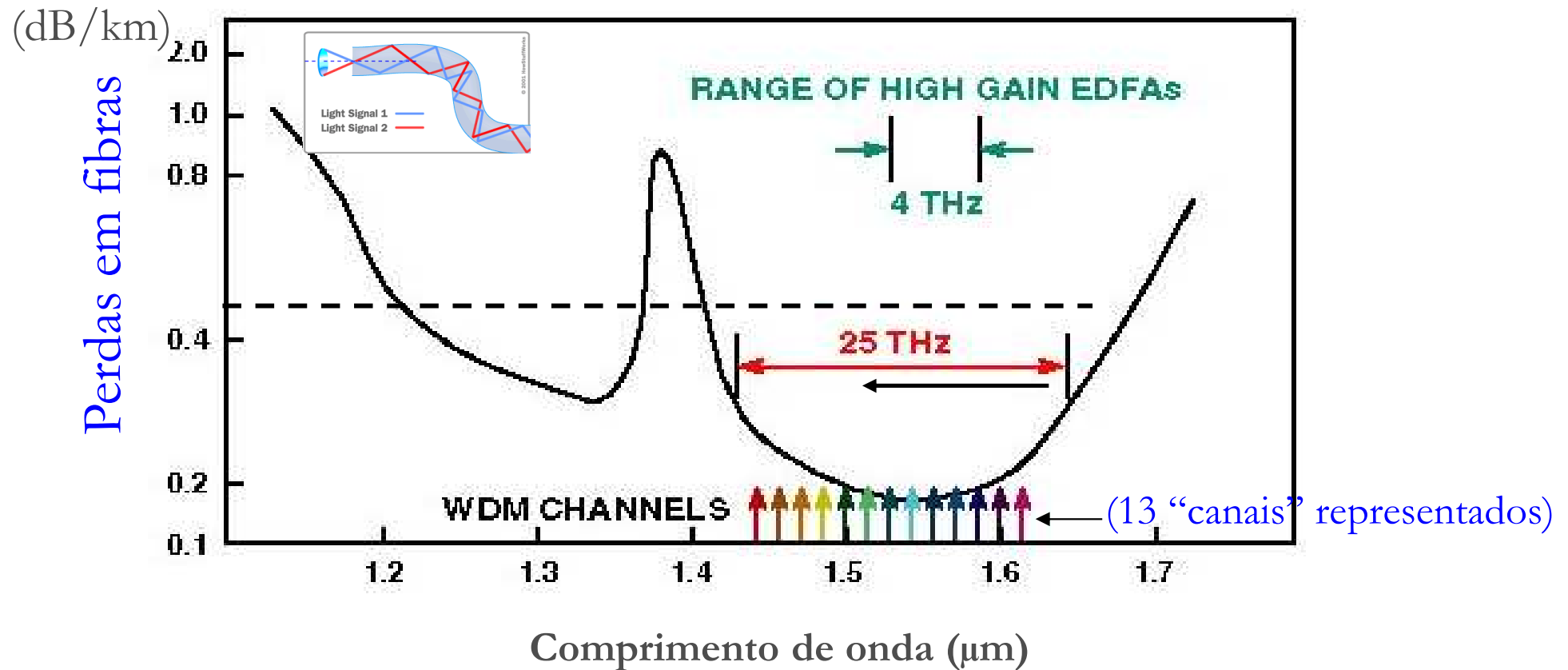


O índice de refração do núcleo é ligeiramente superior ao da bainha. As fibras podem ser monomodo ou multimodo. Uma fibra é multimodo quando o diâmetro efectivo do núcleo é superior ao comprimento de onda.

http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber

Vantagens das redes de fibra óptica

Prémio Nobel da Física 2009



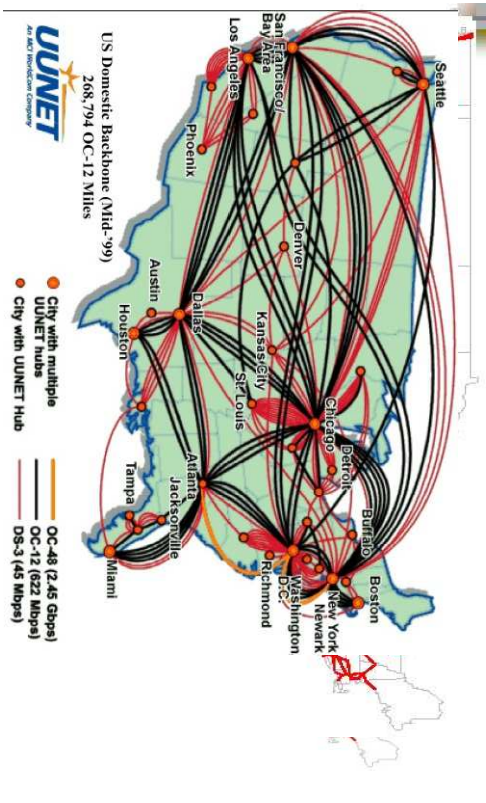
Elevada largura de banda: 25 THz!

Se os “canais” estiverem separados entre si de 50 GHz, temos

$25 \text{ THz} / 50 \text{ GHz} = 500$ “canais” num fio de vidro com menos de 10 μm de diâmetro!

Bel é a unidade logarítmica usada em engenharia de telecomunicações, para comparar duas potências (modernamente usa-se mais o **decibel, dB**) (De A. G. Bell, antr., 1847-1922).

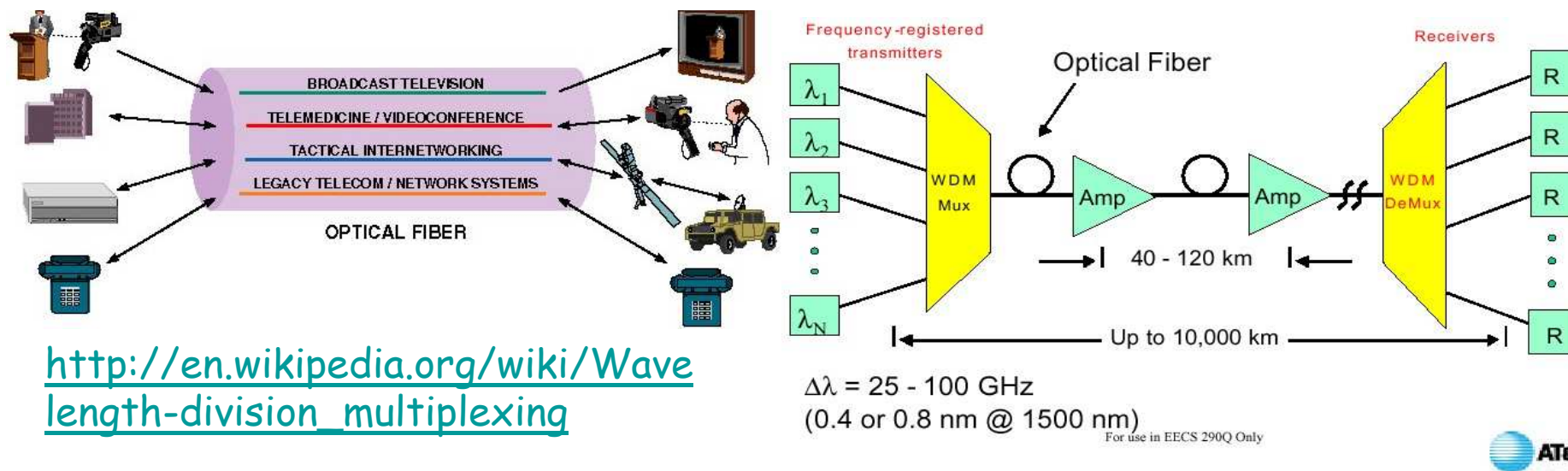
Redes locais de fibra óptica



Redes avançadas de fibra óptica

Prémio Nobel da Física 2009

Sistemas de comunicação por fibra óptica que usando muitos comprimentos de onda, que se propagam através de uma única fibra.



Multiplexador: a unidade funcional que torna possível que muitos sinais diferentes se propaguem pelo mesmo meio de transmissão.

A Alcatel-Lucent anunciou na conferência OFC (Optical Fiber Communication Conference), Fevereiro de 2008, que estabeleceu o recorde mundial de transmissão óptica em 25,6 terabits por segundo (Tbit/s) sobre uma única fibra, utilizando 160 canais WDM (wavelength division multiplexing - multiplexagem em comprimento de onda), o que corresponde a uma largura de Estes resultados ultrapassam de longe o recorde precedente de transmissão de 14 Tbit/s, estabelecido em Setembro de 2006.

Física Geral I

file:///D:/w3dev_06-08-2011-pode-sepagar/hhonda-ad-300k.swf

Unidade Curricular
Física Geral II
(Área Científica: Física)
Ano lectivo 2011-2012

Curso: Engenharia Informática

[Ver <http://www.fct.ualg.pt/intranet/bolonha/LEI.pdf>, página 52-54]

5 ECTS*, 140 horas de trabalho do estudante
(70 horas presenciais: 30 horas teóricas, 20 horas teórico-práticas,
15 horas laboratoriais , 5 horas de orientação tutorial)

Docentes:

Aulas teóricas e tutoriais: José Longras Figueiredo (jlongras@ualg.pt).

Aulas práticas: Rui Guerra (rguerra@ualg.pt).

Aulas teórico-práticas: José António Rodrigues (jarod@ualg.pt)

Página web: [http://w3.ualg.pt/~jlongras/FGII\(LEI\)t.html](http://w3.ualg.pt/~jlongras/FGII(LEI)t.html)

- * Sistema Europeu de Acumulação e Transferência de Créditos que mede as horas que o estudante tem que trabalhar para alcançar os objectivos do programa de estudos. Estes objectivos são especificados em termos de competências a adquirir e resultados de aprendizagem.