

Universidade do Algarve
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Física
Ano lectivo 2007-2008

Unidade Curricular

Electromagnetismo e Óptica
(Área Científica: Física)

José Figueiredo



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



Nota prévia

Unidade Curricular Electromagnetismo e Óptica (Área Científica: Física)

Engenharia Electrónica e Telecomunicações (Mestrado Integrado)

[<http://www.fct.ualg.pt/intranet/bolonha/MIEET.pdf>, página 63]

Física (1.º Ciclo) [<http://www.fct.ualg.pt/intranet/bolonha/LF.pdf>, páginas 38 e 39]

- ECTS: 5: 20 aulas teóricas (1,5 horas \times 4 aulas \times 5 semanas), 20 horas teórico-práticas (2 \times 2 \times 5), 15 horas de práticas laboratoriais (3 \times 5), 5 horas de orientação tutorial (1 \times 5) (Total: 70 horas presenciais)
- Estes resumos destinam-se apenas a atenuar a falta de habilidade para o desenho do docente, podendo, contudo, servir como orientação no estudo e como sumário, mas não substituem a leitura do(s) texto(s) recomendados no programa da disciplina (ver <http://w3.ualg.pt/~jlongras/EO.htm>).
- Recomenda-se que os alunos os usem durante as aulas, por forma a melhor acompanhar a exposição das matérias.
- As aulas incluirão, sempre que possível, sessões curtas de demonstração e discussão de alguns dos conceitos e fenómenos tratados na disciplina.

Votos de bom trabalho,

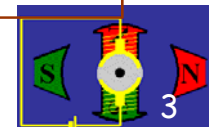
José Figueiredo





Alguns sítios inspiradores

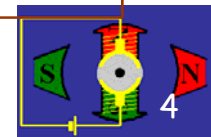
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02Electricity-and-MagnetismSpring2002/VideoLectures/>
- <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/web/courses/courses/index.htm#Physics>
- <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/web/courses/courses/index.htm#ElectricalEngineeringandComputerScience>
- <http://physics.nist.gov/cuu/Units/>
- <http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/index.html>





Introdução

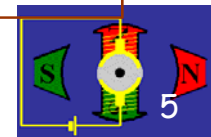
- No estudo da [Física](#), o **electromagnetismo** (ou **eletromagnetismo**) é o nome da teoria unificada desenvolvida por [James Maxwell](#) para explicar a relação entre a [electricidade](#) e o [magnetismo](#). Esta teoria baseia-se no conceito de [campo electromagnético](#).
- O [campo magnético](#) é resultado do movimento de [cargas eléctricas](#), ou seja, é resultado de [corrente eléctrica](#). O campo magnético pode resultar em uma [força electromagnética](#) quando associada a [íman](#).
- A variação do [fluxo magnético](#) resulta em um [campo eléctrico](#) (fenómeno conhecido por [indução electromagnética](#), mecanismo utilizado em [geradores eléctricos](#), [motores](#) e transformadores de tensão). De forma semelhante, a variação de um campo eléctrico gera um campo magnético. Devido a essa interdependência entre campo eléctrico e campo magnético, faz sentido falar em uma única entidade chamada [campo electromagnético](#).
- Esta unificação foi realizada por [James Clerk Maxwell](#), e escrita em fórmulas por [Oliver Heaviside](#), no que foi uma das grandes descobertas da [Física](#) no [século XIX](#), que posteriormente levou a uma melhor compreensão da natureza da [luz](#), que é a propagação de uma perturbação electromagnética, isto é, a luz é uma [onda electromagnética](#). As diferentes frequências de oscilação estão associadas a diferentes tipos de [radiação](#). Por exemplo, [ondas de rádio](#) tem frequências desde alguns quilohertz até algumas centenas de MHz, a luz visível tem frequências da ordem das centenas de terahertz, e os raios gama tem as frequências superiores a exahertz.
- A teoria do electromagnetismo permitiu o desenvolvimento da teoria da [relatividade especial](#) por [Albert Einstein](#) em 1905. (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Electromagnetismo>)





Um pouco de história

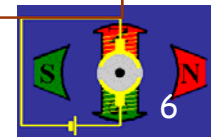
- De acordo com Tales de Mileto, ao se esfregar âmbar com pele de carneiro, observou-se que pedaços de palha eram atraídos pelo âmbar. A palavra *eléktron* (ἤλεκτρον) significa âmbar em grego.
- O magnetismo era conhecido através do mineral magnetite.
- A electricidade e o magnetismo apenas começam a ser estudados com rigor científico a partir do século XVI.
- Por volta de 1550, Gerolamo Cardano discute no livro *De Subtilitate* as diferenças entre forças eléctricas e forças magnéticas.
- Em 1600 William Gilbert publica *De Magnete*, onde desenvolve um trabalho metódico sobre as propriedades do magnetismo.
- 1660: Otto von Guericke inventa o primeiro gerador electrostático, chamado de *Elektrisiermaschine*.





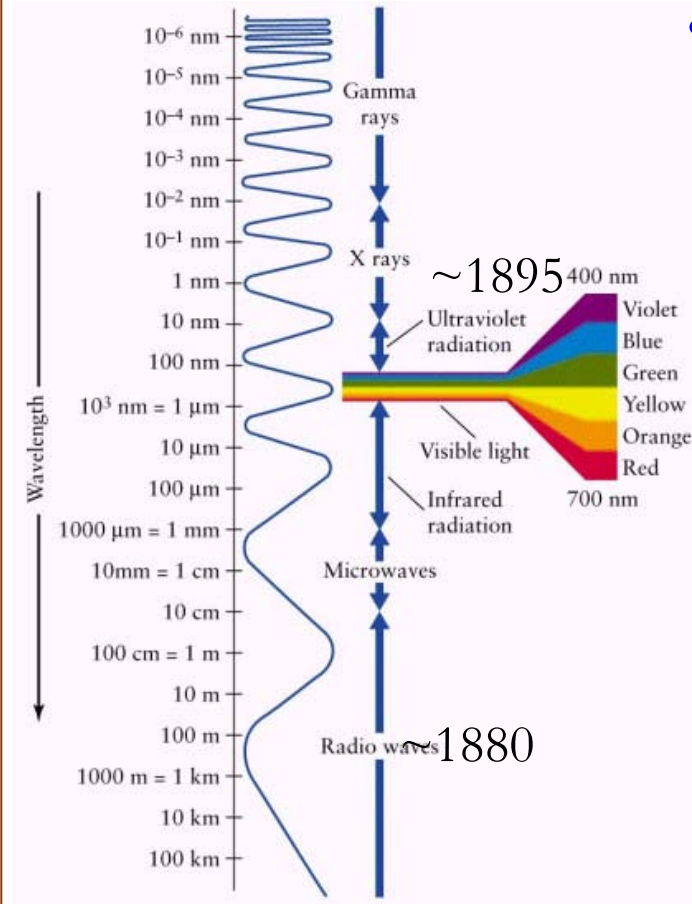
Um pouco de história (2)

- 1675: Robert Boyle descobre que as forças eléctricas também actuam no vácuo.
- 1714: Luigi Galvani realiza experiências com electricidade na dissecção de animais, fazendo com que uma rã movesse as pernas.
- 1729: Stephan Gray descobriu que a electricidade pode ser transmitida através de fios eléctricos.
- 1733: Du Fay refere a existência de dois tipos de electricidade, o que mais tarde seria identificado como "positivo" e "negativo".
- 1746: Galvani inventou o electrómetro (de *electro-* + *-metro*).
- 1750: Benjamin Franklin provoca uma descarga eléctrica durante uma tempestade e inventa o pára-raios.
- 1786: Descoberta da lei de Coulomb.
- 1800: Alessandro Volta desenvolve a pilha voltaica, precursor das baterias modernas. A pilha de Volta era capaz de produzir **corrente contínua**.
- **Até 1800 não era feita qualquer associação entre electricidade e magnetismo.**

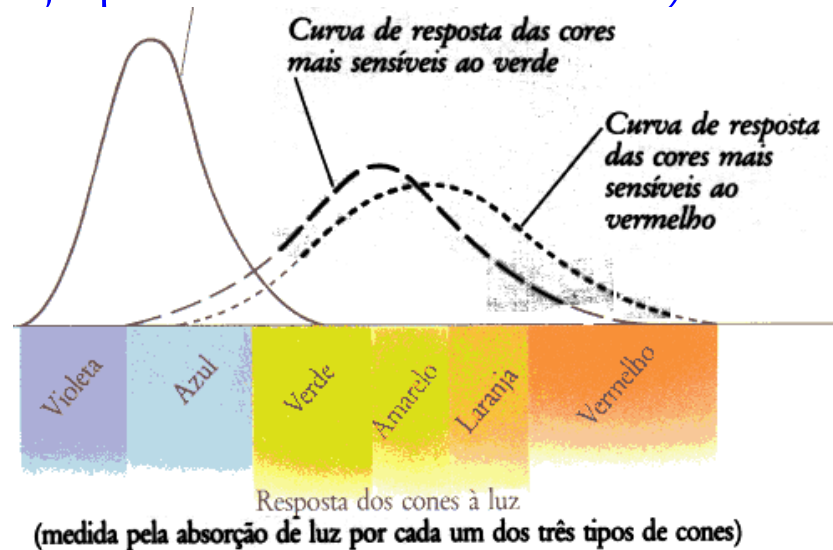




O espectro electromagnético no séc. 18



- O nosso detector óptico natural é apenas sensível às cores do arco-íris ... e apenas se conhecia a parte do espectro electromagnético *visível*, e não se sabia muito bem o que era a luz (hoje pouco mais sabemos ...)





No princípio ...

... as trevas cobriam o abismo ... e “Deus disse”»

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$(\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E})$$

e foi feita a ‘primeira criatura’ de Deus, **a luz** (Génesis 1, 1-4):

$$-\nabla^2 \vec{E} + \mu \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{J}}{\partial t^2} = -\mu \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}$$

“Deus viu que a luz era boa e separou a luz das trevas.”



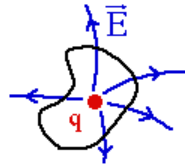


Equações de Maxwell

Maxwell's Equations

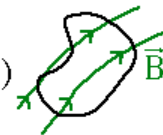
$$\oiint \vec{E} \cdot \hat{n} dS = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Gauss's Law



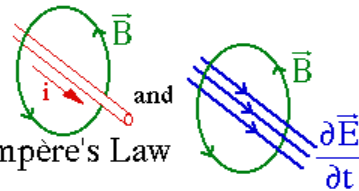
$$\oiint \vec{B} \cdot \hat{n} dS = 0$$

(no monopoles)



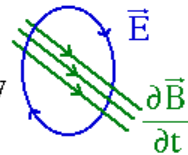
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

Ampère's Law



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

Faraday's Law



$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Differential Forms)





Em 1864 Maxwell disse ...

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$(\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P})$$

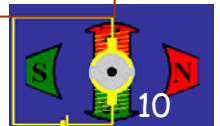
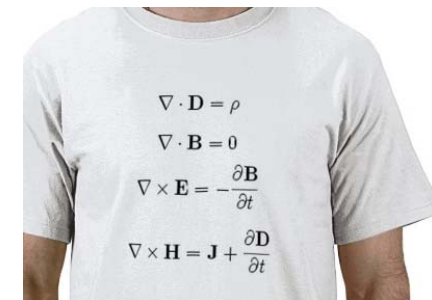
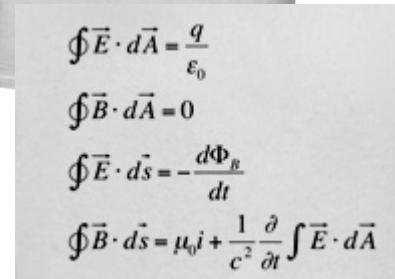
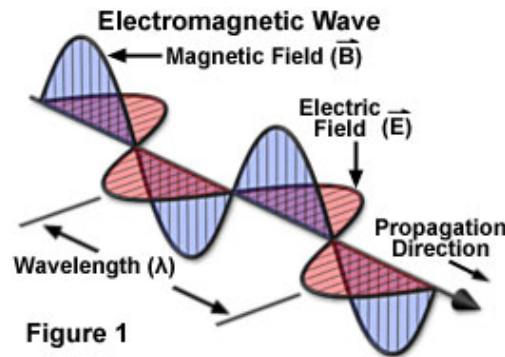
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

E fez-se luz no vácuo ($\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$, $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ e $\vec{J} = \vec{0}$):

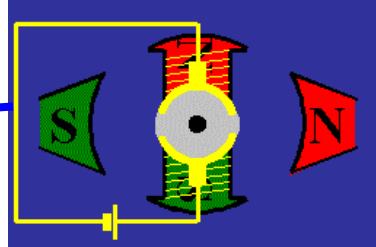
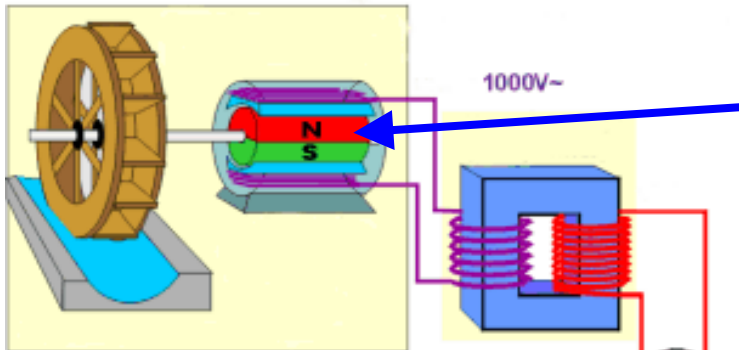
$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$





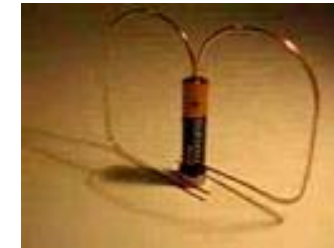
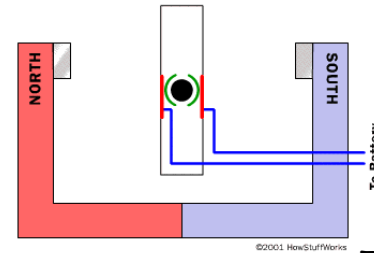
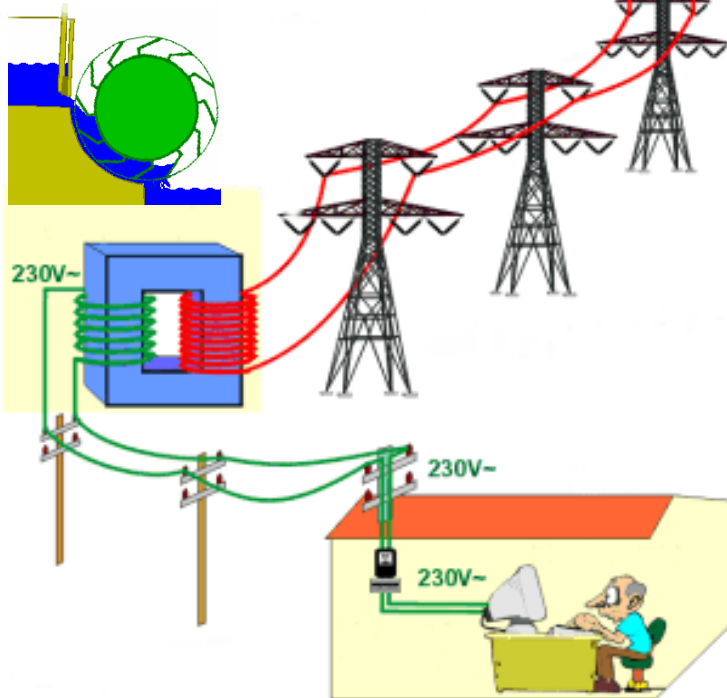
Produção de electricidade (lei de Faraday)



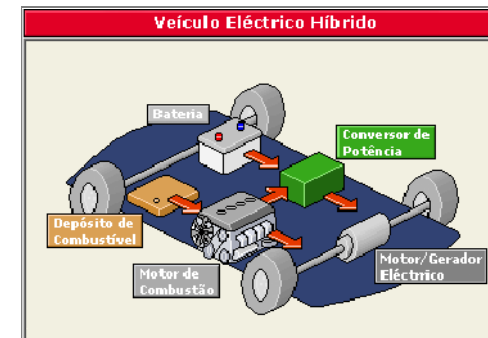
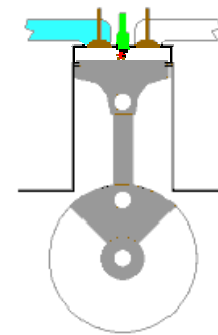
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

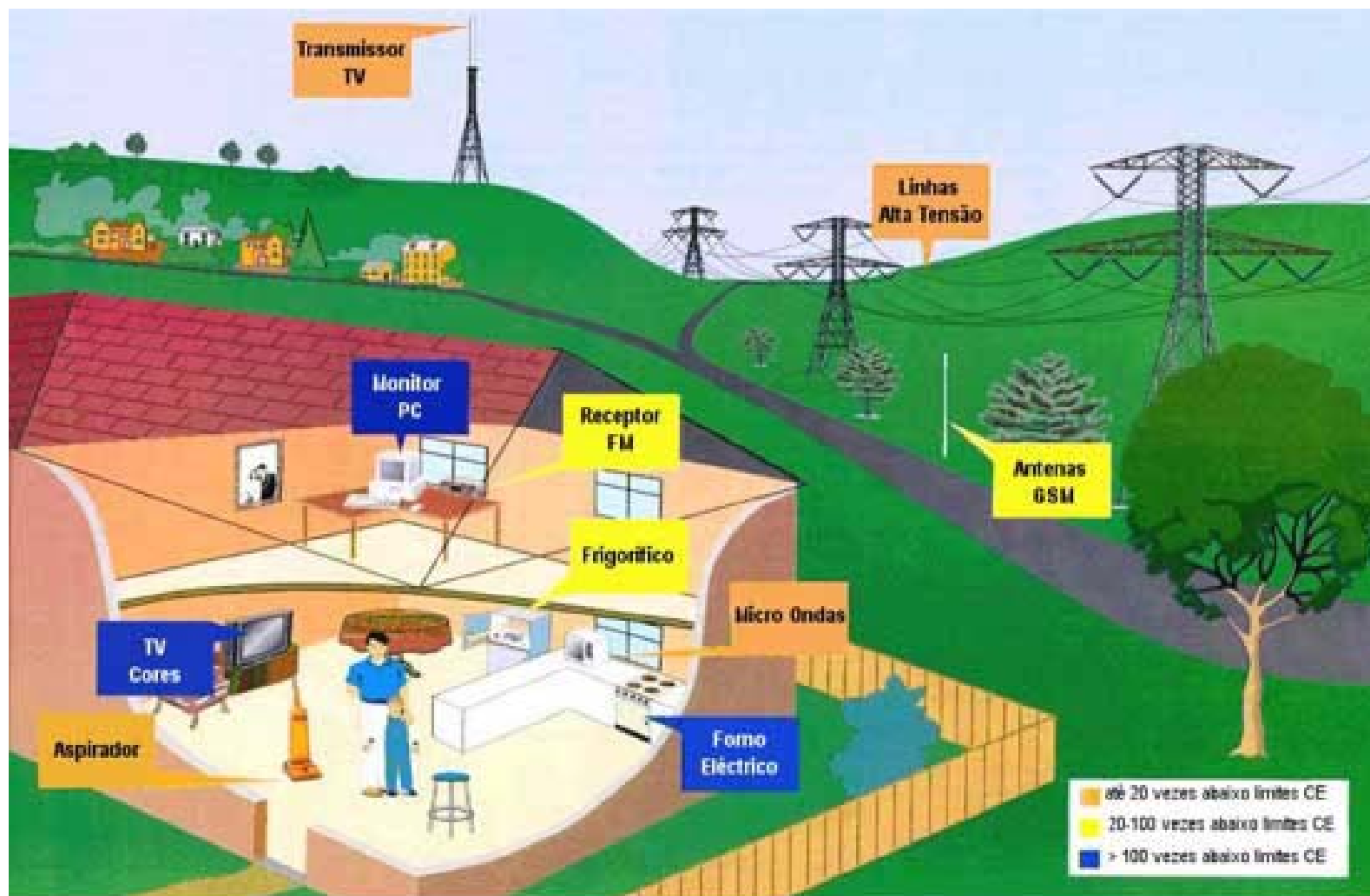
Motores e máquinas eléctricas



Thesimplestmotoroftheworld.wmv



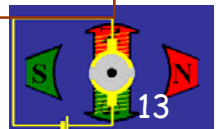
O electromagnetismo em casa





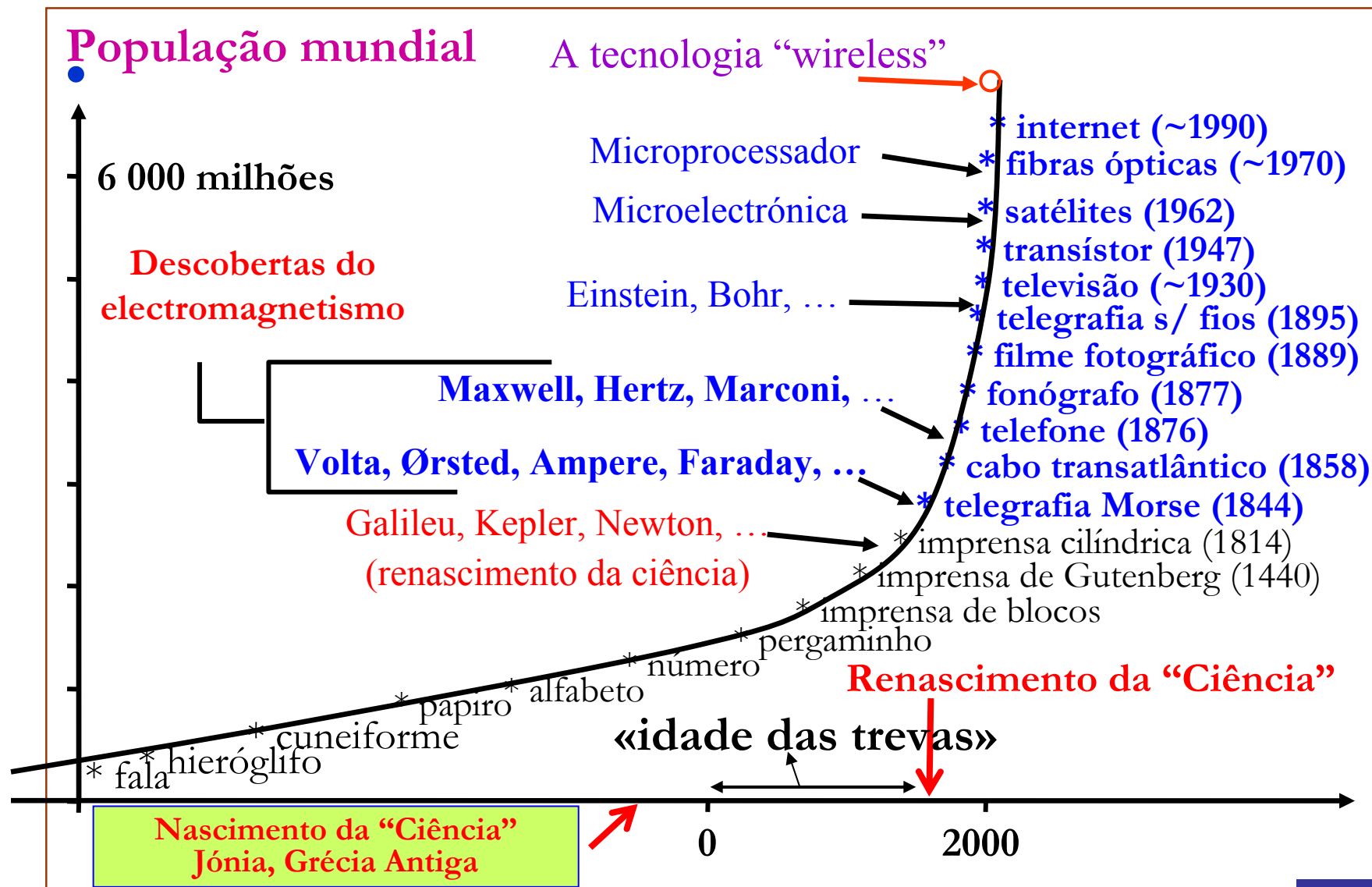
Exemplos de equipamentos

- Telegrafo eléctrico com fios, ~1840 (Morse)
- Telecópia (fax), ~1843 (Alexander Bain)
- Telefone eléctrico com fios, ~1876 (Bell)
- Telegrafo eléctrico sem fios, ~1894 (Marconi)
- Radiofonia, ~1905 (Reginald Fessenden)
- Televisão, ~1920 (Charles Jenkins, Paul Nipkow)
- Telefone sem fios (telemóvel), ~1946
- Satélites de comunicações, ~1962
- Redes de computadores, ~1976
- Fibras ópticas, ~1980
- Telemóvel moderno, anos 90.
- Tecnologia “wireless”



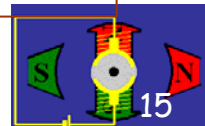
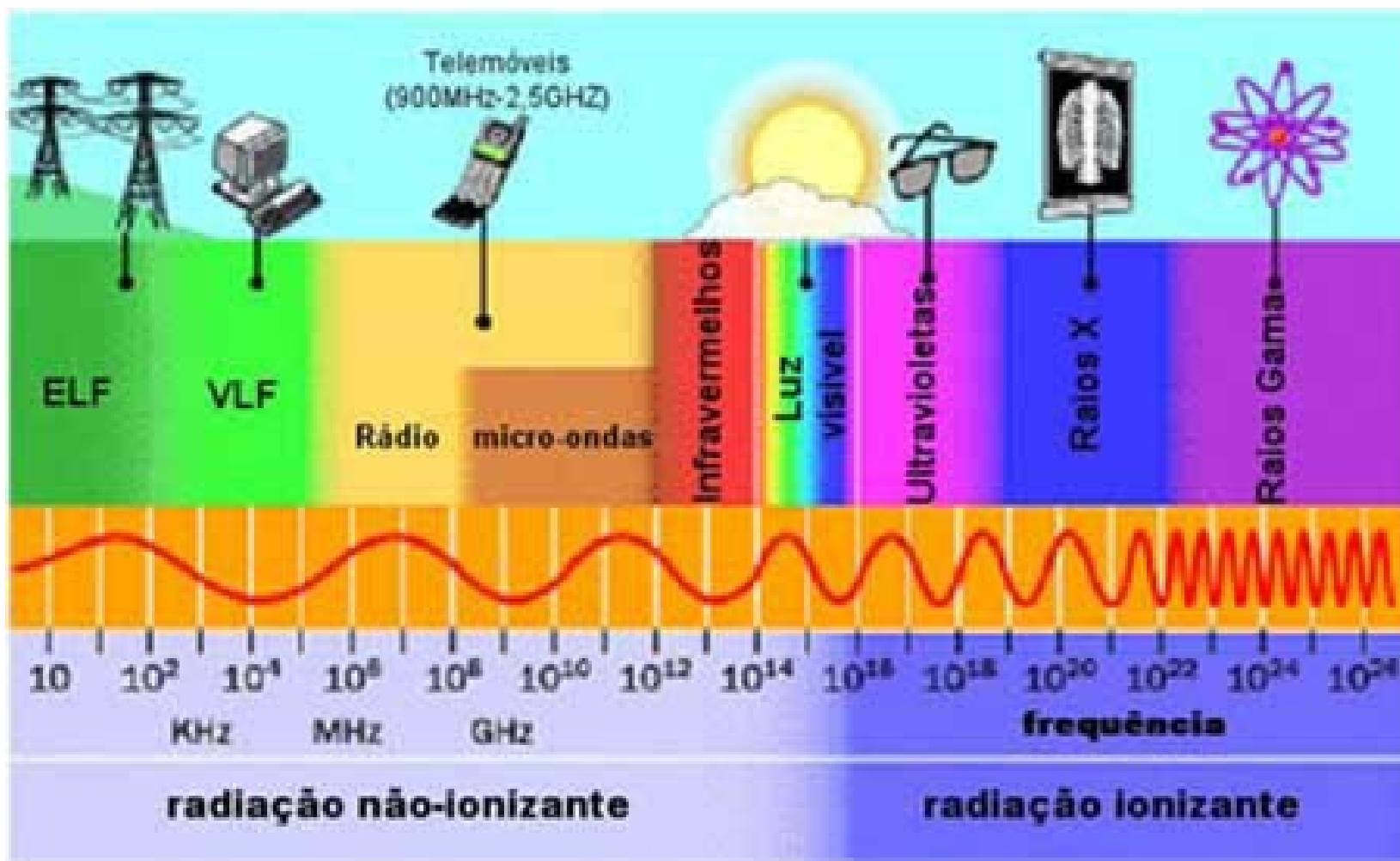


O electromagnetismo e a revolução tecnológica





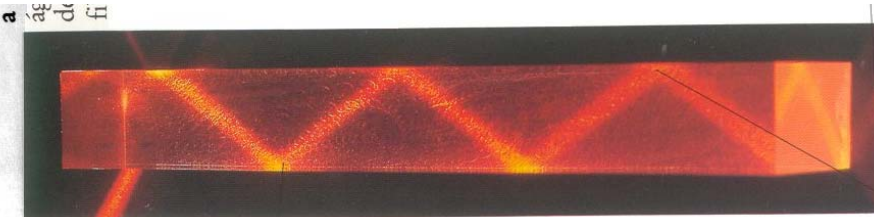
O universo electromagnético





Óptica

Se o mergulhador continuar a atingir a superfície seguiu cada vez maior. Quando atinge-se o «ângulo crítico» a luz reflete-se para dentro da água, atinge-se o «ângulo crítico» a luz reflete-se para dentro da água, atinge-se o «ângulo crítico» a luz reflete-se para dentro da água...



Os raios luminosos são reflectidos internamente e incidem nos lados da barra segundo um ângulo pequeno
APANHAR A LUZ
Nesta figura vemos um raio luminoso ser reflectido por uma barra de plástico transparente. A reflexão é «total» porque nenhuma ou pouca luz escapa da barra em cada reflexão. É «total» porque todas as reflexões ocorrem no interior da barra. Esta espécie de reflexão só acontece em determinadas circunstâncias. A luz deve deslocar-se no interior de um meio com elevado índice de refração (pág. 14), tal como a água, o vidro ou o plástico. Esse meio deve estar rodeado por outro de índice de refração inferior, tal como o ar. A luz deve incidir na linha de separação dos dois meios, segundo um ângulo pequeno.

A LEI DE REFRAÇÃO DE SNELL
Nesta experiência um feixe de luz desvia-se quando entra e sai de um bloco de vidro transparente. Quando o feixe atinge o bloco, aproxima-se mais da horizontal. Quando deixa o bloco volta a desviar-se mas na direcção oposta. A medida do desvio é muito precisa. Se o feixe entra ou sai do bloco perpendicularmente não sofre refração. Se entrar ou sair segundo um ângulo haverá refração, que será tanto maior quanto maior for o afastamento da vertical. Em 1621 o matemático holandês, também astrónomo, Willebrord Snell determinou que existia uma relação característica entre o ângulo de incidência do feixe (ângulo antes do desvio) e o seu ângulo de refração (ângulo depois do desvio). A sua lei mostra que cada substância tem um poder de refração próprio, o seu índice de refração. Quanto mais uma substância desvia a luz tanto maior o seu índice de refração.



WILLEBRORD SNELL
Willebrord Snell (1580-1626) descobriu uma das mais importantes leis respeitantes à luz. Foi também pioneiro da triangulação, método para medir distâncias usando os ângulos entre diferentes pontos.

Nearsightedness and Farsightedness

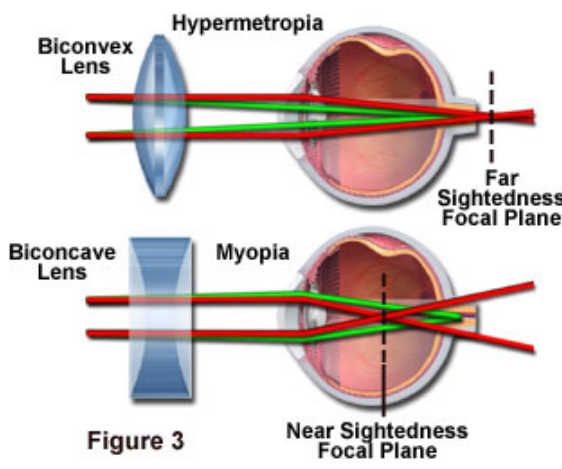
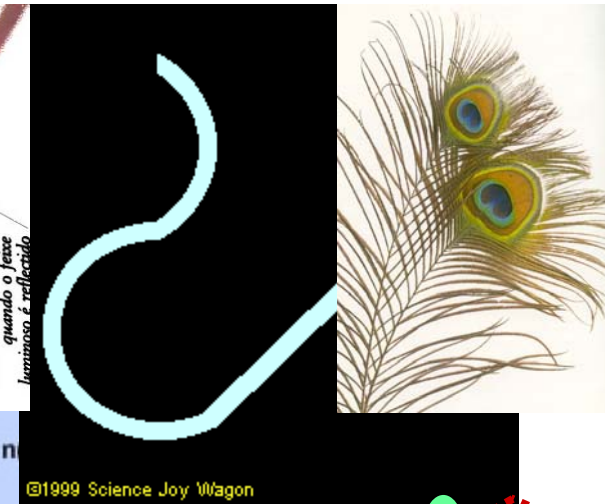
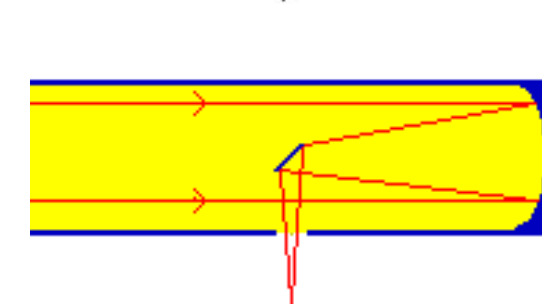
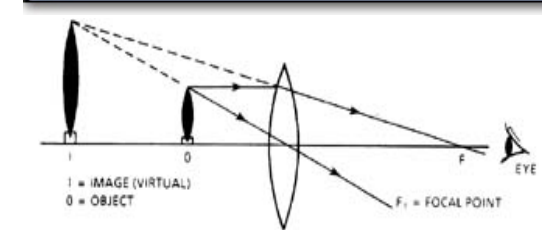
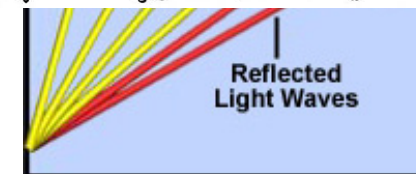
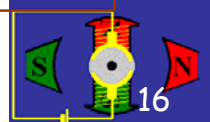


Figure 3



Nenhuma luz escapa quando o feixe luminoso é reflectido

@1999 Science Joy Wagon





Electrostática

•

Lei de Coulomb e Campo Eléctrico

electrostática

s. f.

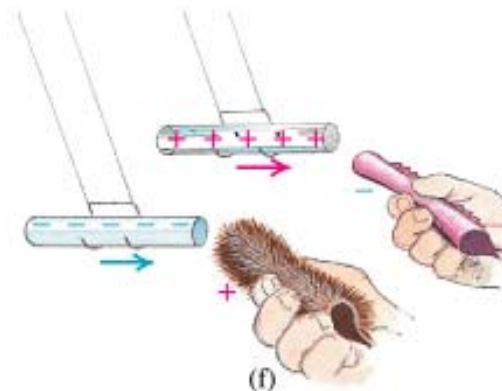
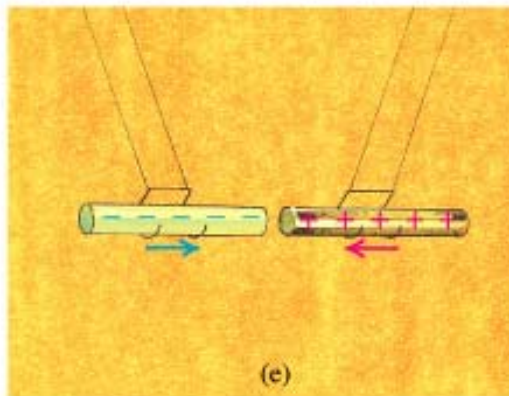
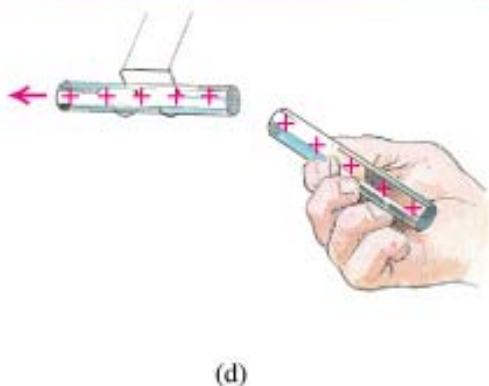
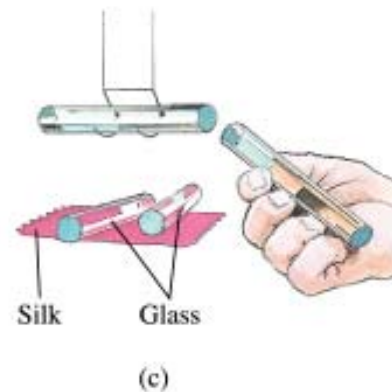
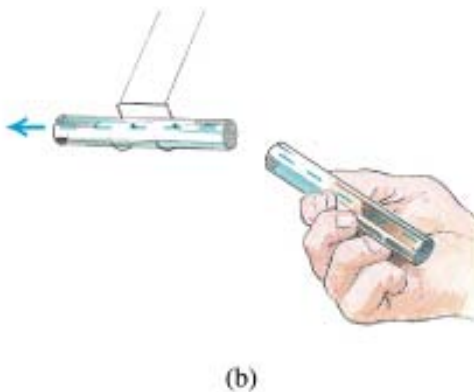
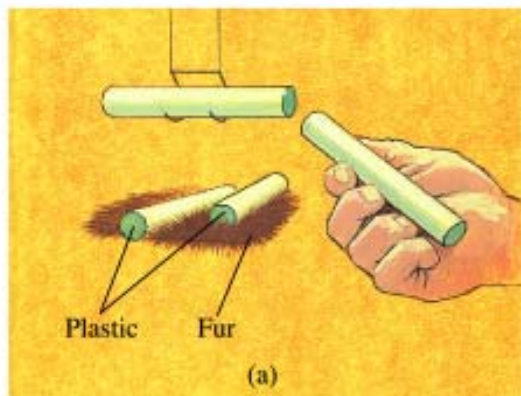
estudo das propriedades das cargas eléctricas em repouso.

(De electro- + estático)





Carga eléctrica e força eléctrica



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Série triboelétrica

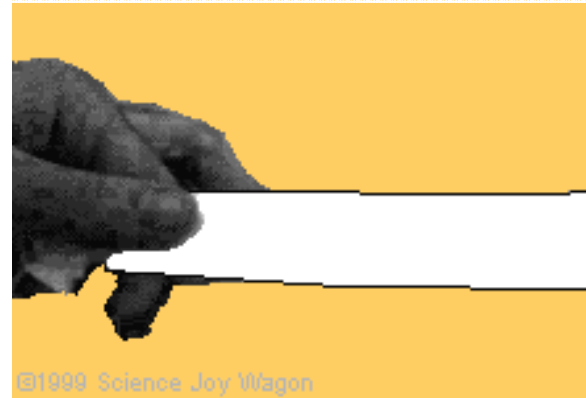
Série triboelétrica
Amianto
Pele de coelho
Vidro
Mica
Cabelo humano
Nylon
Lã
Algodão
Âmbar
Borracha
Celulóide
PVC
Teflon



Maior facilidade em receber electrões

Esfregando uma fita de PVC com lã
Qual deles adquire carga negativa?

Esfregando uma fita de nylon com lã
Qual deles adquire carga negativa?



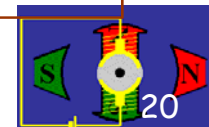
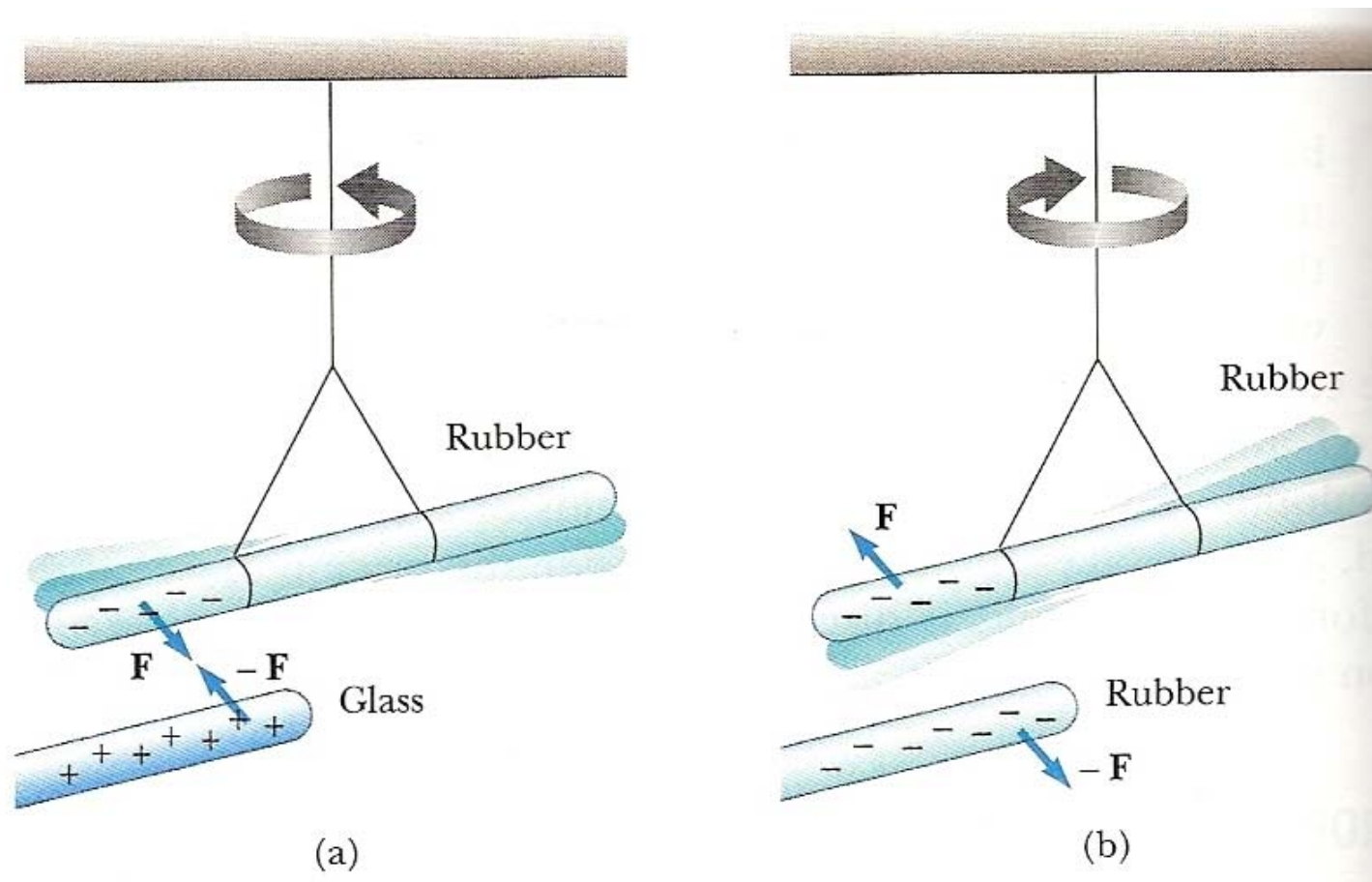
Triboelectricidade: s. f. electricidade desenvolvida por fricção (De tribo- + electricidade).

Triboluminescência: s. f. produção de luz visível durante a trituração e pulverização de sólidos (De tribo- + luminescência).





Carga eléctrica e força eléctrica (2)



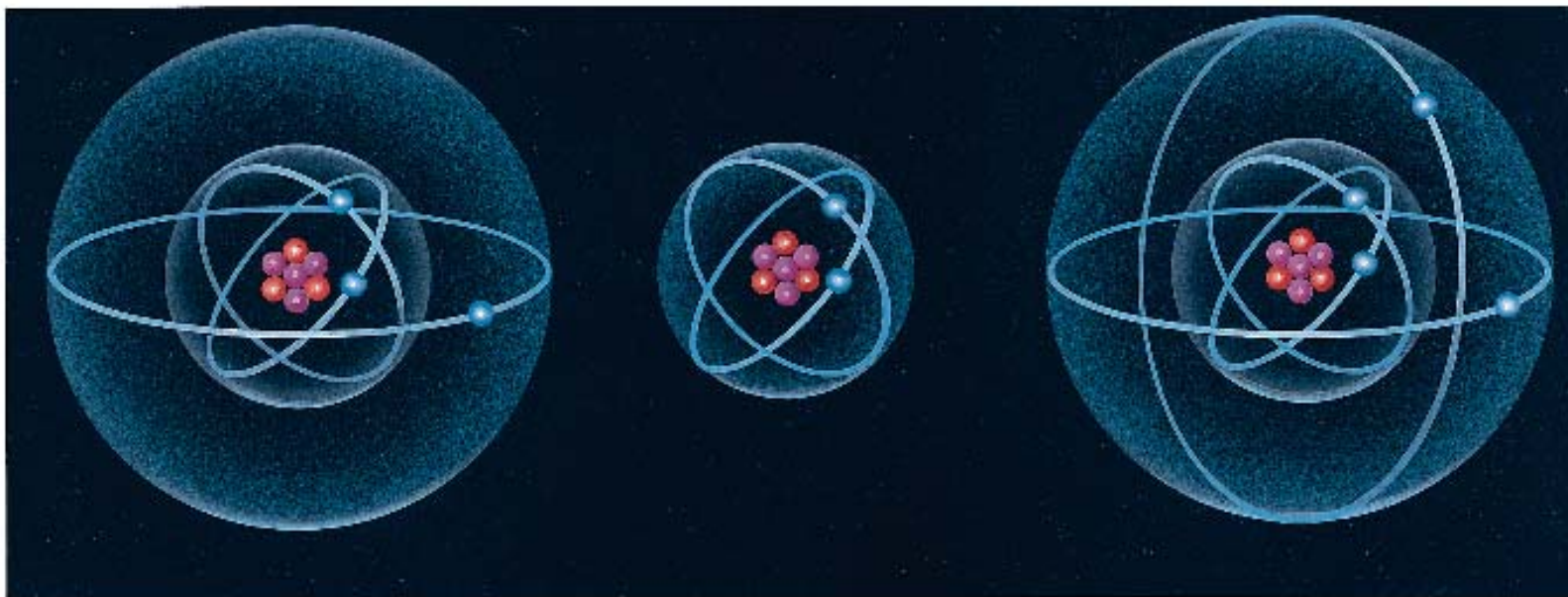


Carga eléctrica e estrutura da matéria

Átomo lítio: electricamente neutro 3 protões e 3 electrões.

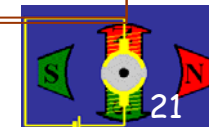
Catião Li: falta um electrão – carga efectiva é positiva.

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



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

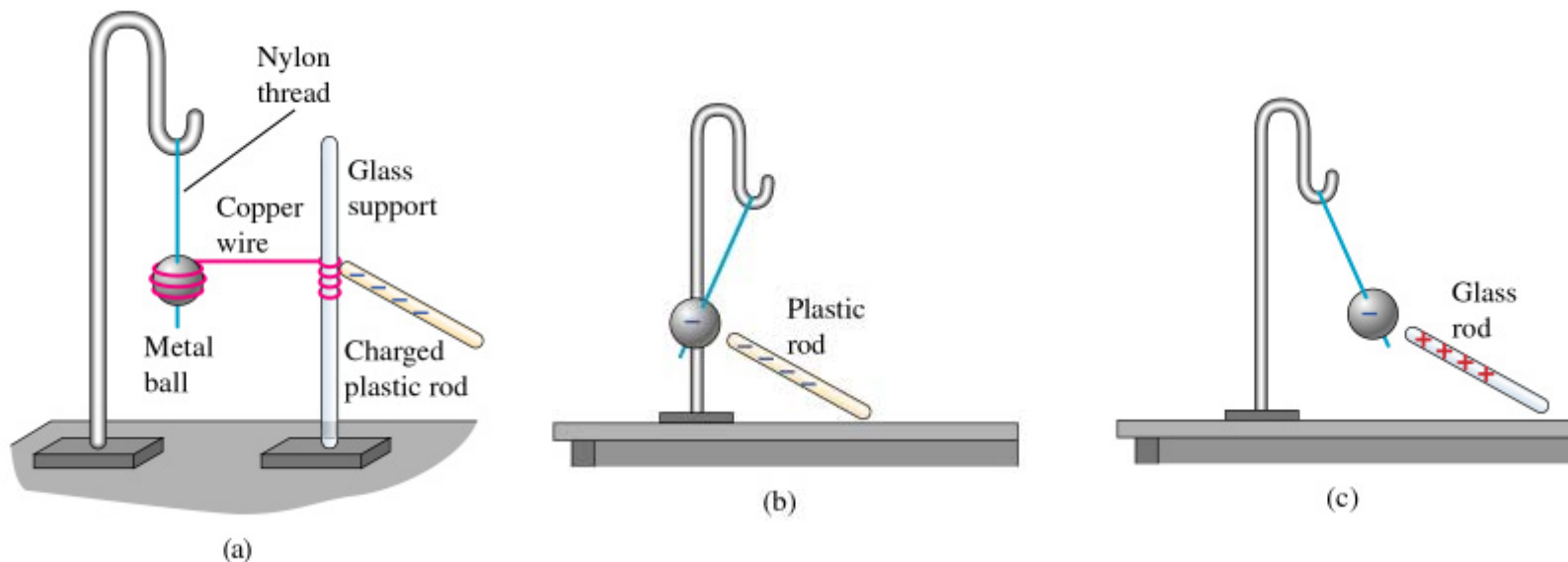
Lítio(quím.) elemento n.º 3 da classificação periódica, que é um metal alcalino, branco e pouco denso, utilizado em várias ligas para aumentar a rigidez e a resistência à corrosão. (Do gr. líthos, «pedra» + -io).



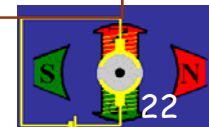


Condutores e isoladores

- A bola metálica está carregada negativamente como mostra a figura (a)

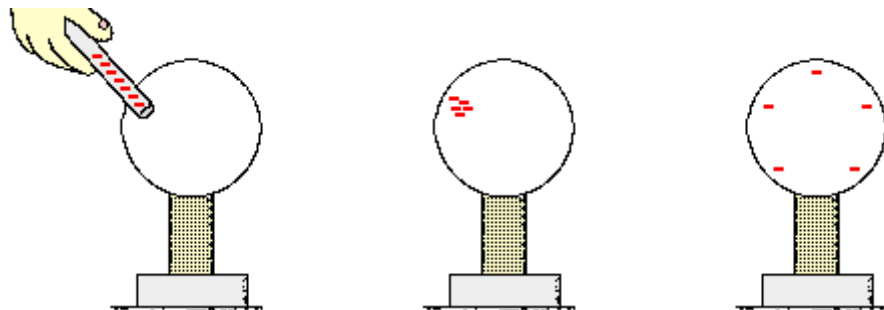


O cobre é um bom condutor de electricidade;
A prata e o ouro são muito bons condutores de electricidade.
O vidro e o nilon são bons isoladores;
Há ainda os semicondutores ...

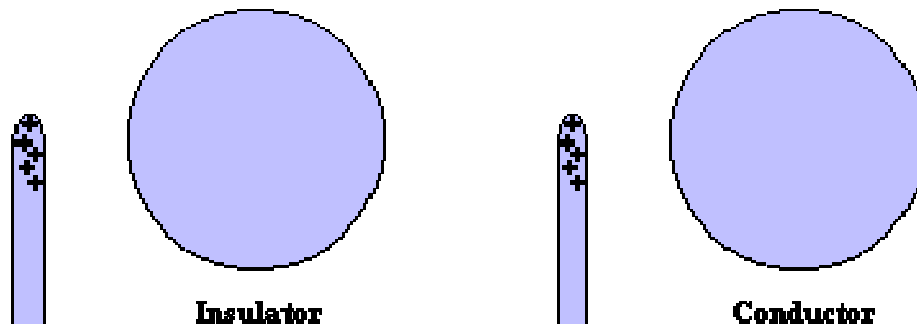




Condutores e isoladores (2)



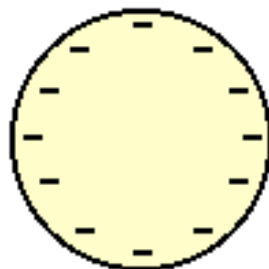
Nos condutores as cargas eléctricas têm tendência a distribuir-se uniformemente à sua superfície.



Esfera A



Esfera B



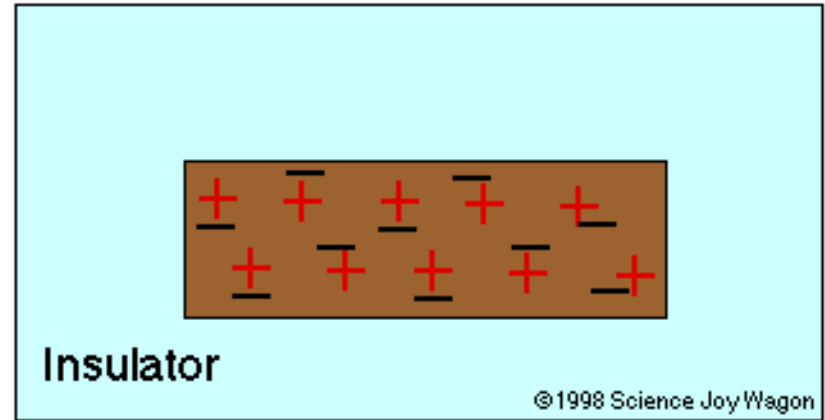
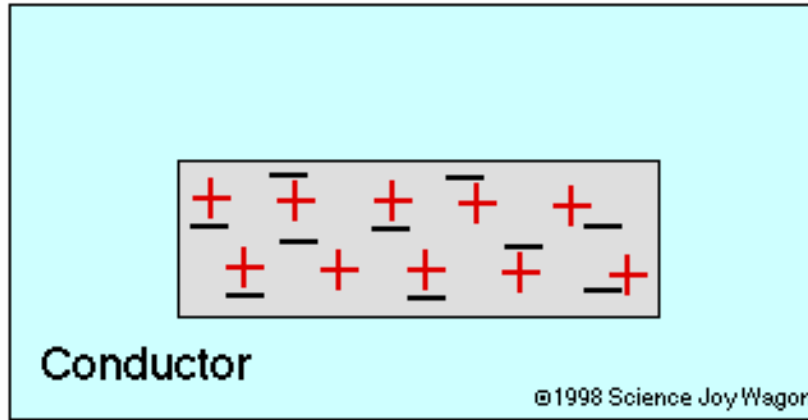
Uma das esferas é de cobre e a outra é de borracha. Identifica-as.

A – borracha; B - cobre



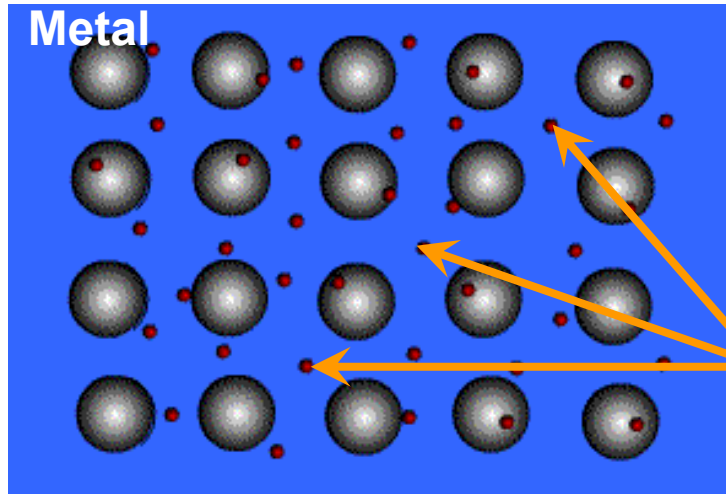


Condutores e isoladores (3)



Nos condutores as cargas eléctricas têm liberdade de movimento.

Nos dielectricos formam-se dipolos resultantes de um afastamento dos centros de distribuição de carga positiva e negativa.

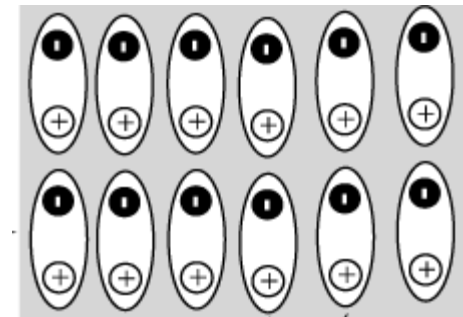


Metal

Electrões livres ou de condução



Moléculas polarizadas

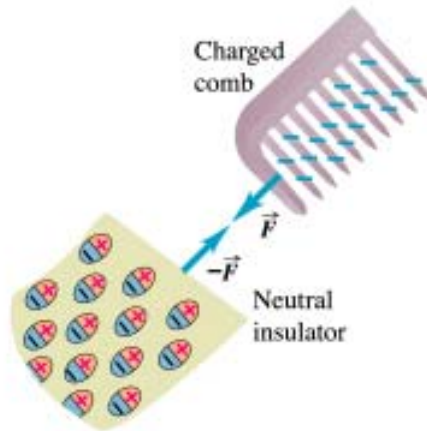




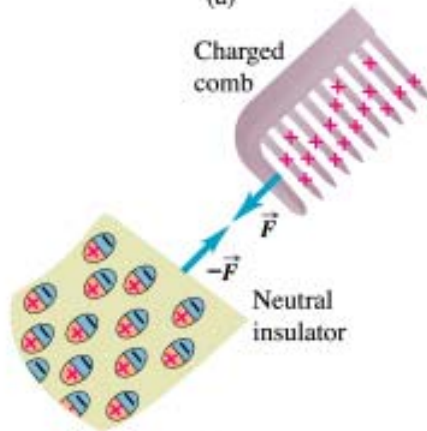
Indução e polarização

Indução electrostática: (electr.) criação de um estado de electrização num corpo, inicialmente no estado neutro, pela aproximação de outro corpo com carga eléctrica; o m. q. influência electrostática.

Num isolador as cargas eléctricas das moléculas/átomos podem *deslocar-se* ligeiramente das suas posições (efeito designado por **polarização** do isolador) na presença de um corpo electrizado. Como consequência os bocados de papel são atraídos pelo pente carregado.

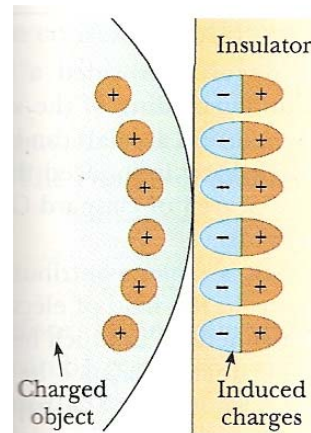


(a)

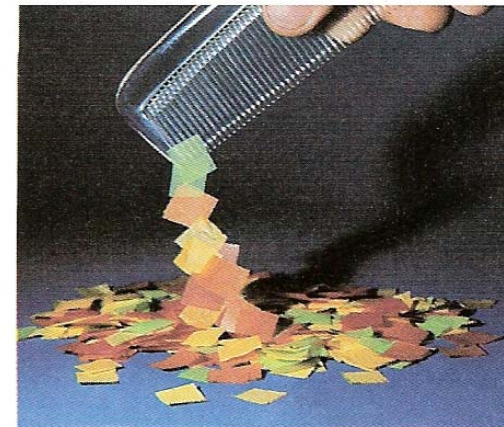


(b)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



(a)



(b)

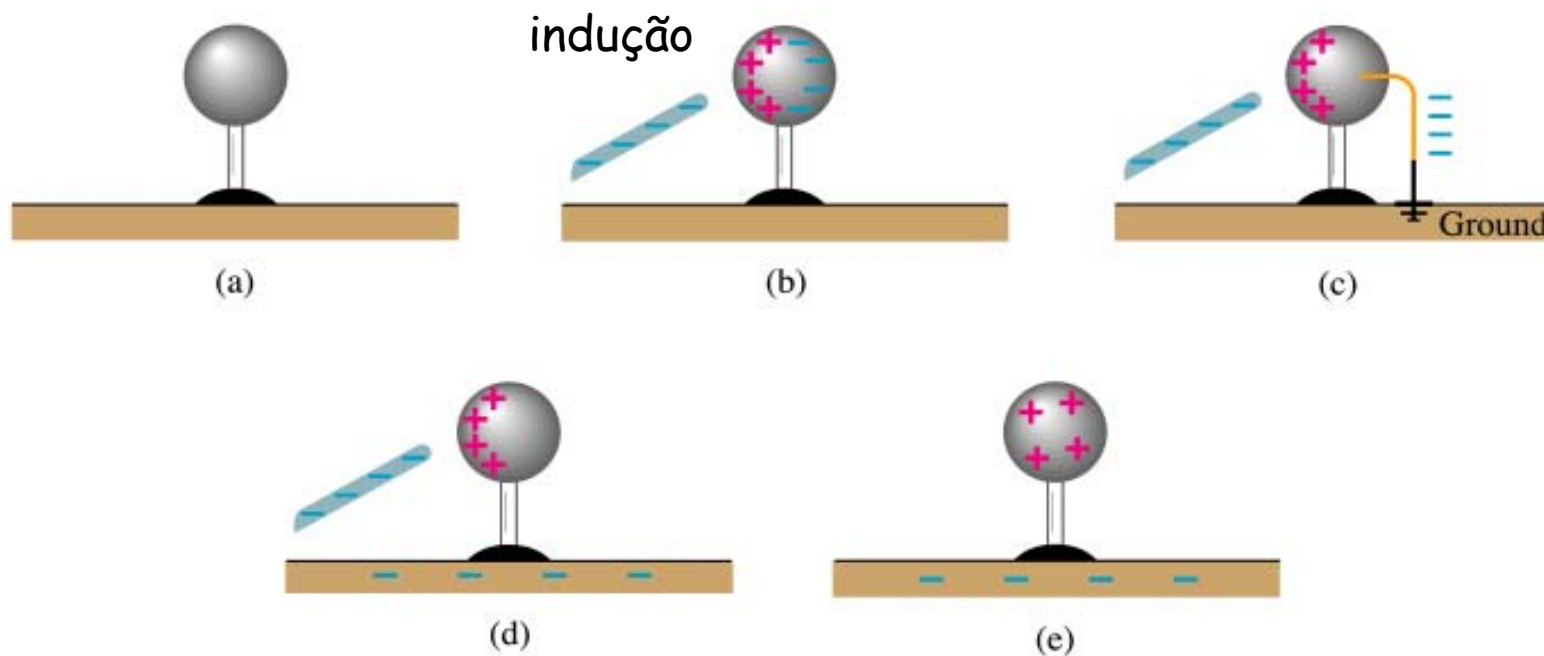




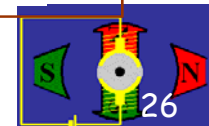
Cargas induzidas

CARREGAR UMA ESFERA METÁLICA POR INDUÇÃO

- Num condutor as cargas eléctricas negativas (electrões) são livres de se moverem no material. Mas num isolador estão fortemente ligadas ao núcleos atómicos. A terra (chão) é um bom condutor, funcionando como um reservatório de electrões livres.



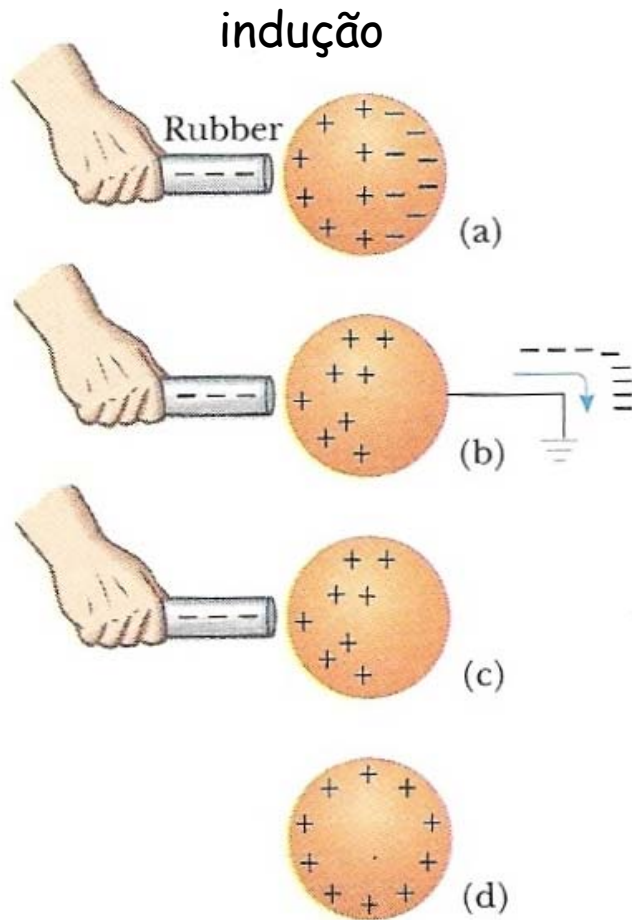
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



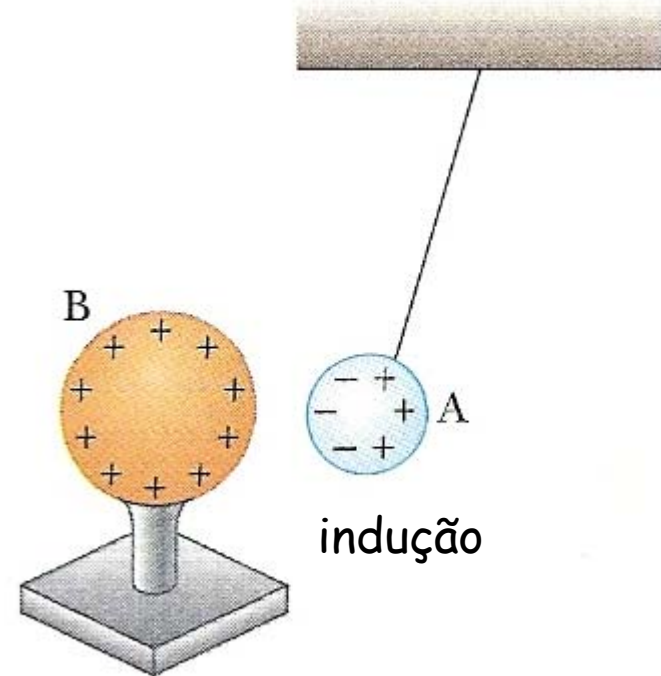


Cargas induzidas (2)

- Carga de um objecto metálico por indução



Um corpo carregado pode atrair outro corpo neutro

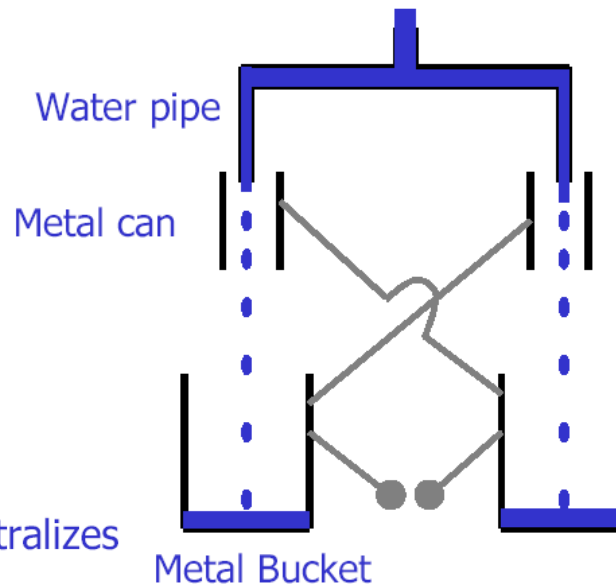
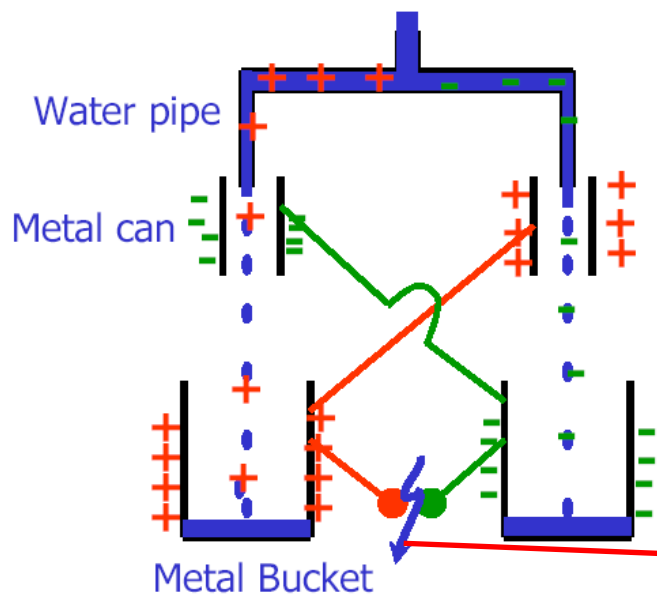


O corpo A (neutro) foi polarizado pelo corpo B carregado

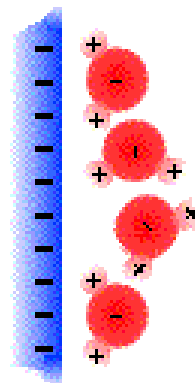
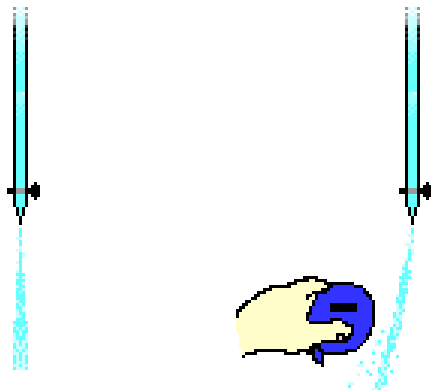




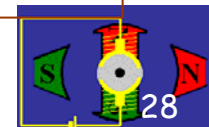
Bateria a partir de latas e água



http://www.youtube.com/watch?v=oY1eyLEo8_A



As moléculas de água são polares e orientam-se ao serem atraídas pelo objecto carregado.





Electróforo

HÁ UM APARELHO DE ELECTROSTÁTICA QUE PODEMOS CONSTRUIR EM CASA: O **ELECTRÓFORO**.

INVENTADO POR VOLTA DE 1775!

PRECISARÁS DE UMA PLACA DE PLÁSTICO PARA A BASE, DE UMA BANDEJA DE METAL COM UMA PEGA ISOLADORA (NESTE CASO, A TAÇA DE ESFEROVITE).

ESFREGUE A BASE COM SEDA OU LÃ, PARA A CARREGAR.

PONHA A BANDEJA METÁLICA SOBRE A BASE E TOQUE NA TRAVESSA COM UM DEDO.

DE SEGUIDA, ERGA A BANDEJA PELA PEGA ISOLADORA.

VERÁ QUE É FÁCIL PRODUIZIR FAÍSCAS ENTRE A BANDEJA E OS SEUS DEDOS...
... OU MESMO PRODUIZIR LUZ COM UMA LÂMPADA FLUORESCENTE.

115

El electróforo fue ideado en el siglo XVIII por Johannes Wilcke y Alessandro Volta

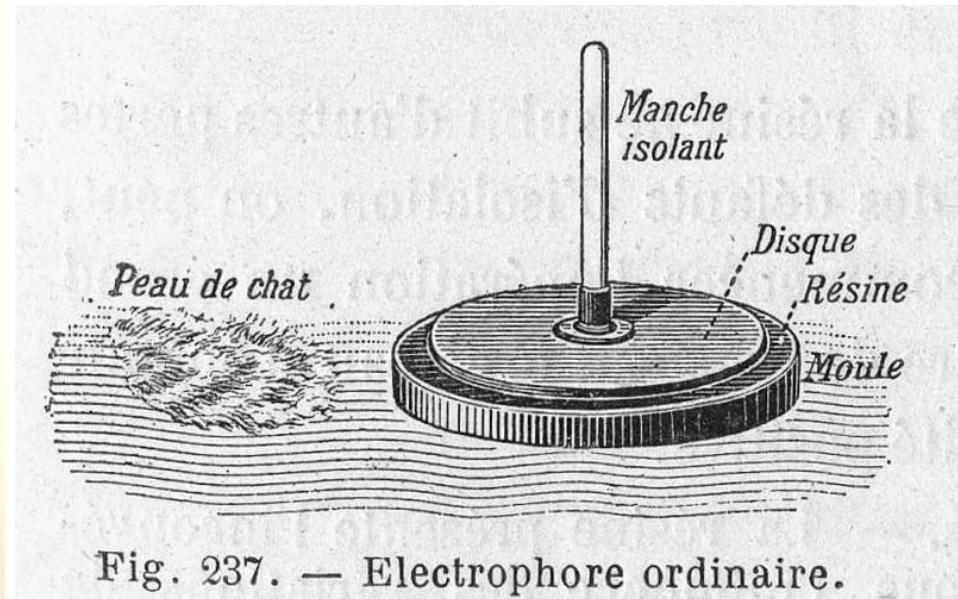
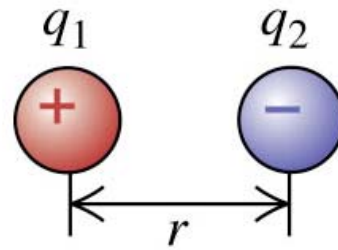
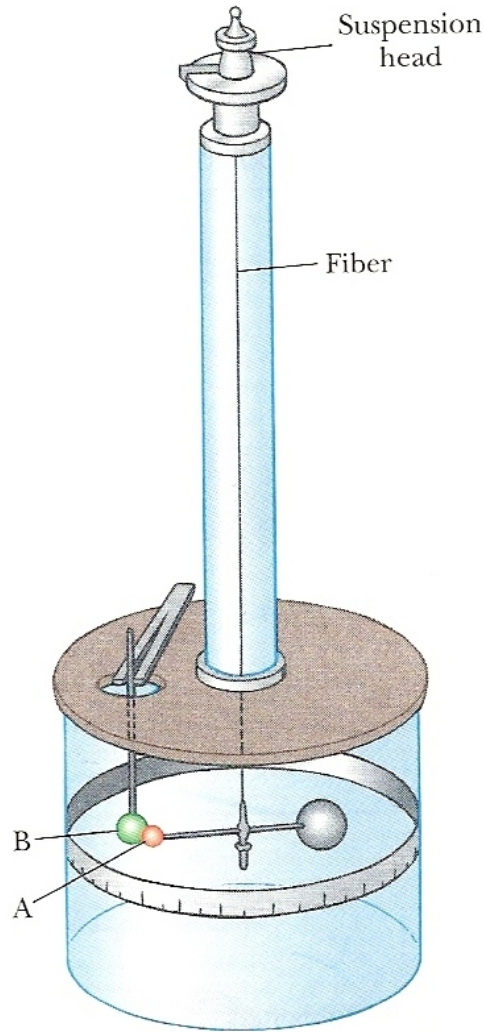


Fig. 237. — Electrophore ordinaire.

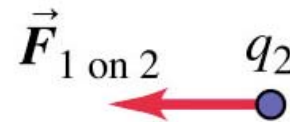




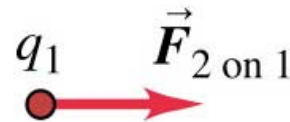
Lei de Coulomb



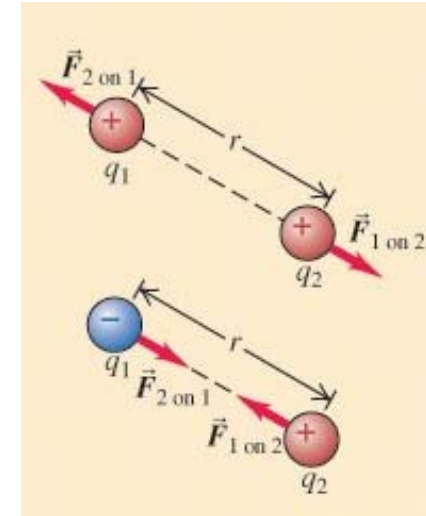
(a)



(b)



(c)



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

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

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





Lei de Coulomb (2)

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.

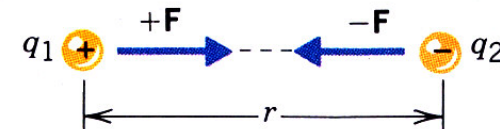
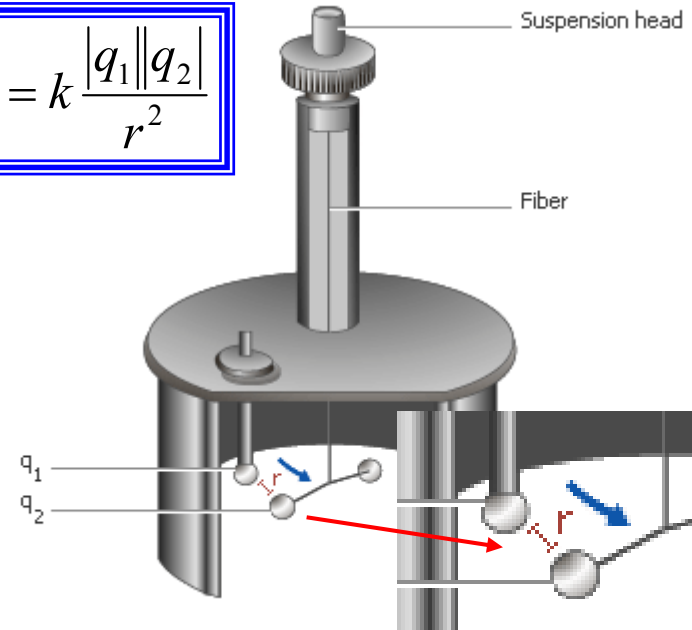
$$|\vec{F}_{\text{elétrica}}| = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$



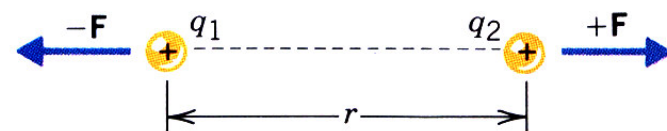
Balança de torção de Coulomb



Charles Coulomb
1736-1806

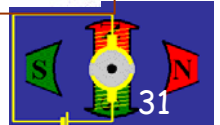


(a)



(b)

Copyright John Wiley & Sons





Força eléctrica versus força gravítica

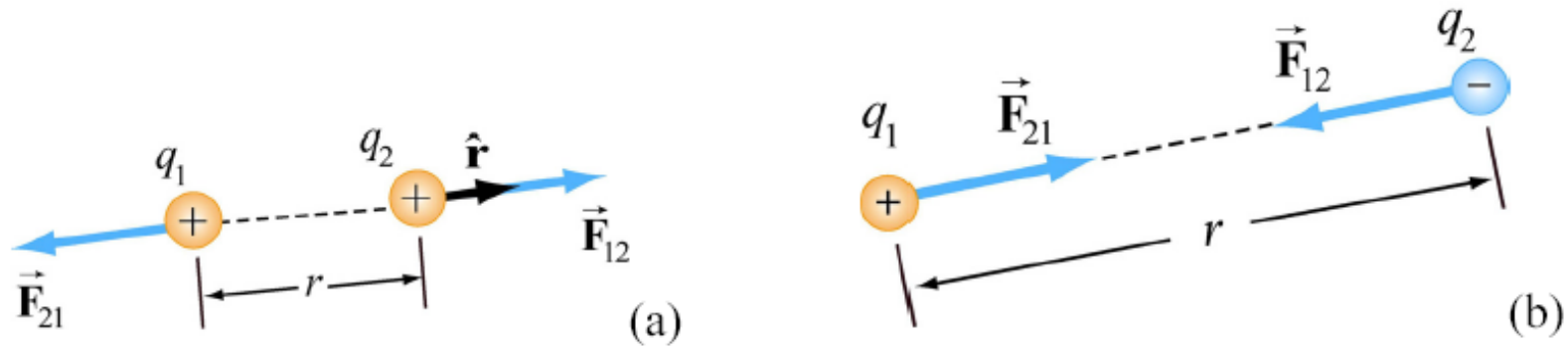


Figure 2.2.1 Coulomb interaction between two charges

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

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

Força eléctrica no electrão no átomo de hidrogénio

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

$$F_g \approx 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

$$F_e / F_g \sim ?$$

Força eléctrica no electrão numa partícula alfa

$$F_e / F_g \sim 3 \times 10^{35}$$





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

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

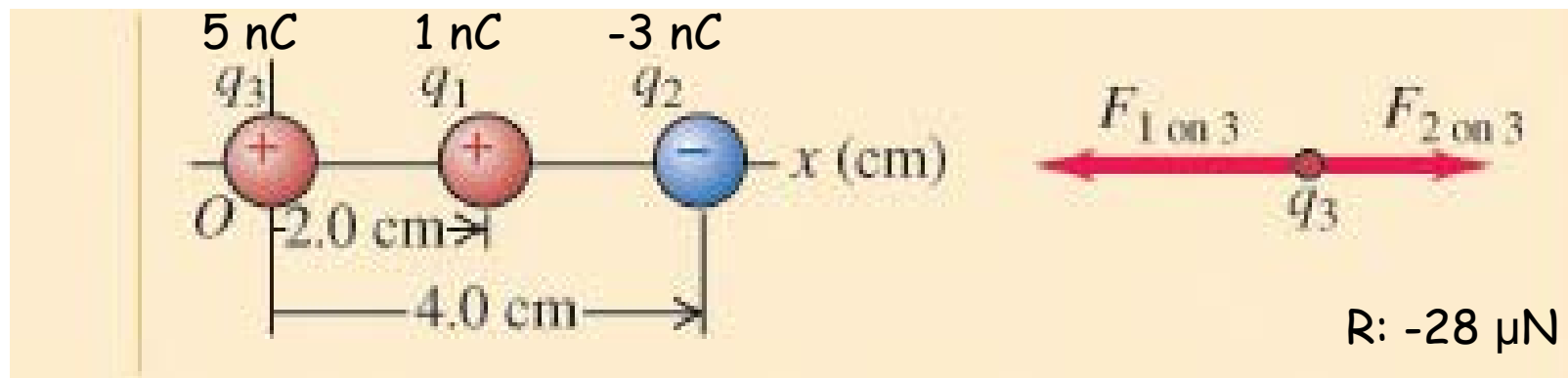
where $\vec{\mathbf{F}}_{ij}$ denotes the force between particles i and j . The superposition principle implies that the net force between any two charges is independent of the presence of other charges. This is true if the charges are in fixed positions.





Exercício: princípio de sobreposição

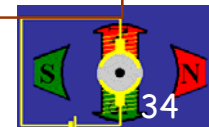
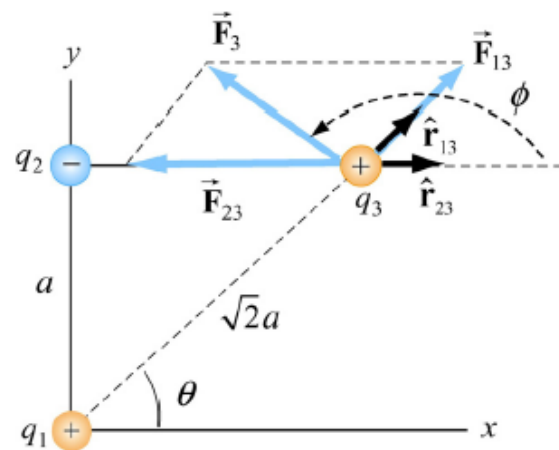
- Qual é a força total em q_3 ?



Three charges are arranged as shown in Figure 2.3.1. Find the force on the charge q_3 assuming that $q_1 = 6.0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_2 = -q_1 = -6.0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_3 = +3.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ and $a = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$.

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23} \quad \vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1 q_3}{r_{13}^2} \hat{r}_{13} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}^2} \hat{r}_{23} \right)$$

$$\hat{r}_{13} = \cos\theta \hat{i} + \sin\theta \hat{j} = \frac{\sqrt{2}}{2} (\hat{i} + \hat{j})$$



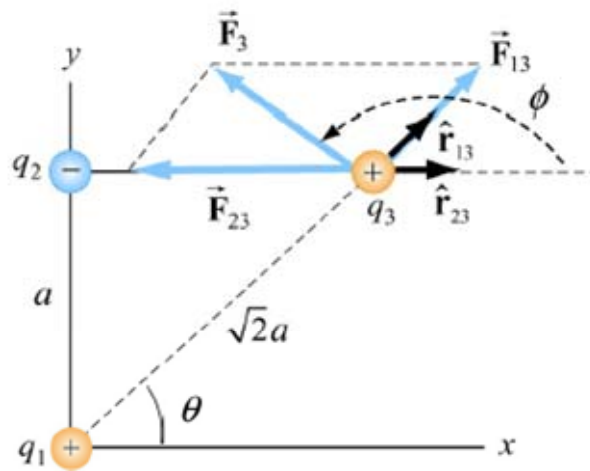


Exercício: princípio de sobreposição (2)

$$\vec{F}_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1 q_3}{r_{13}^2} \hat{r}_{13} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}^2} \hat{r}_{23} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1 q_3}{(\sqrt{2}a)^2} \frac{\sqrt{2}}{2} (\hat{i} + \hat{j}) + \frac{(-q_1) q_3}{a^2} \hat{i} \right)$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_3}{a^2} \left[\left(\frac{\sqrt{2}}{4} - 1 \right) \hat{i} + \frac{\sqrt{2}}{4} \hat{j} \right]$$

Three charges are arranged as shown in Figure 2.3.1. Find the force on the charge q_3 assuming that $q_1 = 6.0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_2 = -q_1 = -6.0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_3 = +3.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ and $a = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$.



$$F_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_3}{a^2} \left[\left(\frac{\sqrt{2}}{4} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{4} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) \frac{(6.0 \times 10^{-6} \text{ C})(3.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2} (0.74) = 3.0 \text{ N}$$

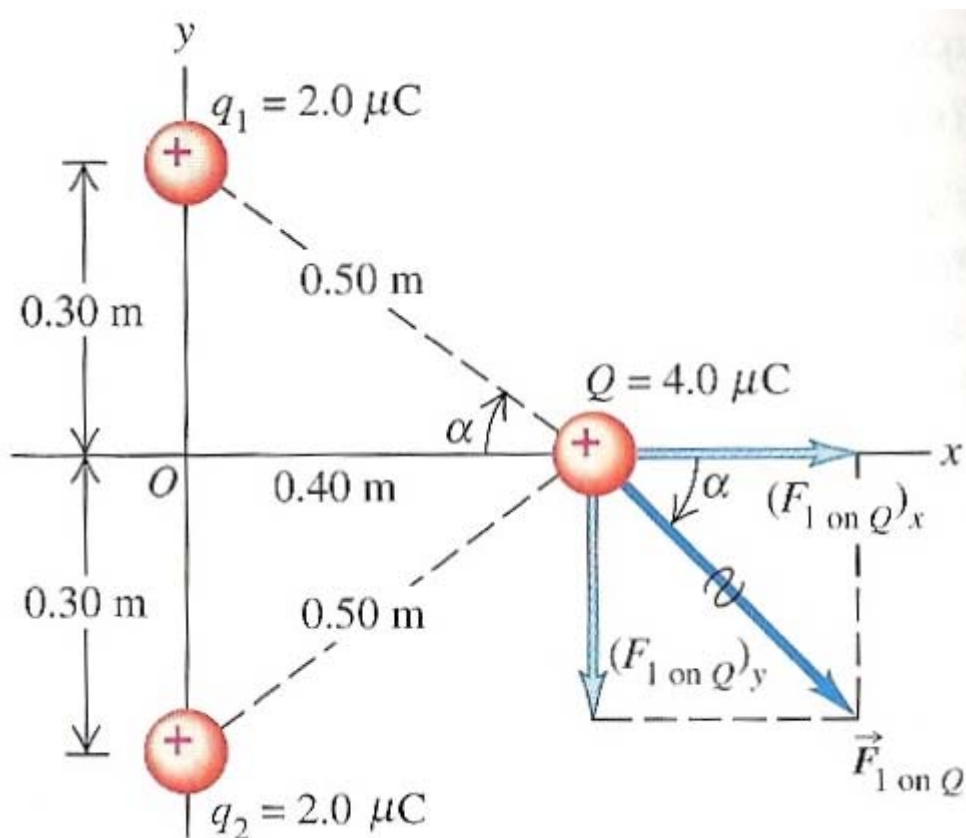
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{F_{3,y}}{F_{3,x}} \right) = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{2}/4}{-1 + \sqrt{2}/4} \right] = 151.3^\circ$$





Exercício: princípio de sobreposição (3)

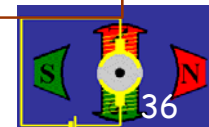
- Determinar a Força total em Q.



R: $F_x = 0,46 \text{ N}$ e $F_y = 0 \text{ N}$

E se q_2 for igual a $-2 \mu\text{C}$?

R: $F_x = 0 \text{ N}$ e $F_y = -0,34 \text{ N}$





Campo eléctrico

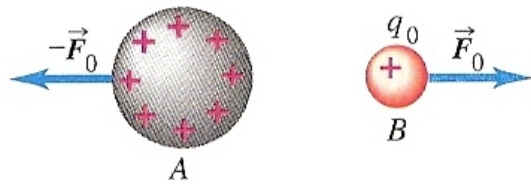
Um **campo eléctrico** é o campo de forças provocado por cargas eléctricas (electrões, protões ou iões) ou por um sistema de cargas.

Cargas eléctricas num campo eléctrico estão sujeitas a uma força eléctrica.

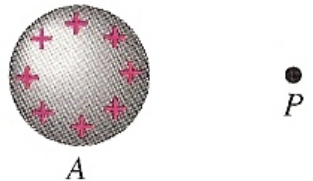




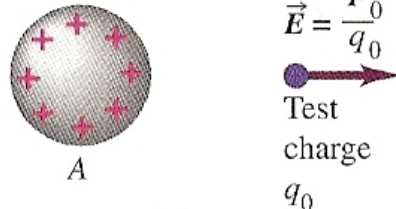
Campo eléctrico



(a)



(b)

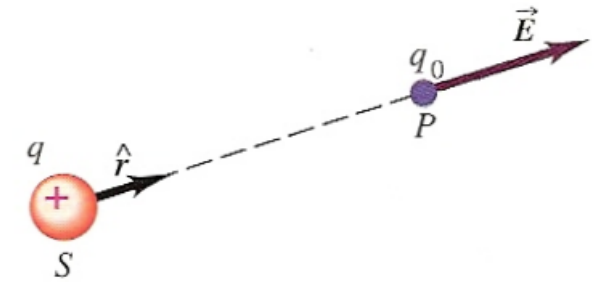


(c)

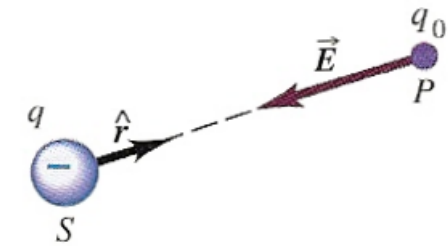
22-10 A charged body creates an electric field in the space around it.



(a)



(b)



(c)



Campo eléctrico (2)

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

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

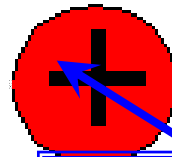
CAMPO ELÉCTRICO

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

Carga criadora



$\vec{F}_{\text{elétrica}}$

Carga de prova



\vec{E}

$\vec{F}_{\text{elétrica}}$

Presence of electric field: unknown

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





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.

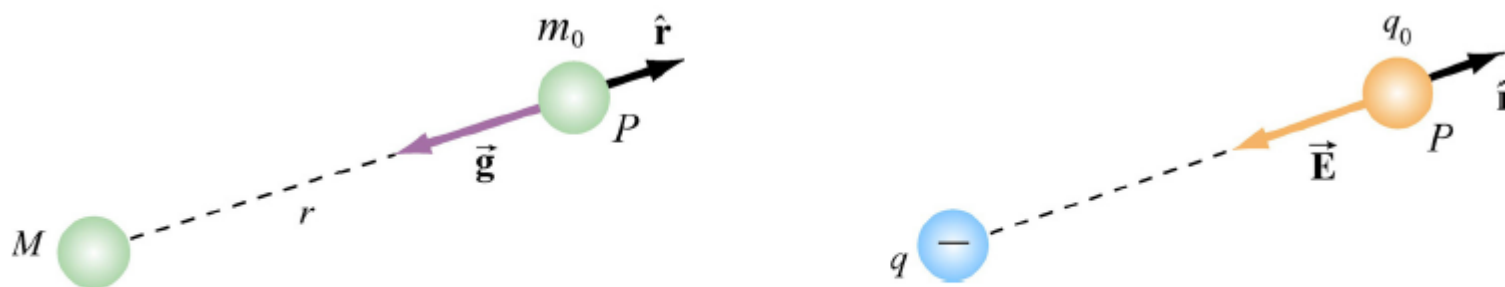
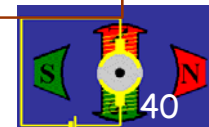
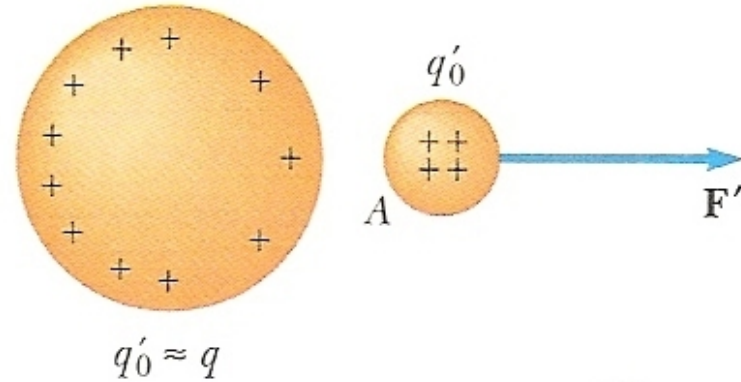
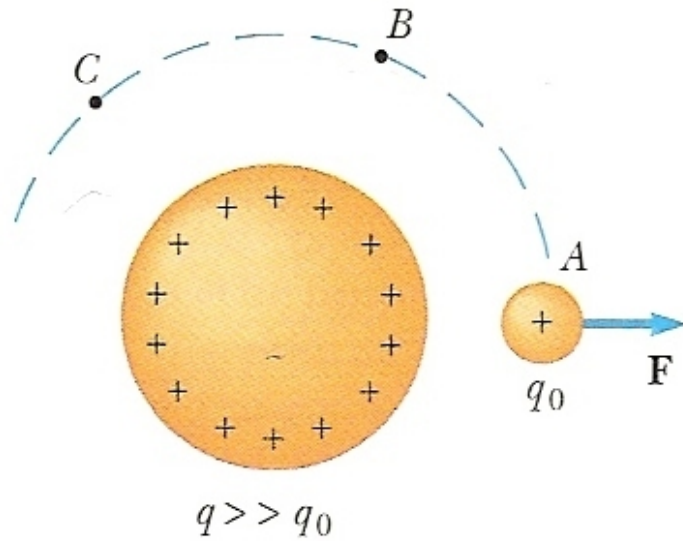


Figure 2.4.1 Analogy between the gravitational field \vec{g} and the electric field \vec{E} .





Campo eléctrico (4)

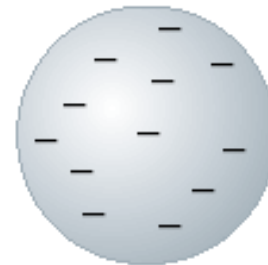


Na definição de E porque é que q_0 deve tender para zero?

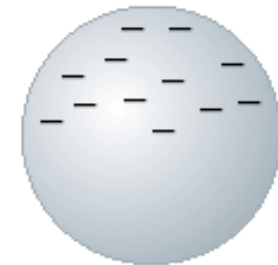
$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$

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

$+ q_0$



$+ q'_0 \gg q_0$





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

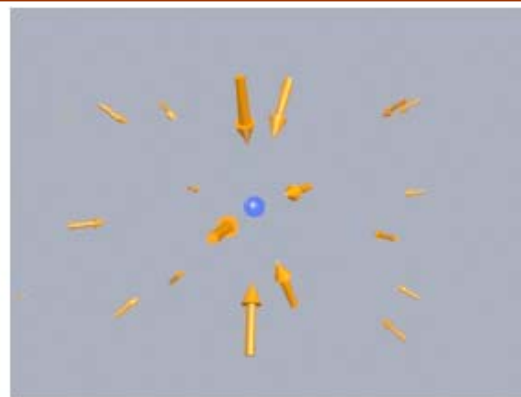
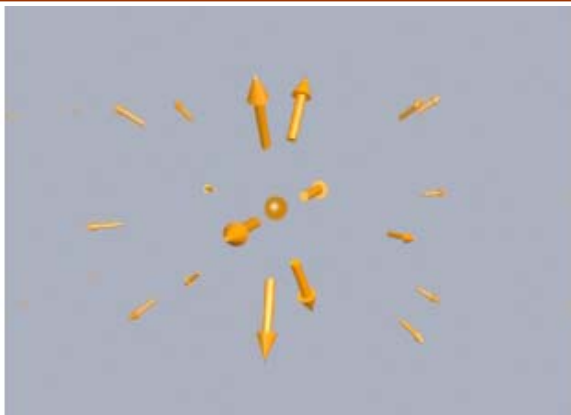
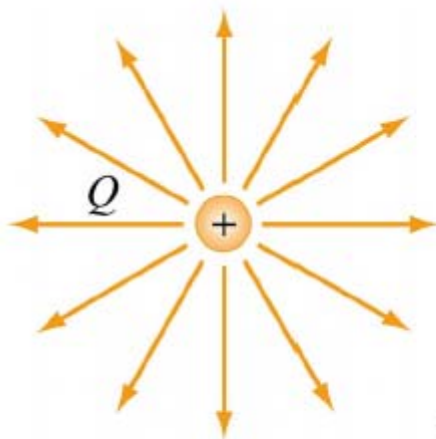
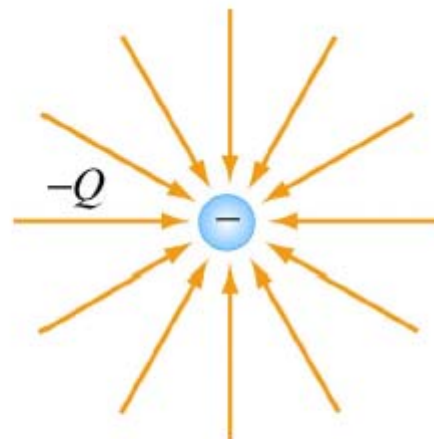


Figure 2.4.2 The electric fields of (a) a moving positive charge, (b) a moving negative charge, when the speed of the charge is small compared to the speed of light.

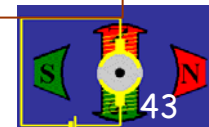


(a)



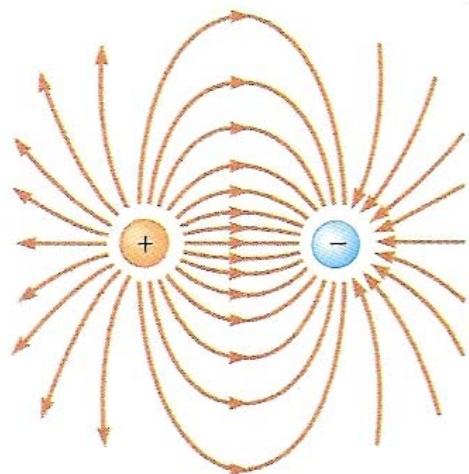
(b)

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

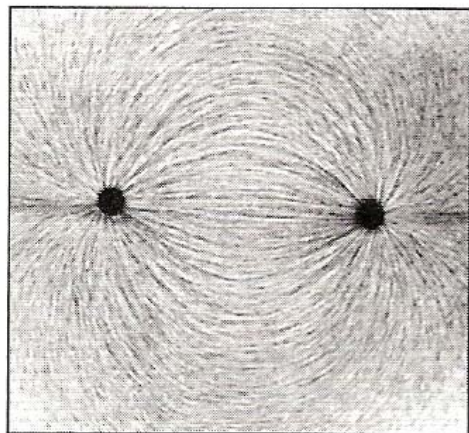




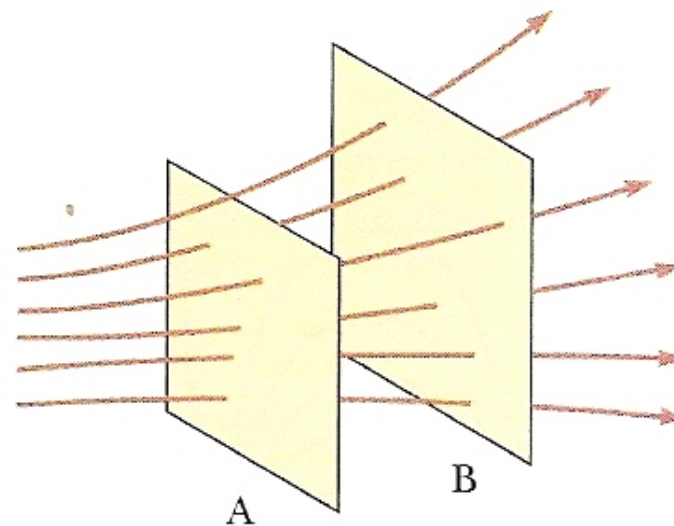
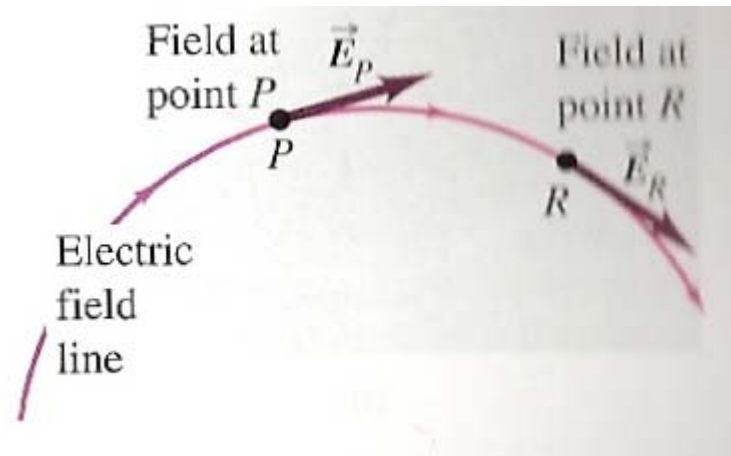
Linhas de campo eléctrico (2)



(a)

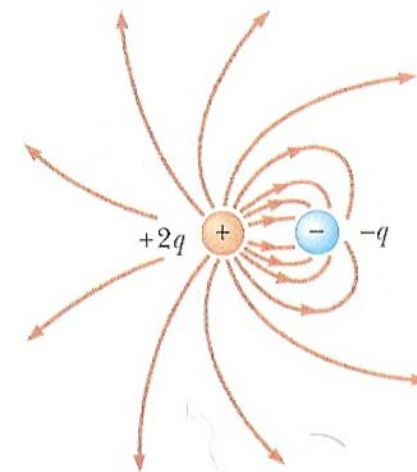
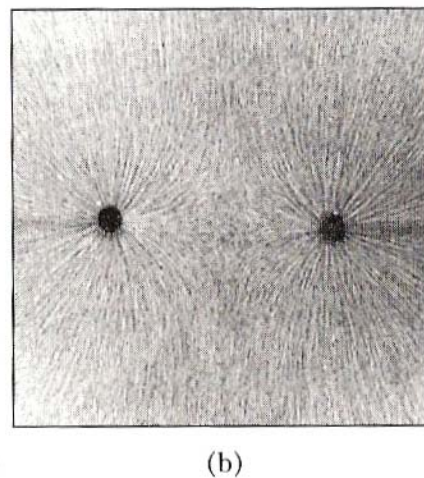
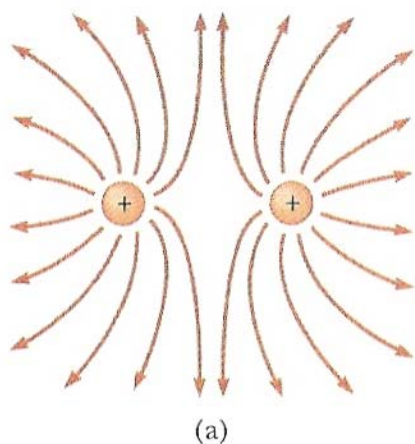
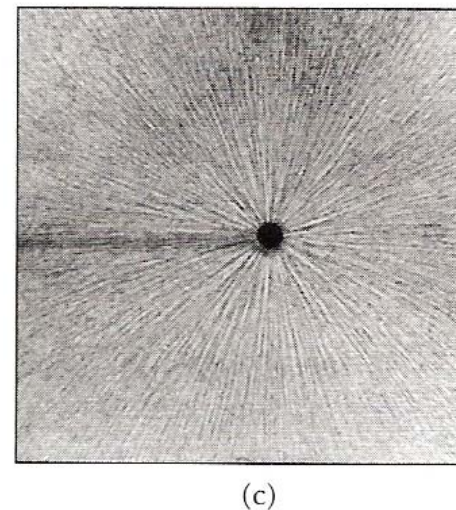
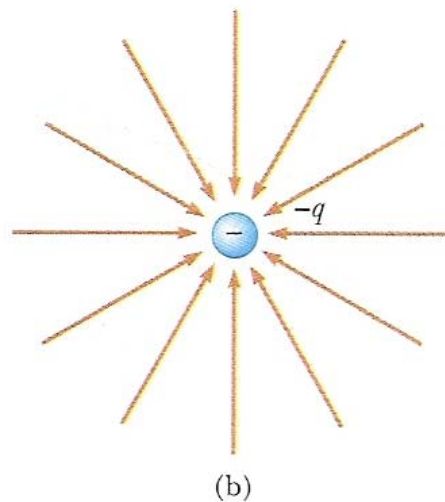
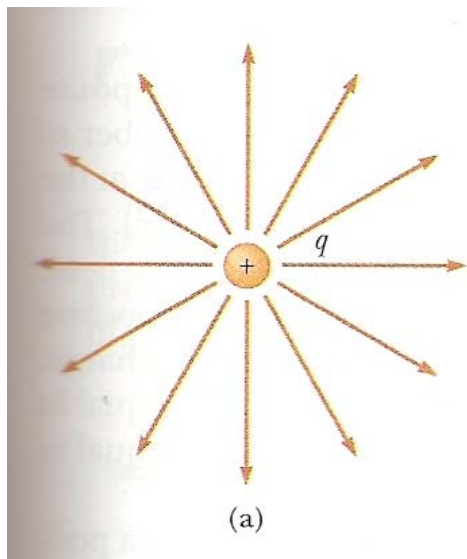


(b)



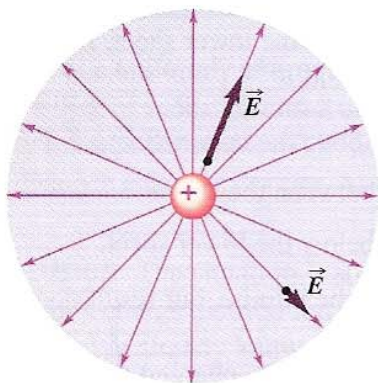


Linhas de campo eléctrico (3)

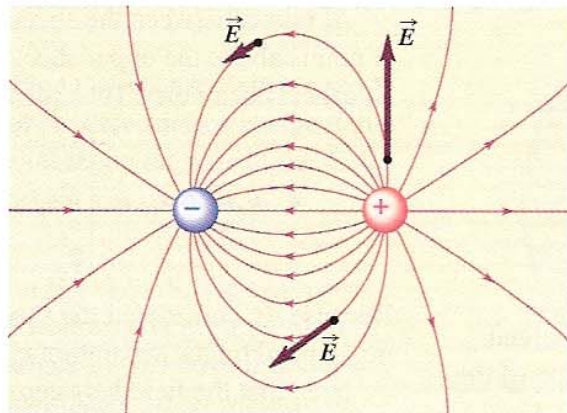




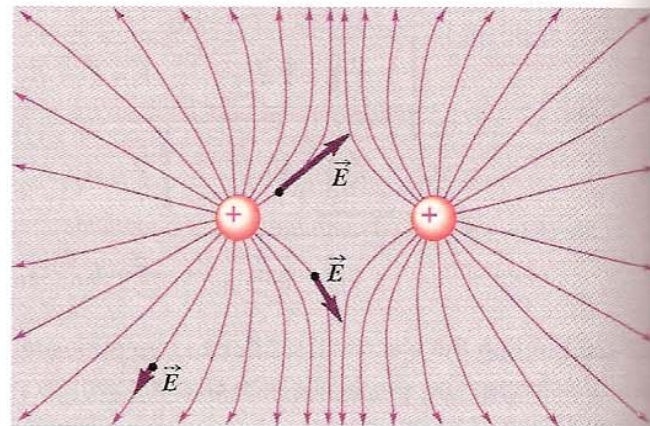
Linhas de campo eléctrico (4)



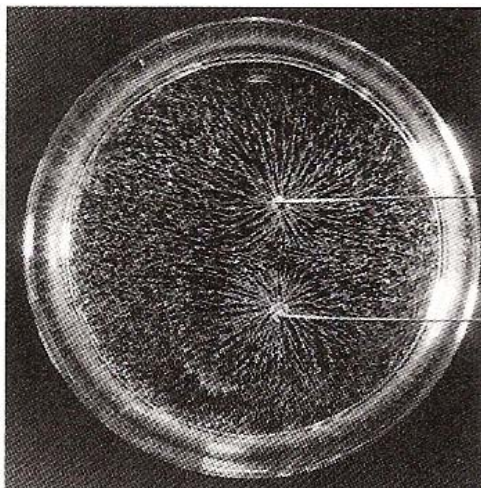
(a)



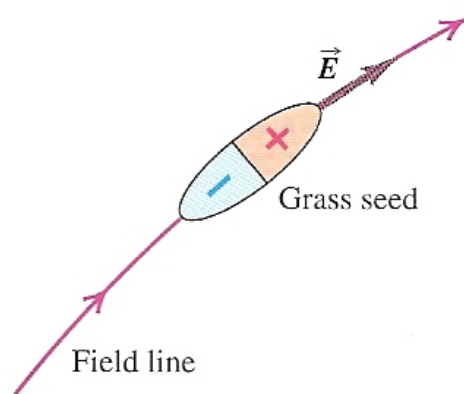
(b)



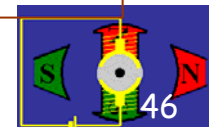
(c)



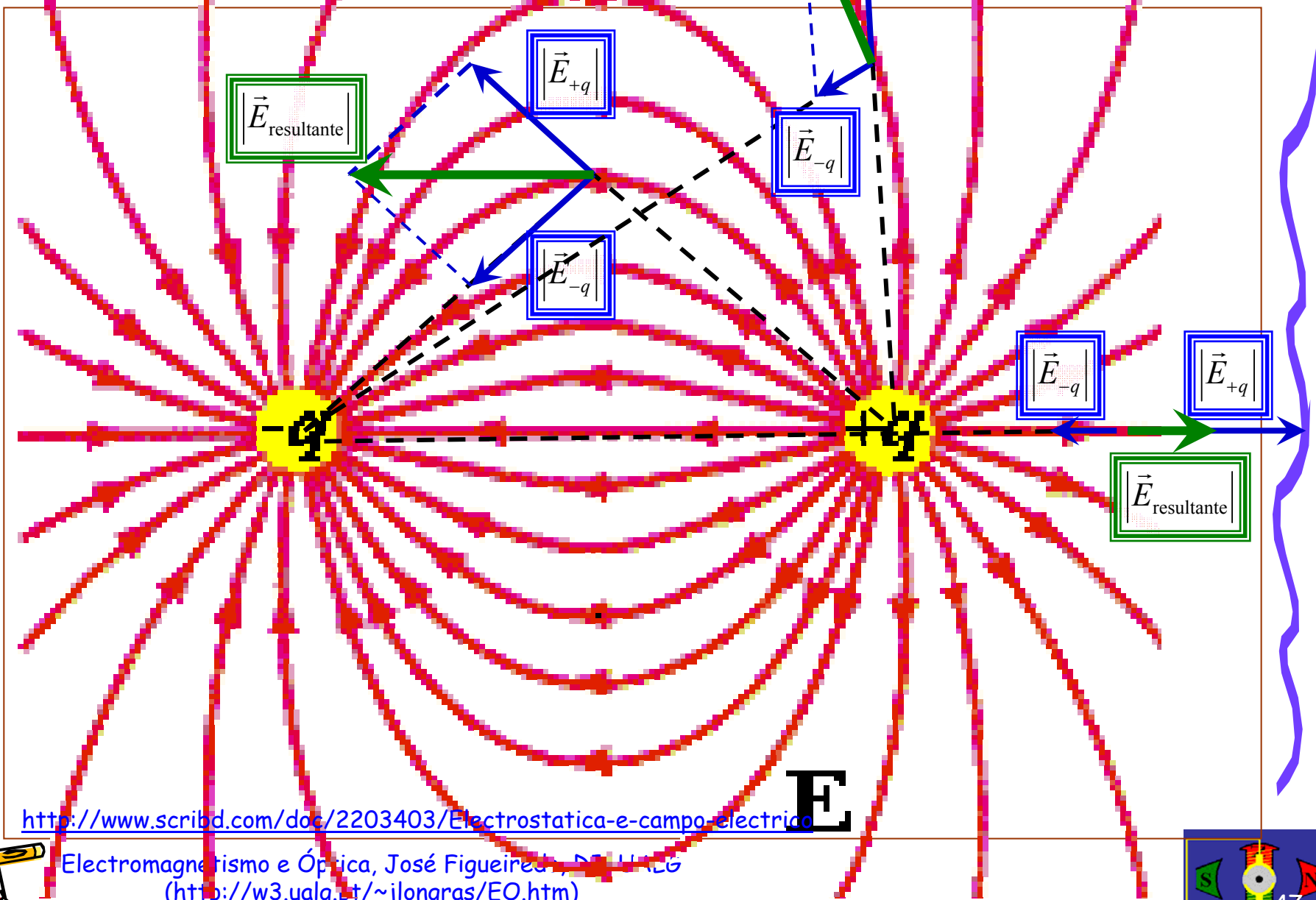
(a)



(b)



Campo eléctrico e o principio da sobreposição



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

Electromagnetismo e Óptica, José Figueiredo, DEE/FEUCG
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EO.htm>)





Campo eléctrico e o princípio da sobreposição

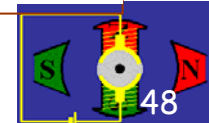
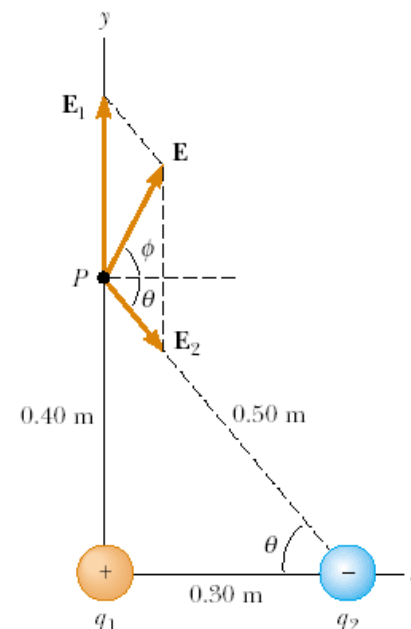
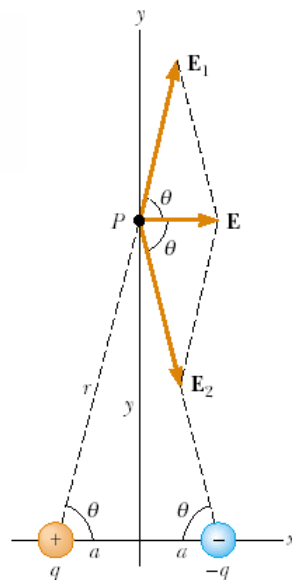
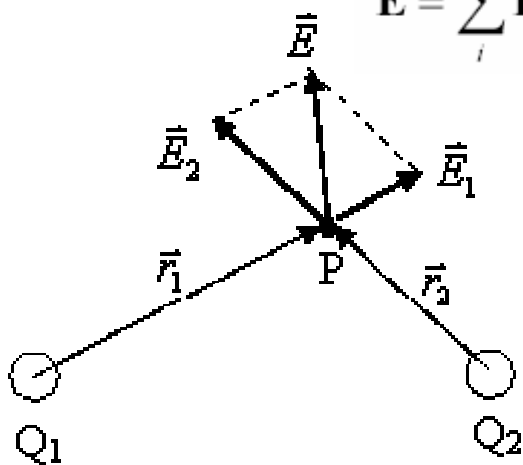
From the field theory point of view, we say that the charge q creates an electric field \vec{E} which exerts a force $\vec{F}_e = q_0 \vec{E}$ on a test charge q_0 .

Using the definition of electric field given in Eq. (2.4.1) and the Coulomb's law, the electric field at a distance r from a point charge q is given by

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (2.4.2)$$

Using the superposition principle, the total electric field due to a group of charges is equal to the vector sum of the electric fields of individual charges:

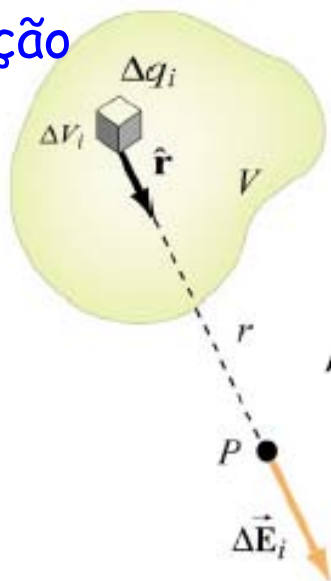
$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$





Distribuições de carga eléctrica

Distribuição num volume



$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

$$\rho(\vec{r}) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \frac{\Delta q_i}{\Delta V_i} = \frac{dq}{dV} \quad Q = \sum_i \Delta q_i = \int_V \rho(\vec{r}) dV$$

Electric field due to a small charge element Δq_i .

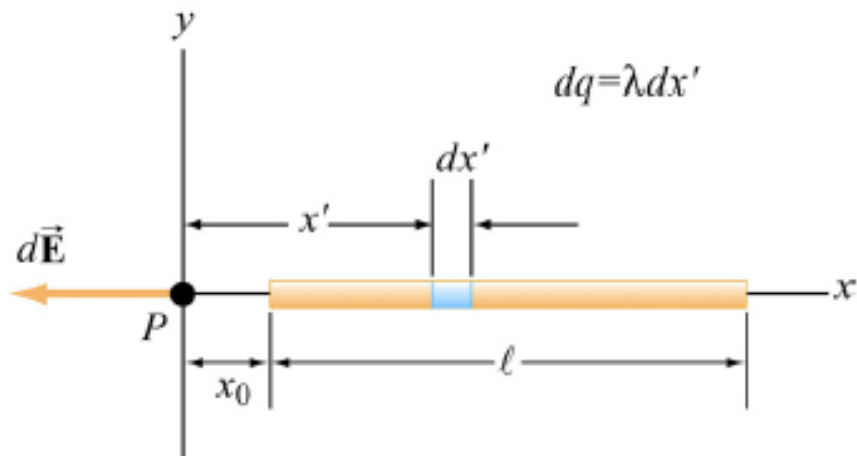
Distribuição superficial de carga: $\sigma(\vec{r}) = \frac{dq}{dA} \quad Q = \iint_S \sigma(\vec{r}) dA$

Distribuição linear de carga: $\lambda(\vec{r}) = \frac{dq}{d\ell} \quad Q = \int_{\text{line}} \lambda(\vec{r}) d\ell$





Campo E criado por um fio de carga eléctrica

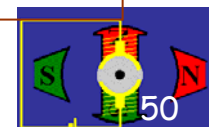


$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx'}{x'^2} (-\hat{i}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q dx'}{\ell x'^2} \hat{i}$$

$$\vec{E} = \int d\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\ell} \int_{x_0}^{x_0+\ell} \frac{dx'}{x'^2} \hat{i} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\ell} \left(\frac{1}{x_0} - \frac{1}{x_0+\ell} \right) \hat{i} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{x_0(\ell+x_0)} \hat{i}$$

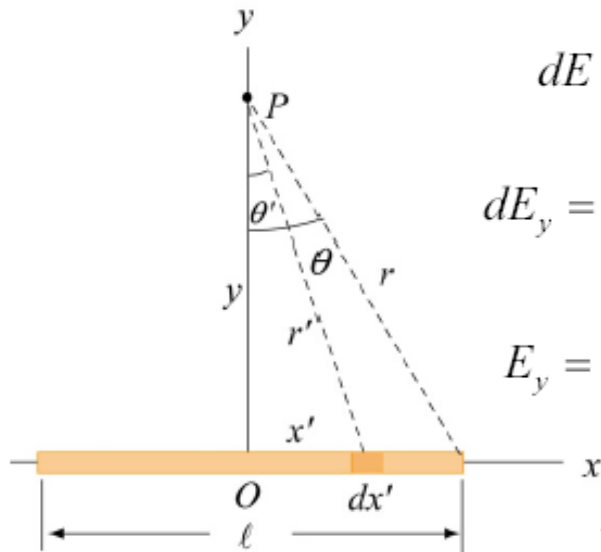
Notice that when P is very far away from the rod, $x_0 \gg \ell$,

$$\vec{E} \approx -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{x_0^2} \hat{i}$$





Campo E criado por um fio de carga eléctrica (2)



$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r'^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx'}{x'^2 + y^2}$$

$$dE_y = dE \cos \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx'}{x'^2 + y^2} \frac{y}{\sqrt{x'^2 + y^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda y dx'}{(x'^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$E_y = \int dE_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \frac{\lambda y dx'}{(x'^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{\lambda y}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \frac{dx'}{(x'^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda \sin \theta}{y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda}{y} \frac{\ell/2}{\sqrt{y^2 + (\ell/2)^2}}$$

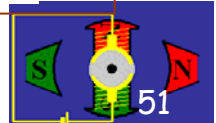
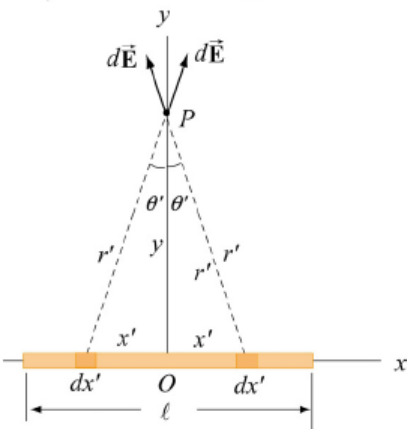
In the limit where $y \gg \ell$,

$$E_y \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda}{y} \frac{\ell/2}{y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda \ell}{y^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{y^2}$$

On the other hand, when $\ell \gg y$,

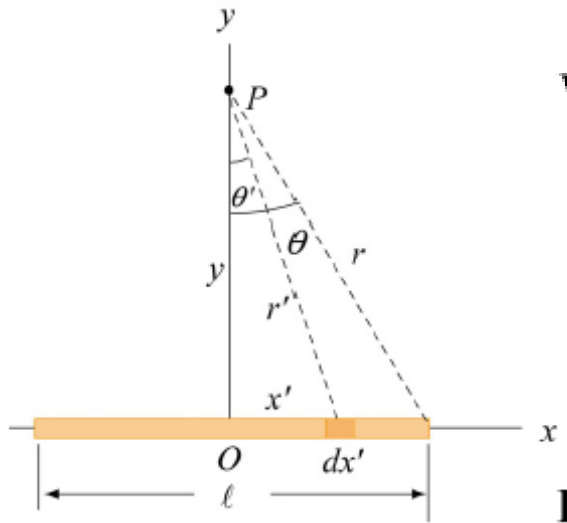
$$E_y \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda}{y}$$

Symmetry argument showing that $E_x = 0$.



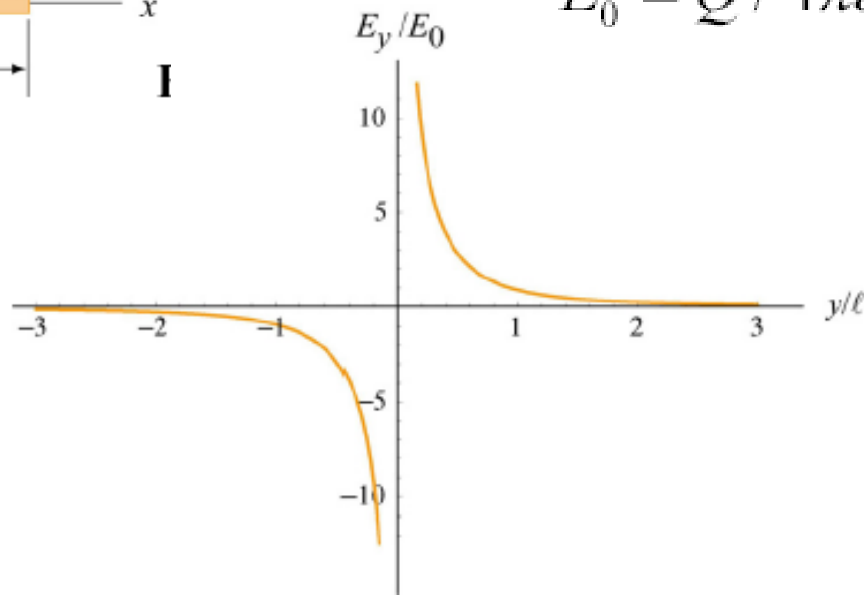


Campo E criado por um fio de carga eléctrica (3)



when $l \gg y$, $E_y \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda}{y}$

$$E_0 = Q / 4\pi\epsilon_0 \ell^2$$

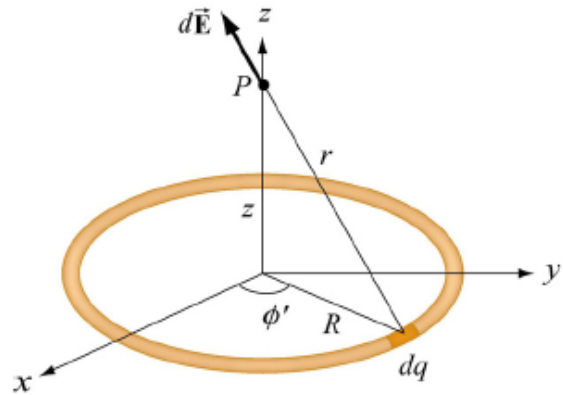


Electric field of a non-conducting rod as a function of y/ℓ .





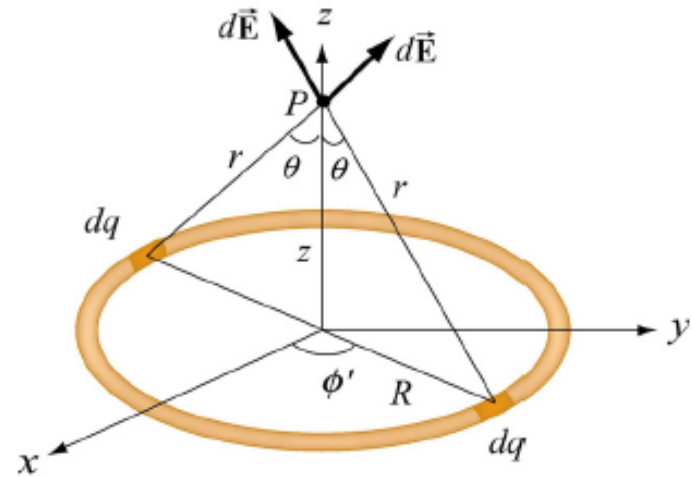
Campo E criado por anel de carga eléctrica



$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda R d\phi'}{r^2} \hat{r}$$

Electric field at P due to the charge element dq .

$$Q = \lambda(2\pi R)$$



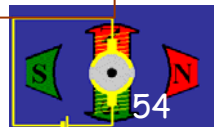
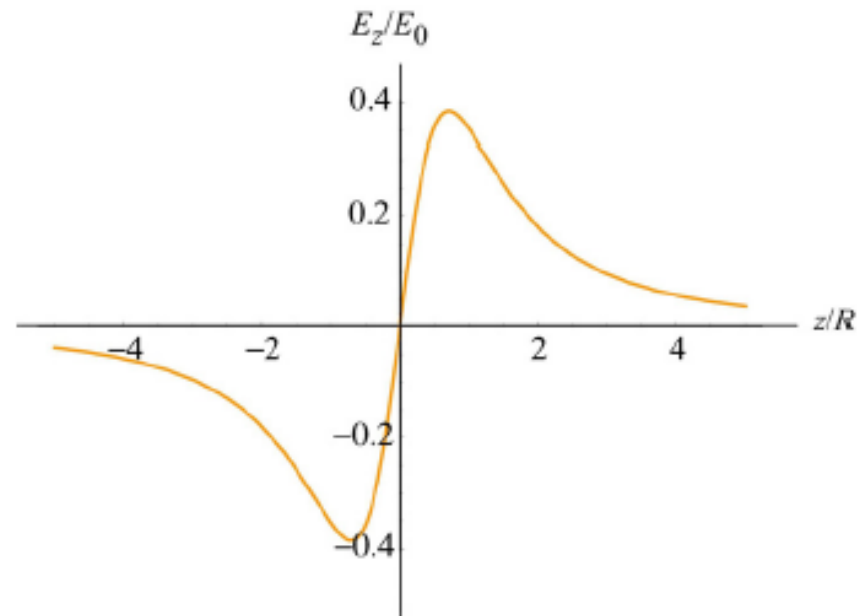
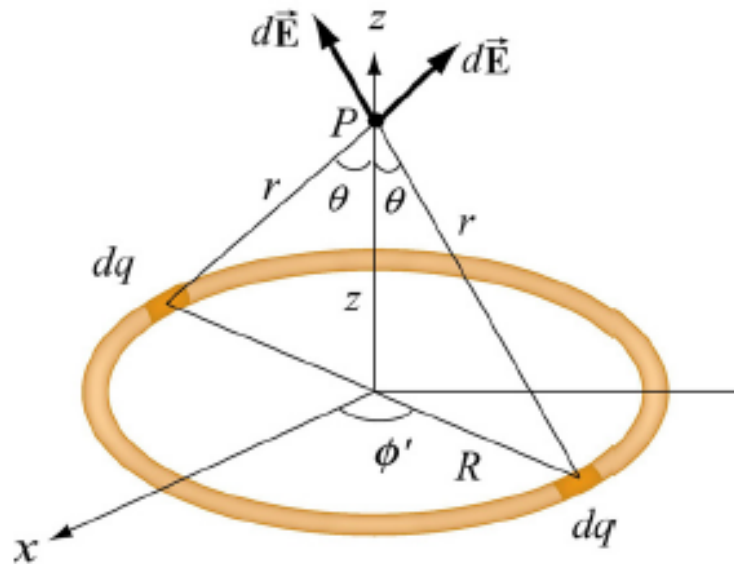
$$dE_z = dE \cos \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda R d\phi'}{R^2 + z^2} \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{Rz d\phi'}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$





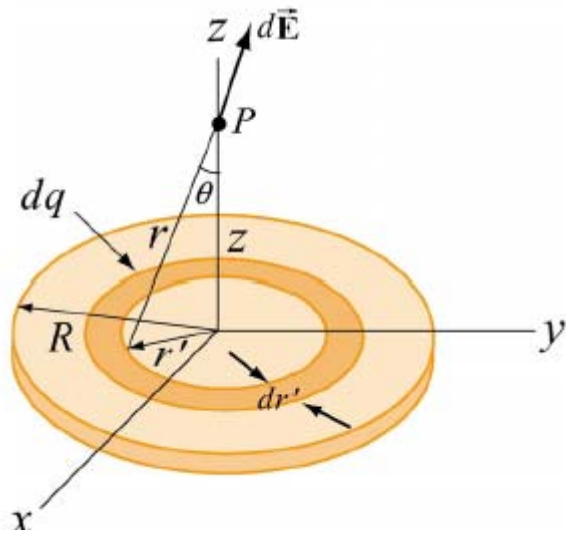
Campo E criado por anel de carga eléctrica (2)

$$E_z = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{Rz}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \oint d\phi' = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\pi Rz}{(R^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qz}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$





Campo E criado por disco de carga eléctrica

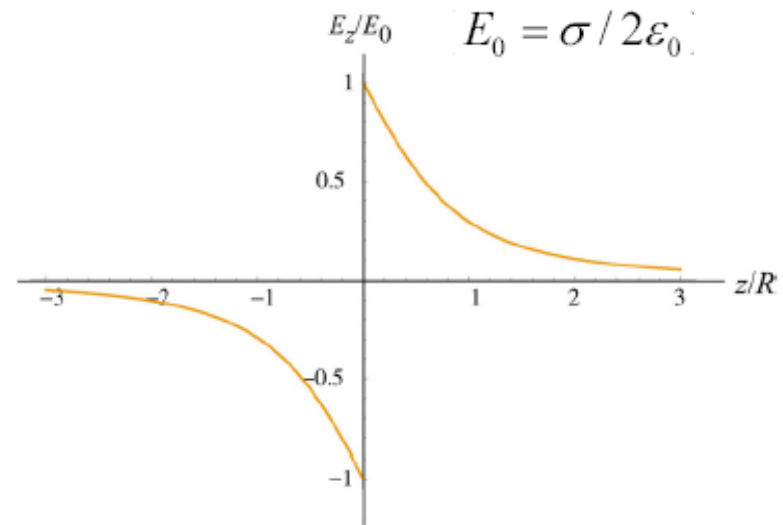


$$dE_z = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z dq}{(r'^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z(2\pi\sigma r' dr')}{(r'^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$E_z = \int dE_z = \frac{\sigma z}{2\epsilon_0} \int_0^R \frac{r' dr'}{(r'^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \int_{z^2}^{R^2 + z^2} \frac{du}{u^{3/2}} = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \frac{u^{-1/2}}{(-1/2)} \Big|_{z^2}^{R^2 + z^2}$$

$$= -\frac{\sigma z}{2\epsilon_0} \left[\frac{1}{\sqrt{R^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{z^2}} \right] = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left[\frac{z}{|z|} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right]$$

$$E_z = \begin{cases} \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left[1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right], & z > 0 \\ \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left[-1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right], & z < 0 \end{cases}$$





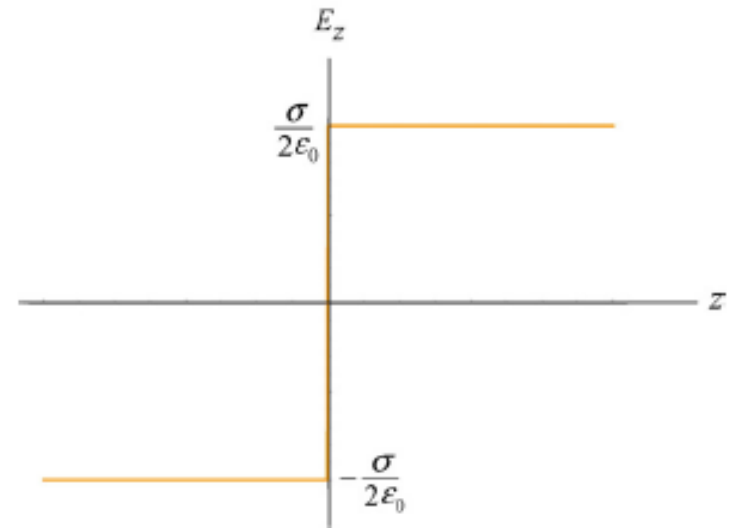
Campo E criado por disco de carga eléctrica (2)

To show that the “point-charge” limit is recovered for $z \gg R$,

$$1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} = 1 - \left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right)^{-1/2} = 1 - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{R^2}{z^2} + \dots\right) \approx \frac{1}{2} \frac{R^2}{z^2}$$

$$E_z = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \frac{R^2}{2z^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma\pi R^2}{z^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{z^2}$$

$$R \gg z \quad \vec{E} = \begin{cases} \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{\mathbf{k}}, & z > 0 \\ -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{\mathbf{k}}, & z < 0 \end{cases}$$



Notice the discontinuity in electric field as we cross the plane.

$$\Delta E_z = E_{z+} - E_{z-} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} - \left(-\frac{\sigma}{2\epsilon_0}\right) = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$





Cálculo do campo eléctrico: resumo

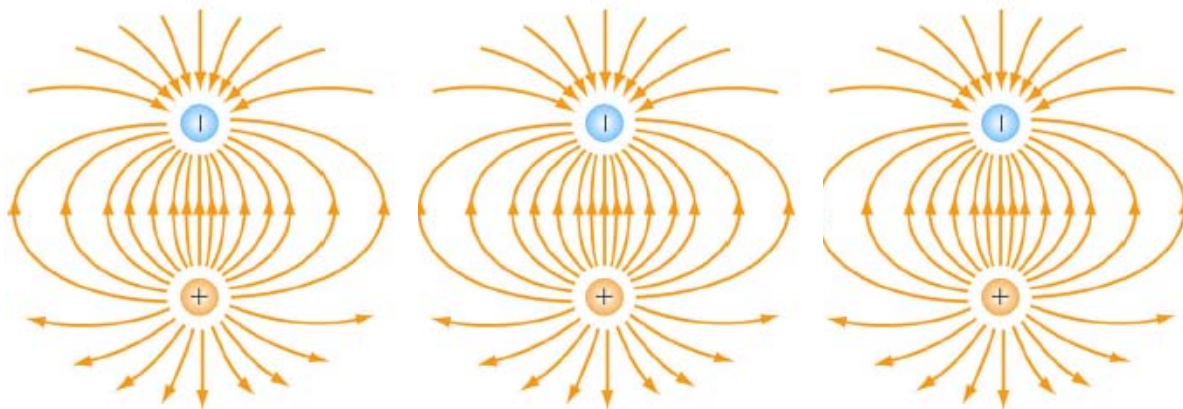
	Line charge	Ring of charge	Uniformly charged disk
Figure			
(2) Express dq in terms of charge density	$dq = \lambda dx'$	$dq = \lambda dl$	$dq = \sigma dA$
(3) Write down dE	$dE = k_e \frac{\lambda dx'}{r'^2}$	$dE = k_e \frac{\lambda dl}{r^2}$	$dE = k_e \frac{\sigma dA}{r^2}$
(4) Rewrite r and the differential element in terms of the appropriate coordinates	dx' $\cos \theta = \frac{y}{r'}$ $r' = \sqrt{x'^2 + y^2}$	$dl = R d\phi'$ $\cos \theta = \frac{z}{r}$ $r = \sqrt{R^2 + z^2}$	$dA = 2\pi r' dr'$ $\cos \theta = \frac{z}{r}$ $r = \sqrt{r'^2 + z^2}$
(5) Apply symmetry argument to identify non-vanishing component(s) of dE	$dE_y = dE \cos \theta$ $= k_e \frac{\lambda y dx'}{(x'^2 + y^2)^{3/2}}$	$dE_z = dE \cos \theta$ $= k_e \frac{\lambda R z d\phi'}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$	$dE_z = dE \cos \theta$ $= k_e \frac{2\pi\sigma z r' dr'}{(r'^2 + z^2)^{3/2}}$
(6) Integrate to get E	$E_y = k_e \lambda y \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \frac{dx}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$ $= \frac{2k_e \lambda}{y} \frac{\ell/2}{\sqrt{(\ell/2)^2 + y^2}}$	$E_z = k_e \frac{R\lambda z}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \oint d\phi'$ $= k_e \frac{(2\pi R\lambda)z}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$ $= k_e \frac{Qz}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$	$E_z = 2\pi\sigma k_e z \int_0^R \frac{r' dr'}{(r'^2 + z^2)^{3/2}}$ $= 2\pi\sigma k_e \left(\frac{z}{ z } - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right)$



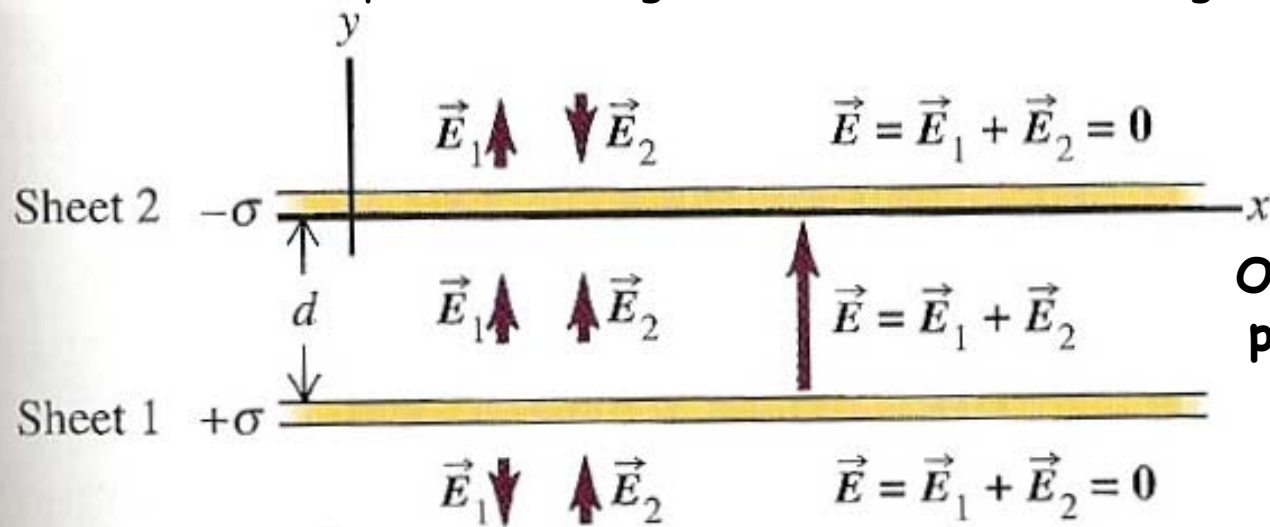


Campo eléctrico uniforme

Sejam três pares de cargas eléctricas como mostra a figura



Se o numero de pares de cargas eléctricas for muito grande obtemos:

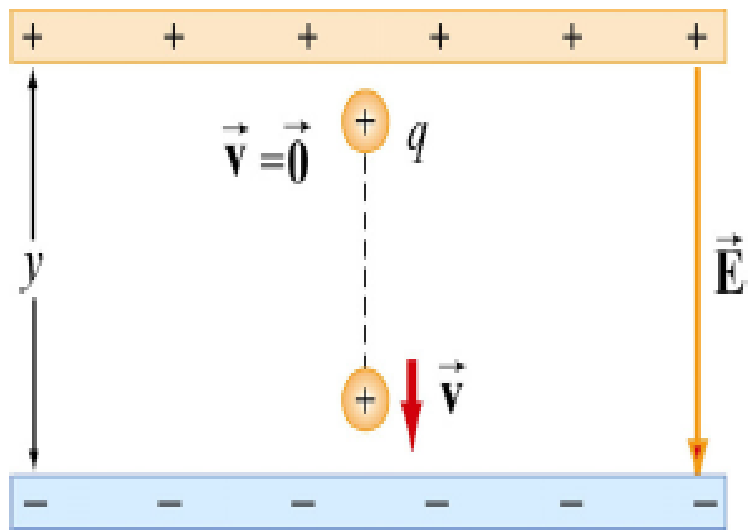
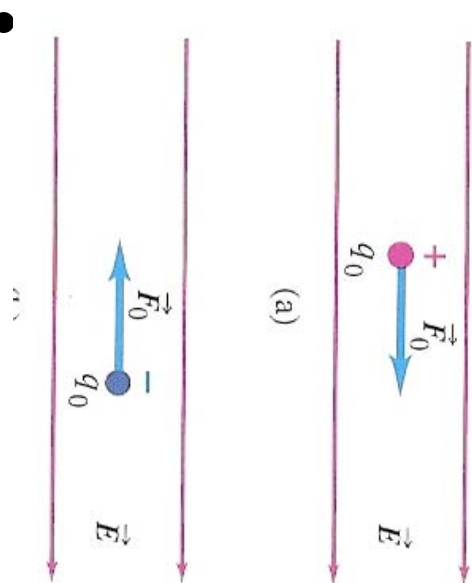


O campo entre as placas é uniforme



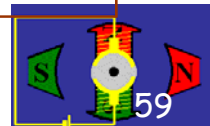


Força eléctrica num campo eléctrico uniforme



$$\vec{\mathbf{F}}_e = q\vec{\mathbf{E}} \quad \vec{\mathbf{a}} = \frac{\vec{\mathbf{F}}_e}{m} = \frac{q\vec{\mathbf{E}}}{m} = -\frac{qE_y}{m} \hat{\mathbf{j}}$$

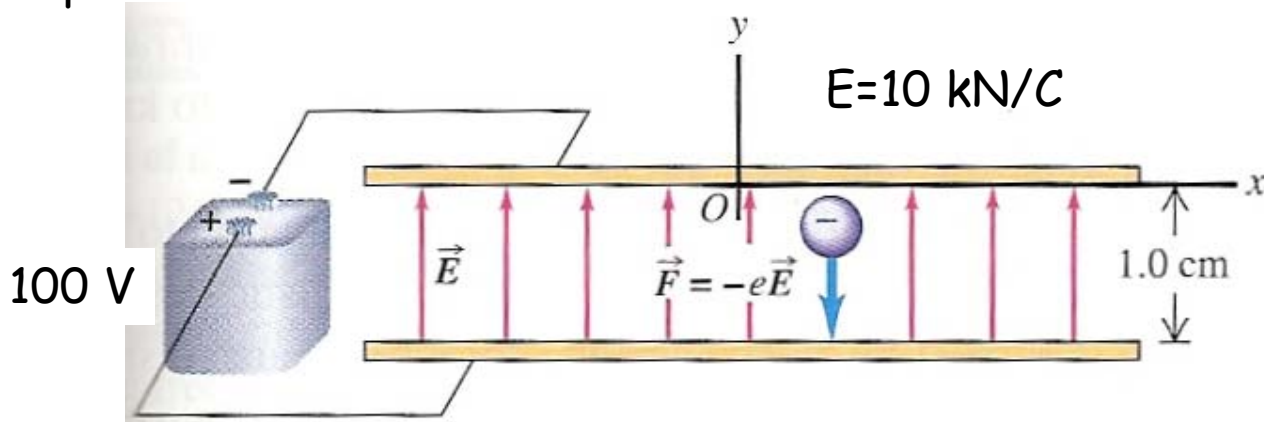
$$v_y = \sqrt{2|a_y|y} = \sqrt{\frac{2yqE_y}{m}} \quad K = \frac{1}{2}mv_y^2 = qE_y y$$



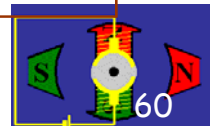
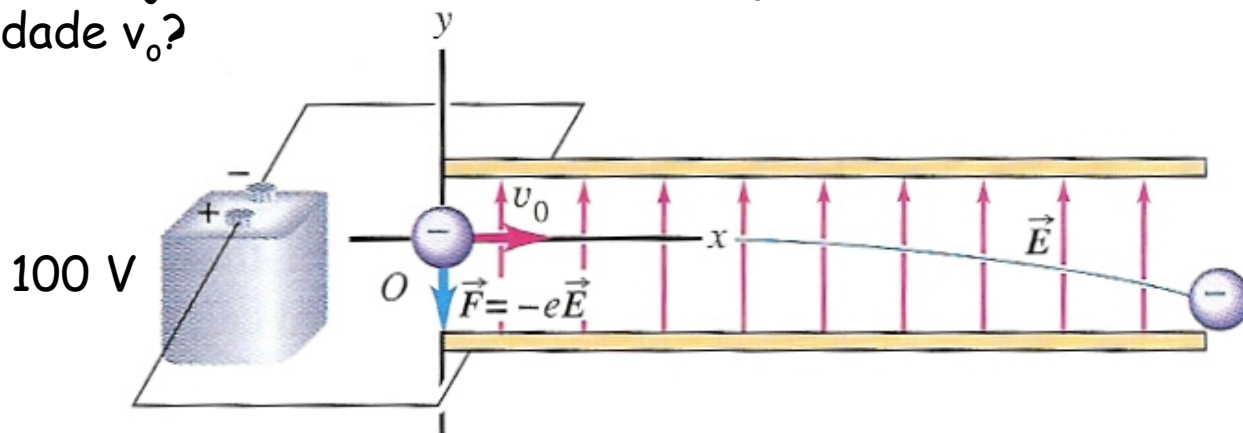


Movimento de cargas num campo eléctrico uniforme

Se um electrão em repouso for libertado junto à placa superior, qual é a aceleração, a energia cinética após percorrer 1 cm, e o tempo necessário para percorrer essa distância?

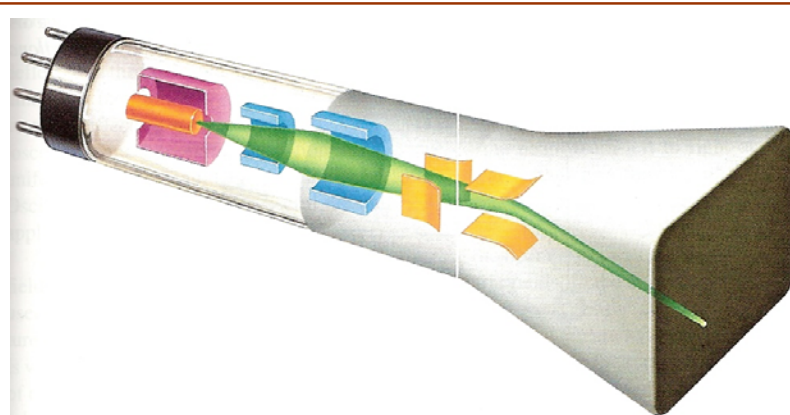


Qual é a trajectória de um electrão lançado horizontalmente com velocidade v_0 ?

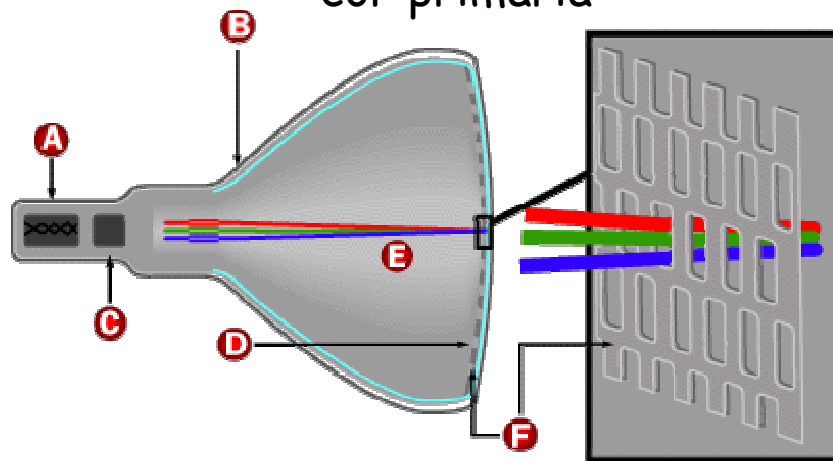




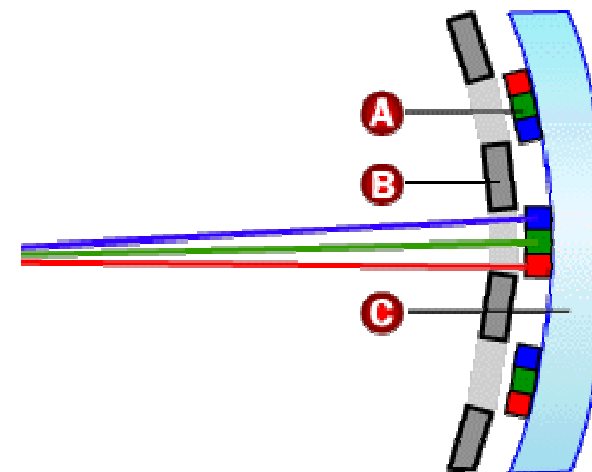
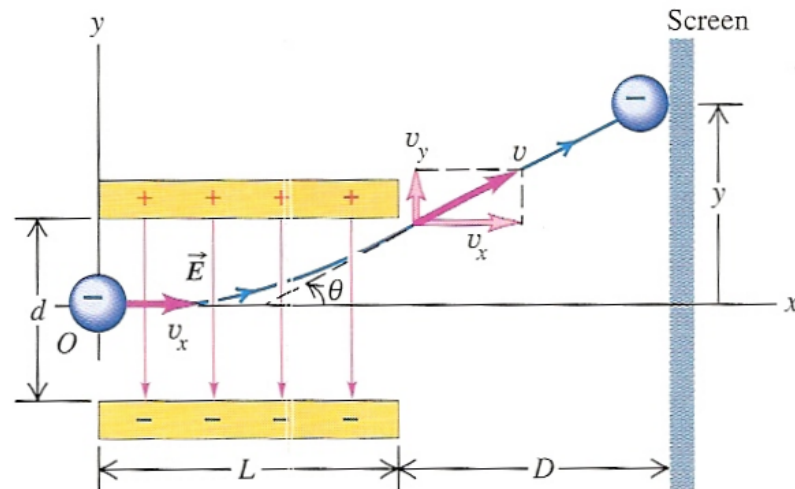
Tubo de raios catódicos



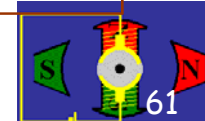
No tubo de raios catódicos de um televisor há três canhões de electrões como este: um para cada cor primária



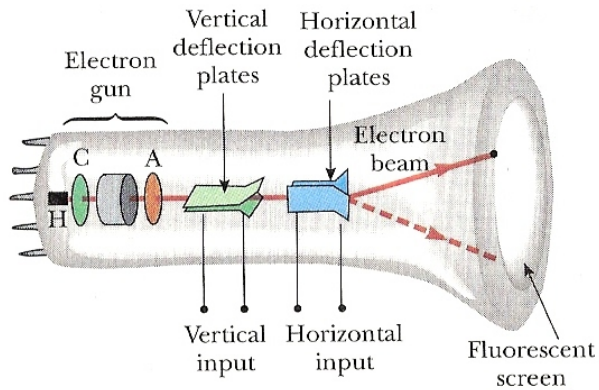
©2000 How Stuff Works



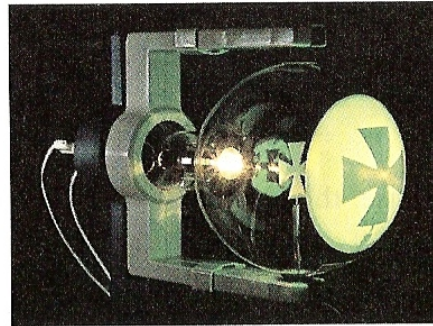
©2000 How Stuff Works



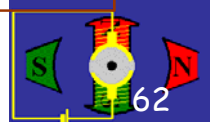
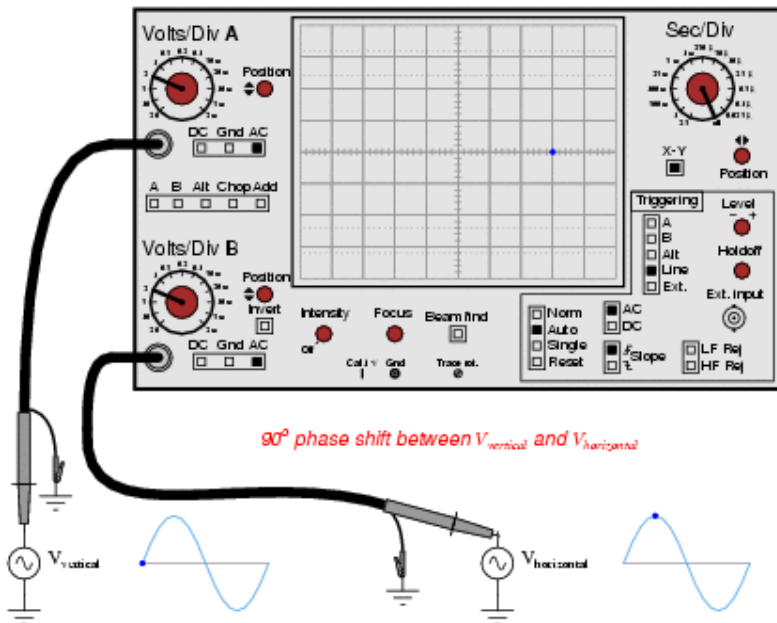
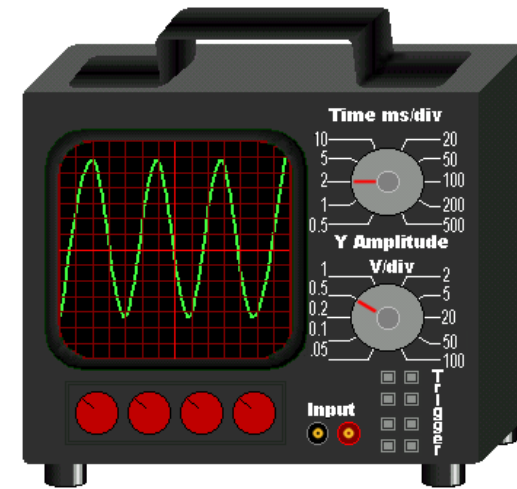
Osciloscópio



(a)

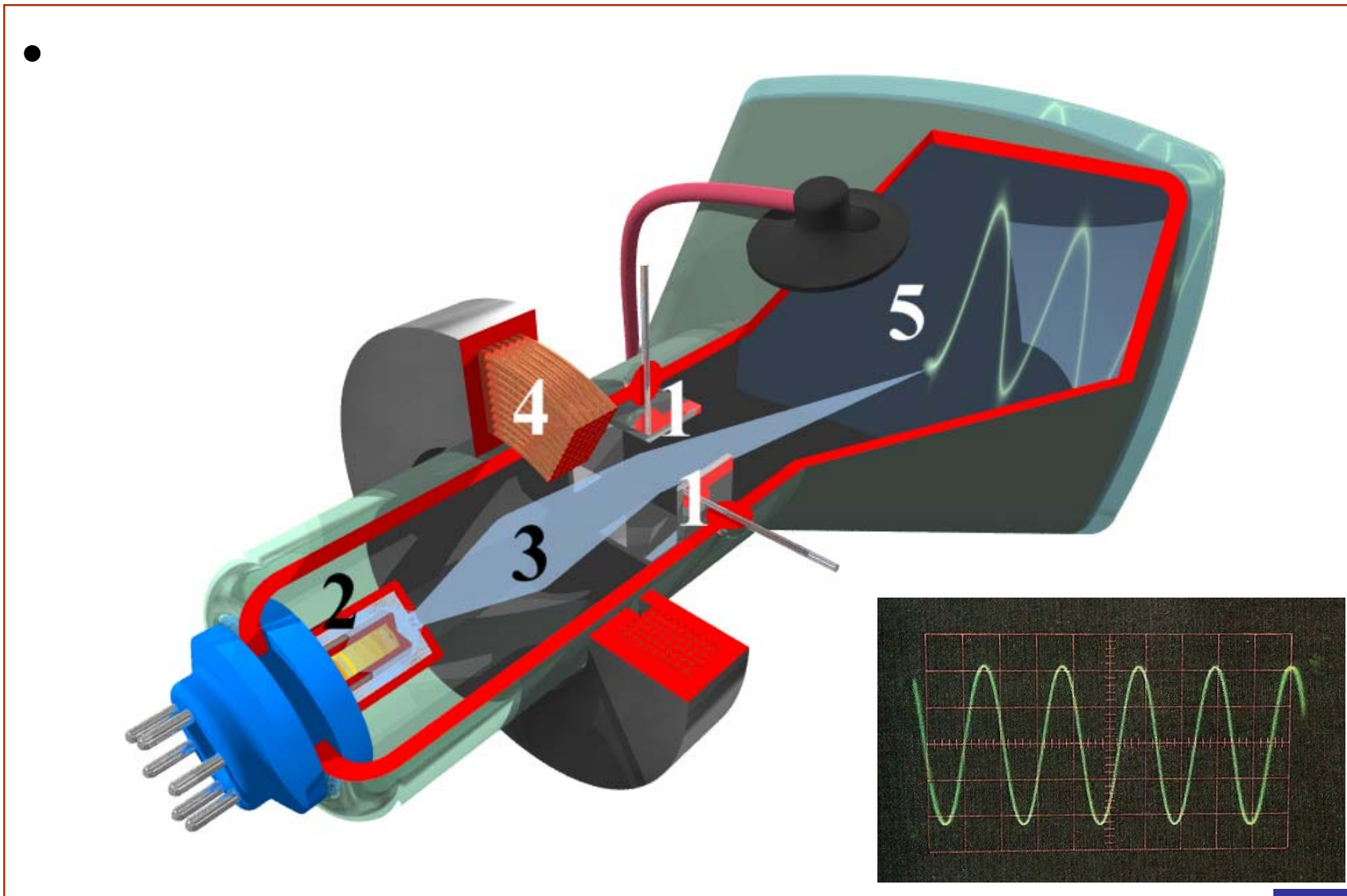


(b)





Osciloscópio (2)





Experiência da gota de óleo de Millikan (1909)

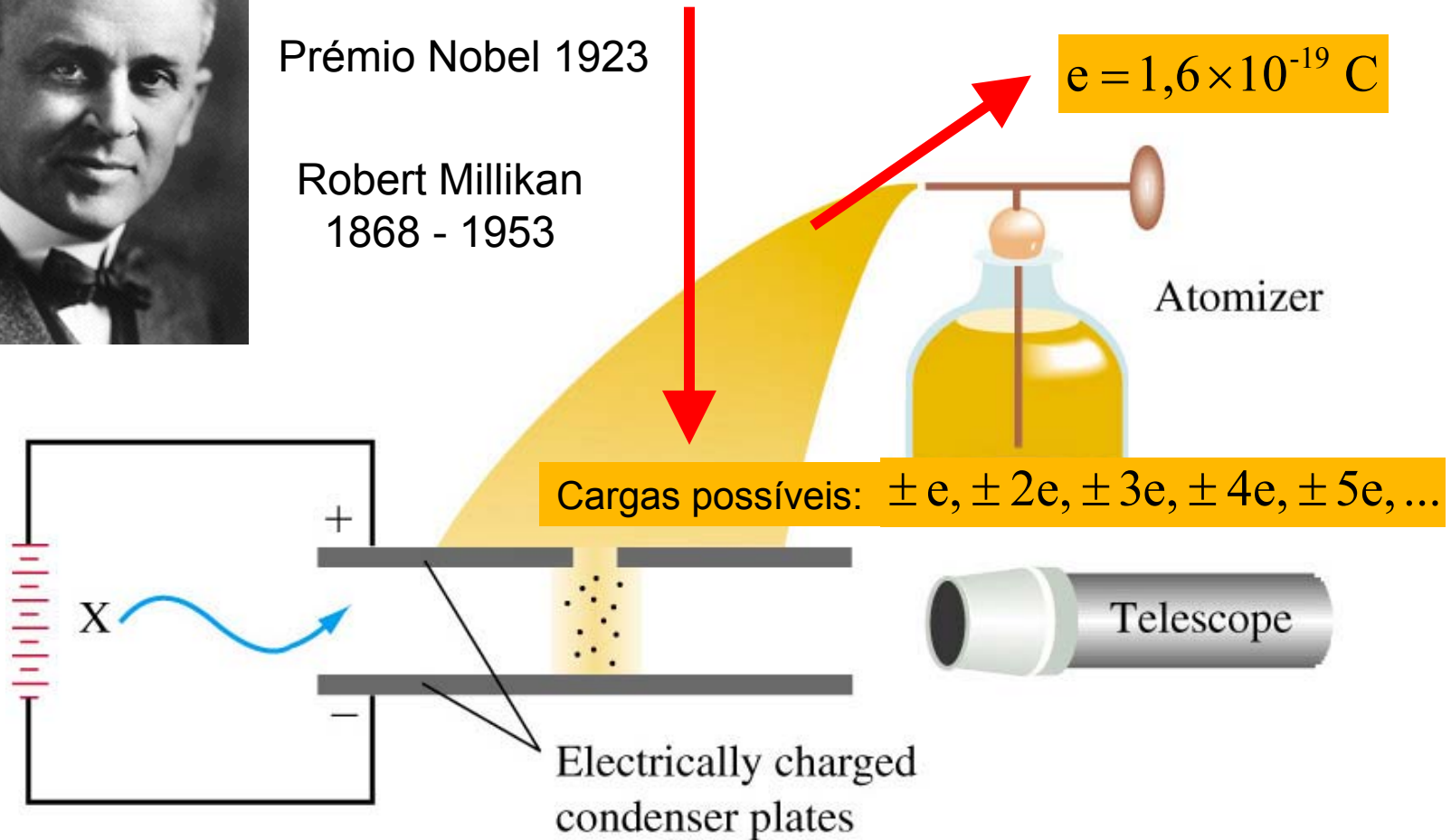


Mediu a carga elementar (módulo da carga do electrão).
Mostrou que a carga estava quantizada.

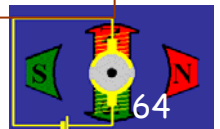
Prémio Nobel 1923

Robert Millikan
1868 - 1953

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$



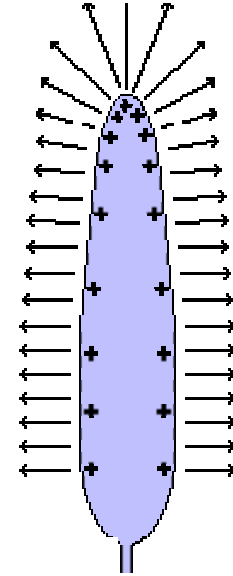
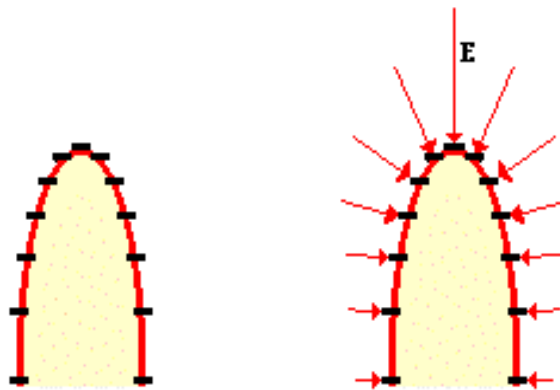
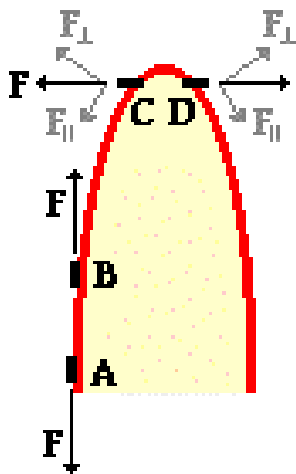
<http://www.scribd.com/doc/2203403/Electrostatica-e-campo-electrico>





Distribuição de cargas e poder das pontas

Num condutor a carga eléctrica tende a acumular-se nas regiões de maior curvatura (maior convexidade). Logo o campo eléctrico é aí muito mais intenso.



Surface Curvature
 Curvatura (convexidade) crescente
 Increasing Amount of Curvature



"Flat"



"Pointed"



Raio de curvatura crescente

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





Poder das pontas e pára-raios

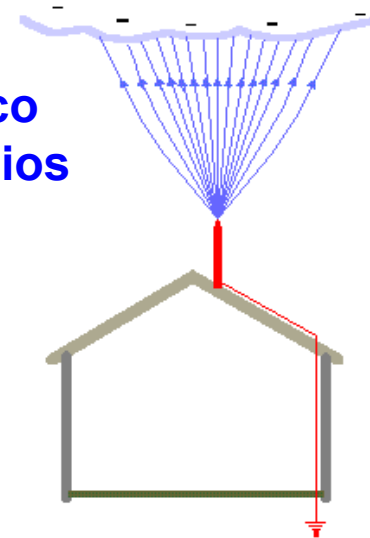
Home Without Lightning Rod



Home With Lightning Rod



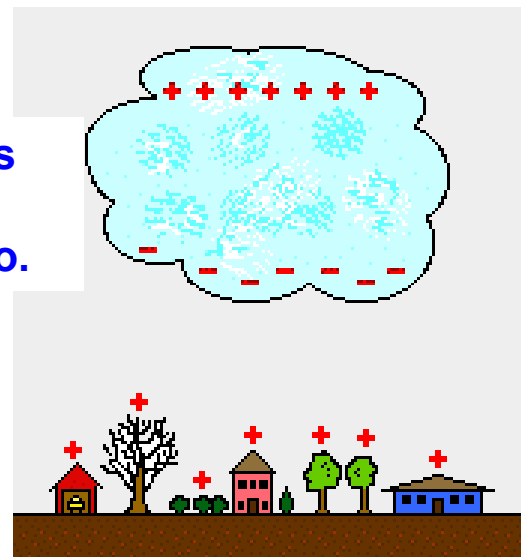
Campo eléctrico entre o pára-raios e a base da nuvem.



A presença do pára-raios permite uma descarga gradual da carga da nuvem, evitando uma descarga súbita e explosiva característica dos relâmpagos.



A carga eléctrica das nuvens induz uma carga oposta no solo.



O campo eléctrico de disrupção do ar seco é cerca de 3×10^6 N/C.

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





Dipolo eléctrico

s. m.

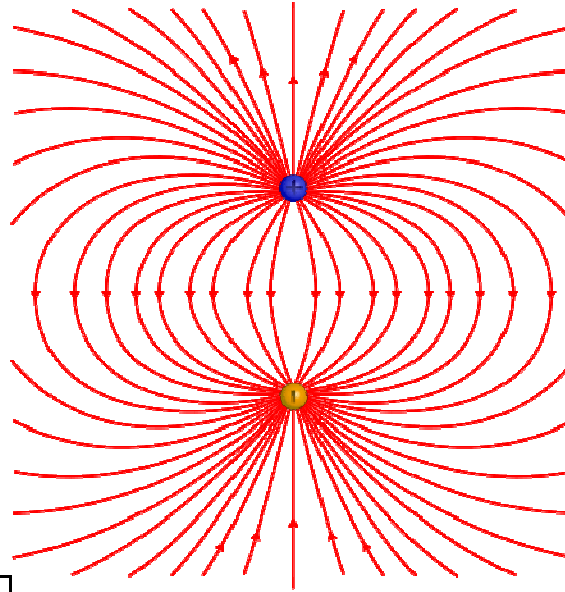
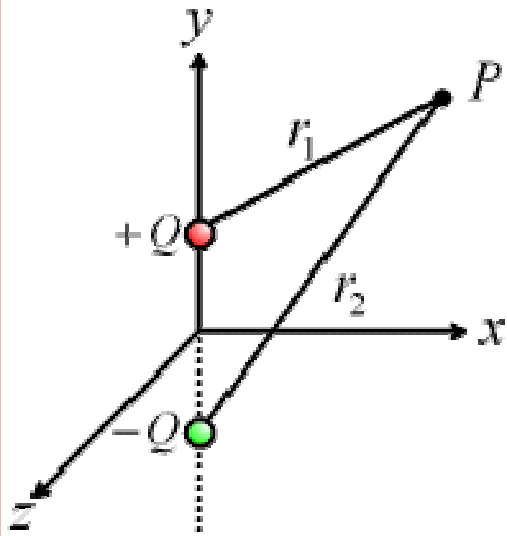
(fís.) sistema de duas cargas iguais e de sinais contrários colocadas a uma distância muito pequena uma da outra;

momento do \sim : produto da grandeza de cada uma das cargas eléctricas pela sua distância.

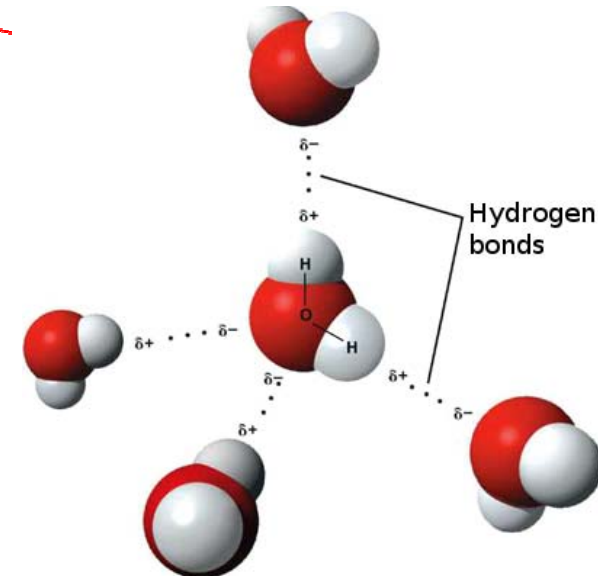
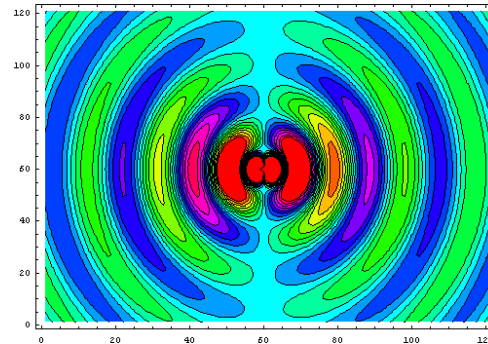
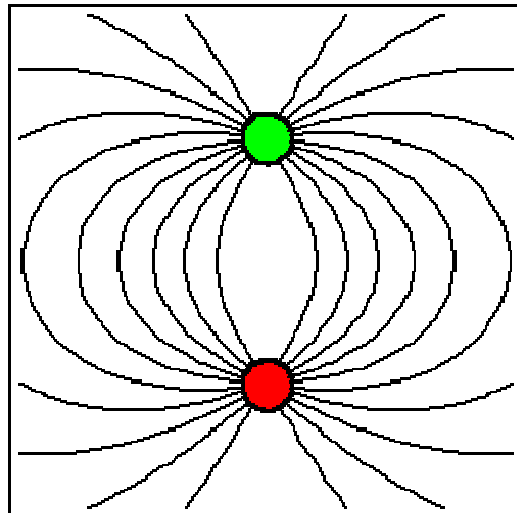
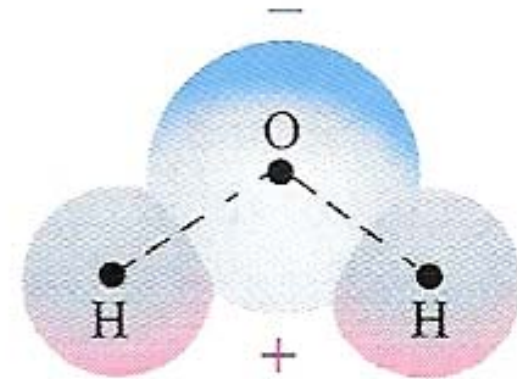
(De di- + pólo)



Dipolo eléctrico



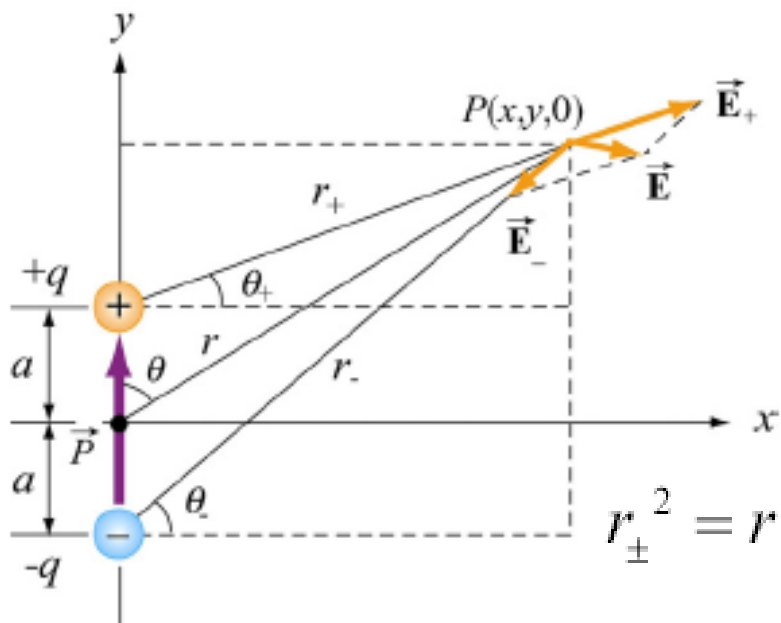
Molécula de água





Campo E criado por um dipolo eléctrico

The dipole moment vector \vec{p} which points from $-q$ to $+q$ (in the $+y$ -direction) is given



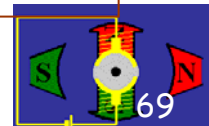
$$\vec{p} = 2qa\hat{j}$$

(2.7.1)

$$r_{\pm}^2 = r^2 + a^2 \mp 2ra \cos \theta = x^2 + (y \mp a)^2$$

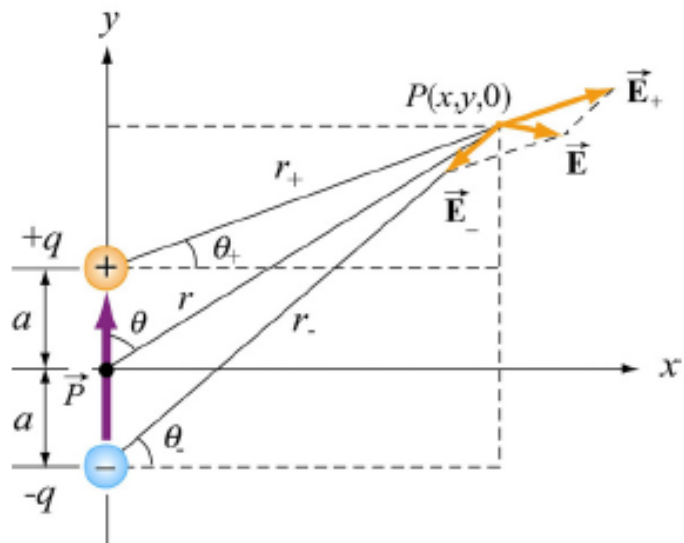
$$E_x = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\cos \theta_+}{r_+^2} - \frac{\cos \theta_-}{r_-^2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{x}{[x^2 + (y-a)^2]^{3/2}} - \frac{x}{[x^2 + (y+a)^2]^{3/2}} \right)$$

$$E_y = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\sin \theta_+}{r_+^2} - \frac{\sin \theta_-}{r_-^2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{y-a}{[x^2 + (y-a)^2]^{3/2}} - \frac{y+a}{[x^2 + (y+a)^2]^{3/2}} \right)$$





Campo E criado por um dipolo eléctrico (2)



In the “point-dipole” limit where $r \gg a$

$$E_x = \frac{3p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sin\theta \cos\theta$$

$$E_y = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} (3\cos^2\theta - 1)$$

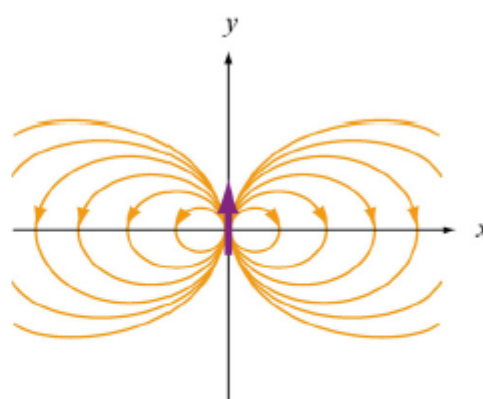
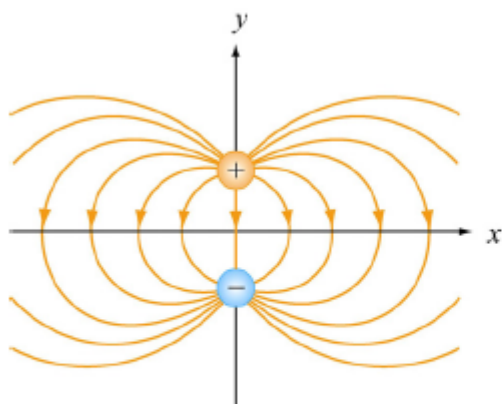
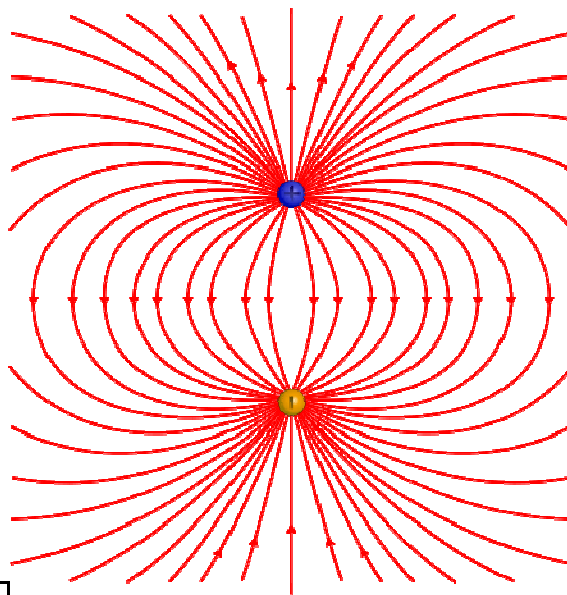
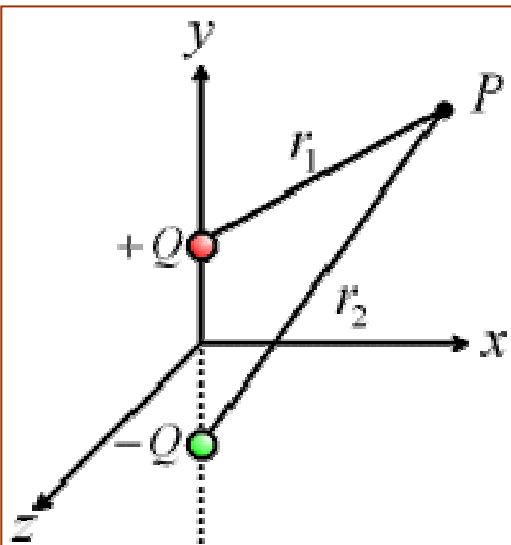


Figure 2.7.2 Electric field lines for (a) a finite dipole and (b) a point dipole.

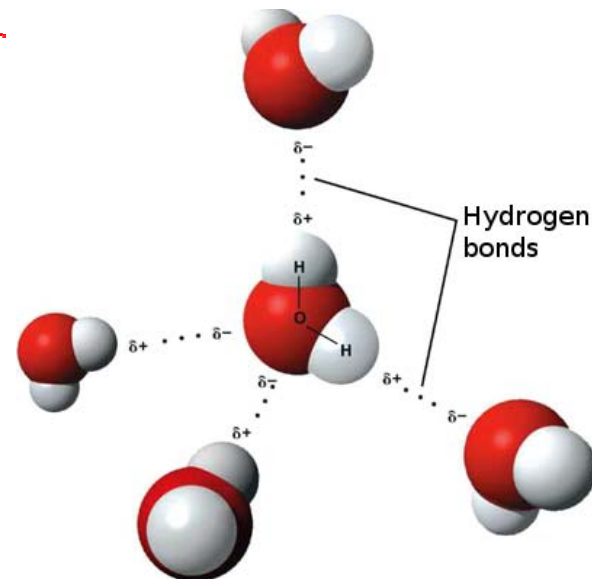
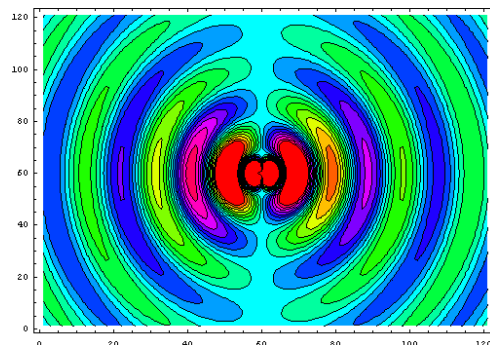
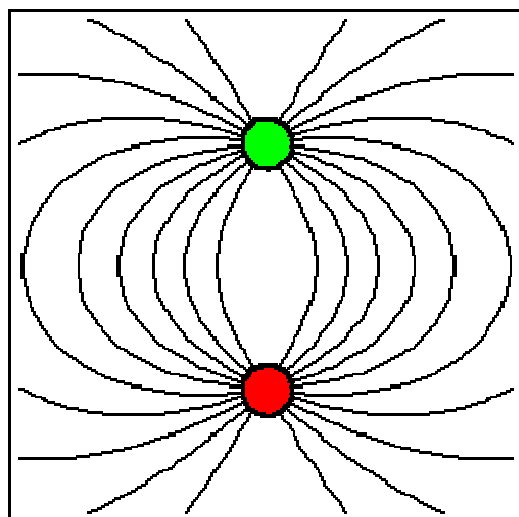
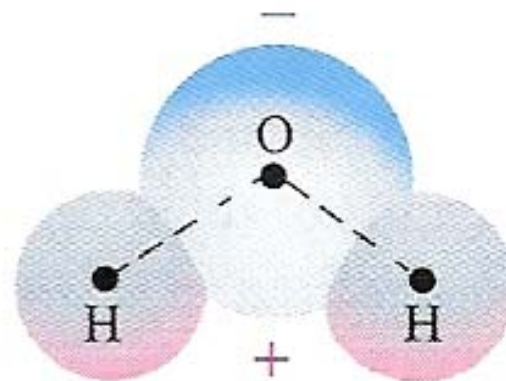




Dipolo eléctrico

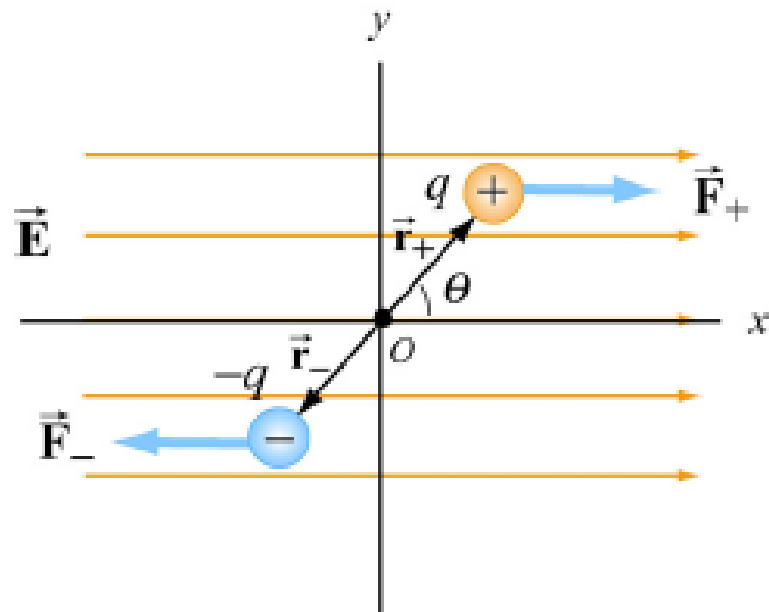


Molécula de água





Dipolo eléctrico num campo eléctrico



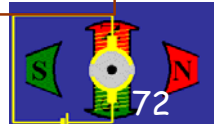
$$\vec{p} = 2qa(\cos \theta \hat{i} + \sin \theta \hat{j})$$

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

$$\begin{aligned}\vec{\tau} &= \vec{r}_+ \times \vec{F}_+ + \vec{r}_- \times \vec{F}_- = (a \cos \theta \hat{i} + a \sin \theta \hat{j}) \times (F_+ \hat{i}) + (-a \cos \theta \hat{i} - a \sin \theta \hat{j}) \times (-F_- \hat{i}) \\ &= a \sin \theta F_+ (-\hat{k}) + a \sin \theta F_- (-\hat{k}) \\ &= 2aF \sin \theta (-\hat{k})\end{aligned}$$

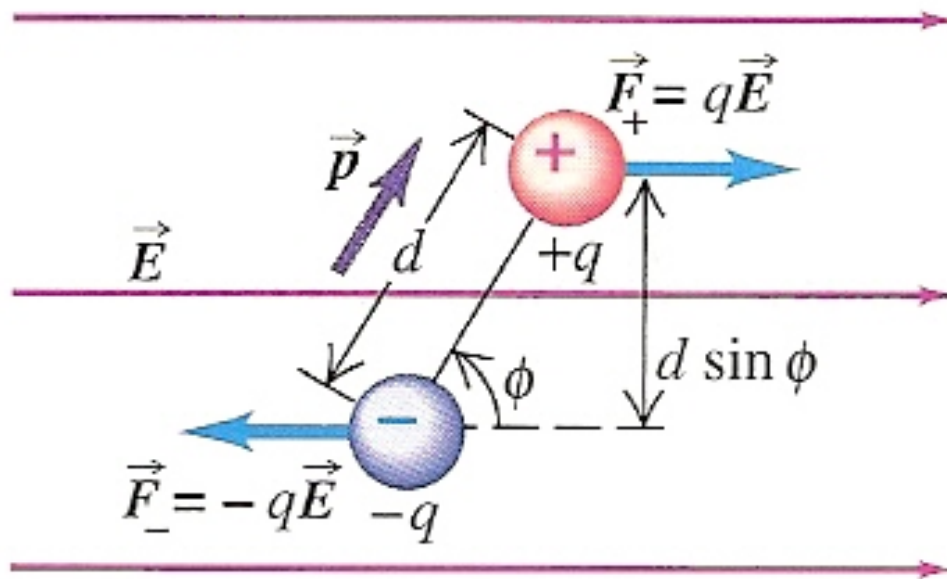
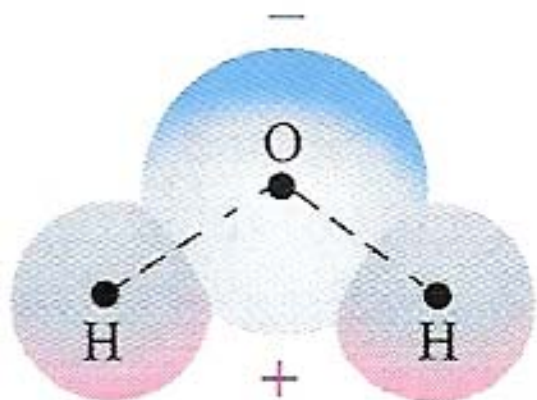
$$\tau = 2a(qE) \sin \theta = (2aq)E \sin \theta = pE \sin \theta$$

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$





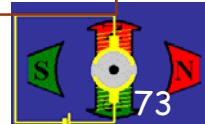
Moléculas dipolares na presença de um campo E



$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

$$\tau = 2a(qE) \sin \theta = (2aq) E \sin \theta = pE \sin \theta$$

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$





Electrostática

•

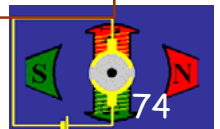
Lei de Gauss

electrostática

s. f.

estudo das propriedades das cargas eléctricas em repouso.

(De electro- + estático)





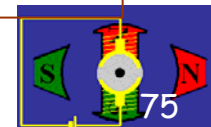
Carga e fluxo eléctrico

Seja uma caixa contendo uma quantidade de carga desconhecida.



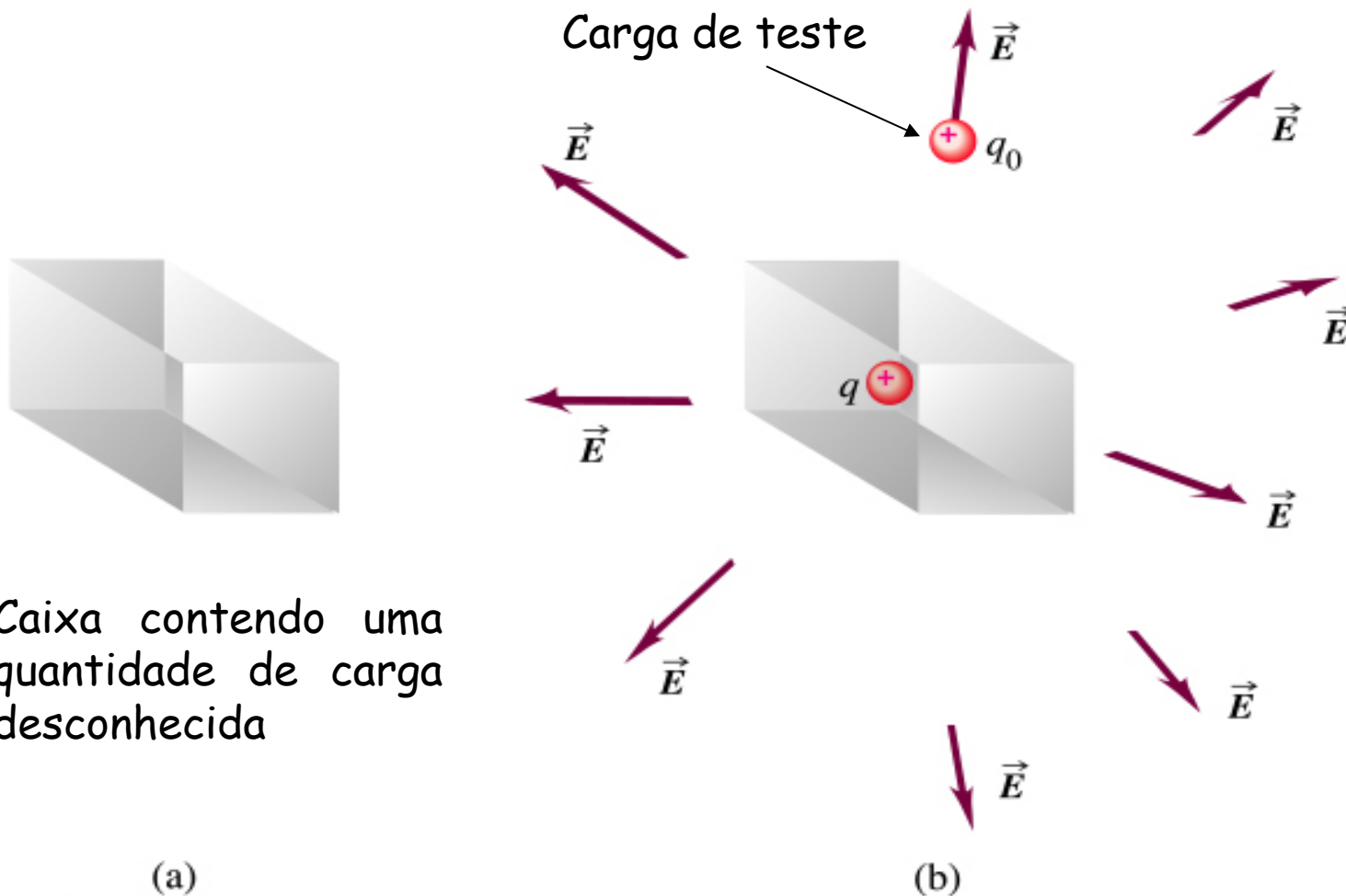
(a)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Carga e fluxo eléctrico (2)

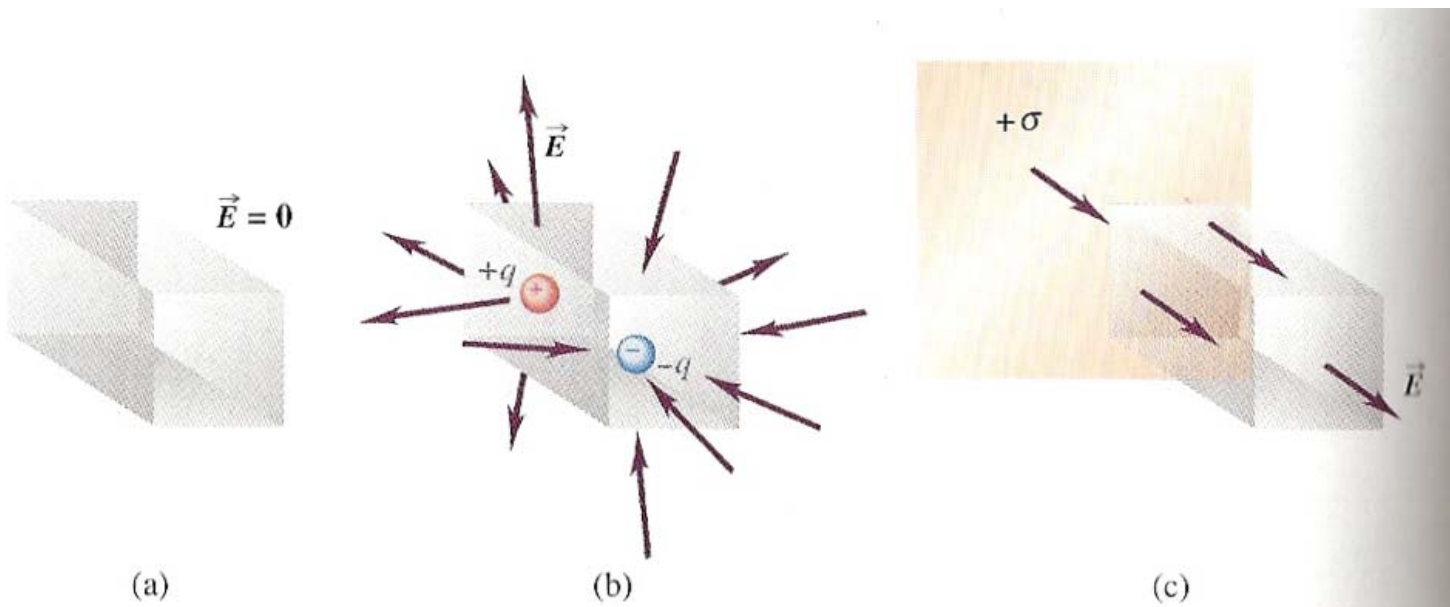
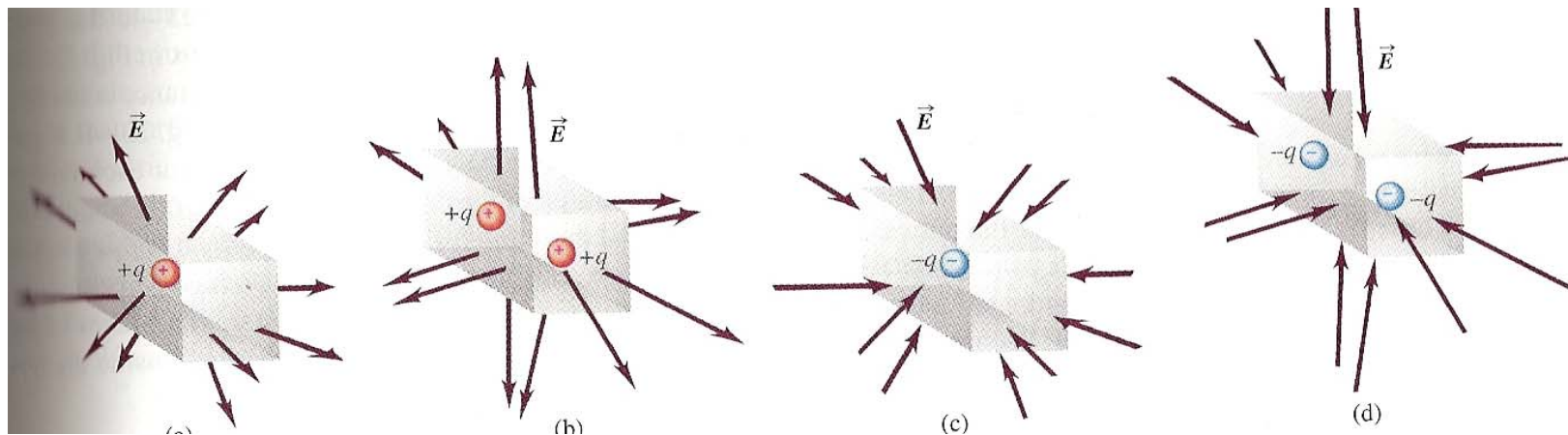


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



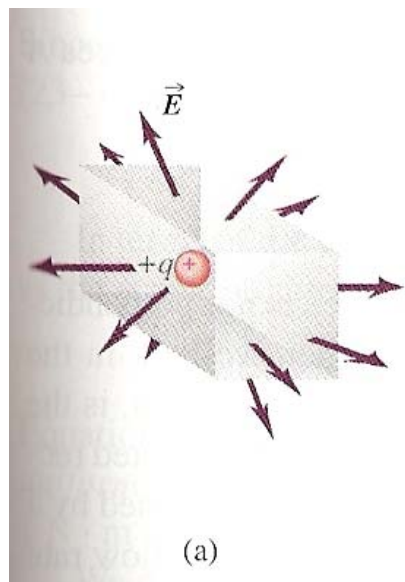


Carga e fluxo eléctrico (3)

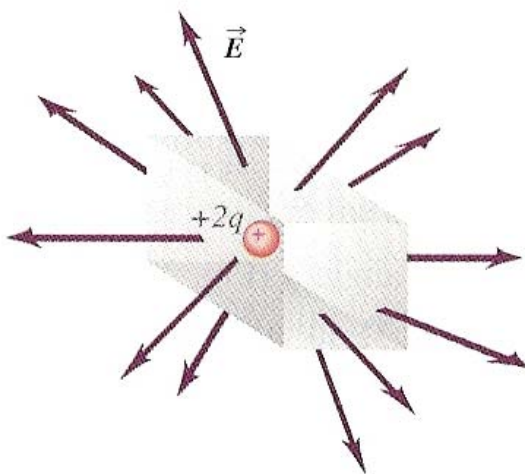




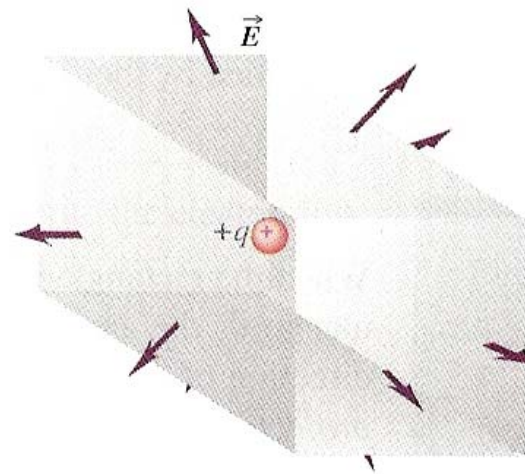
Carga e fluxo eléctrico (4)



(a)



(b)



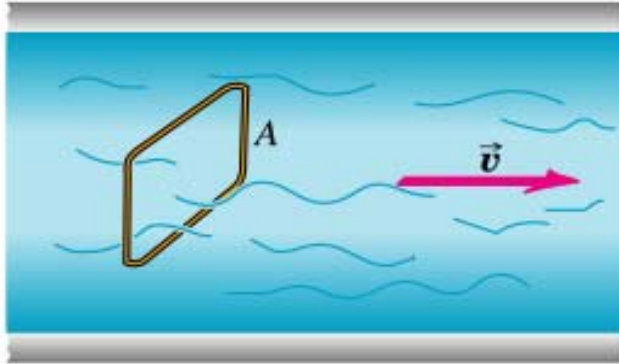
(c)



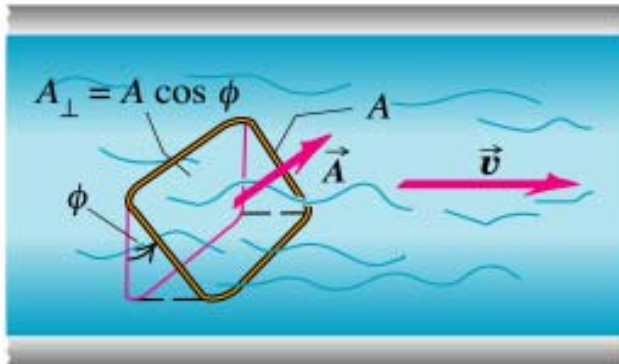


Cálculo do fluxo do campo eléctrico

Fluxo de água através do rectângulo definido pelo fio



(a)



(b)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

O fluxo de uma grandeza é o produto da componente normal da intensidade da grandeza (campo) pela superfície através da qual se mede o fluxo.

Na figura (a), o fluxo de água é $(dV/dt)=vA$.

Na figura (b), o fluxo é $(dV/dt)=vA\cos\phi$, onde ϕ representa o ângulo que o rectângulo faz com v . Também se pode escrever: $(dV/dt)=v \cdot A = v \cdot A$.

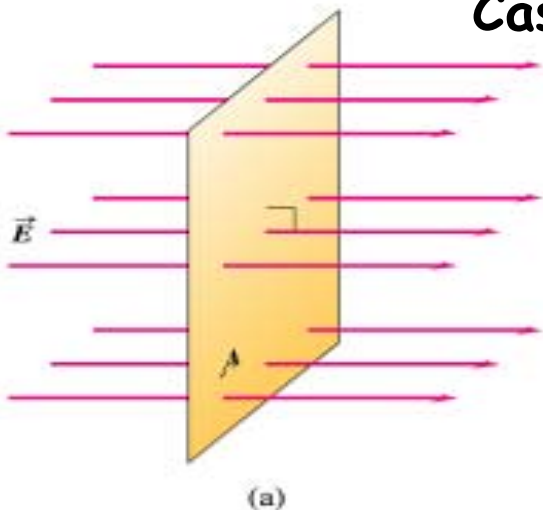
Fazendo a analogia entre o fluxo de um fluido e um campo eléctrico, podemos definir o fluxo de E , simplesmente substituindo o v pelo campo eléctrico E : $\Phi_E = E \cdot A$.





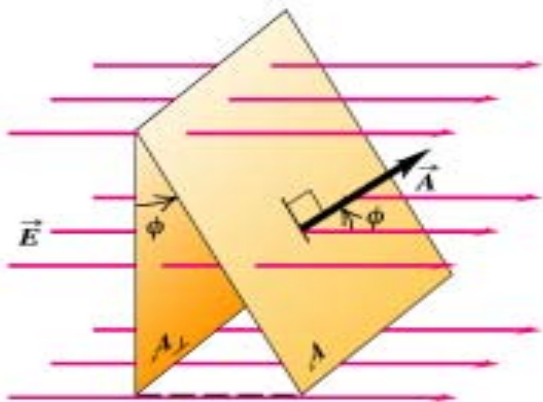
Cálculo do fluxo do campo eléctrico (2)

Caso de um campo eléctrico uniforme



(a)

(a) O fluxo do campo eléctrico (fluxo eléctrico) através da superfície A é $\Phi_E = EA$.



(b)

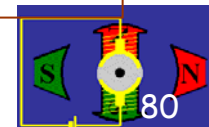
(b) Quando o vector área faz um ângulo ϕ com o vector E , a área projectada no plano orientado perpendicularmente ao fluxo de E é $A \cos \phi$: $\Phi_E = EA \cos \phi$.

O fluxo é zero quando $\phi = 90^\circ$, porque o rectângulo fica paralelo às linhas de campo fluxo e, portanto, não é atravessado pelas linhas do campo eléctrico.

Definição geral do fluxo do E :

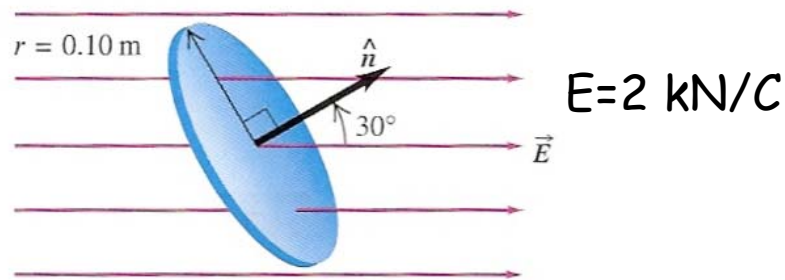
$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_S E_\perp dA = \int_S E_\perp dA.$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Exercícios

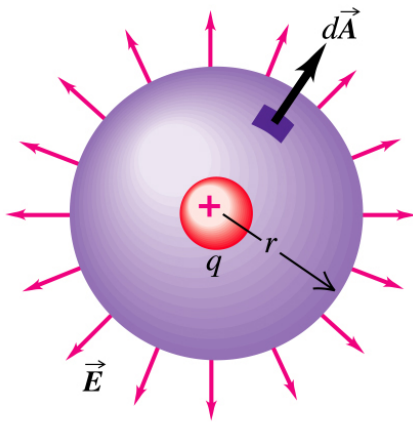
- Fluxo através de um disco quando $\theta=30^\circ$; 90° ; 0° .



23-7 The electric flux Φ_E through a disk depends on the angle between its normal \hat{n} and the electric field \vec{E} .

($\Phi_E = 54 \text{ Nm}^2/\text{C}$; $0 \text{ Nm}^2/\text{C}$; $63 \text{ Nm}^2/\text{C}$)

Fluxo através de uma superfície esférica de raio $0,2 \text{ m}$ e com uma carga de $3 \mu\text{C}$ no centro:



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

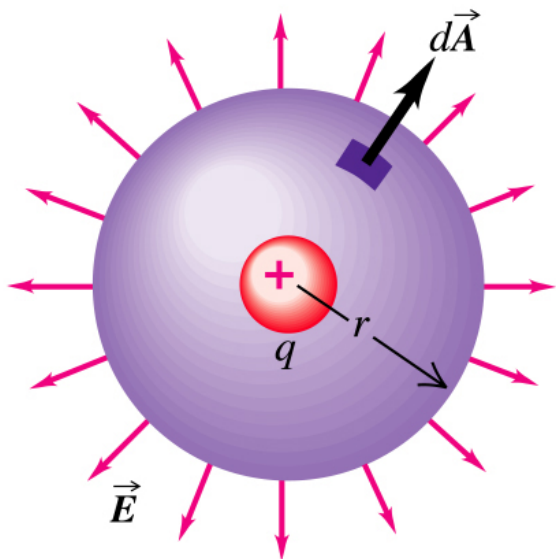
($E = 675 \text{ kN/C}$ e $\Phi_E = 340 \text{ kNm}^2/\text{C}$)

E se o raio da esfera for: a) 2 m ; b) 200 m ?



Lei de Gauss do campo eléctrico

Cálculo do fluxo eléctrico através de uma esfera devido a uma carga eléctrica q colocada no seu centro.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Conclusão

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \quad (\text{Gauss's law})$$

Esta lei é válida para uma superfície fechada qualquer

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int E dA \cos\phi = \int E dA = E \int dA =$$

$$E(4\pi R^2) = (1/4\pi\epsilon_0) q/R^2 (4\pi R^2) = q/\epsilon_0.$$

O fluxo eléctrico é, portanto, $\Phi_E = q/\epsilon_0$.

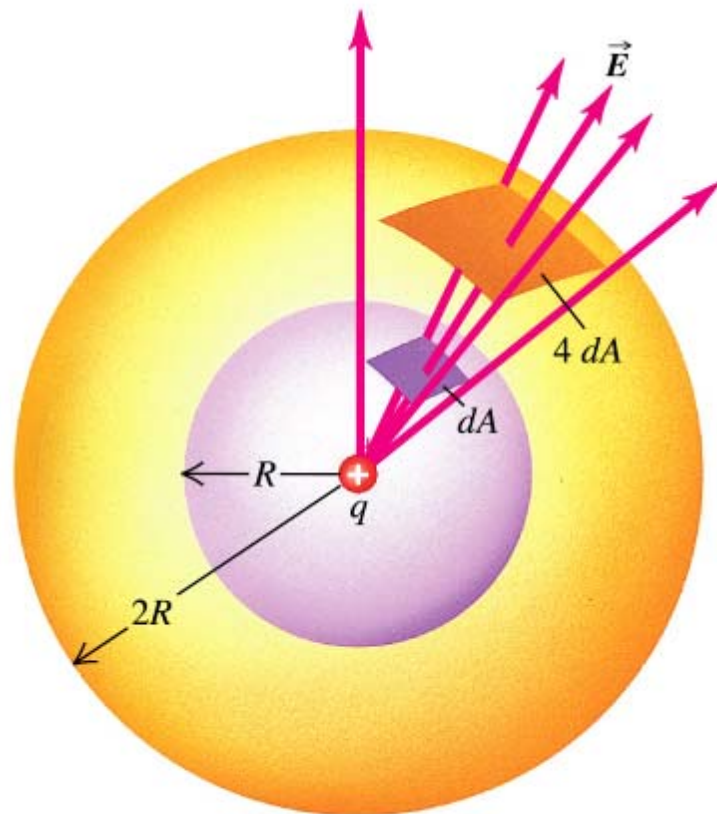
$$\text{Ou: } \Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int E dA \cos\phi = Q_{\text{encl}}/\epsilon_0$$





Lei de Gauss do campo eléctrico (2)

- Fluxo eléctrico Φ_E devido a uma carga pontual q .



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

A projecção do elemento de área dA de uma esfera de raio R Na esfera concêntrica de raio $2R$.

A projecção multiplica cada dimensão linear por w , de forma que o elemento de área na esfera maior é $4 dA$.

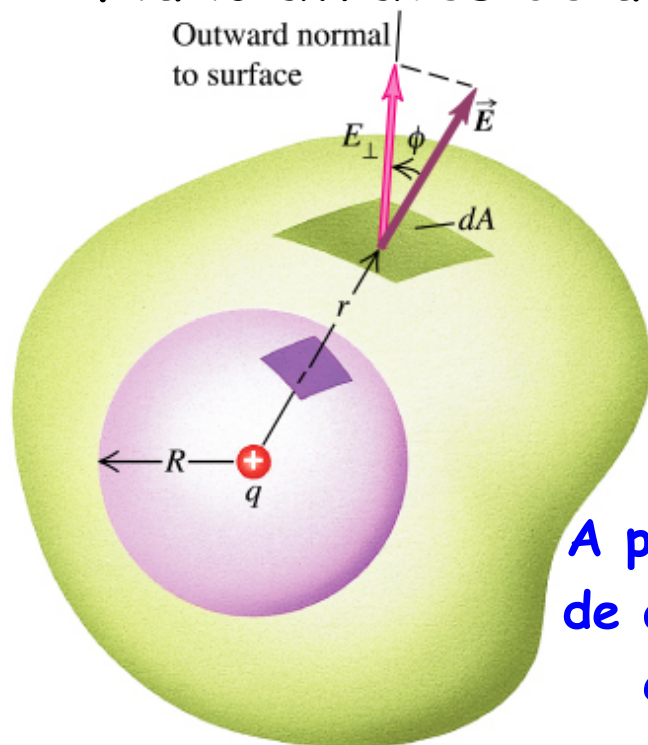
Com consequência, passa o mesmo número de linhas através de cada elemento de área da cada esfera





Lei de Gauss do campo eléctrico (3)

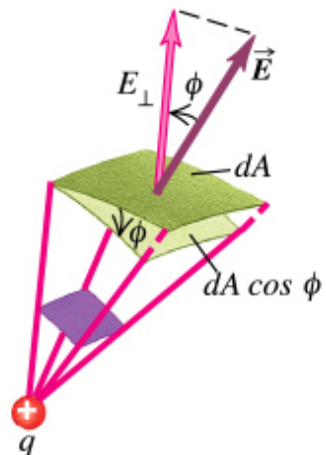
Fluxo através de uma superfície fechada irregular



(a)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

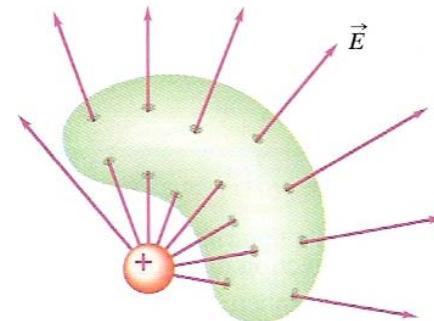
$$\Phi_E = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$



(b)

A projecção do elemento de área dA na superfície esférica é $dA \cos \phi$.

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$



23-12 A point charge *outside* a closed surface that encloses no charge. If an electric field line from the external charge enters the surface at one point, it will leave at another.

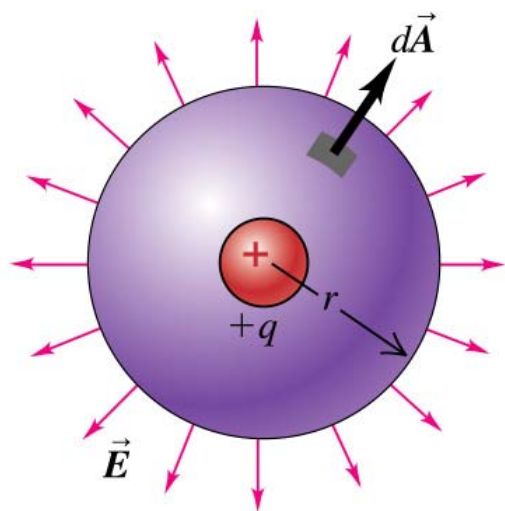
$$\Phi_E = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$$



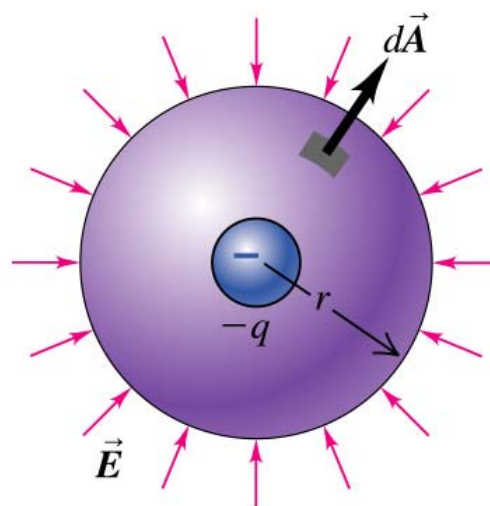


Lei de Gauss do campo eléctrico (4)

Superfícies Gausseanas em torno de cargas pontuais:
(a) positiva (b) negativa.



(a) Gaussian surface around positive charge:
positive (outward) flux



(b) Gaussian surface around negative charge:
negative (inward) flux

Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

A lei de Gauss só é "útil" se a superfície de Gauss e a distribuição de carga tiver certas propriedades de simetria.

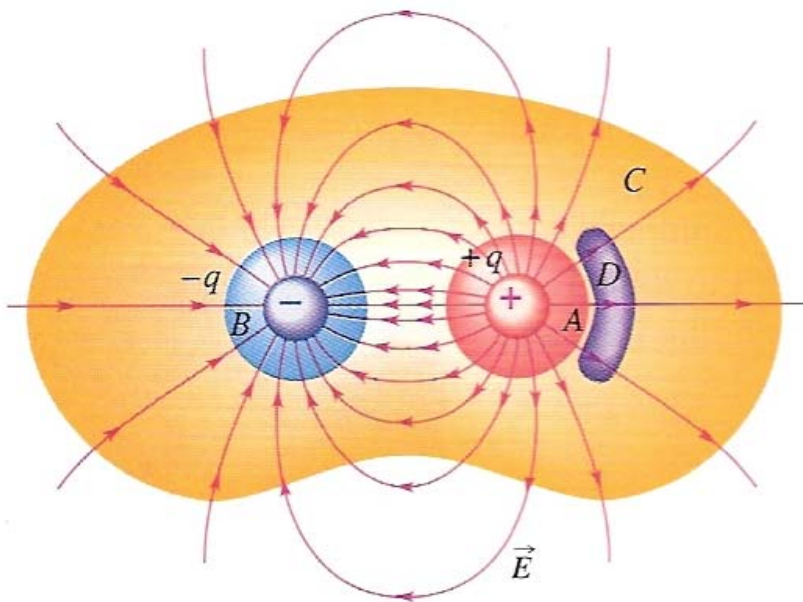




Exemplo de aplicação: cálculo do fluxo

- Determine o fluxo eléctrico através de cada uma das superfícies fechadas A, B, C e D.

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$



$$\text{A: } \Phi_E = +q/\epsilon_0$$

$$\text{B: } \Phi_E = -q/\epsilon_0$$

$$\text{C: } \Phi_E = 0$$

$$\text{D: } \Phi_E = 0$$

23-13 The net number of field lines leaving a closed surface is proportional to the total charge enclosed by that surface.

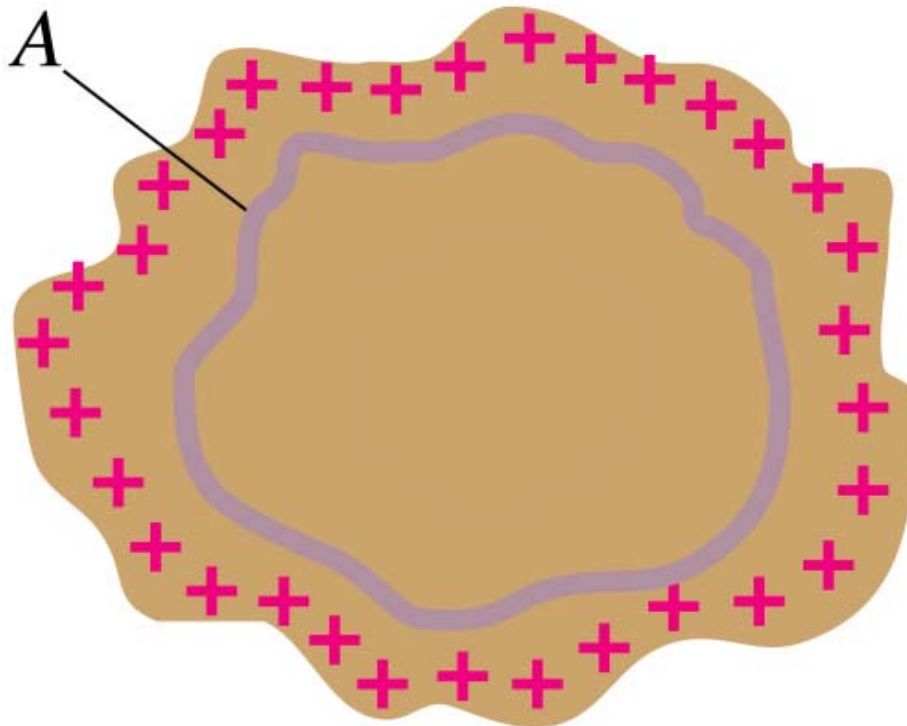
As mesmas conclusões poderiam ser obtidas contando o número de linhas de campo que atravessam cada uma das superfícies.





Condutores em equilíbrio electrostático

Superfície
gausseana



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

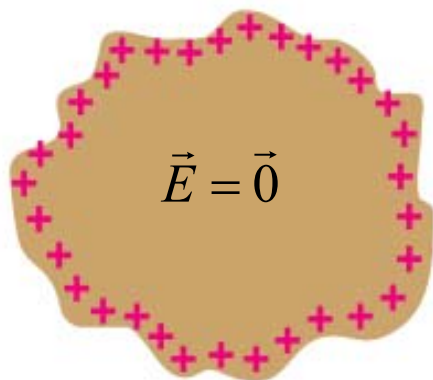
Em equilíbrio electrostático, qualquer o excesso de carga num condutor sólido aloja-se na superfície exterior do condutor.



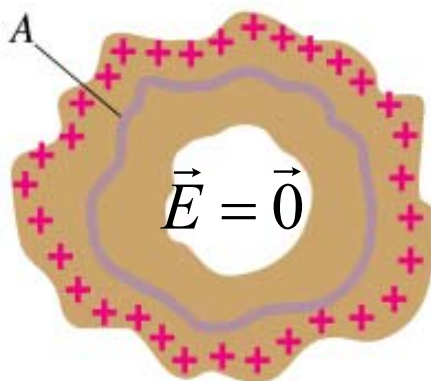


Condutores em equilíbrio electrostático (2)

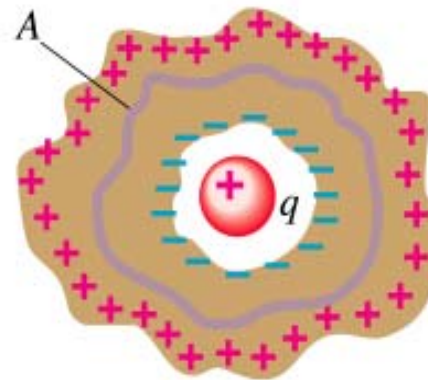
Qual é a carga na superfície interior do condutor oco?



(a)



(b)



(c)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Como o campo eléctrico no interior do condutor é zero, se escolhermos a nossa superfície gausseana dentro do condutor oco (onde o campo deve ser nulo), a carga total encerrada/contida no interior da superfície fechada deve ser zero. Portanto, a carga total na superfície interior do corpo oco deve ser simétrica da carga colocada no centro, de forma $+q+(-q)=0$.

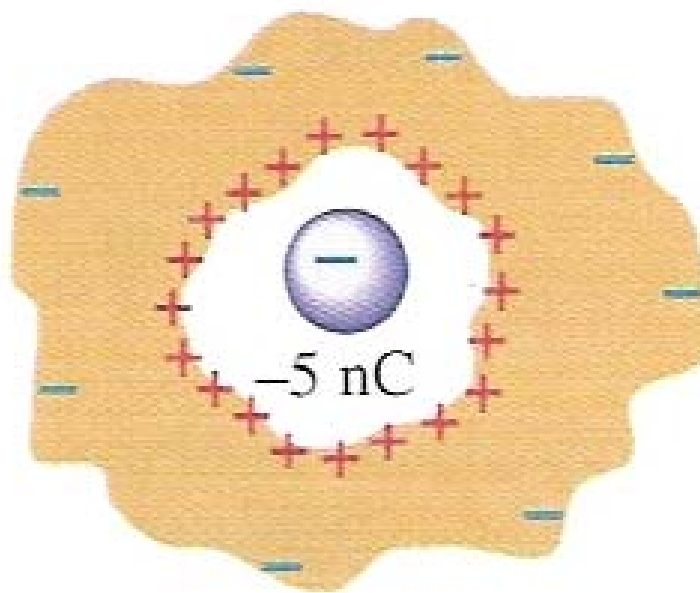




Condutores em equilíbrio electrostático (3)

Exercício: O condutor ao lado tem um carga total de 3 nC. A carga dentro da cavidade, isolada do condutor, é -5 nC. Qual é a carga nas superfícies interior e exterior do condutor?

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$



Superfície interior: +5 nC
Superfície exterior: -2 nC



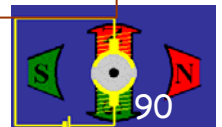
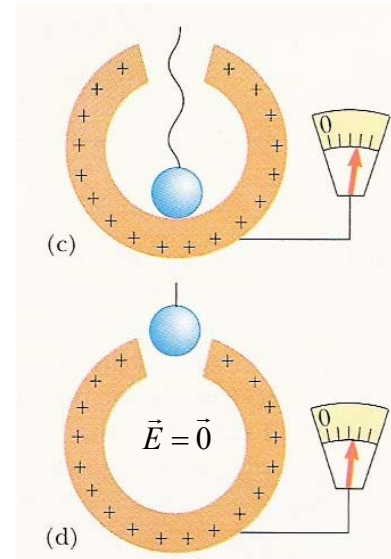
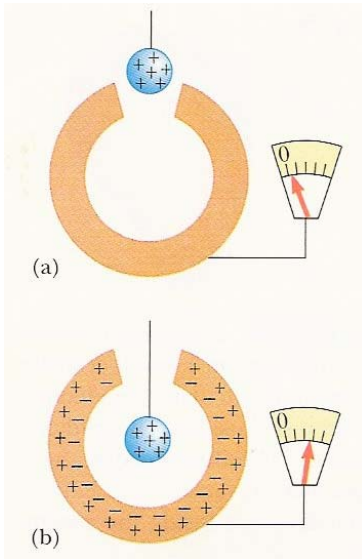
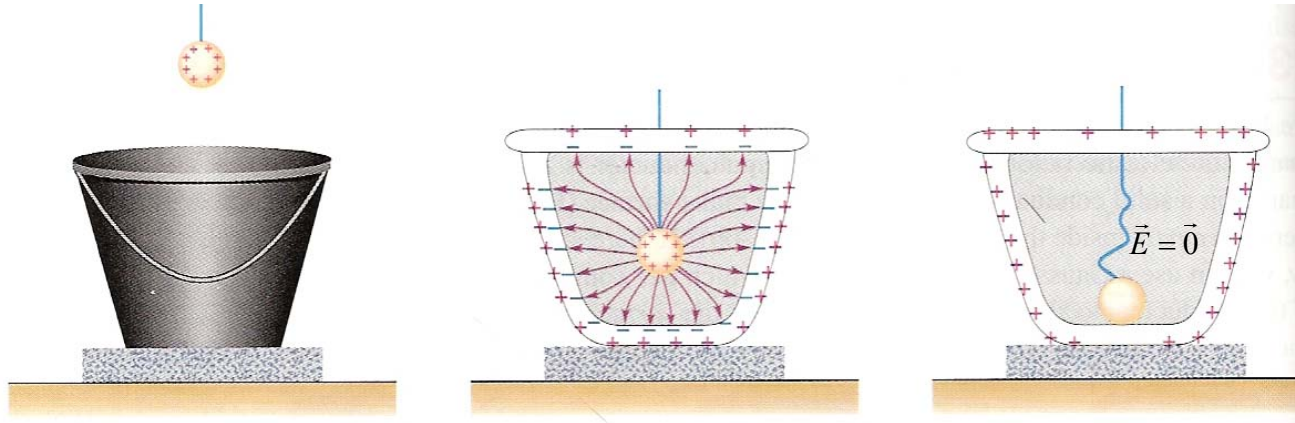


Faraday: Experiência do balde

Verificação experimental/teste às leis de Gauss e de Coulomb

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$

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



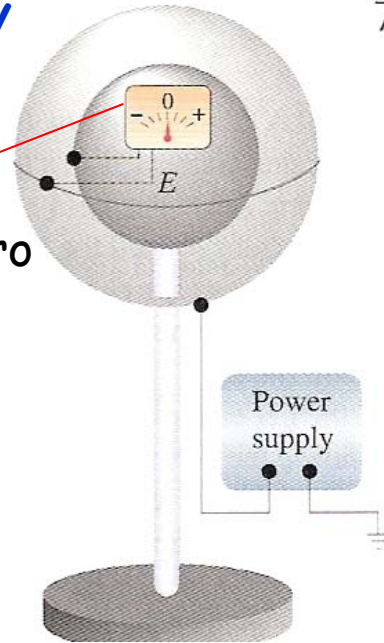


Gerador electrostático de van der Graaff

Versão moderna da experiência de Faraday (Faraday's icepail)

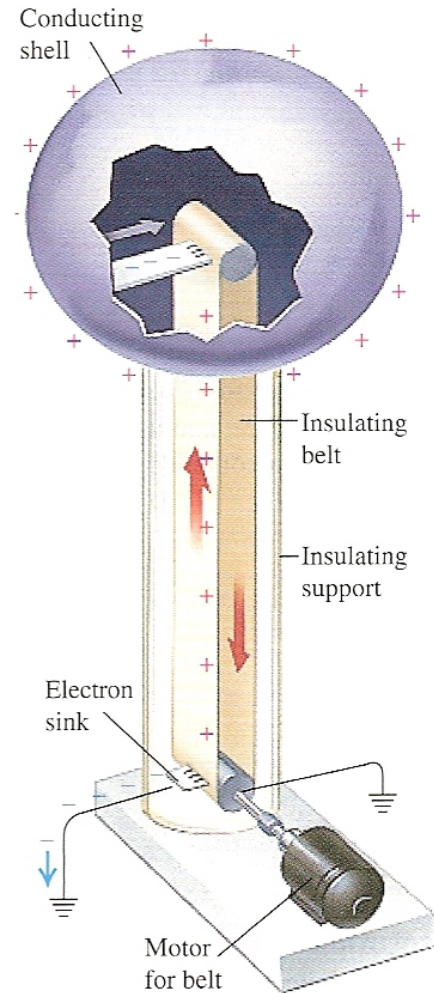
721

Electrómetro



O campo eléctrico entre a esfera interior e a superfície interna da esfera exterior é sempre nulo, qualquer que seja a carga fornecida à superfície exterior pela fonte de energia, confirmando a lei de Gauss.

Gerador electrostático de van de Graaff





Aplicação da lei de Gauss do campo eléctrico

A lei de Gauss pode ser usada para determinar a magnitude do vector campo eléctrico:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0} \quad (\text{Gauss's law})$$

Qualquer superfície fechada

$$Q_{encl} = \sum_i q_i$$

$$Q_{encl} = \int_V \rho(\vec{r}) dV$$

$$Q_{encl} = \int_S \sigma(\vec{r}) dS$$

$$Q_{encl} = \int_L \lambda(\vec{r}) dl$$





Aplicação da lei de Gauss do campo eléctrico (2)

Receita para usar bem a lei de Gauss:

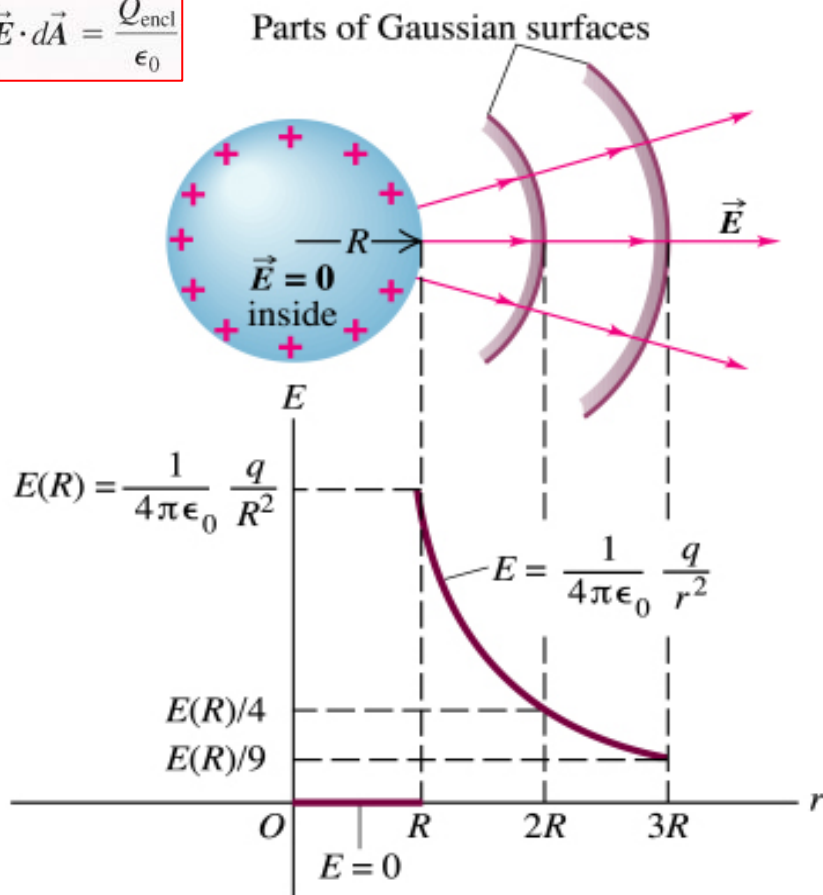
1. Desenhar a figura muito bem - localizar todas as cargas e as direcções dos vectores campos eléctricos \mathbf{E} .
2. Desenhar uma **superfície gausseana** imaginária fechada de forma que a magnitude do campo eléctrico é **constante** nessa superfície e que a **superfície contém o ponto** onde se quer determinar o valor do campo.
3. Escrever a lei de Gauss e determinar o produto $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$
4. Uma vez que a superfície foi desenhada de forma que \mathbf{E} é constante nessa superfície, pode-se passar o factor $|\mathbf{E}|$ para fora do integral.
5. Determinar o valor de Q_{encl} a partir da figura desenhada e inseri-lo na equação da lei de Gauss.
6. Resolver a equação em ordem à magnitude de \mathbf{E} .





Esfera condutora carregada

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

O campo eléctrico electrostático é nulo no interior de um condutor sólido, qualquer que seja a forma do condutor.

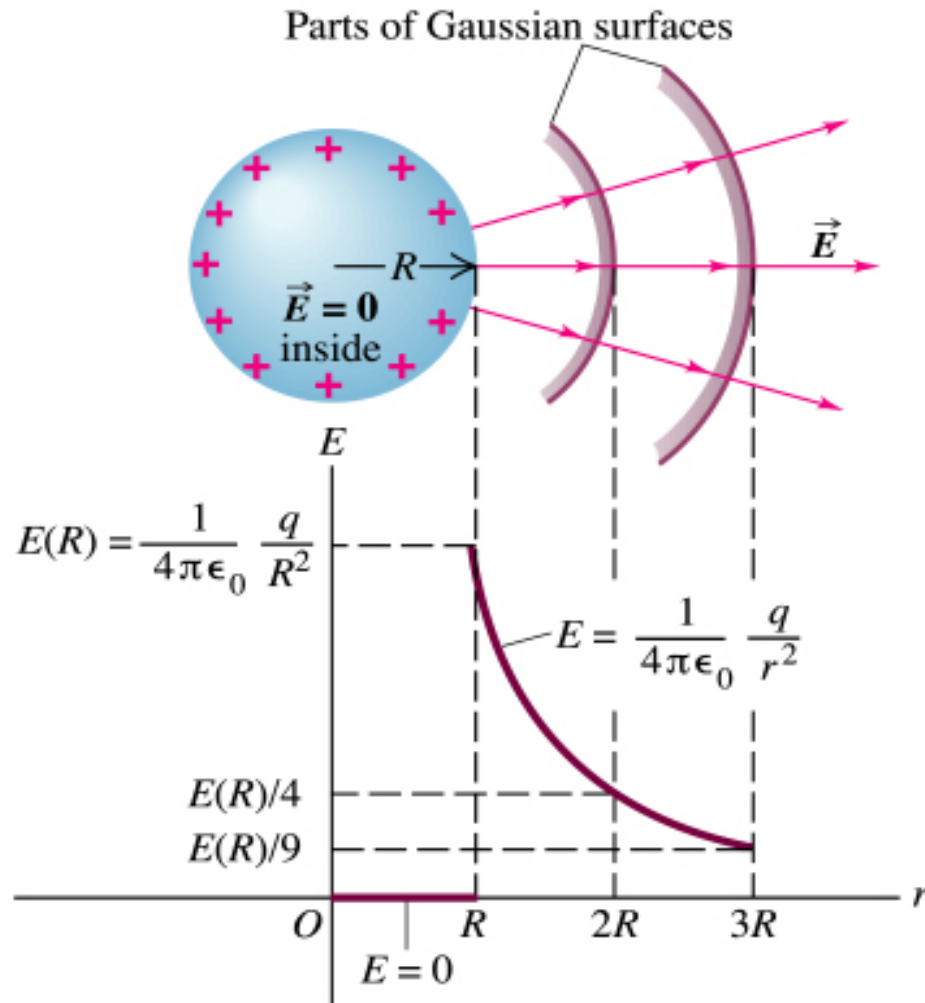
No interior de um condutor esférico em equilíbrio electrostático o campo eléctrico é nulo.

Fora do condutor (esfera) o campo "cai" com $1/r^2$, como se toda a carga em excesso estivesse concentrada no centro da esfera.





Campo eléctrico na superfície de uma esfera condutora



$$E_{\perp}(r = R^+) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(R^+)^2}$$

$$\sigma = \frac{q}{4\pi(R^+)^2}$$

$$\Phi_E(r = R^+) = E_{\perp} A^+ = \frac{\sigma A^+}{\epsilon_0}$$

$$E_{\perp}(r = R^+) = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$





Casca esférica com e sem carga no centro

Campo eléctrico criado por uma esfera condutora centrada numa casca esférica também condutora.

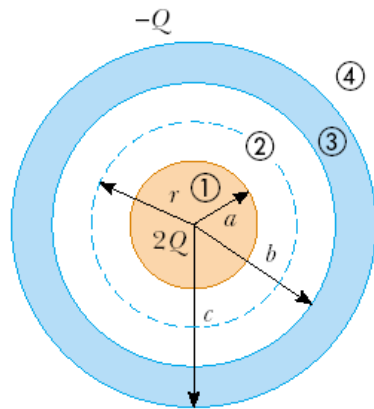
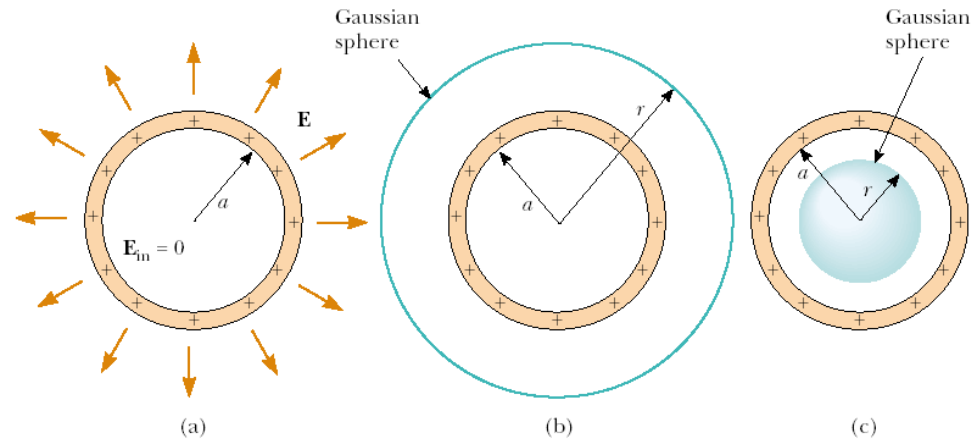


Figure 24.20 (Example 24.10) A solid conducting sphere of radius a and carrying a charge $2Q$ surrounded by a conducting spherical shell carrying a charge $-Q$.

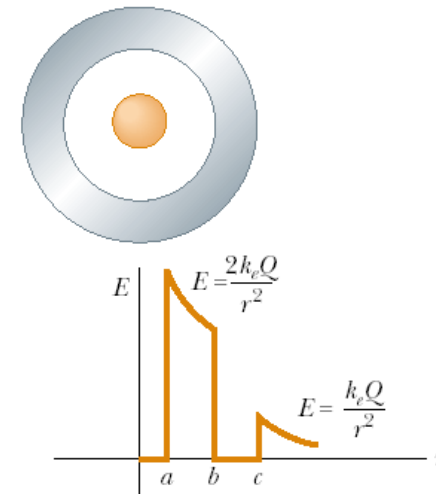


Figure 24.21 (Example 24.10) A plot of E versus r for the two-conductor system shown in Figure 24.20.





Lei de Gauss e condutores em equilíbrio electrostático

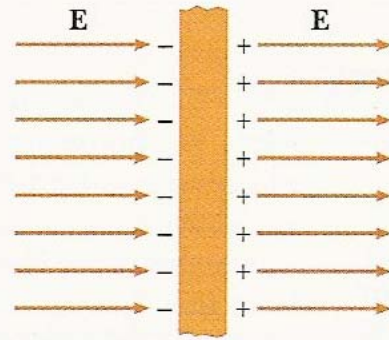
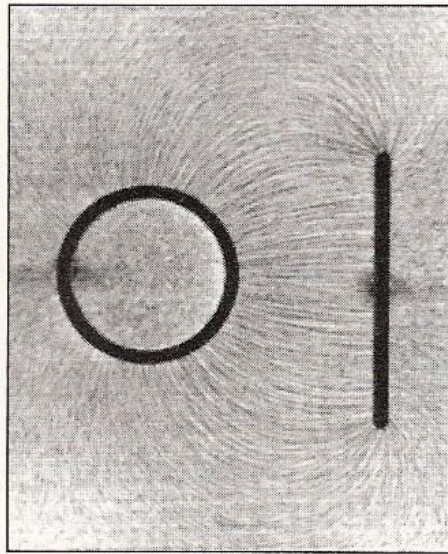


FIGURE 24.16 A conducting slab in an external electric field E . The charges induced on the surfaces of the slab produce an electric field that opposes the exter-

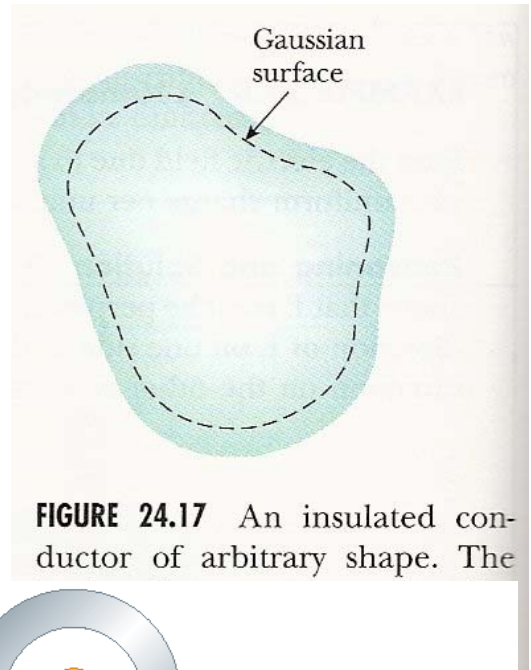


FIGURE 24.17 An insulated conductor of arbitrary shape. The

Electric charges on an opposing cylindrical thread with that (1) are perpendicular lines in

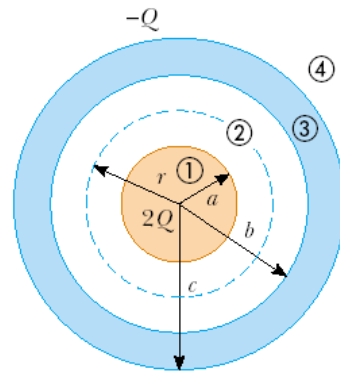


Figure 24.20 (Example 24.10) A solid conducting sphere of radius a and carrying a charge $2Q$ surrounded by a conducting spherical shell carrying a charge $-Q$

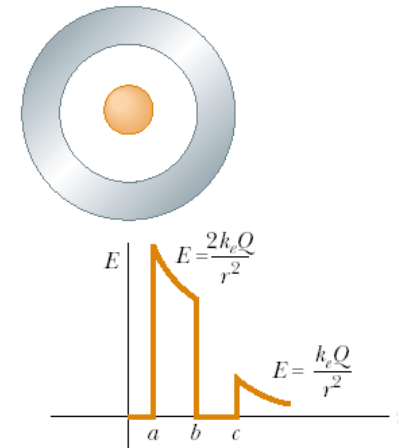


Figure 24.21 (Example 24.10) A plot of E versus r for the two-conductor system shown in Figure 24.20.





Lei de Gauss e condutores em equilíbrio electrostático (2)

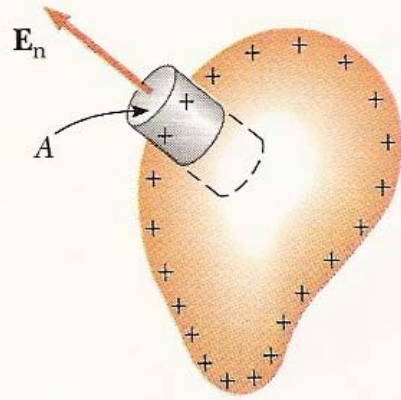


FIGURE 24.18 A gaussian surface in the shape of a small cylinder is used to calculate the electric field just outside a charged conductor. The flux through the gaussian surface is $E_n A$. Note that E is zero inside the conductor.

$$E_2 A = E_2 (4\pi r^2) = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} = \frac{2Q}{\epsilon_0}$$

$$E_2 = \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{2k_e Q}{r^2} \quad (\text{for } a < r < b)$$

EXAMPLE 24.10 A Sphere Inside a Spherical Shell

A solid conducting sphere of radius a has a net positive charge $2Q$ (Fig. 24.19). A conducting spherical shell of inner radius b and outer radius c is concentric with the solid sphere and has a net charge $-Q$. Using Gauss's law, find the electric field in the regions labeled ①, ②, ③, and ④ and the charge distribution on the spherical shell.

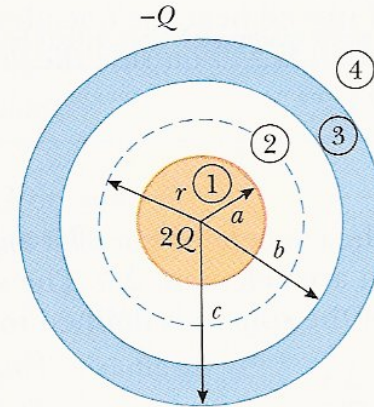


FIGURE 24.19 (Example 24.10) A solid conducting sphere of radius a and charge $2Q$ surrounded by a conducting spherical shell of charge $-Q$.

$$E_4 = \frac{k_e Q}{r^2} \quad (\text{for } r > c)$$

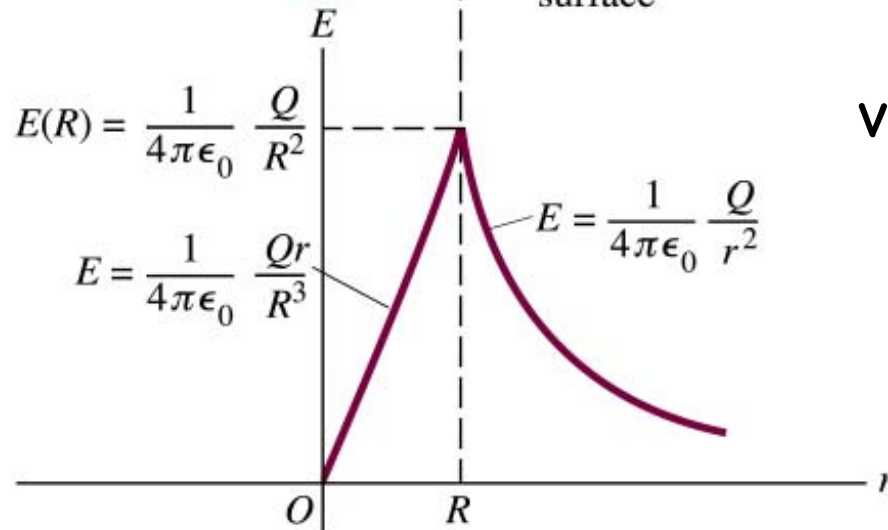
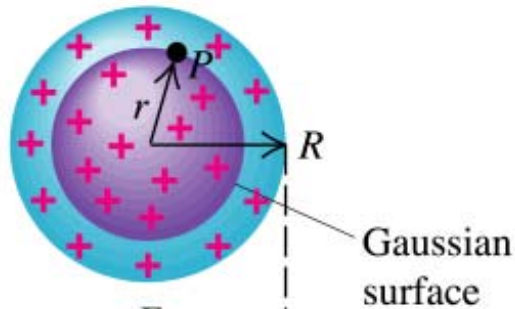




Esfera não condutora carregada uniformemente

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0}$$

Determinar o campo eléctrico criado por uma esfera isoladores uniformemente carregada.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

“usa-se a densidade de volume de carga”:
 $\rho = \text{carga} / \text{unidade de volume}$ para caracterizar a distribuição de carga no interior da esfera.

$$Q_{encl} = \int_V \rho(\vec{r}) dV$$





Esfera não condutora carregada uniformemente (2)

Campo eléctrico criado por uma esfera isoladores uniformemente carregada.

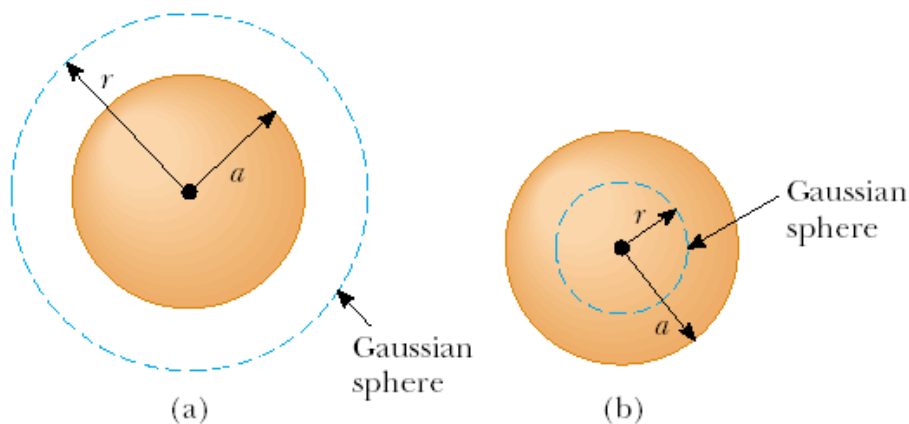
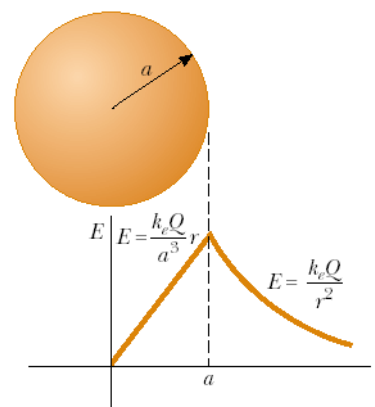


Figure 24.12. Note that the magnitude of the field is continuous, but the derivative of the field magnitude is not.



Notar que o campo é contínuo, mas a sua derivada não é contínua.

O campo eléctrico poderá ser descontínuo?



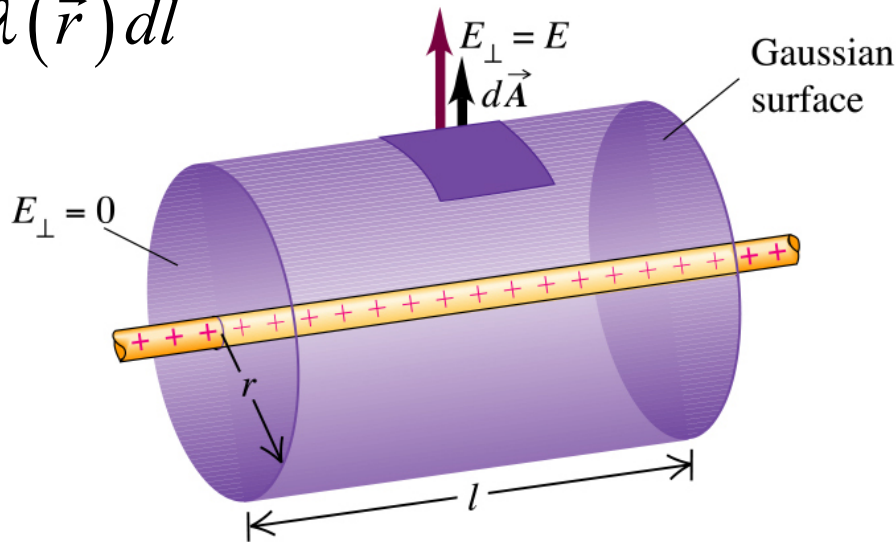


Fio condutor carregado infinito

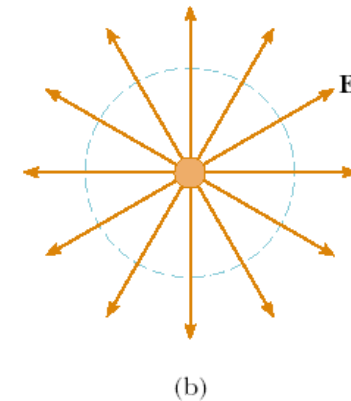
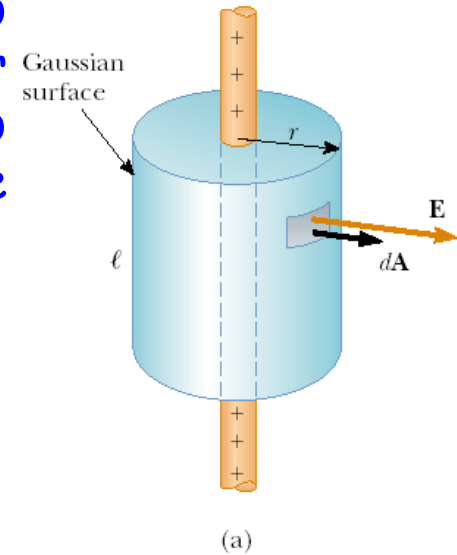
$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0}$$

Para determinar o campo eléctrico fora de um fio condutor infinitamente longo com excesso de carga, usa-se uma superfície coaxial cilíndrica

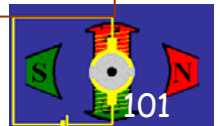
$$Q_{encl} = \int_L \lambda(\vec{r}) dl$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



$$\Phi_E = E 2\pi r l = \frac{\lambda l}{\epsilon_0} \quad \text{e} \quad E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$$

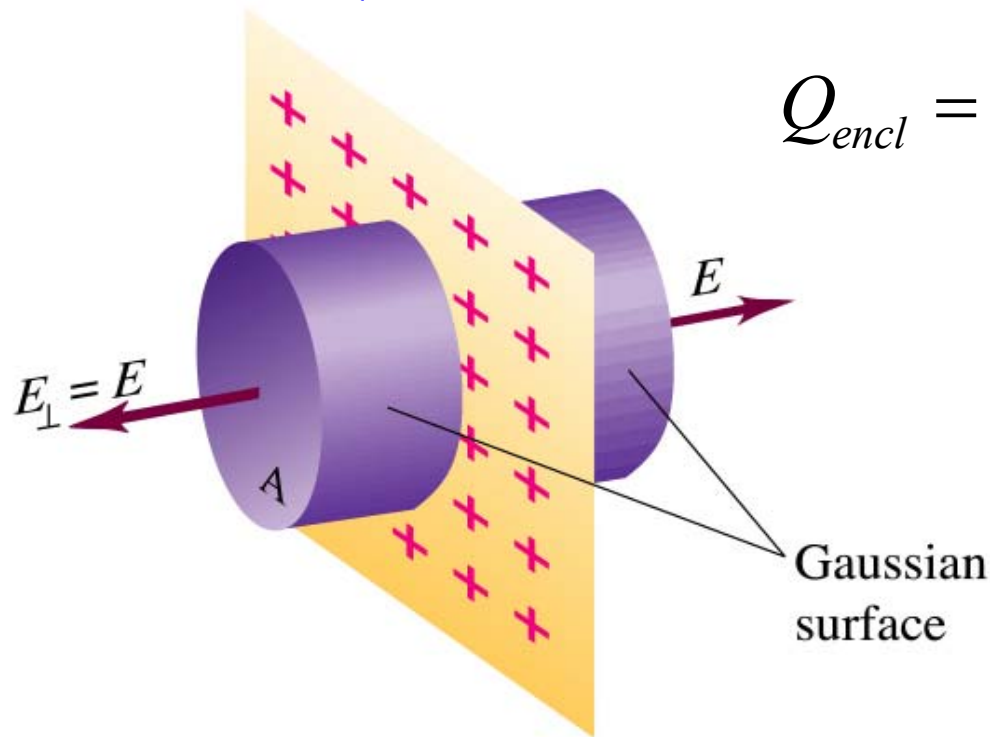




Plano condutor carregado infinito

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0}$$

Para determinar o campo eléctrico criado por uma folha infinita de excesso de carga eléctrica a superfície gausseana que nos facilita a vida é um cilindro.



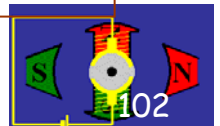
$$Q_{encl} = \int_S \sigma(\vec{r}) dS$$

$$\Phi_E = 2EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

e

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

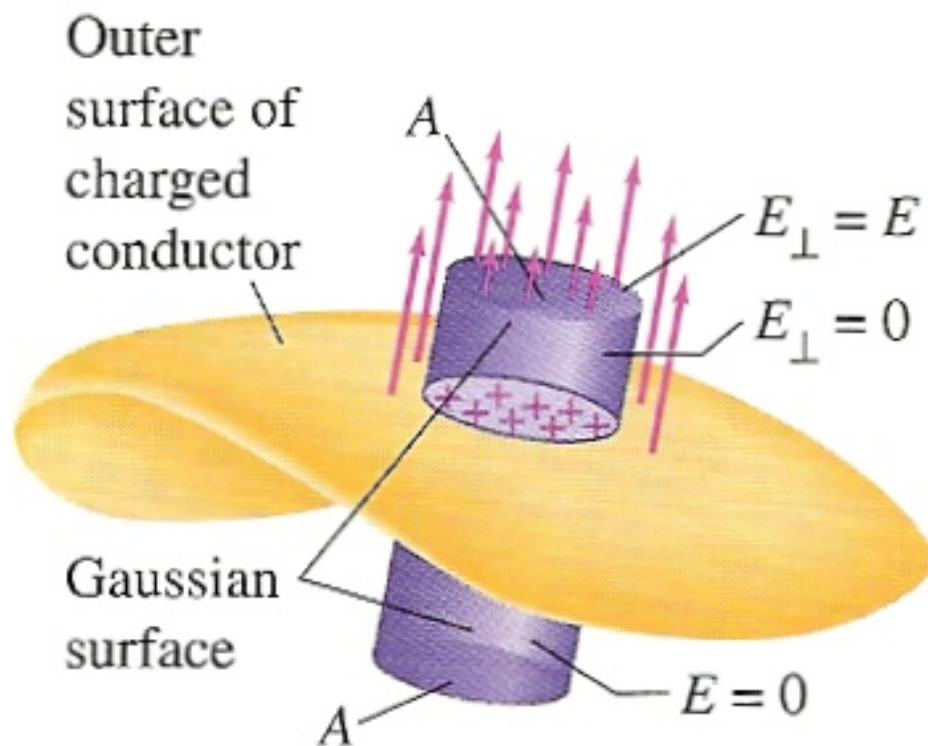




Campo eléctrico na superfície de um condutor

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0}$$

$$Q_{encl} = \int_S \sigma(\vec{r}) dS$$

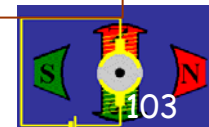


$$\Phi_E = E_{\perp} A = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

Obtendo-se:

$$E_{\perp} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

O campo eléctrico num condutor carregado é perpendicular à superfície exterior do condutor e igual a σ/ϵ_0 .





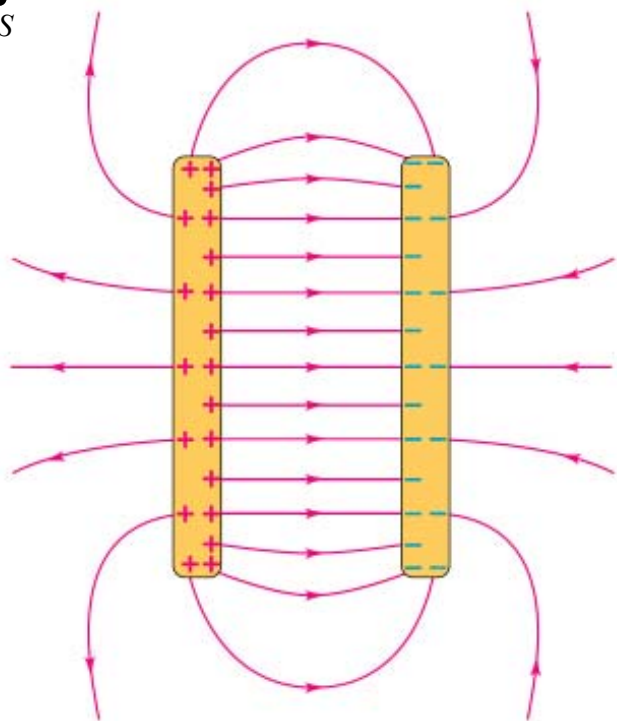
Placas paralelas carregadas simetricamente

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{encl}}{\epsilon_0}$$

$$Q_{encl} = \int_S \sigma(\vec{r}) dS$$

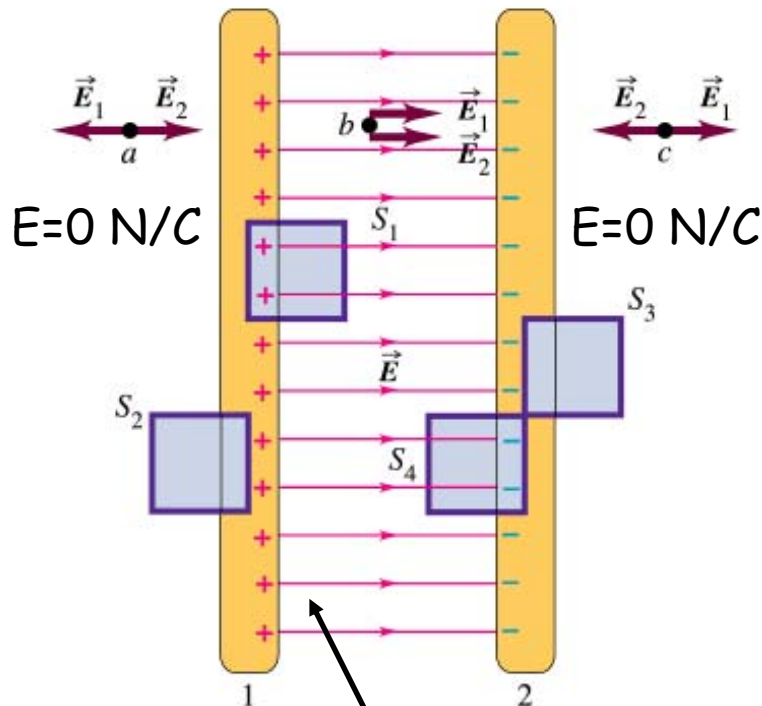
Campo eléctrico criado por duas placas carregadas com a mesma quantidade de carga, mas de polaridade oposta.

Condensador de placas paralelas

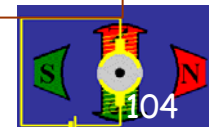


(a)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

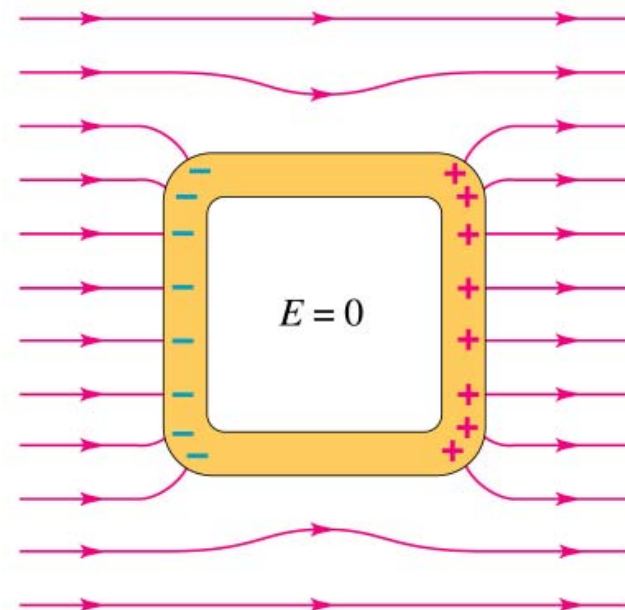
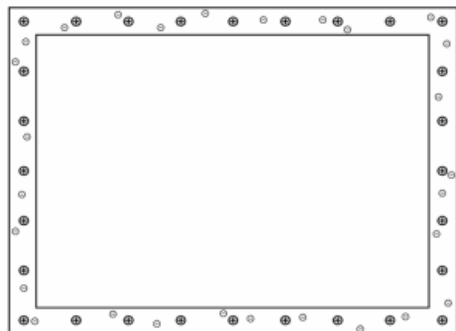


$$\Phi_E = EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_0} \quad e \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$





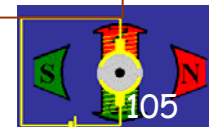
Lei de Gauss e a gaiola de Faraday



(a)

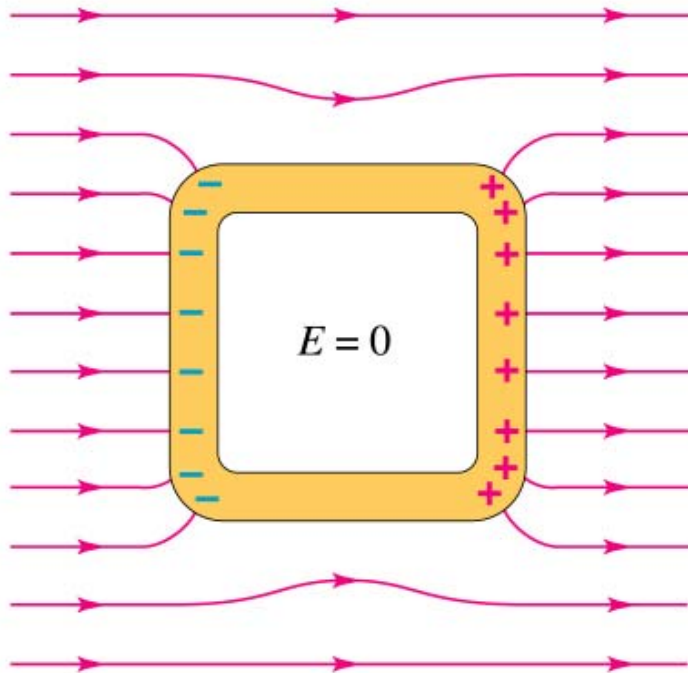
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

O campo eléctrico E no interior de uma caixa condutora (gaiola de Faraday) é nulo, mesmo quando existe um campo eléctrico exterior significativo. Uma superfície gausseana desenhada no interior do material condutor de que a caixa é feita deve ter um campo eléctrico nulo no seu interior. Se a superfície gausseana tem campo nulo, a carga nela contida deve ser zero pela lei de Gauss.



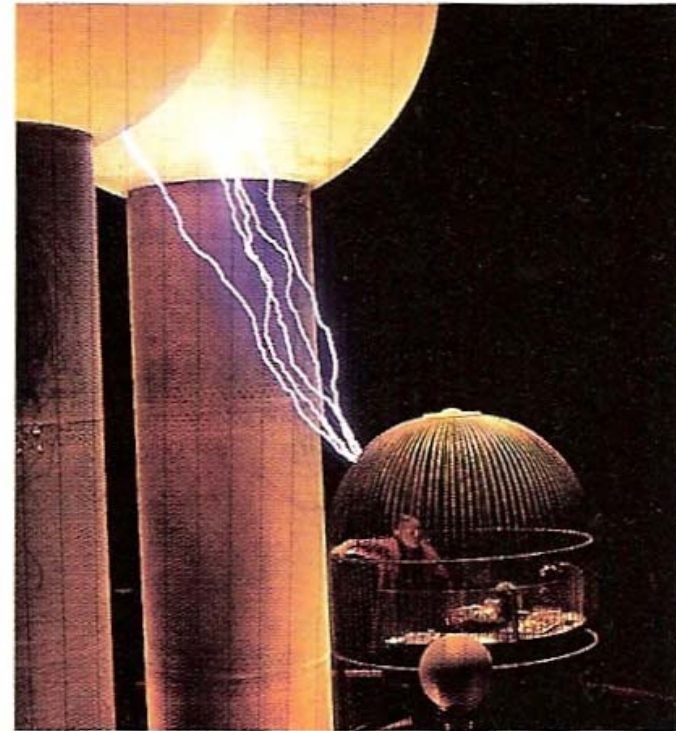


Lei de Gauss e a gaiola de Faraday (2)



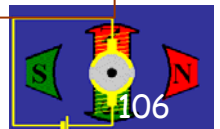
(a)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



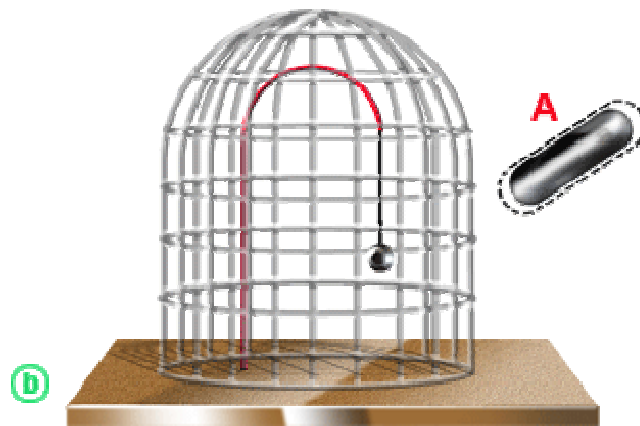
(b)

O campo eléctrico E no interior de uma caixa condutora (gaiola de Faraday) é nulo, mesmo quando existe um campo eléctrico exterior significativo. Uma superfície gausseana desenhada no interior do material condutor de que a caixa é feita deve ter um campo eléctrico nulo no seu interior. Se a superfície gausseana tem campo nulo, a carga nela contida deve ser zero pela lei de Gauss.





Lei de Gauss e a gaiola de Faraday (3)





Electrostática

-

Potencial Eléctrico

Potencial: s. m. (fís.) grandeza física cujo valor, num ponto, é dado pelo trabalho realizado para trazer, desde um ponto infinitamente afastado até àquele ponto, a unidade de carga eléctrica positiva (potencial electrostático), ou a unidade de massa magnética positiva (potencial magnetostático), ou ainda a unidade de massa material (potencial gravítico) (De potência + -al)



Trabalho e energia potencial

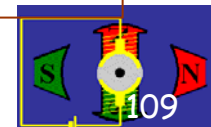
O trabalho realizado por uma força aplicada numa partícula que se desloca sob a acção da força da posição a para a posição b é dado pelo integral de percurso (linha):

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_a^b F \cos \theta dl$$

onde $d\vec{l}$ representa o deslocamento infinitesimal ao longo do caminho percorrido pela partícula, e θ é o ângulo entre a força \mathbf{F} e o vector $d\mathbf{l}$ em cada ponto do percurso.

Se a força F for conservativa, o trabalho realizado pela força \mathbf{F} pode ser expresso sempre em termos da variação de energia potencial U . Quando uma partícula se move sob a acção de uma força \mathbf{F} da posição a onde $U=U_a$ para uma posição b onde $U=U_b$, o trabalho realizado pela força \mathbf{F} é dado por:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = U_a - U_b = -(U_b - U_a) = -\Delta U$$





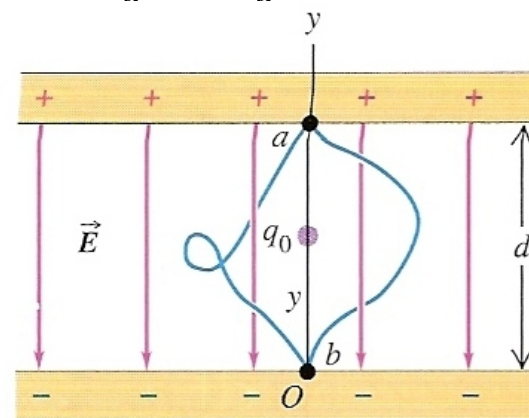
Trabalho e energia potencial (2)

O teorema do trabalho-energia define que a variação de energia cinética $\Delta K = K_b - K_a$ durante qualquer deslocamento é igual ao trabalho total realizado sobre a partícula. Se apenas realizarem trabalho sobre a partícula forças conservativas, então:

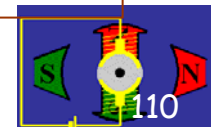
$$W_{a \rightarrow b} = K_b - K_a = -(U_b - U_a) \quad \text{e} \quad K_b + U_b = K_a + U_a$$

Considere-se uma carga eléctrica de teste q_0 no espaço compreendido entre duas placas paralelas carregadas uniformemente com carga de polaridade oposta (campo eléctrico uniforme). Devido à presença do campo eléctrico entre as placas, a carga é actua por uma força $F = q_0 E$. À medida que a carga se desloca a força que actua na carga de teste é constante e independente da localização de carga. Assim, o trabalho realizado pelo campo eléctrico é o produto da magnitude da força pelo deslocamento d :

$$W_{a \rightarrow b} = Fd = q_0 Ed.$$



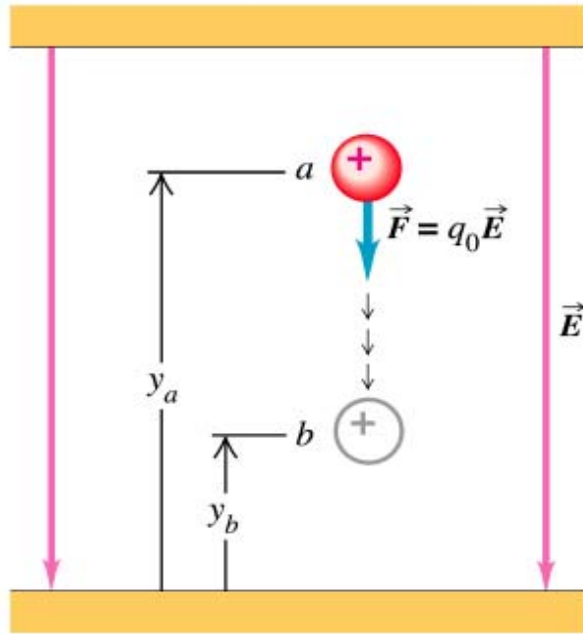
24-1 A test charge q_0 moving from a to b experiences a force of magnitude $q_0 E$. The work done by this force is $W_{a \rightarrow b} = q_0 Ed$ and is independent of the particle's path.



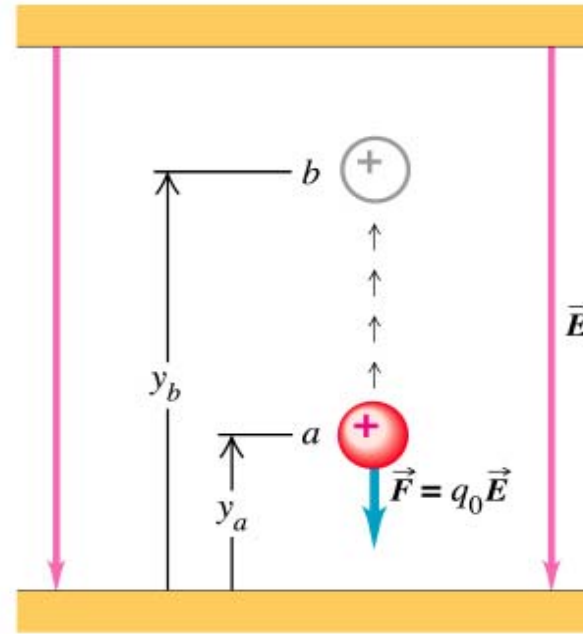


Energia potencial num campo eléctrico uniforme

Carga positiva movendo-se num campo eléctrico E .



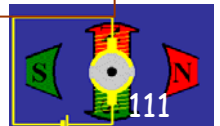
(a) Decreasing U



(b) Increasing U

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

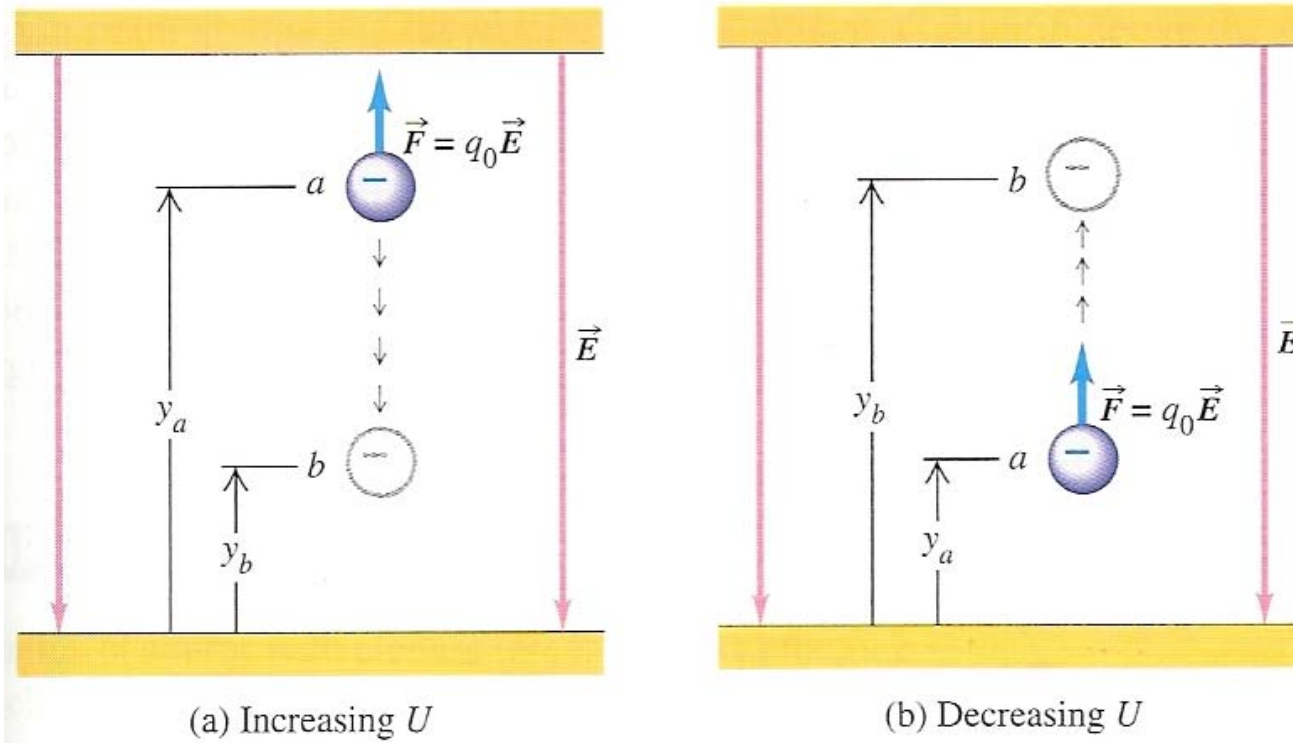
(a) Quando uma carga eléctrica positiva se move na direcção de um campo eléctrico, o campo eléctrico realiza trabalho positivo e a energia potencial diminui; (b) ... direcção oposta ao campo eléctrico ... trabalho negativo ... a energia potencial aumenta.



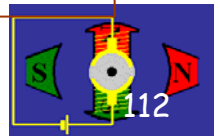


Energia potencial num campo eléctrico uniforme (2)

Carga negativa movendo-se num campo eléctrico E .



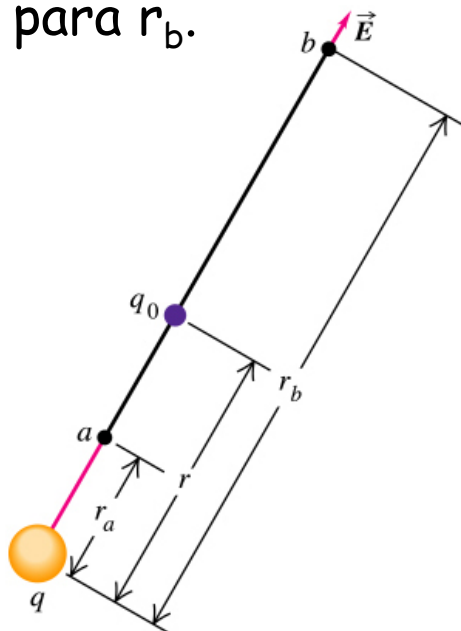
(a) Quando uma carga eléctrica negativa se move na direcção de um campo eléctrico, o campo eléctrico realiza trabalho negativo e a energia potencial aumenta; (b) ... na direcção oposta ao campo eléctrico ... trabalho positivo ... a energia potencial diminui.



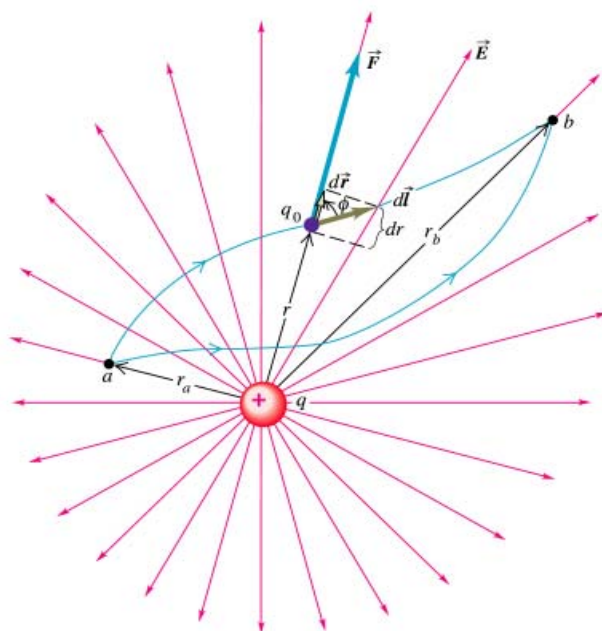


Energia potencial de um sistema de 2 cargas

Seja uma carga q_0 movendo-se ao longo de uma linha recta estendendo-se radialmente a partir da carga q . Quando se move da posição a para a posição b , a distancia à carga q passa de r_a para r_b .



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$F_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2}$$

O trabalho realizado na carga q_0 pelo campo eléctrico produzido pela carga q depende apenas das distâncias r_a e r_b .

$$W_{a \rightarrow b} = \int_{r_a}^{r_b} F_r \cdot dr = \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} dr = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) = U_a - U_b$$

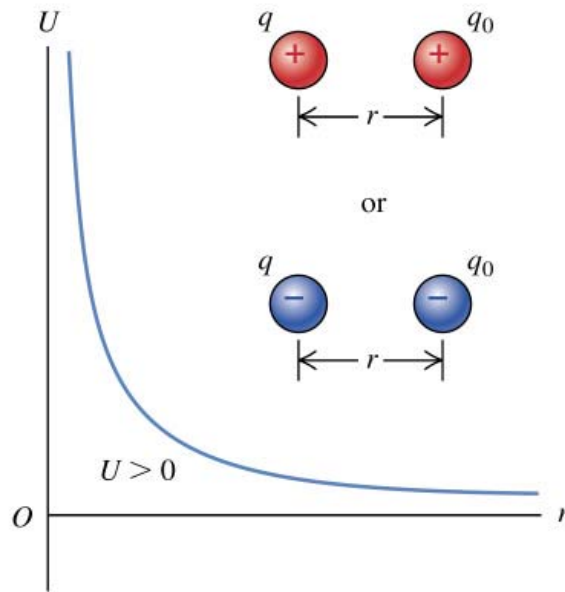




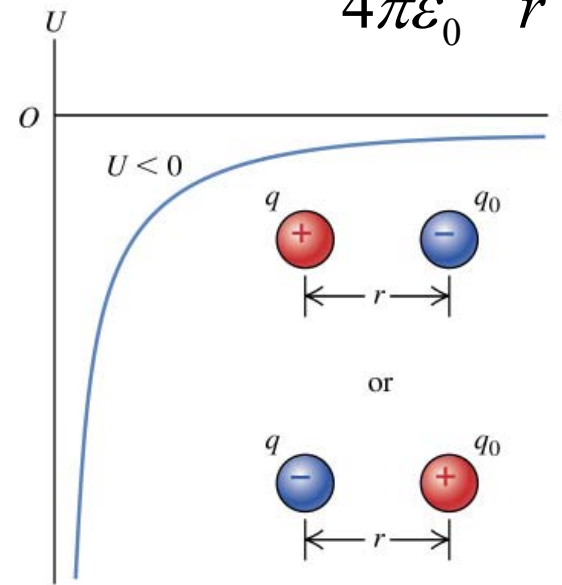
Energia potencial de um sistema de 2 cargas (2)

Gráficos da energia potencial U de um sistema de duas cargas pontuais q e q_0 versus a separação entre elas.

$$U_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r}$$

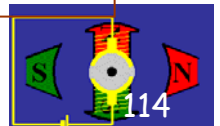


(a) q, q_0 have same sign



(b) q, q_0 have opposite signs

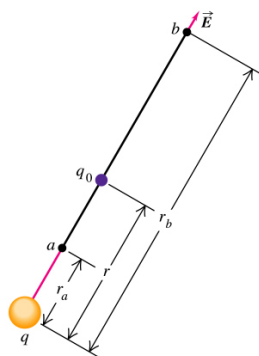
Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.



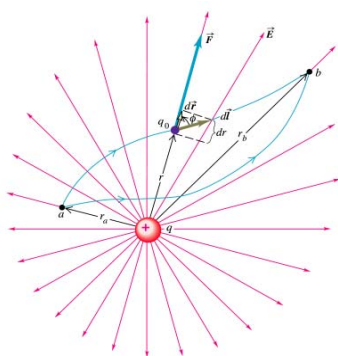


Energia potencial de um sistema de várias cargas

A energia de um sistema de duas cargas quando a carga de teste q_0 está a uma distância r da carga q criadora de campo é:



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

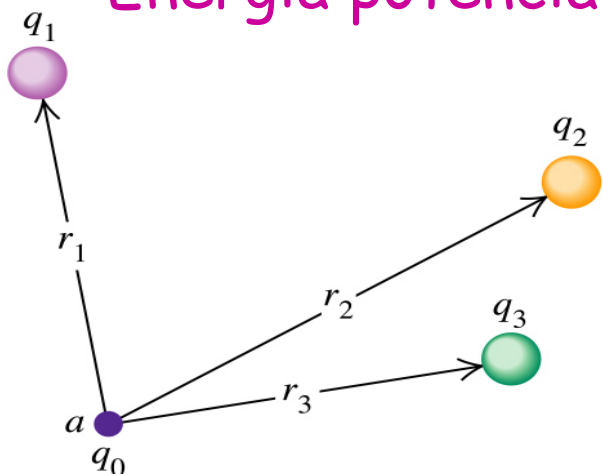


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$U_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r}$$

Energia necessária para trazer do infinito a carga de teste q_0 do infinito para um ponto que dista da carga q a distância r .

Energia potencial de um sistema de várias cargas



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$U = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

A energia potencial associada à presença da carga de teste q_0 no ponto "a" de um campo E criado pelas cargas q_1, q_2, q_3, \dots , depende das cargas q_1, q_2, q_3 e das suas distâncias r_1, r_2, r_3, \dots , ao ponto "a."





Energia potencial de um dipolo num E

The work done by the electric field to rotate the dipole by an angle $d\theta$ is

$$dW = -\tau d\theta = -pE \sin \theta d\theta$$

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta} (-pE \sin \theta) d\theta = pE (\cos \theta - \cos \theta_0)$$

$$\Delta U = U - U_0 = -W = -pE (\cos \theta - \cos \theta_0)$$

$$U_0 = -PE \cos \theta_0$$

$$U = -pE \cos \theta = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

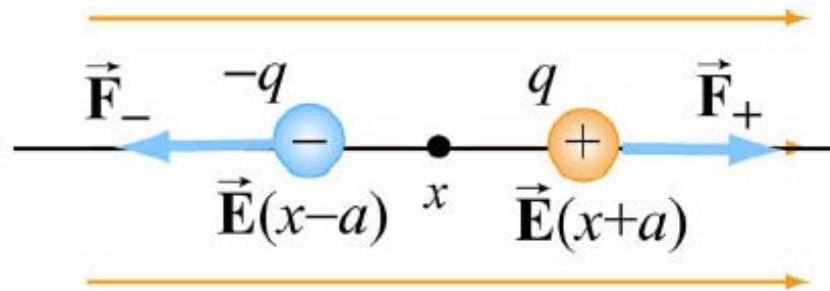
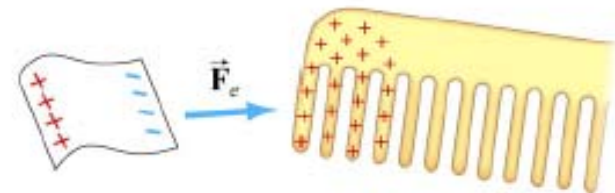


Figure 2.8.2 Force on a dipole

$$\vec{F}_e = q(\vec{E}_+ - \vec{E}_-) = 2qa \left(\frac{dE}{dx} \right) \hat{i} = p \left(\frac{dE}{dx} \right) \hat{i}$$





Potencial eléctrico

Potencial eléctrico: s. m. (fís.) grandeza física **escalar** cujo valor, num ponto, é dado pelo trabalho realizado para trazer, desde um ponto infinitamente afastado até àquele ponto, a unidade de carga eléctrica positiva (potencial electrostático), (De potência + -al). Lembrar que o campo eléctrico é definido como a força por unidade de carga numa carga eléctrica colocada no campo.

O potencial corresponde à energia por unidade de carga. O potencial num dado ponto de um campo eléctrico é definido como a energia potencial U por unidade de carga associada à carga de teste q_0 no ponto em consideração: $V=U/q_0$. A unidade SI do potencial é o volt (1 joule por coulomb).

O trabalho realizado por unidade de carga pela força eléctrica durante o deslocamento de a para b é igual a:

$$\frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = -\frac{\Delta U}{q_0} = -\left(\frac{U_b}{q_0} - \frac{U_a}{q_0}\right) = -(V_b - V_a) = V_a - V_b = V_{ab} \quad V = \frac{U}{q_0}$$

V_a e V_b representam os potenciais nos pontos a e b , respectivamente. Assim, o trabalho realizado por unidade de carga pela força eléctrica quando uma partícula carregada se desloca de a para b é igual ao potencial em a menos o potencial em b , isto é, V_{ab} é o potencial em a com respeito a b é igual ao trabalho realizado pela força eléctrica quando a unidade de carga se move de a para b . A diferença de potencial entre dois pontos mede-se usando um voltímetro.





Potencial eléctrico (2)

O potencial eléctrico V devido a uma carga pontual q é dado por:

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

onde r representa a distância da carga ao ponto onde se calcula o potencial. Se a carga q é positiva, o potencial é positivo em todos os pontos; se é negativa, o potencial será negativo em todos os pontos. $V=0$ quando $r=\infty$. Ter presente que o potencial, como o campo eléctrico, é independente da carga de teste q_0 que é usada para o definir:

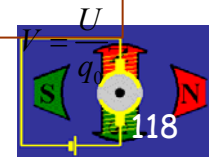
$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

onde r_i representa a distância da carga q_i ao ponto onde se calcula o potencial V . Quando a distribuição de carga é contínua, divide-se a carga em quantidades elementares dq e a soma transforma-se num integral:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

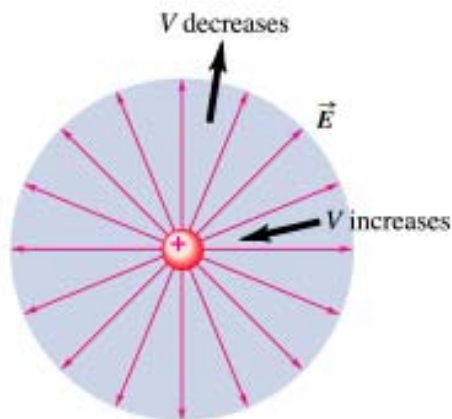
Nos casos em que se conhece o vector campo eléctrico \vec{E} , a diferença de potencial entre nos pontos a e b , $V_a - V_b$, obtém-se a partir do integral de linha entre os pontos a e b :

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_a^b q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l} \rightarrow V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b E \cos \phi dl$$

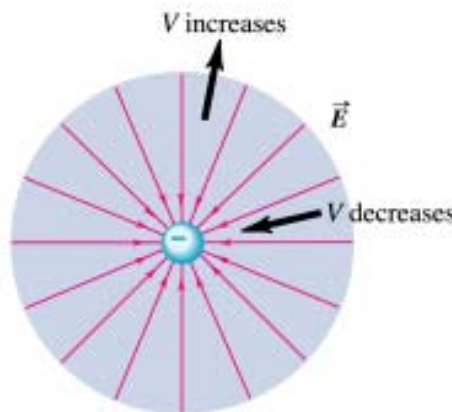




Potencial eléctrico (3)



(a)

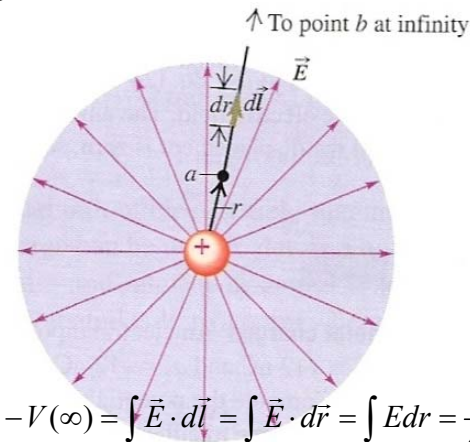


(b)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Nos dois casos (carga positiva ou negativa), se a carga de prova se mover na direcção do campo eléctrico E , o potencial eléctrico V diminui; se a carga de prova se deslocar na direcção oposta ao campo eléctrico, o potencial aumenta. **Pode-se determinar o potencial eléctrico devido a uma carga pontual através do cálculo do integral de $E \cdot dl$.**

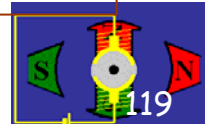
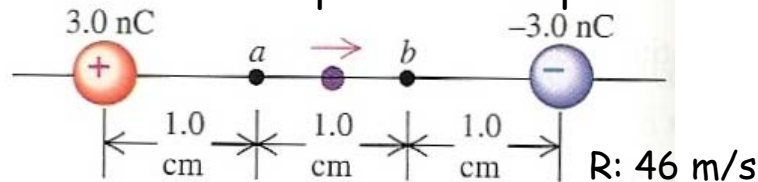
Determinar o potencial criado pela carga pontual q usando a definição do integral de linha de E ?



$$V(\vec{r}) = V(\vec{r}) - V(\infty) = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int E dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

24-9 Calculating the potential by integrating \vec{E} for a single point charge.

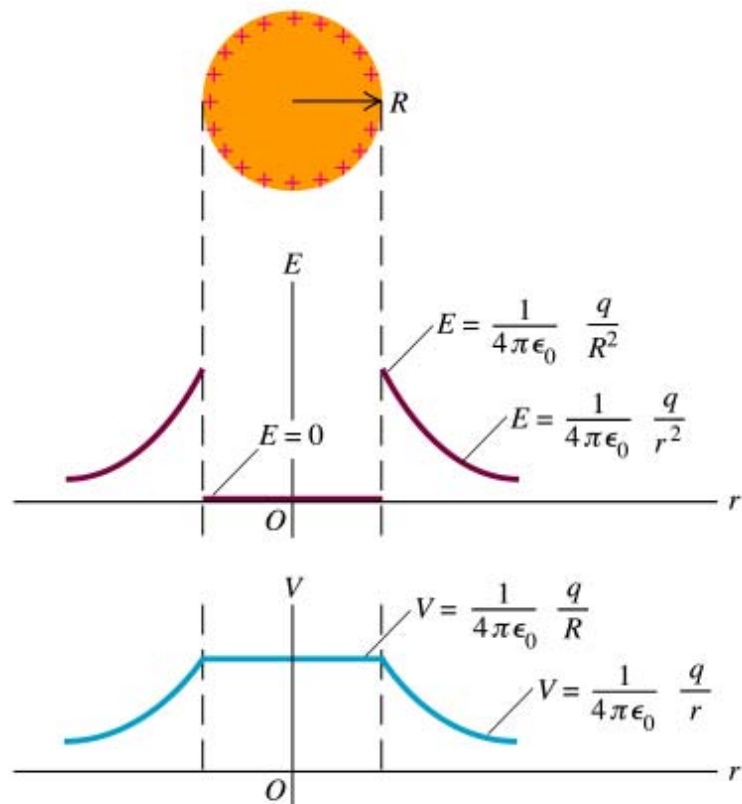
Uma partícula de pó com $5 \mu\text{g}$ e 2 nC desloca-se a partir do repouso da posição a para b . Qual é a velocidade da partícula no ponto b ?





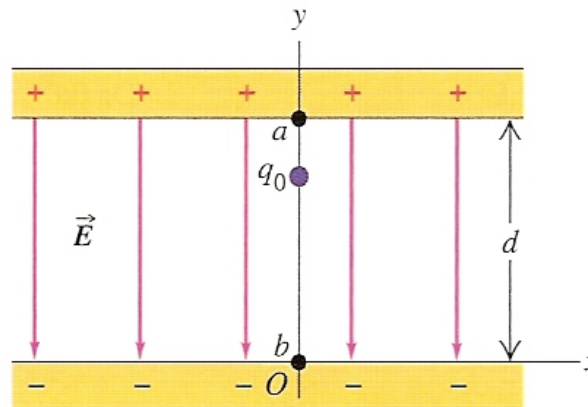
Cálculo do potencial

Determine o campo eléctrico E e potencial V em todos os pontos, dentro e fora de uma esfera condutora carregada.

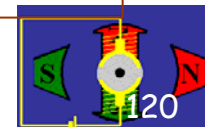


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Determine o campo eléctrico E e o potencial V em qualquer ponto entre os dois planos condutores representados abaixo. Calcule a diferença de potencial entre as duas placas, assumindo que a magnitude do campo eléctrico é E .



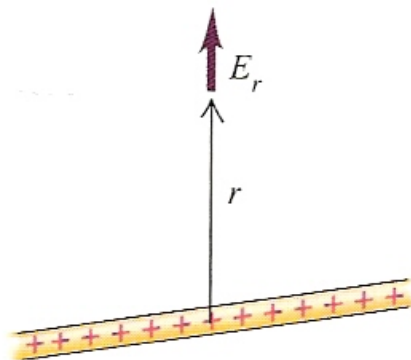
Assumindo que a diferença de potencial entre as duas placas condutoras acima é V , mostre que a densidade superficial de carga é dada por: $|\sigma| = \epsilon_0 V / d$.





Cálculo do potencial (2)

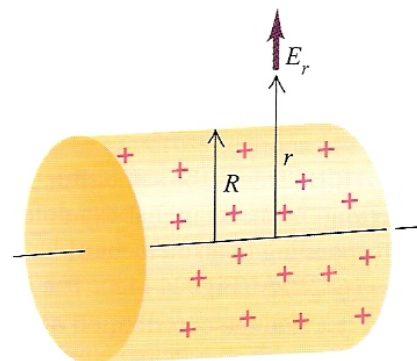
Determine o campo eléctrico \mathbf{E} à distância r de um fio condutor muito comprido e com uma densidade linear de carga (carga por unidade de comprimento) λ ; calcule a diferença de potencial $V_a - V_b$ entre dois pontos a e b disposto segundo a mesma radial. Repita o cálculo para o caso de um cilindro também muito longa, em que $r \gg R$.



$$(a) \quad E_r(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$$

$$V(a) - V(b) = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$= \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a}$$

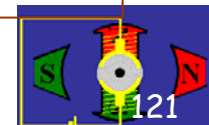


$$(b) \quad \text{Se } r > R: \quad E_r(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$$

$$\text{Se } r > R, r_b = R \text{ e } r = r_a: \quad V(r) - V(R) = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$= \int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_r^R \frac{dr}{r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r}$$

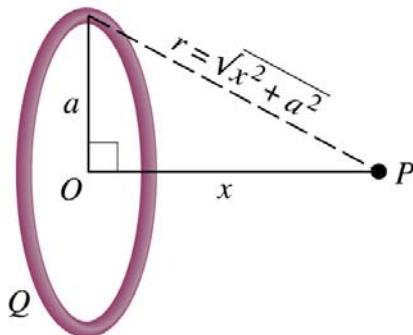
$$\text{Se } r \leq R: \quad \vec{E} = \vec{0}; \quad V(r) - V(R) = 0.$$





Cálculo do potencial (3)

Determine o campo eléctrico \mathbf{E} e o potencial criados por um anel condutor num ponto r do eixo do anel. A carga do anel é Q e está uniformemente distribuída pelo anel. As cargas do anel estão todas à mesma distância de um dado ponto P pertencente ao seu eixo.

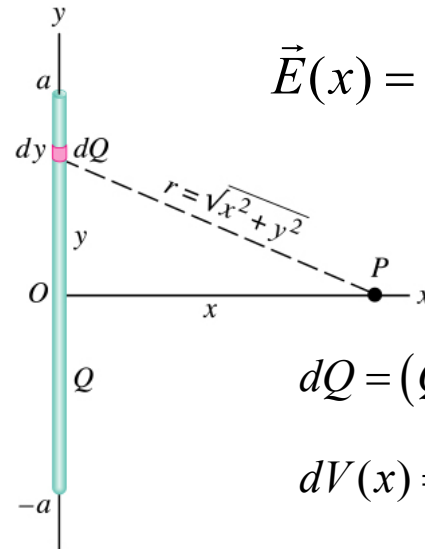


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$\vec{E}(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \vec{i}.$$

$$V(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\sqrt{x^2 + a^2}}.$$

Determine o campo eléctrico \mathbf{E} e o potencial criados por um fio condutor de comprimento $2a$ num ponto P pertencente à sua recta bissectriz. A carga total Q está uniformemente distribuída pelo comprimento do fio.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$\vec{E}(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{x\sqrt{x^2 + a^2}} \vec{i}.$$

$$dQ = (Q/2a) dy.$$

$$dV(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{2a} \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

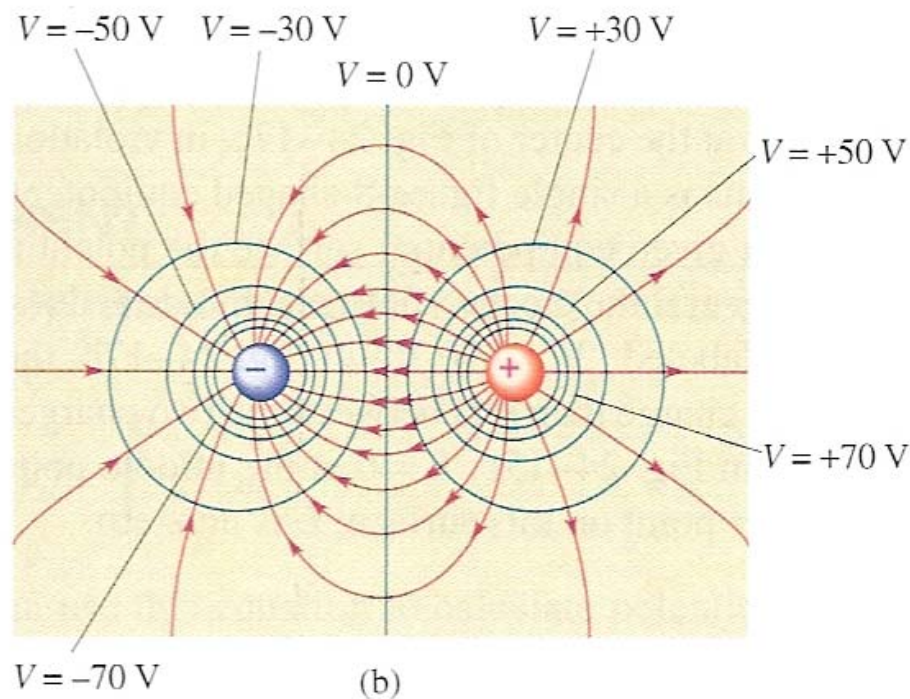
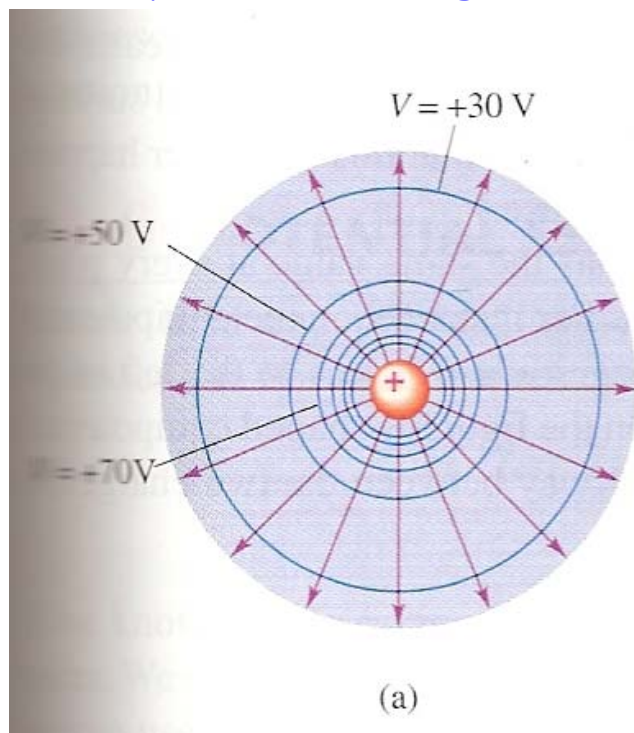
$$V(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{2a} \int_{-a}^a \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{2a} \ln \left(\frac{\sqrt{x^2 + a^2} + a}{\sqrt{x^2 + a^2} - a} \right).$$





Superfícies equipotenciais

superfície equipotencial: (fís.) lugar dos pontos de um campo que estão ao mesmo potencial; em geodesia, uma superfície de nível.



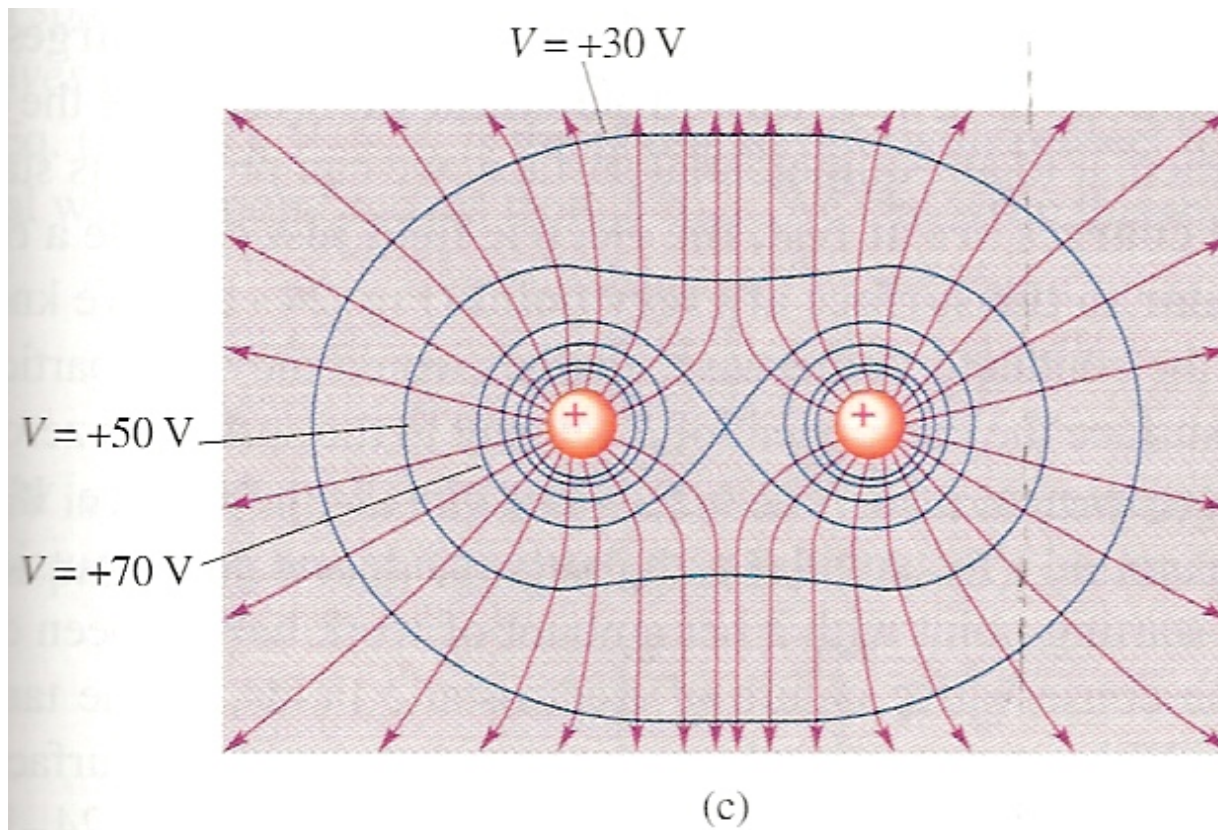
Como seriam os diagramas se as cargas fossem de polaridade oposta?

As linhas do vector campo eléctrico são sempre perpendiculares às linhas (superfícies) equipotenciais.





Superfícies equipotenciais (2)



Duas linhas/superfícies equipotenciais nunca se cruzam.

Embora o potencial seja o mesmo em todos os pontos de uma superfície equipotencial, o campo eléctrico pode variar de ponto para ponto numa mesma superfície equipotencial.

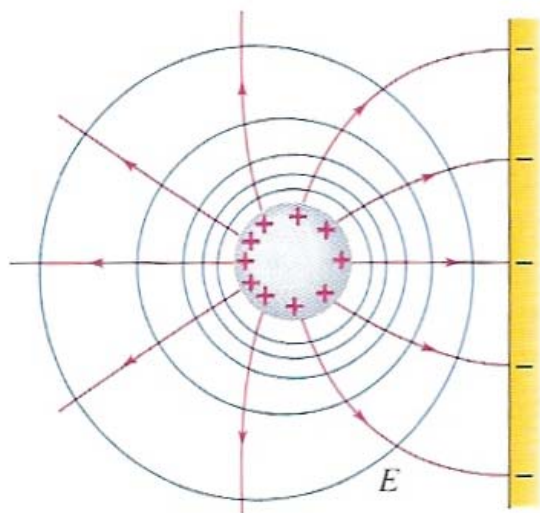




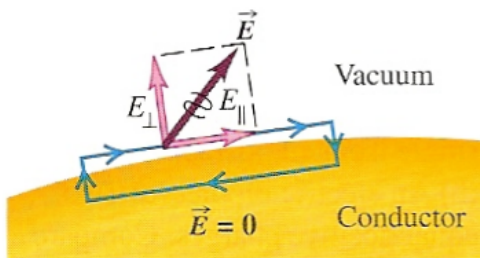
Equipotenciais e condutores

Quando todas as cargas de um condutor estão em repouso, a superfície do condutor é sempre uma superfície equipotencial.

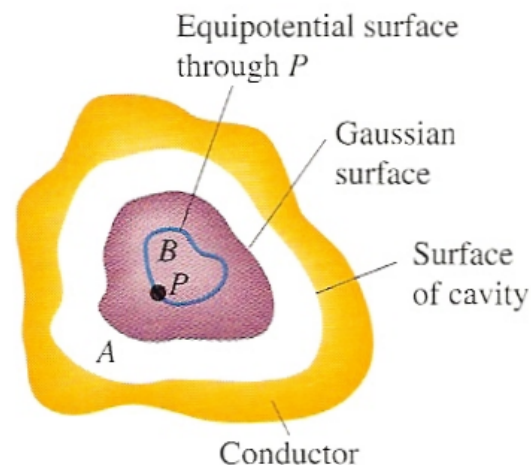
Quando todas as cargas de um condutor estão em repouso, o campo eléctrico imediatamente fora do condutor é sempre perpendicular à superfície do condutor.



24-18 When charges are at rest, a conducting surface is always an equipotential surface. Field lines (shown in red) are perpendicular to a conducting surface.



24-19 Inside the conductor, $\vec{E} = 0$. If \vec{E} just outside the conductor had a component E_{\parallel} parallel to the conductor surface, then a test charge moving around the rectangular loop and returning to the starting point would have nonzero total work done on it by the field. Because the \vec{E} field is conservative, this is impossible. Therefore E_{\parallel} must be zero, and \vec{E} just outside the surface must be perpendicular to it.



24-20 A cavity in a conductor. If the cavity contains no charge, every point in the cavity is at the same potential, the electric field is zero everywhere in the cavity, and there is no charge anywhere on the surface of the cavity.





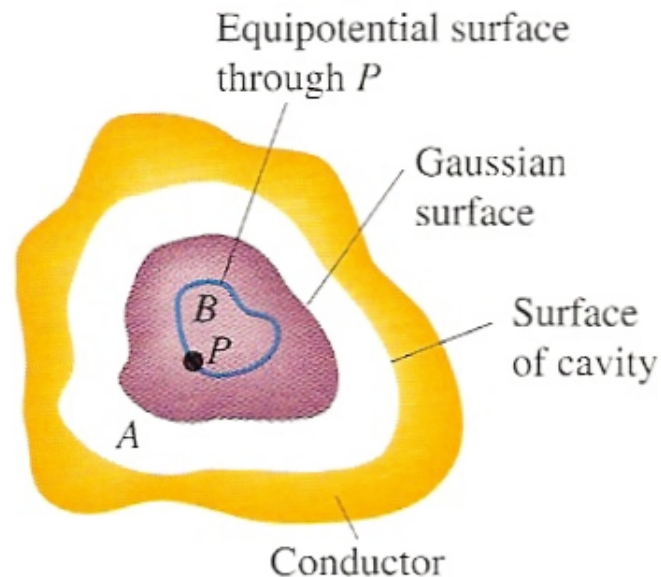
Equipotenciais e cargas em condutores

Num condutor em equilíbrio electrostático, o campo eléctrico em qualquer ponto do seu interior é nulo. Qualquer excesso de carga no condutor estará distribuído pela sua superfície exterior.

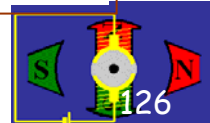
No caso do condutor possuir uma cavidade, e se não existir excesso de carga no interior da cavidade não pode haver excesso de carga em qualquer ponto da superfície interior do condutor. Isto explica porque é que se estivermos dentro de uma gaiola de Faraday podemos tocar nas suas paredes interiores sem sentirmos um choque eléctrico.

Qualquer ponto da cavidade está ao mesmo potencial, isto é, a cavidade é um "volume" equipotencial. Como consequência, o campo eléctrico em qualquer ponto da cavidade é nulo. Mas como campo na superfície interior é proporcional a σ , resulta que $\sigma=0$ em qualquer ponto da superfície interior da cavidade.

Rever gaiola de Faraday



24-20 A cavity in a conductor. If the cavity contains no charge, every point in the cavity is at the same potential, the electric field is zero everywhere in the cavity, and there is no charge anywhere on the surface of the cavity.





Campo eléctrico = - gradiente do potencial

Sabemos que: $dU(x, y, z) = -dW = -\vec{F} \cdot d\vec{l} = -q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l}$.

$$V_a - V_b = \int_b^a dV$$

Por definição: $dV(x, y, z) = \frac{dU(x, y, z)}{q_0} = -\vec{E} \cdot d\vec{l}$,

$$= -\int_a^b dV = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}.$$

obtendo-se:

$$-dV = (E_x \hat{i} + E_y \hat{j} + E_z \hat{k}) \cdot (\hat{i} dx + \hat{j} dy + \hat{k} dz) = E_x dx + E_y dy + E_z dz$$

Se assumirmos que o deslocamento é paralelo ao eixo x, de forma que $dy=dz=0$, obtemos: $-dV=E_x dx$ ou:

$$E_x = -\left(\frac{dV}{dx}\right)_{y,z=const} = -\frac{\partial V(x, y, z)}{\partial x}$$

Generalizando,

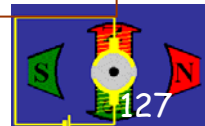
$$E_x = -\frac{\partial V(x, y, z)}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial V(x, y, z)}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial V(x, y, z)}{\partial z}.$$

Obtém-se:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V = -\left(\hat{i} \frac{\partial V}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial V}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial V}{\partial z} \right)$$

$\vec{\nabla}$: operador del ou gradiente

Em cada ponto o gradV aponta na direcção da taxa de maior crescimento de V. Assim, o campo eléctrico tem a direcção e o sentido em que V diminui mais rapidamente e é sempre perpendicular à superfície equipotencial nesse ponto.





Exercícios: Campo eléctrico = - gradiente do potencial

Sabendo que o potencial criado por uma carga pontual é $V(r)=q/(4\pi\epsilon_0 r)$, determine o vector campo eléctrico a partir da expressão de V .

Como se trata de um problema com simetria esférica, e campo eléctrico é radial. Expressando o gradiente em coordenadas esféricas, obtém-se:

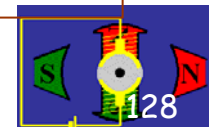
$$\vec{E} = E_r \hat{r} = -\vec{\nabla} V = -\frac{\partial V}{\partial r} \hat{r} : E_r = -\frac{\partial V}{\partial r}.$$

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \rightarrow \vec{E} = E_r \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}.$$

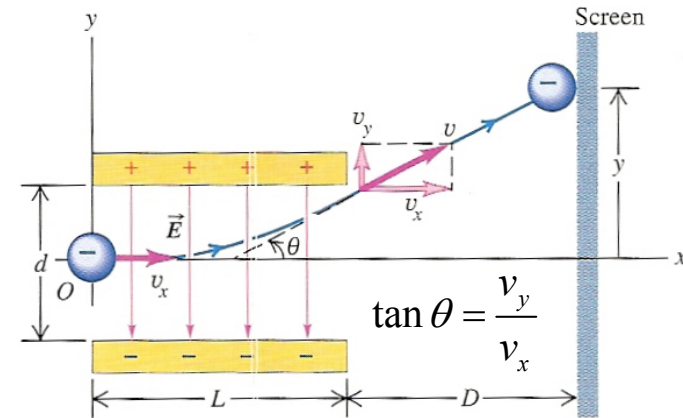
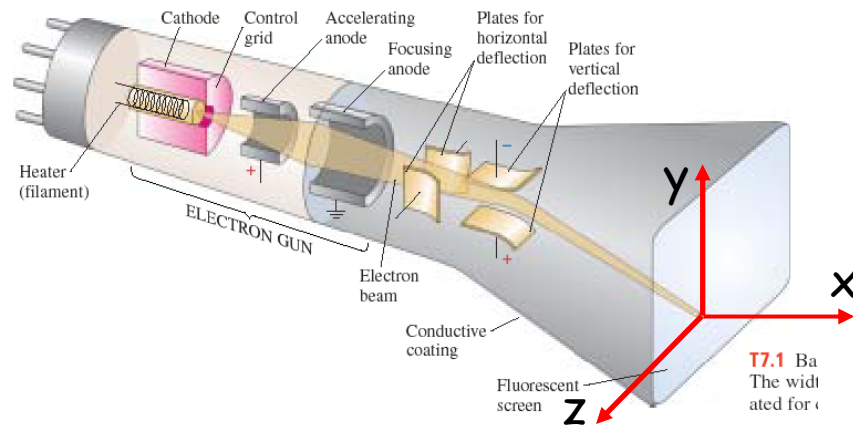
Sabendo que o potencial no exterior de um cilindro condutor é $V(r)=\lambda/(2\pi\epsilon_0)\ln(R/r)$, determine o vector campo eléctrico a partir da expressão de V .

Por questões de simetria sabemos que o campo eléctrico é radial e só tem componente E_r . A derivada de $\ln(R)=0$ e de $\ln(r)=1/r$, obtém-se:

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{\partial \ln r}{\partial r} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} \rightarrow \vec{E} = E_r \hat{r} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} \hat{r}.$$



Osciloscópio



Assumindo que os electrões emitidos partem do repouso, e são acelerados por uma diferença de potencial V_1 (~ 2 kV, entre o ânodo e o cátodo), a componente da velocidade segundo x é: $v_x = \sqrt{2eV_1 / m_e}$.

O campo eléctrico $E = V_2 / d$ entre as placas deflectoras verticais aceleram os electrões segundo y (z): $a_{y,z} = eE_{y,z} / m_e = eV_{2y,z} / m_e d$.

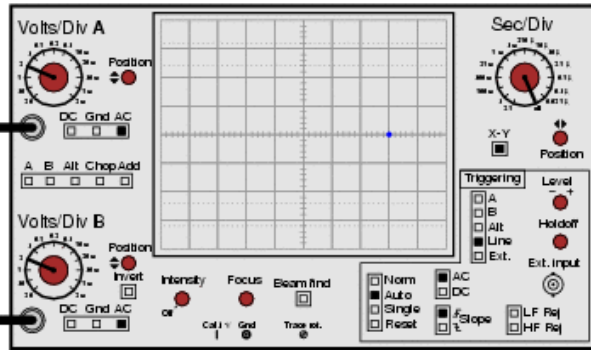
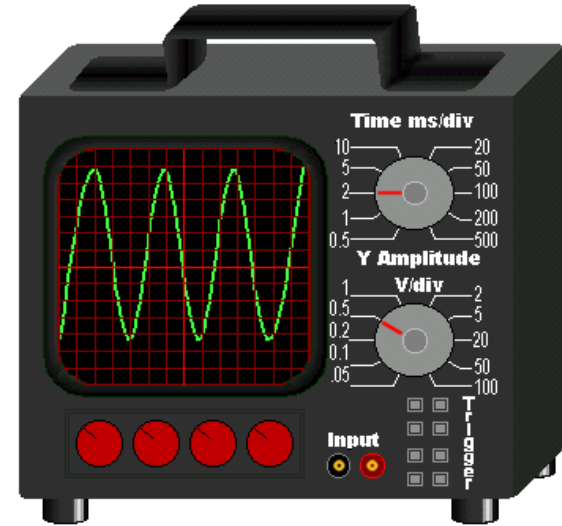
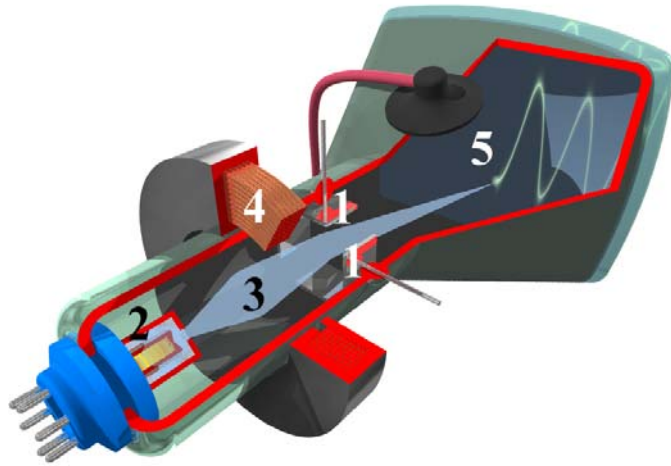
O tempo necessário para os electrões atravessarem a região de campo eléctrico E , L , é $t = L / v_x$. A componente da velocidade segundo y (z) é: $v_{y,z} = a_{y,z} t = eV_{2y,z} L / m_e dv_x$.

Os electrões chegam ao ecrã fluorescente na posição (y, z) :

$$\frac{y(z)}{D} \simeq \frac{v_y(v_z)}{v_x} \rightarrow y, z = \frac{eDV_{2y,z}L}{m_e dv_x^2} = \frac{DL}{2d} \frac{V_{2y,z}}{V_1}$$



Osciloscópio (2)



90° phase shift between $V_{vertical}$ and $V_{horizontal}$





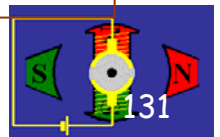
Electrostática

Corrente eléctrica e resistência

Corrente eléctrica: movimento ordenado de cargas eléctricas; quantidade de electricidade que atravessa, por segundo, uma secção de um condutor;

Resistência eléctrica: (electr.) grandeza física, característica dos condutores eléctricos, cujos valores são dados pela razão entre o valor da diferença de potencial estabelecida nos terminais do condutor e o valor da intensidade da corrente que o percorre, quando no condutor só há transformação de energia eléctrica em calorífica.

Ver também [Notas de apoio às aulas teóricas de Introdução à Electrónica](http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ie.html)
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ie.html>) e
[http://w3.ualg.pt/~jlongras/Notas IE1 2006-07.pdf](http://w3.ualg.pt/~jlongras/Notas_IE1_2006-07.pdf))



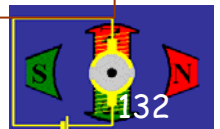


Corrente eléctrica

Uma corrente eléctrica consiste num fluxo de cargas eléctricas em movimento de uma para outra região. Quando este fluxo de carga ocorre num caminho condutor fechado forma-se um circuito eléctrico. Os circuitos eléctricos são um meio de transporte de energia de um lado para outro. O movimento de cargas eléctricas permite transferir energia potencial eléctrica das fontes (baterias ou geradores) para dispositivos onde a energia eléctrica é armazenada ou convertida noutras formas de energia: em som numa aparelhagem Hi-Fi, em energia térmica num aquecedor eléctrico ou em luz numa lâmpada.

Mesmo em sistemas vivos a corrente eléctrica tem um papel essencial: os sistemas nervosos são circuitos eléctricos especializados que transportam os sinais vitais de uma parte para outra parte do corpo.

Em equilíbrio electrostático, o campo eléctrico é nulo no interior dos condutores, não havendo deslocamento efectivo de carga eléctrica. Contudo, no interior dos condutores os electrões mais livres deslocam-se aleatoriamente em todas as direcções, de forma semelhante a moléculas num gás, embora com velocidades superiores da ordem de 1 Mm/s. Como este movimento dos electrões é aleatório, não ocorre fluxo efectivo de carga eléctrica e, portanto, não há corrente eléctrica.

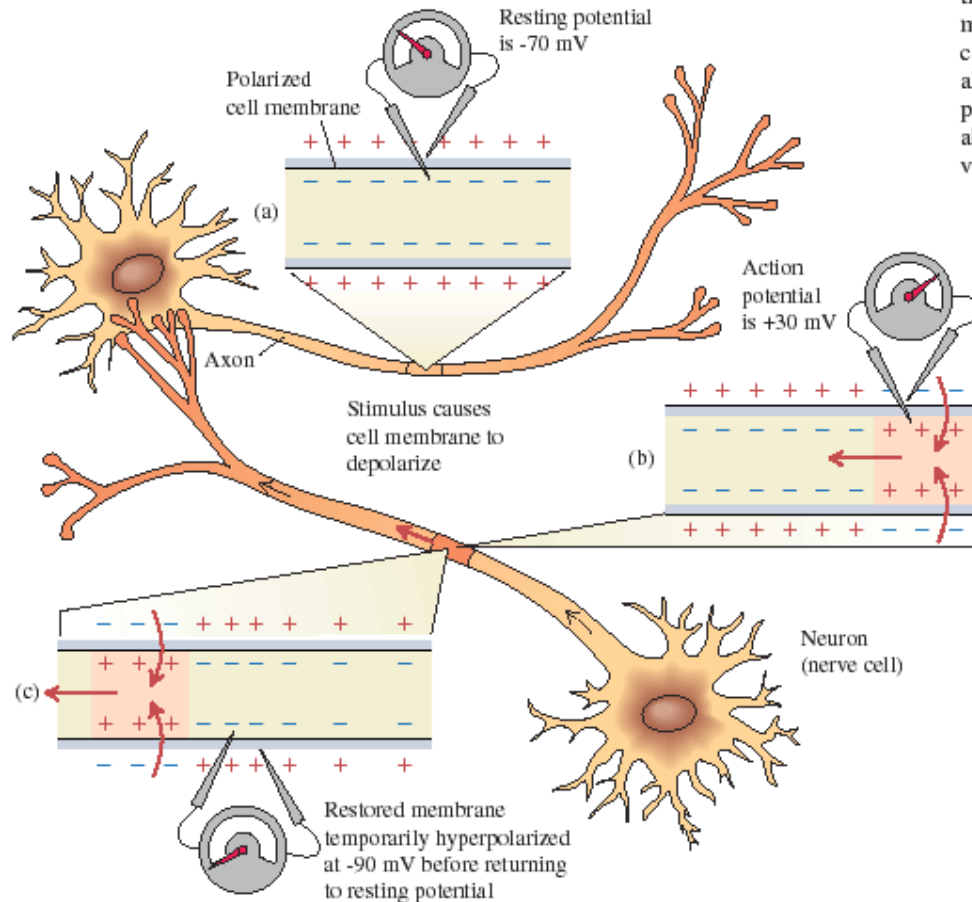




Efeitos fisiológicos da corrente eléctrica

The electrical nature of nerve impulses explains why the body is sensitive to externally supplied electrical currents. Currents through the body as small as 0.1 A can be fatal because they interfere with essential nerve processes such as those

T9.2 (a) The cell membrane around an axon maintains a resting potential difference of about -70 mV between inner and outer fluids. (b) An electrical stimulus depolarizes the membrane, and the potential difference suddenly rises to about $+30$ mV. (c) The change in potential difference, called the *action potential*, propagates along the axon. After the pulse passes, the potential difference first overshoots to about -90 mV, then recovers its original value.

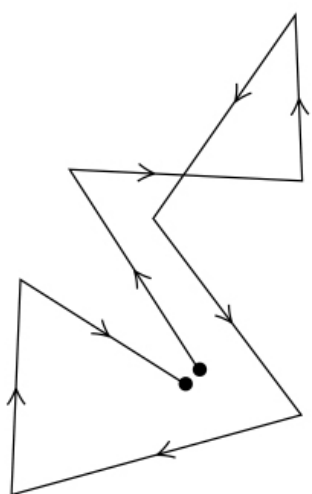


T9.1 Potassium ions (K^+) play an essential role in nerve conduction. A healthy diet includes foods rich in potassium, such as bananas, tomatoes, spinach, and oranges.



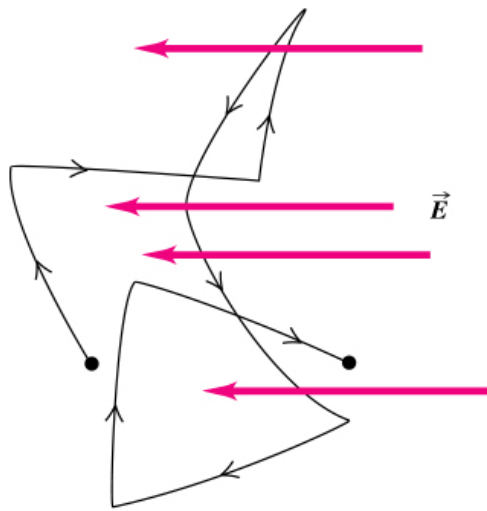


Movimento dos electrões num condutor sem e com E



$$\vec{E} = \mathbf{0}$$

(a)



(b)

Na presença de um campo eléctrico E , os electrões deslocam-se no sentido oposto ao campo com uma velocidade efectiva designada velocidade de arrastamento, de algumas décimas de mm/s, e como resultado estabelece-se uma corrente eléctrica no condutor.

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Nos metais as portadores de carga livres são os electrões; em plasmas e em soluções iónicas podem ser os electrões e os iões; nos semicondutores são os electrões e as lacunas (vazios ou buracos - ausências de electrões numa ligação química, que se comportam como cargas positivas).

Por definição considera-se que o sentido de uma corrente eléctrica corresponde ao sentido de deslocamento dos portadores de carga positivos - sentido convencional da corrente eléctrica. Ter em atenção que a intensidade de corrente eléctrica é uma grandeza escalar.





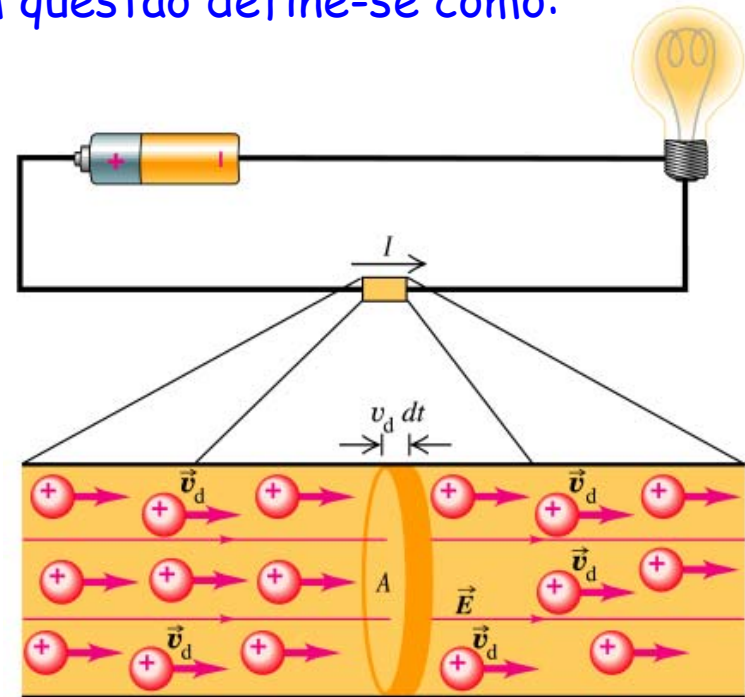
Definição de intensidade de corrente eléctrica

Quantidade de electricidade que atravessa, por unidade de tempo, uma secção de um condutor. Se a quantidade efectiva de carga eléctrica que flui através de uma área A num intervalo de tempo dt , é dQ , a intensidade de corrente eléctrica através da área em questão define-se como:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Isto é, a intensidade de corrente corresponde à taxa de variação temporal da transferência de carga eléctrica através da superfície A . A unidade SI de intensidade de corrente eléctrica é o ampere, símbolo A: 1 A corresponde ao fluxo de carga de 1 C por segundo. Num computador, as correntes são da ordem de nanoampere.

Numa lanterna, a corrente típica é da ordem de decimas de A; a corrente necessária para colocar o motor de um carro a funcionar é da ordem de 200 A. Num circuito de rádio ou de televisão é da ordem de mA ou μ A.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Velocidade de arrastamento e densidade de corrente

Assumindo que existem n cargas positivas por unidade de volume e que todas elas se deslocam com a mesma velocidade de arrastamento v_d , no intervalo de tempo dt cada partícula desloca-se a distância $v_d dt$. O fluxo de partículas para fora do cilindro a sombreado com comprimento $v_d dt$ no intervalo de tempo dt corresponde às partículas que estavam dentro do cilindro no início do intervalo de tempo dt . O volume do cilindro é $Av_d dt$. Se cada partícula tem carga q , a carga dQ que flui para fora do cilindro no intervalo de tempo dt é:

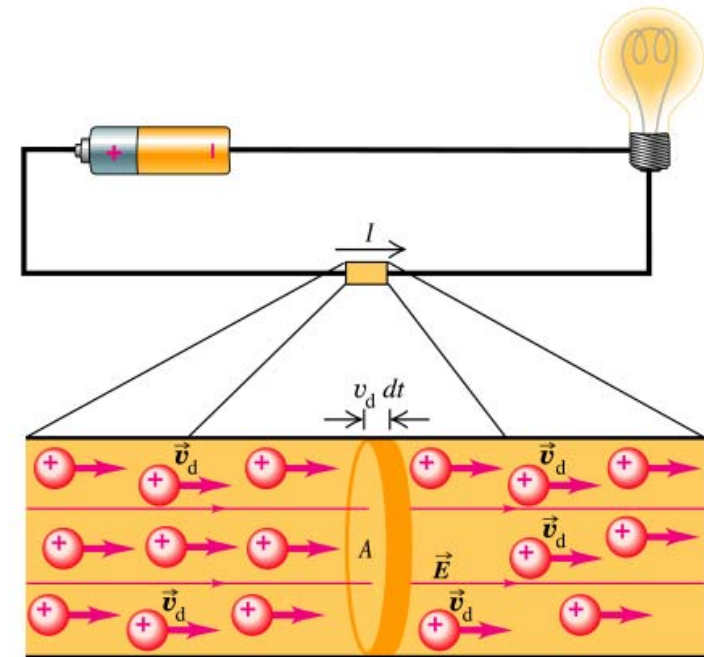
$$dQ = q(nAv_d dt) \quad \text{e} \quad I = \frac{dQ}{dt} = nqv_d A$$

A corrente por unidade secção recta chama-se densidade de corrente J :

$$J = \frac{I}{A} = nqv_d$$

A unidade de densidade de corrente J é A/m^2 . O densidade de corrente eléctrica é uma grandeza vectorial:

$$\vec{J} = nq\vec{v}_d$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

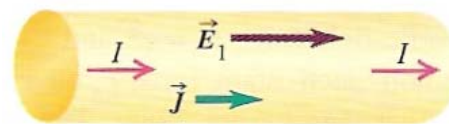




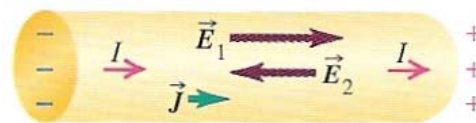
Força electromotriz

Para que se estabeleça corrente eléctrica num condutor é necessário que este faça parte de um percurso fechado. Se o condutor estiver isolado, quando se aplica um campo eléctrico às extremidades de um condutor, a corrente eléctrica que se desenvolve leva à acumulação de cargas eléctricas negativas na extremidade oposta ao sentido do campo, havendo um excesso de cargas positivas na extremidade na direcção do campo eléctrico. Esta distribuição de cargas cria um campo que se opõe ao campo aplicado, e, portanto, a densidade de corrente após o período transitório é nula.

Para manter um fluxo de carga eléctrica através de um circuito fechado, é necessário fornecer energia potencial eléctrica às cargas, porque à medida que se movem a cargas eléctricas perdem energia (situação similar a um circuito fechado de água, onde é necessário uma bomba para manter a água a correr). Em circuitos eléctricos as fontes de energia designam-se por fontes de força electromotriz (fem). A unidade de fem é o volt, V, pois a fem é quantidade de energia por unidade de carga que um sistema é capaz de fornecer. Uma pilha típica tem uma fem de 1,5 V, significando que a pilha realiza 1,5 J de trabalho em cada coulomb que a atravessa. O símbolo de fem é \mathcal{E} . As fontes de fem podem ser baterias, células solares, geradores, etc.

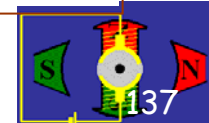


(a)



(b)

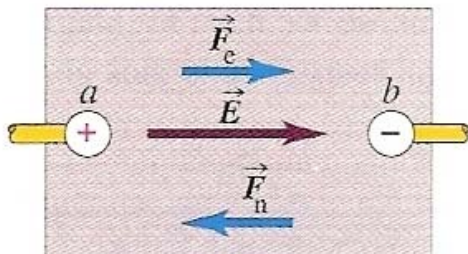
26-9 (a) If an electric field \vec{E}_1 is produced inside a conductor that is *not* part of a complete circuit, a current will flow at least temporarily. (b) The current causes charge to build up at the ends of the conductor, producing an additional field \vec{E}_2 that opposes \vec{E}_1 . The total field $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ is reduced, and the current decreases. After a very short time, \vec{E}_2 becomes equal in magnitude to \vec{E}_1 , so that the total field \vec{E} inside the conductor equals zero; the current then stops completely.



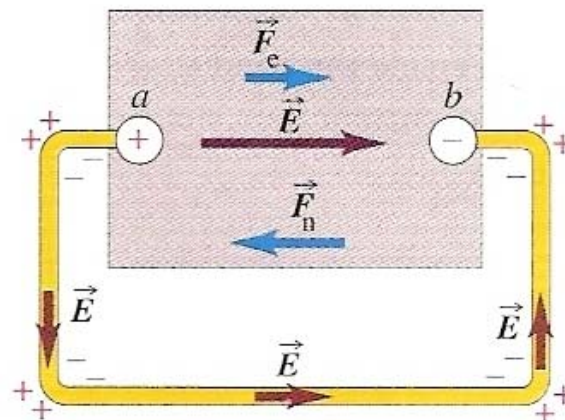


Força electromotriz (2)

Uma fonte ideal de força electromotriz mantém constante a diferença de potencial entre os seus terminais, independentemente da corrente que a percorre.

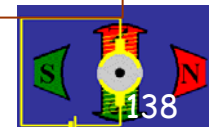


26-10 Schematic diagram of a source of emf in an “open-circuit” situation in which the source is not connected in a circuit. The electric-field force $\vec{F}_e = q\vec{E}$ and the non-electrostatic force \vec{F}_n on a positive charge q are shown. The work done by \vec{F}_n on a positive charge q moving from b to a is equal to $q\varepsilon$, where ε is the emf. In the open-circuit situation, \vec{F}_e and \vec{F}_n have equal magnitude.



26-11 Schematic diagram of an ideal source in a complete circuit. The vectors \vec{F}_n and \vec{F}_e are the forces on a positive charge q inside the source. The current is in the direction from a to b in the external circuit and from b to a within the source.

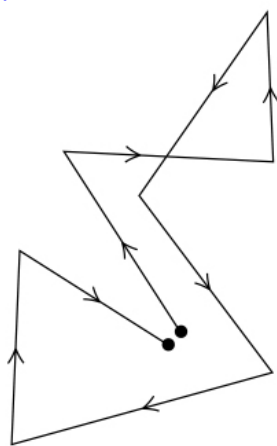
$$V_{ab} = \varepsilon \text{ (fonte de fem ideal)}$$





Resistividade e condutividade eléctricas

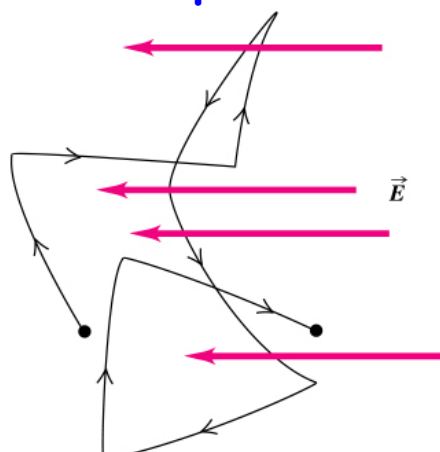
A densidade de corrente \mathbf{J} depende do campo eléctrico \mathbf{E} aplicado (e, portanto, da diferença de potencial) e das propriedades do material onde ocorre o fluxo de carga. Numa primeira aproximação, \mathbf{J} é directamente proporcional a \mathbf{E} , e a uma dada temperatura a razão E/J é constante para um dado material: $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$. A grandeza σ designa-se **condutividade eléctrica** do material e mede-se em siemens por metro, S/m. O inverso da condutividade eléctrica $\rho = 1/\sigma$ chama-se **resistividade eléctrica** do material, e exprime-se em ohm-m, Ωm . A relação entre \mathbf{E} e \mathbf{J} designa-se por "lei" de Ohm microscópica.



$$\vec{E} = 0$$

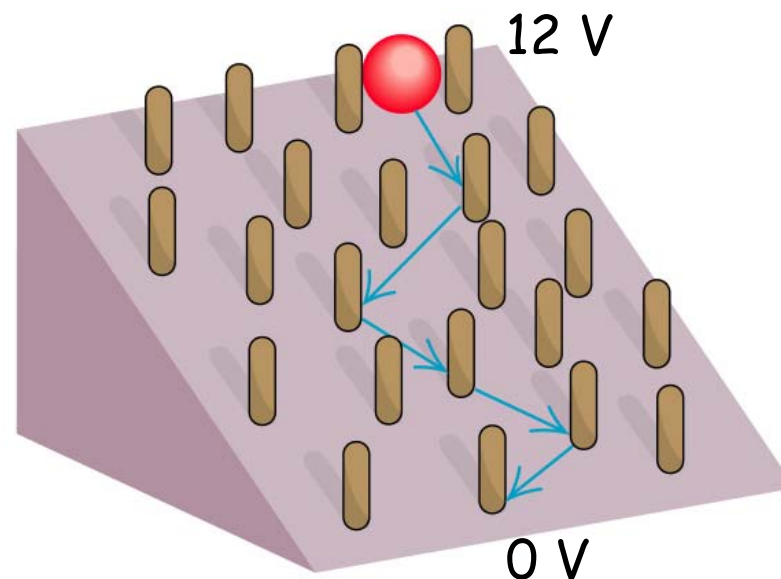
(a)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



← Net displacement →

(b)



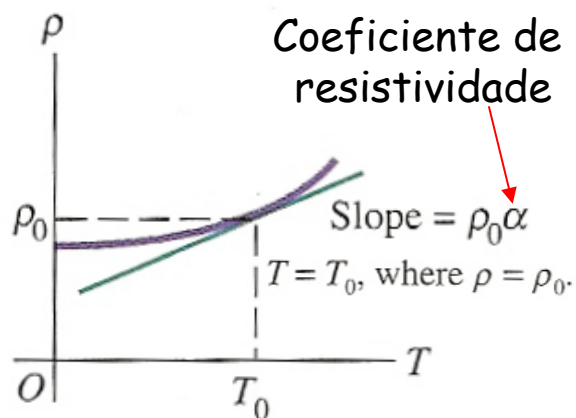
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



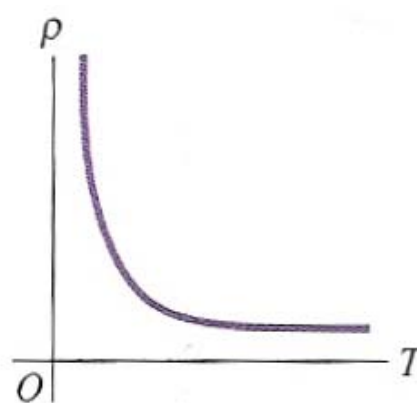


Resistividade e temperatura

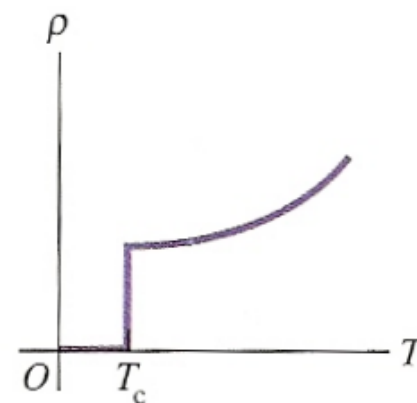
Quanto maior for a resistividade maior deverá ser o campo eléctrico para se obter uma dada densidade de corrente eléctrica (ou intensidade de corrente eléctrica), isto é, menor a densidade de corrente conseguida pelo campo eléctrico. Um isolador perfeito teria resistividade infinita e condutividade nula. Os metais e as ligas metálicas são os melhores condutores (a prata é o metal que melhor conduz electricidade). Um bom condutor de electricidade é, em geral, também um bom condutor de energia térmica. Os materiais que obedecem à "lei" de Ohm são designados condutores ohmicos ou lineares. A uma dada temperatura, a resistividade destes materiais é constante. Os materiais que não satisfazem a "lei" de Ohm dizem-se não-ohmicos ou não-lineares. Em geral a resistividade de uma material varia com a temperatura: $\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]$



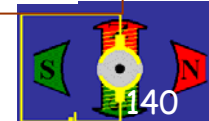
(a) Metal



(b) Semiconductor



(c) Superconductor

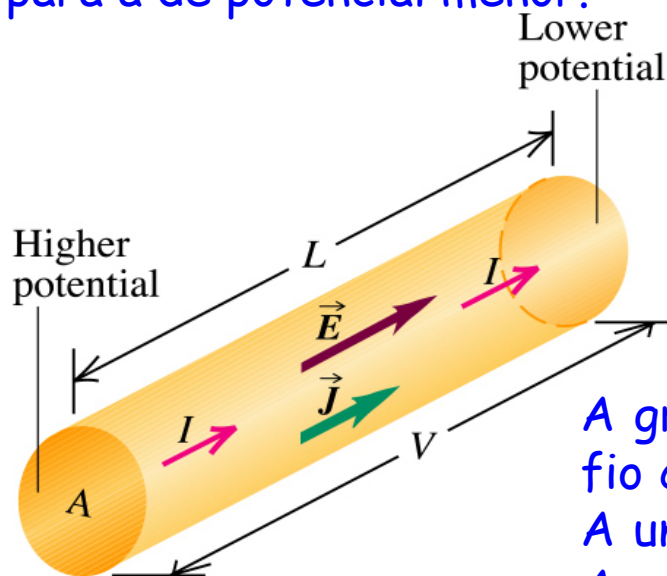




Resistência e "lei" de Ohm

Para um condutor com resistividade ρ , a densidade de corrente $\mathbf{J} = \mathbf{E}/\rho$. Quando se verifica a "lei" de Ohm, a ρ não depende de E , e \mathbf{J} tem a direcção de \mathbf{E} . Geral estamos mais interessados em saber a intensidade de corrente eléctrica total através do condutor em função da diferença de potencial entre as suas extremidades. É muito mais fácil medir I e ΔV do que \mathbf{J} e \mathbf{E} .

Seja um fio condutor com secção recta A uniforme e comprimento L , aos terminais do qual existe uma diferença de potencial (ddp) V . A direcção da corrente (sentido convencional) é sempre da região de potencial maior para a de potencial menor.

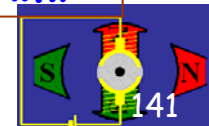


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

À medida que a corrente flui através da ddp, a energia potencial é dissipada na forma de energia térmica. A I total através do fio condutor é $I = \mathbf{J}A$ e a ddp $V = EL$. Resolvendo em ordem a V , obtém-se:

$$V = \frac{\rho L}{A} I = RI$$

A grandeza R chama-se **resistância eléctrica** do fio condutor de secção recta A e comprimento L . A unidade SI de resistância é o ohm, símbolo Ω . A relação $V = RI$ é conhecida como "lei" de Ohm.

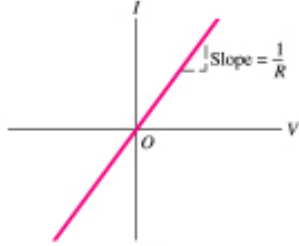




"Lei" de Ohm e resistência interna de fonte de fem

A relação $I(V)$ de um condutor ou dispositivo designa-se característica corrente-tensão. Diferentes "formas" da "lei" de Ohm:

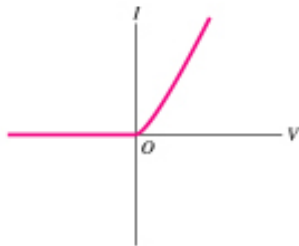
Resistência



$$V = RI; \quad V = V / R; \quad R = V / I;$$

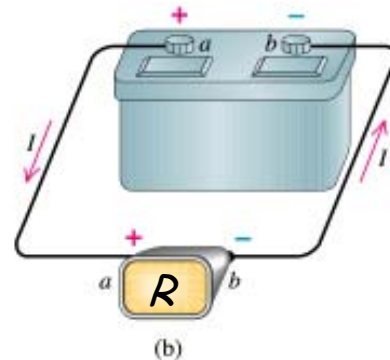
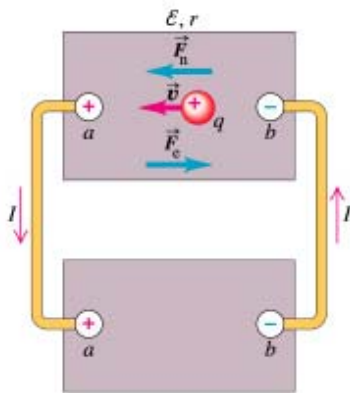
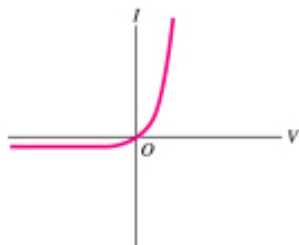
O valor de uma resistência depende do material de que é feita e das características geométricas do condutor: $R = \rho L / A$.

Válvula termiónica



Uma fonte real de força electromotriz não mantém constante a diferença de potencial (ddp) entre os seus terminais. A ddp aos terminais da fonte de fem depende da corrente que a percorre, porque a própria fonte de fem oferece resistência à passagem de corrente (resistência interna, r).

Díodo



Fonte de fem ideal

$$V_{ab} = \varepsilon = IR$$

Fonte de fem real

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir = IR$$

Copyright © Addison Wesley Longman.

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

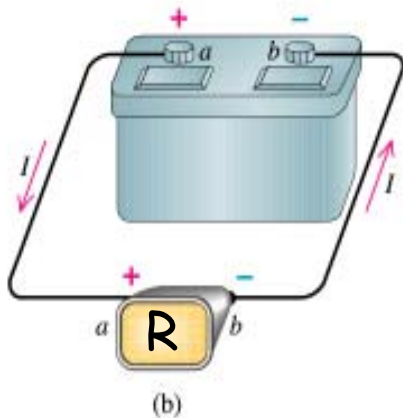
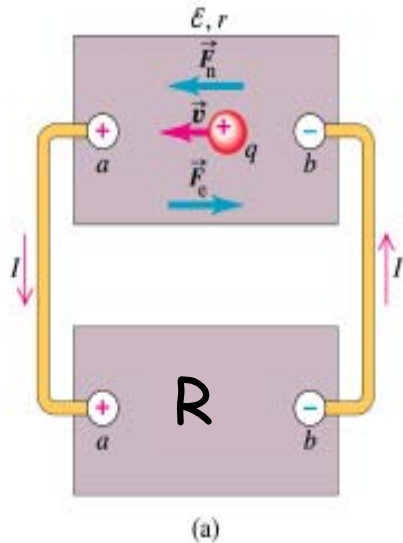
(a)

(b)





Energia e potência em circuitos eléctricos



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$P_{ab} = V_{ab} I = I^2 R = V_{ab}^2 / R$$

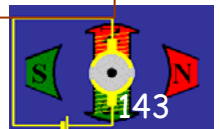
Energia do circuito e potência

ϵI = taxa de conversão de energia não-eléctrica (química) em energia eléctrica dentro da fonte - Potência da fonte de força electromotriz.

$I^2 r$ = taxa de dissipação de energia na resistência interna da fonte (bateria) - potencia dissipada na resistência interna da fonte.

$\epsilon I - I^2 r = I^2 R$ = taxa a que a fonte fornece energia eléctrica à carga R (lâmpada de mineiro) - potência dissipada na resistência da lâmpada.

$$\text{Efeito de Joule: } P_R = I^2 R = V_R^2 / R$$





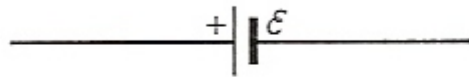
Símbolos para diagramas de circuitos eléctricos



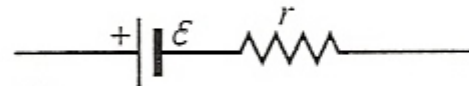
Conductor with negligible resistance



Resistor



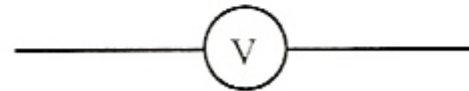
Source of emf (Longer vertical line always terminal, usually the terminal at higher potential)



or



Source of emf with internal resistance r (side)



Voltmeter (measures potential difference)



Ammeter (measures current through it)

Ver também [Notas de apoio às aulas teóricas de Introdução à Electrónica](http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ie.html)
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ie.html> e
http://w3.ualg.pt/~jlongras/Notas_IE1_2006-07.pdf)

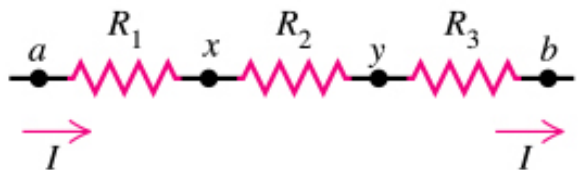




Resistências em série e em paralelo

Circuitos contendo várias resistências podem ser simplificados. Os grupos de resistências conectadas em série (em paralelo) podem ser substituídas por uma única resistência

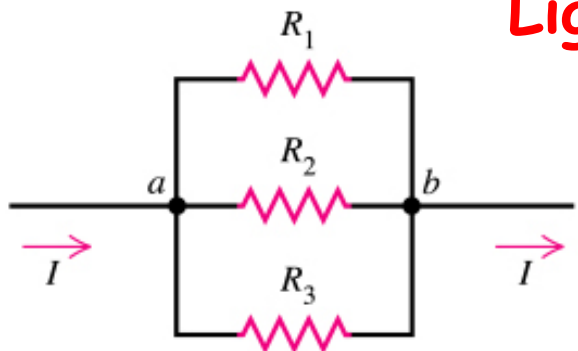
Ligação em Series



(a)

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Ligação em paralelo



(b)

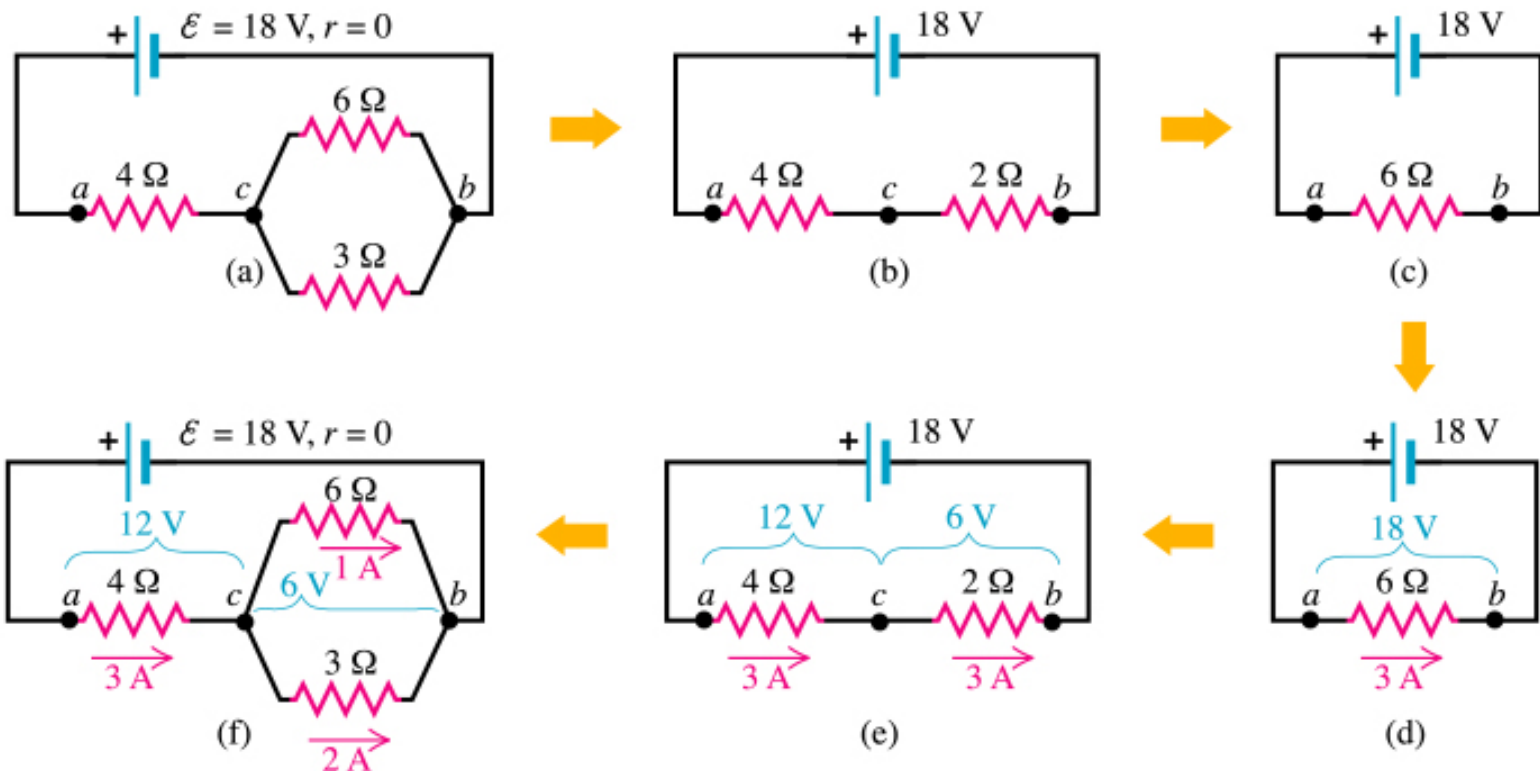
$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Exercício

Simplifique o circuito da figura a, determinando a resistência equivalente e calcule a potência dissipada em cada resistência.

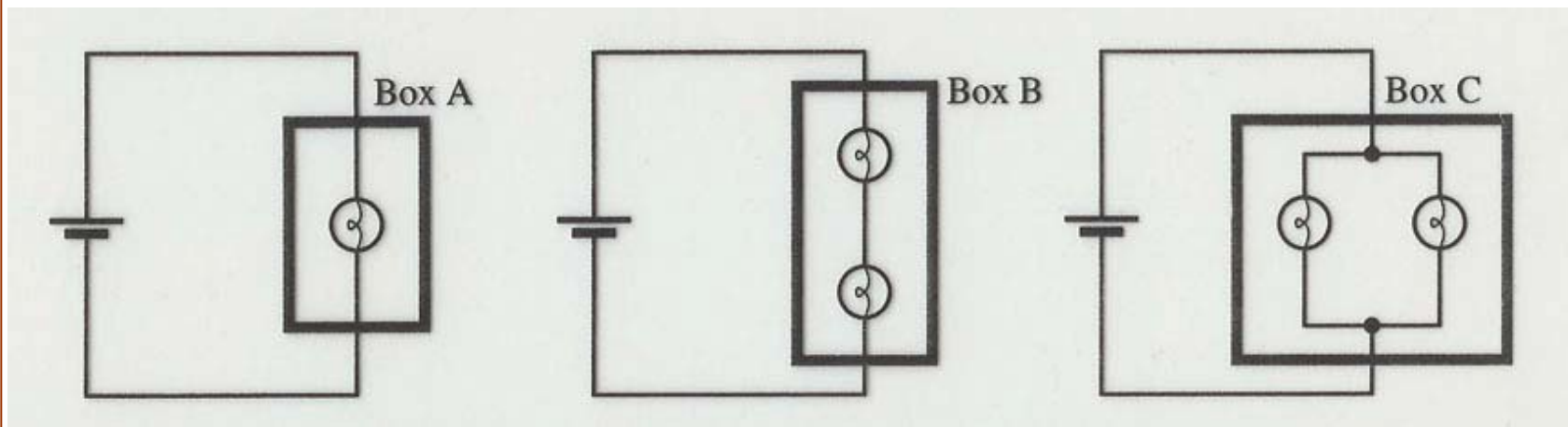


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Exemplos de circuitos eléctricos simples

Circuitos com bateria de lanterna e lâmpadas idênticas (cada lâmpada apresenta a mesma resistência à passagem de corrente eléctrica).



Qual das caixa (A, B, ou C) apresenta a maior resistência à passagem de corrente eléctrica?

A corrente é o fluxo de carga que passa num dado ponto do circuito por unidade de tempo.

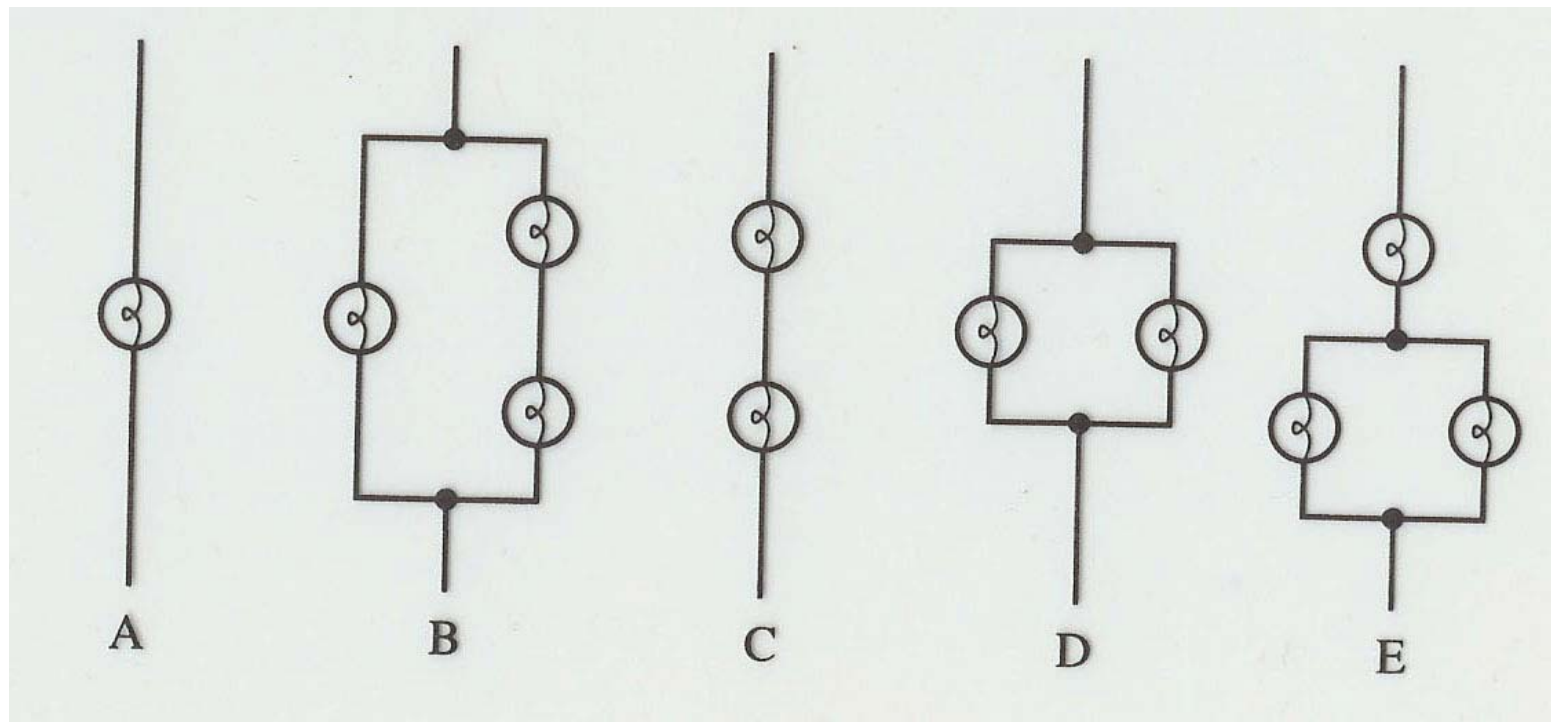
Em qual das situações a lâmpadas brilham mais?

C 1998 McDermott, et al., Prentice Hall





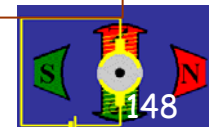
Exemplos de circuitos eléctricos simples (2)



Qual das redes eléctricas apresenta maior resistência à passagem de corrente eléctrica?

Ordene as redes por ordem decrescente de resistência.

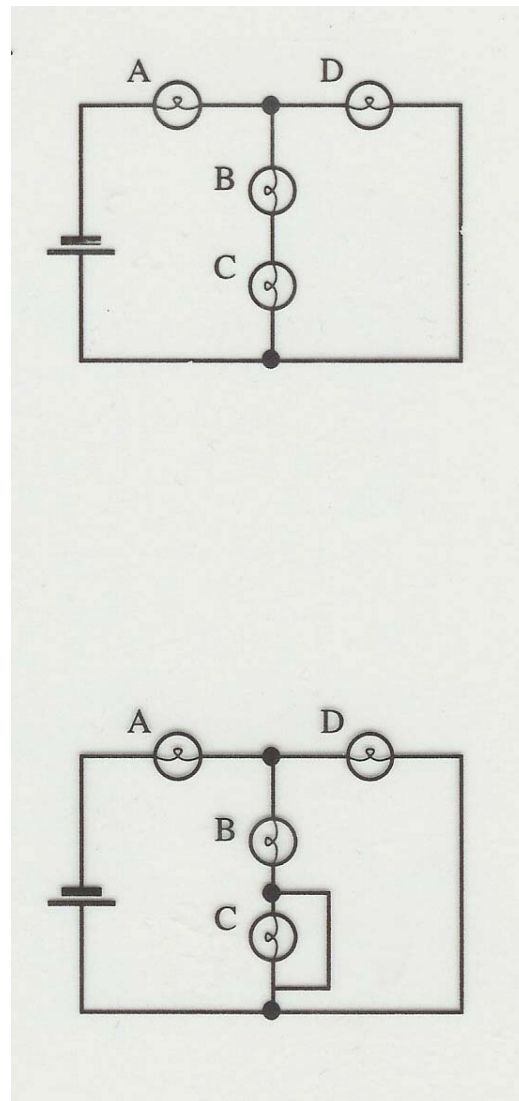
C 1998 McDermott, et al., Prentice Hall





Exemplos de circuitos eléctricos simples (3)

1. Ordene as lâmpadas da mais brilhante à menos brilhante.
2. Um fio condutor é adicionado ao circuito como mostra a figura baixo.
 - a) O brilho da lâmpada *C* aumenta, diminui ou permanece o mesmo?
 - b) O brilho da lâmpada *A* aumenta, diminui ou permanece o mesmo?
 - c) A corrente através da bateria aumenta, diminui ou permanece a mesma?

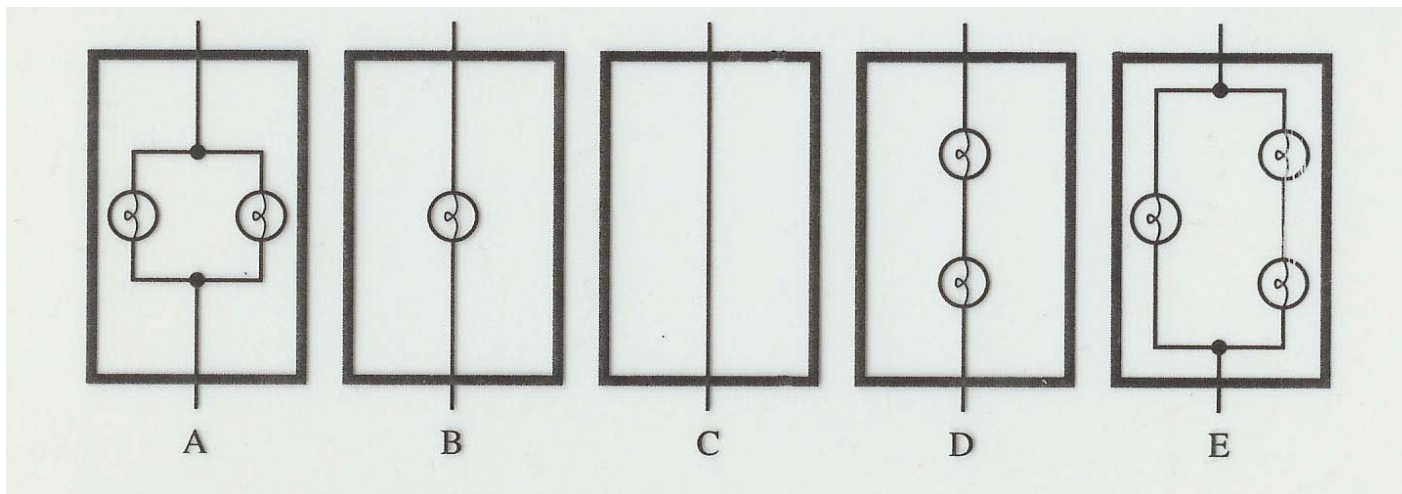


C 1998 McDermott, et al., Prentice Hall





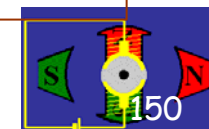
Exemplos de circuitos eléctricos simples (4)



Ordene as caixas de acordo com a resistênci a ao fluxo de carga eléctrica, da maior para a menor. Não calcule o valor da resistênci a de cada caixa!

Sabendo que cada lâmpada tem uma resistênci a de 10Ω , determine a resistênci a de cada caixa.

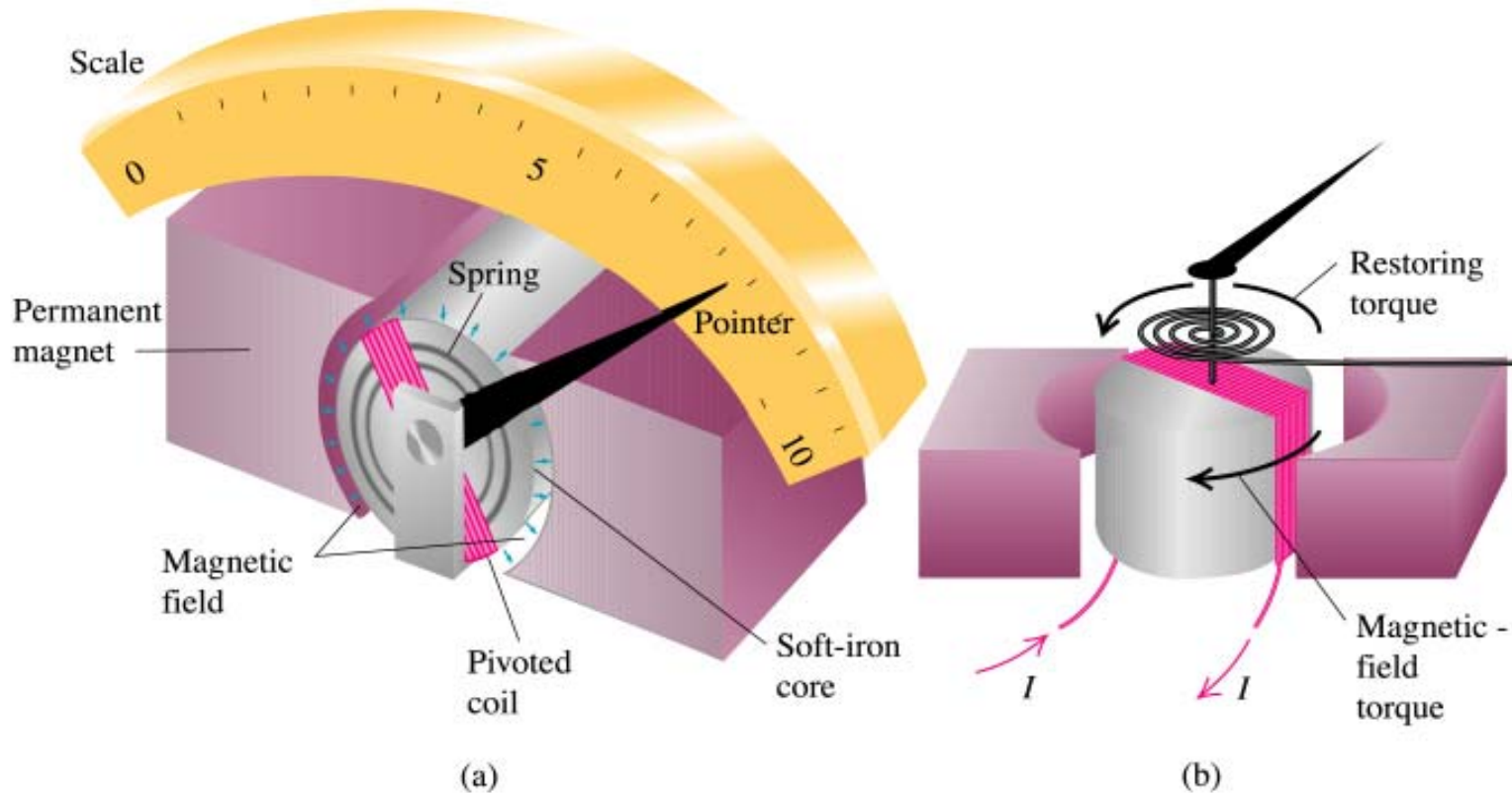
C 1998 McDermott, et al., Prentice Hall



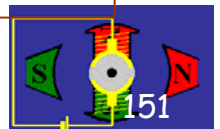


Instrumentos eléctricos de medida

Galvanómetro de d'Arsonval



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

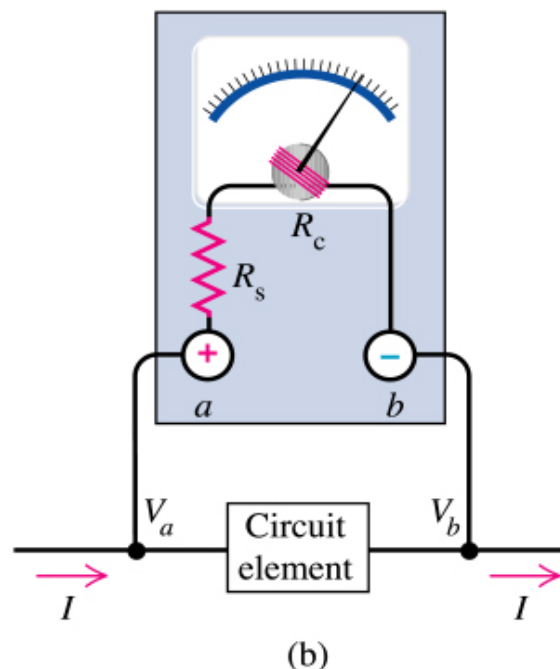
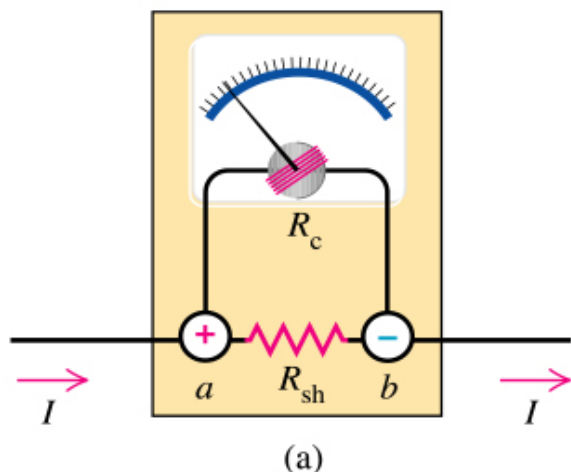




Instrumentos eléctricos de medida (2)

Os amperímetros (I) têm uma resistência muito pequena para reduzir o efeito que podem ter na corrente do circuito que está a ser medida.

Os voltímetros (ΔV) têm uma resistência interna muito elevada de forma que a corrente retirada ao circuito não afecte o valor da tensão a medir.

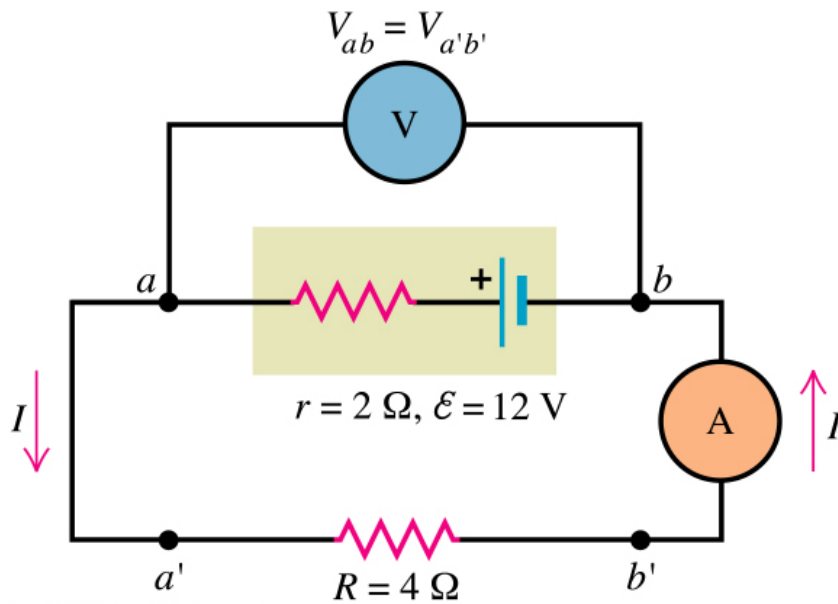


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



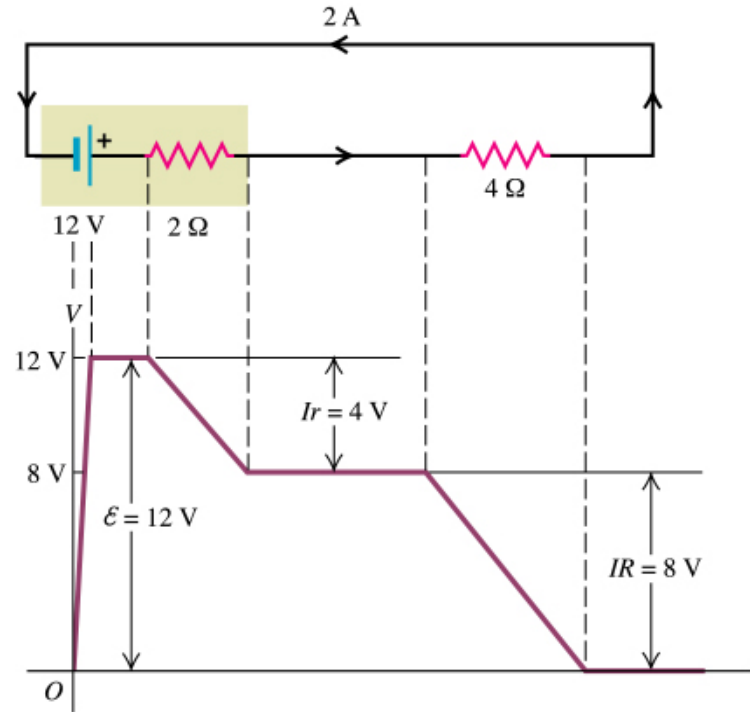
Exercícios

Determine os valores medidos pelo voltímetro e pelo amperímetro no circuito abaixo.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Subidas e descidas do potencial ao longo do circuito ao lado.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

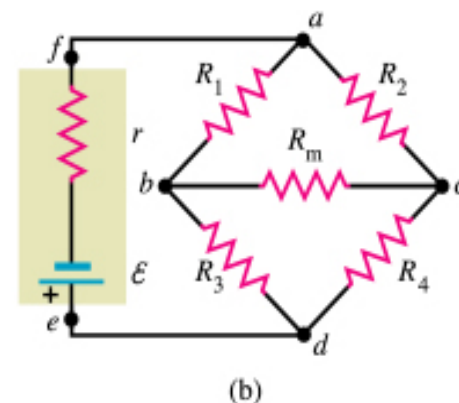
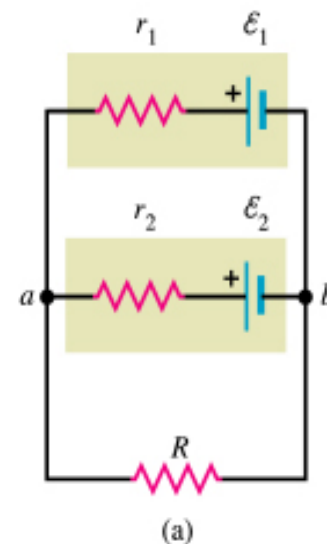




Leis de Kirchhoff

Quando um circuito não pode ser reduzido a uma combinação de ligações em série e paralelo usam-se as leis de Kirchhoff:

1. $\Sigma \mathbf{I}_j = 0$ (regra dos nodos, válida para qualquer nodo), consequência do princípio da conservação da carga eléctrica.
2. $\Sigma(\Delta V_j) = 0$ (regras das malhas, válida em qualquer malha (percurso) fechada); consequência do princípio da conservação da energia.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Consumo de electricidade



Apoio Técnico
800 506 506 (24h por dia)

Apoio Comercial
808 505 505 (8h às 20h/dias úteis)

Leitura do Contador
800 507 507 (24h por dia)

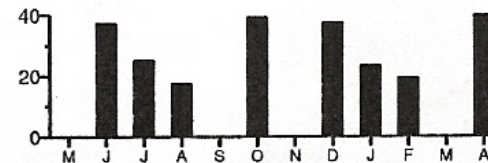
Consumos - Electricidade

Contador N 6

Leitura: Empresa 2008-01-15 **Simples** 6722

Desde 2008-01-16, o consumo estimado foi de (kWh): 362

Gráfico de Faturação (Euros/mês)



Gasto médio - 0.65 Euros/Dia

Factura N.º [redacted] **de 08 de Abril de 2008 (2008-02-12 a 2008-04-08)**

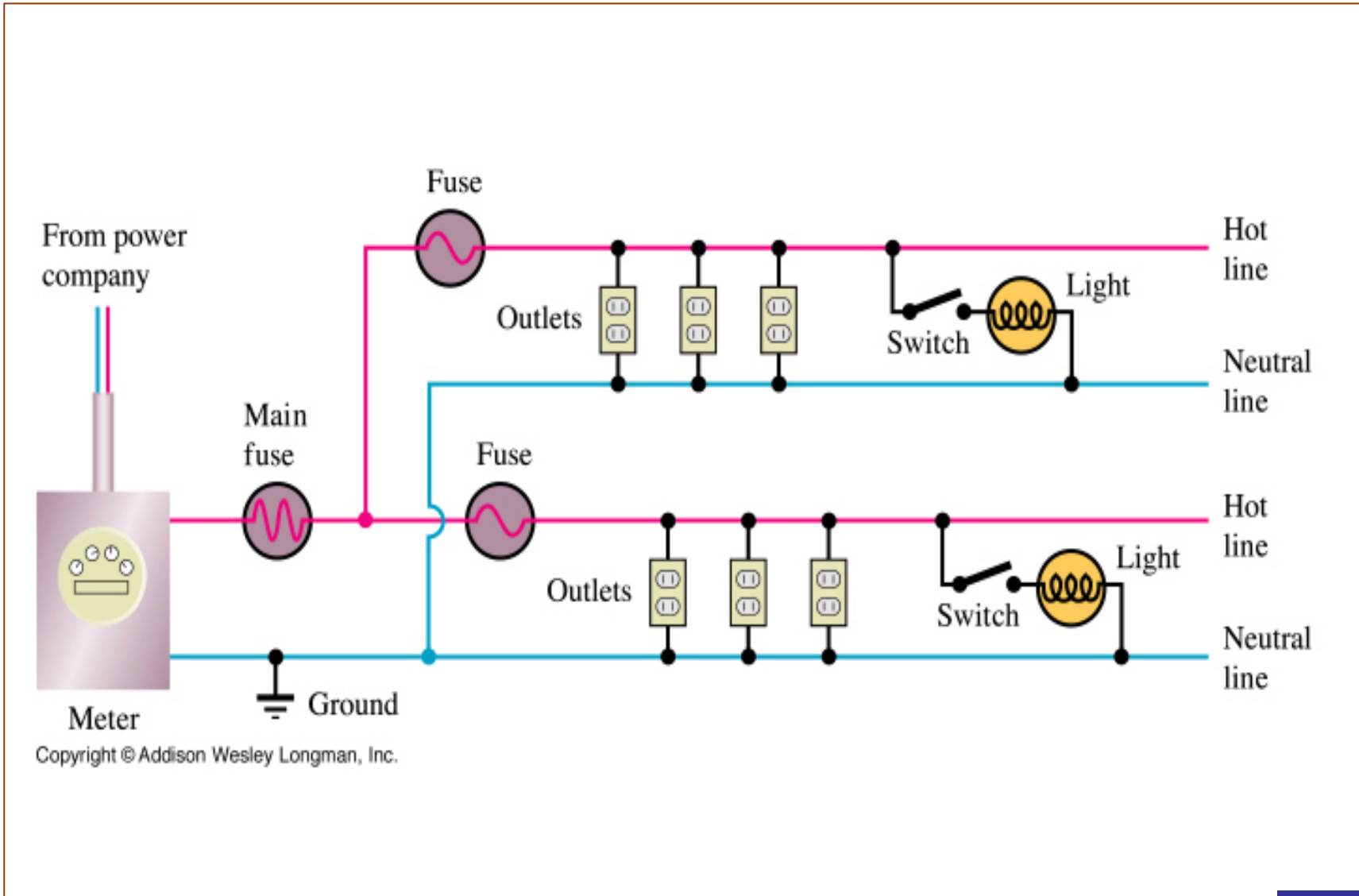
Electricidade	Qtd.	Preço	Valor	IVA (%)
Tarifa BTN-Simples 3,45 até 20,7 kVA				
Consumo estimado	245	0,1143	28,00	5
Potencia Contratada (3,45 kVA)	2	5,7400	11,48	5
Taxa Exploração DGGE	2	0,0700	0,14	5
IVA (5 % * 39,62)			1,98	
Total			€ 41,60	
Outros Débitos/Créditos				
	Qtd.		Valor	IVA (%)
Contribuição áudio-visual (Nota de Débito n.º 10305879230)	2		3,42	5
IVA (5%* 3.42)			0,17	
Total			€ 3,59	
Total do mês			€ 45,19	

Parcela relativa ao acesso às redes, sem IVA: **€ 22,86** (valor independente do fornecedor de energia eléctrica)





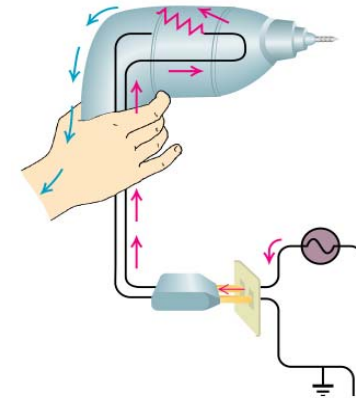
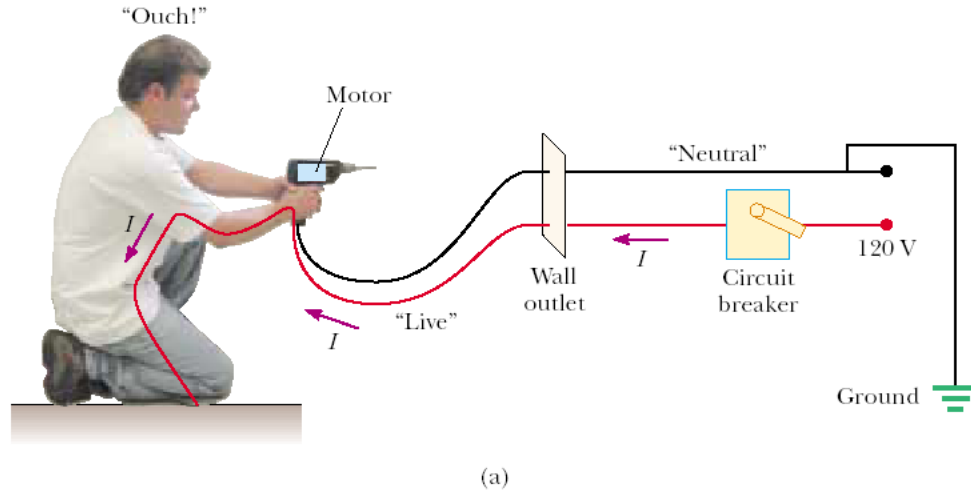
Rede eléctrica doméstica



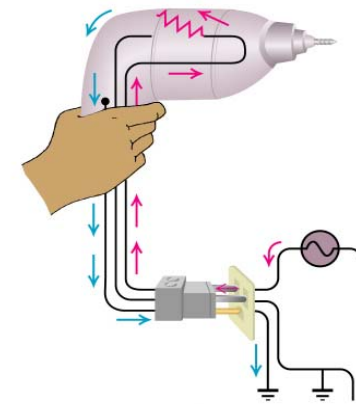
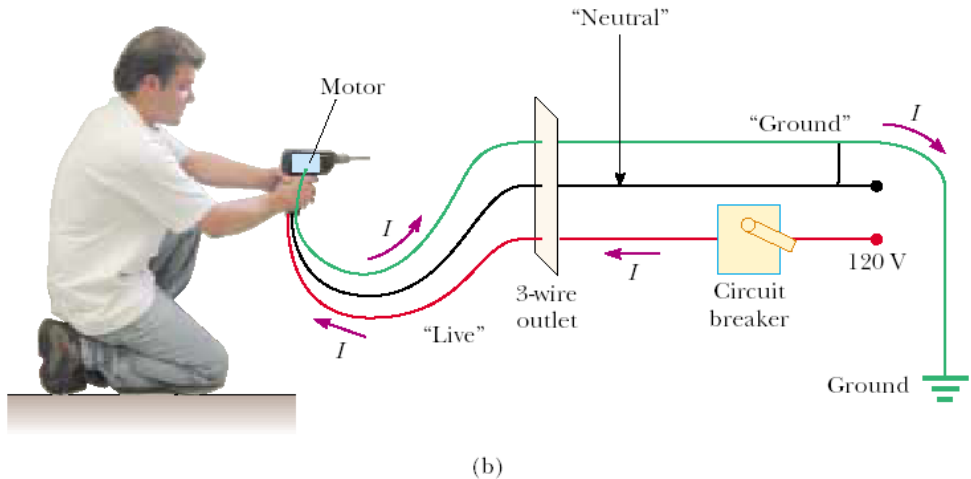


Regras de segurança

Berbequim sem ligação à terra e com ligação à terra para maior segurança.



(a)
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

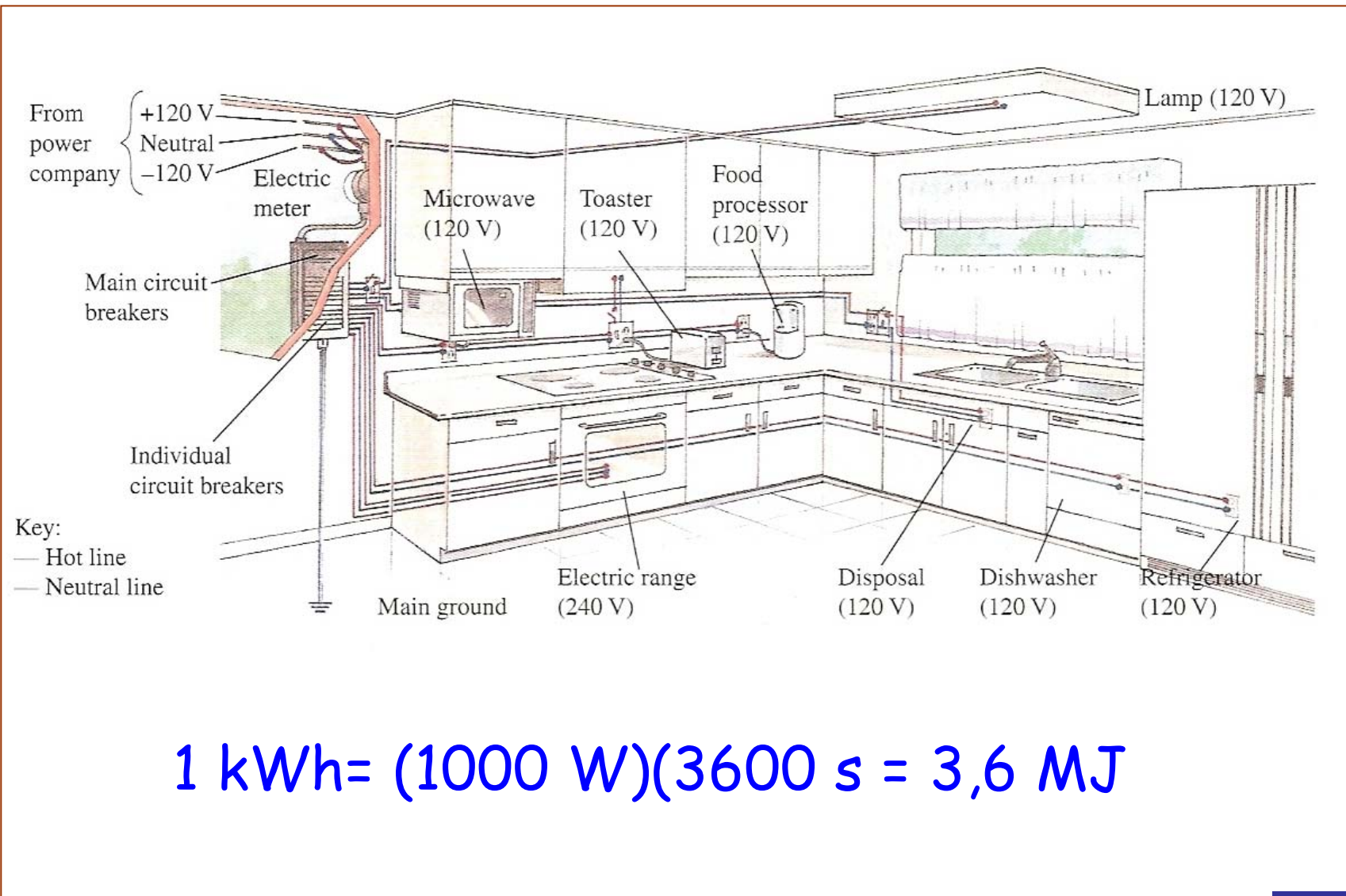


(b)





Rede eléctrica numa cozinha



$$1 \text{ kWh} = (1000 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3,6 \text{ MJ}$$





Electrostática

-

Capacidade e dieléctricos

capacidade eléctrica (de um condutor isolado): (fís.) a razão entre a carga do condutor e o seu potencial;

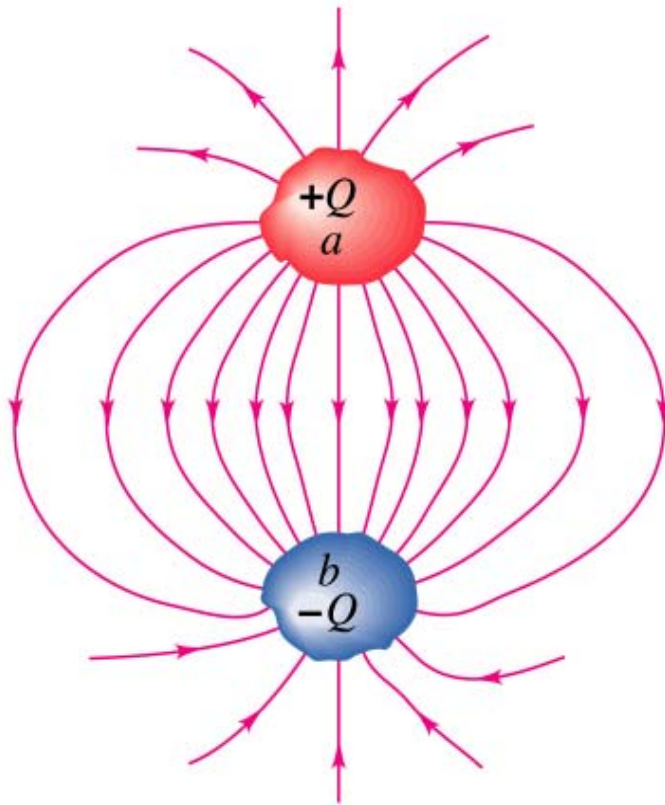
capacidade eléctrica (de um condensador): a razão entre a carga da armadura colectora e a diferença de potencial entre as armaduras;

condensador eléctrico: sistema de dois condutores eléctricos separados por um dieléctrico e colocados, em geral, tão próximos um do outro que praticamente todas as linhas de força que saem de um terminam no outro, permitindo a acumulação de energia no dieléctrico;



Condensadores

Dois condutores quaisquer isolados um do outro formam um CONDENSADOR.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Um condensador "carregado" pode armazenar energia potencial eléctrica. Quando em processo de carga, cargas negativas são removidas de um lado do condensador e transferidas para outro lado, deixando um lado com carga negativa (-q) e o outro lado com carga positiva (+q).

Um condensador num circuito impõe uma frequência natural de oscilação da corrente no circuito.

Um condensador num circuito electrónico pode proteger os componentes mais sensíveis impedindo variações rápidas na tensão devido alterações bruscas da tensão de alimentação (actua como os amortecedores de um carro).

O condensadores têm um grande número de aplicações: flash das máquinas fotográficas; em circuito de sintonização de tv e de rádio; etc..



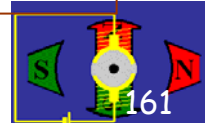
Condensadores e capacitância

Os condensadores podem ter também efeitos indesejados. Por exemplo, os pinos adjacentes de um circuito integrado comportam-se como condensadores, e a propriedade que faz com que os condensadores sejam úteis como alisadores de variações de tensão indesejadas, limita a taxa temporal a que o potencial dos pinos pode ser alterado. Este efeito limita a frequência máxima a que o circuito pode operar. Esta característica tende tornar-se mais forte à medida que o tamanho dos circuitos é reduzido e a frequência de operação é aumentando.

Para um dado condensador, a razão entre a carga em cada condutor e a diferença de potencial entre condutores, Q/V , é constante e chama-se **capacidade ou capacitância**, C . A capacidade depende apenas das características geométricas dos condutores e das propriedades do meio que os separa. A capacidade de um condensador aumenta se entre os condutores for colocado um meio dieléctrico, em vez do ar ou do vácuo. Isto acontece porque há uma redistribuição de cargas no dieléctrico, em resultado da polarização do dieléctrico.

A energia armazenada num condensador carregado está associada ao campo eléctrico existente no espaço entre os condutores: a energia potencial pode ser vista como estando armazenada no próprio campo eléctrico.

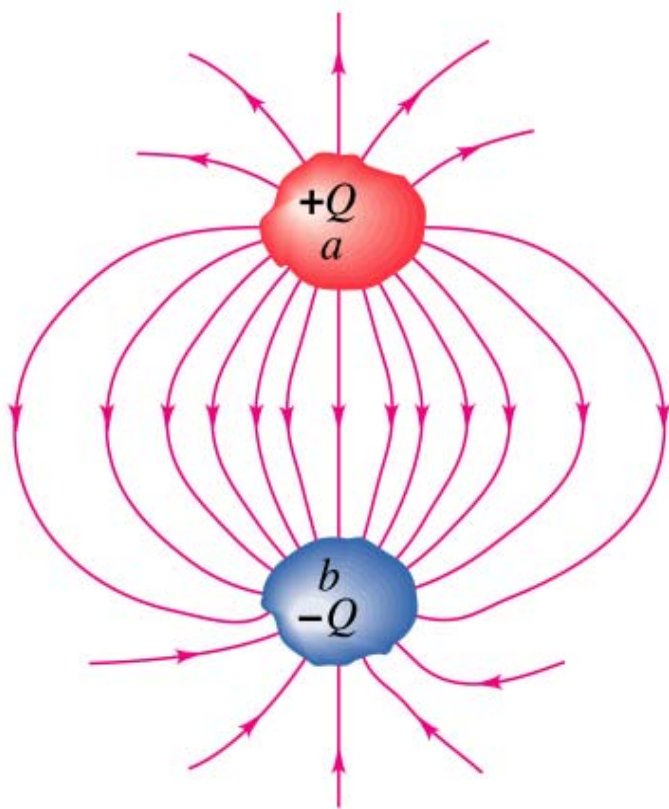
A ideia que o próprio campo eléctrico funciona como um armazém de energia está no coração da teoria das ondas electromagnéticas e da luz.





Cargas em condensadores

Dois quaisquer condutores isolados um do outro formam um CONDENSADOR. Na maioria das aplicações, cada condutor tem inicialmente carga nula, sendo os electrões progressivamente transferidos de um condutor para o outro:



este processo corresponde à carga do condensador. Os dois condutores ficam com a mesma quantidade de carga, mas com polaridade oposta. A carga total no condensador (nas armaduras colectora e condensadora) é sempre zero.

Quando se diz que o condensador está carregado com a carga Q , quer-se dizer que o condutor que está a maior potencial tem carga $+Q$, e o condutor que está ao potencial inferior tem carga $-Q$ (assumindo que $Q > 0$).

Num circuito eléctrico o condensador é representado pelos símbolos:

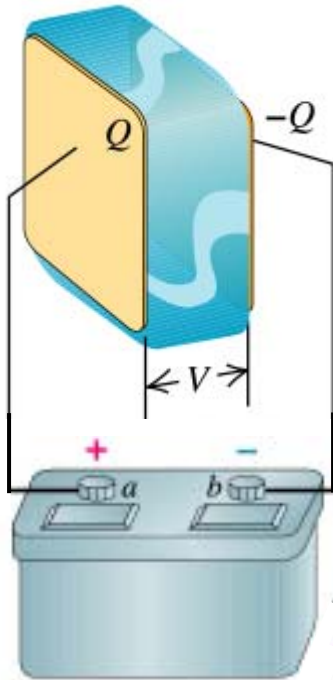


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Capacidade

Um modo comum de carregar um condensador é ligar as suas armaduras ao terminais de uma fonte de força electromotriz. Quando carregado com as cargas Q e $-Q$ nos condutores, desconecta-se a bateria, e a diferença de potencial entre os condutores é V , igual à da bateria. O campo eléctrico na região entre os condutores é proporcional à magnitude da carga em cada condutor Q . Como consequência a ddp V é também proporcional a Q .



Define-se capacidade ou capacitância à razão entre a carga Q e a ddp V entre os condutores:

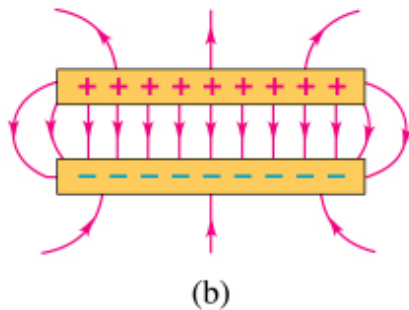
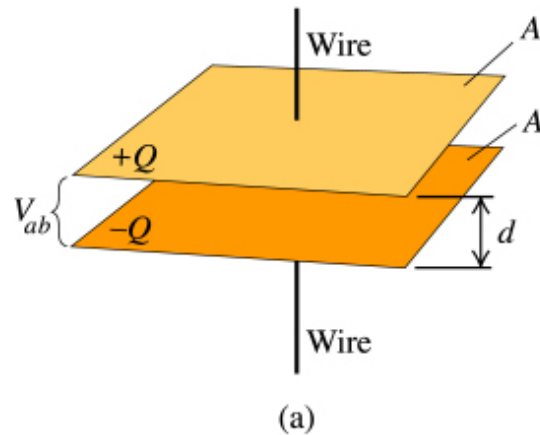
$$C=Q/V.$$

A unidade SI de capacidade é o **farad**, símbolo **F**. A capacidade C é uma medida da propensão do condensador para armazenar energia. O valor da capacidade de um condensador depende apenas da sua forma geométrica e das características do meio material entre os condutores. A forma mais simples de condensador consiste em dois planos condutores paralelos, cada um com área A e separados de uma distância d pequena quando comparada com as dimensões lineares das placas.



Calculo de capacidades

O condensador de placas paralelas é a a forma mais simples de condensador e consiste em dois planos condutores paralelos, cada um com área A e separados de uma distância d pequena quando comparada com as dimensões lineares das placas.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Quando as placas estão carregadas, o campo eléctrico está quase todo localizado na região entre as placas, e é praticamente uniforme, uma vez que as cargas se distribuem uniformemente nas placas condutoras. O campo eléctrico E pode ser determinado usando a lei de Gauss para o campo eléctrico, obtendo-se $E = \sigma / \epsilon_0$. Como $Q = \sigma A$, $E = Q / (A \epsilon_0)$. Uma vez que o campo é uniforme e a distância entre as placas é d , a diferença de potencial (tensão) entre os dois planos é $V_{ab} = Ed = Qd / (A \epsilon_0)$. A capacidade é, então, dada por $C = Q / V_{ab} = \epsilon_0 A / d$.





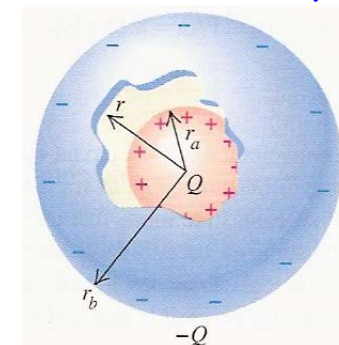
Exercícios

Um farad é uma capacidade muita elevada. Em geral, usa-se microfarad (μF) e picofarad (pF). Exercício: sabendo que a distância entre as placas de um condensador plano de placas paralelas com capacidade 1 F é 1 mm, determine a área das placas. (R: $1.1 \times 10^8 \text{ m}^2$.)

Nota: Tecnologias recentes permitem fabricar condensadores de 1 F com dimensões de pouco centímetros, usando grânulos de carbono activados - 1 g de grânulos de carbono activado tem uma superfície de cerca de 1000 m^2 (ver Nanotecnologia).

Seja um condensador de placas paralelas de 2 m^2 separadas de 5 mm. É aplicada uma diferença de potencial de 10 kV entre as placas. Determine: a) a capacidade; b) a magnitude da carga em cada placa; c) a magnitude do campo eléctrico entre as placas. R: 3,54 nF; 35,4 μC ; 2 MN/C.

Condensador esférico: Duas cascas esféricas concêntricas e condutores estão separadas por vácuo. A casca interior tem carga total $+Q$ e um raio exterior $r_a = 9,5 \text{ cm}$; a casca exterior tem carga $-Q$ e raio interior $r_b = 10,5 \text{ cm}$. Determine a capacidade do condensador esférico.



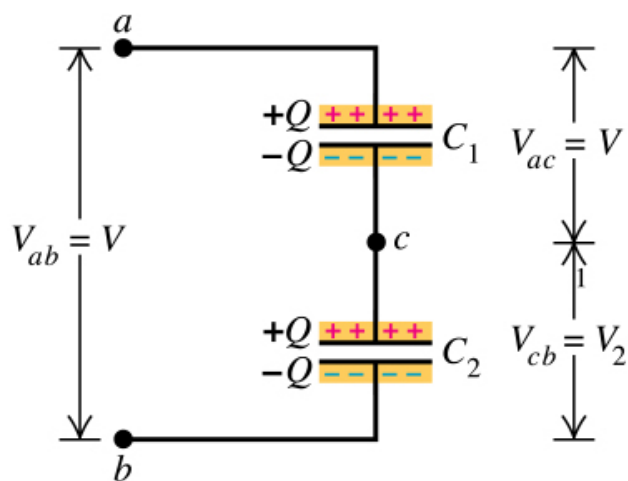
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \rightarrow E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \rightarrow V_{ab} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_a} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_b} \rightarrow C = \frac{Q}{V_{ab}} = 4\pi\epsilon_0 \frac{r_a r_b}{r_b - r_a}$$



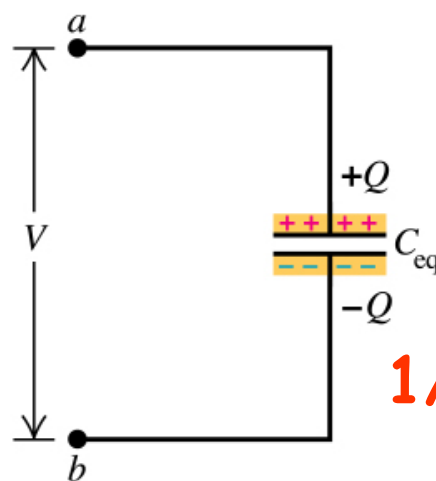


Condensadores em série

(a) Dois condensadores em series, (b) Condensador equivalente.



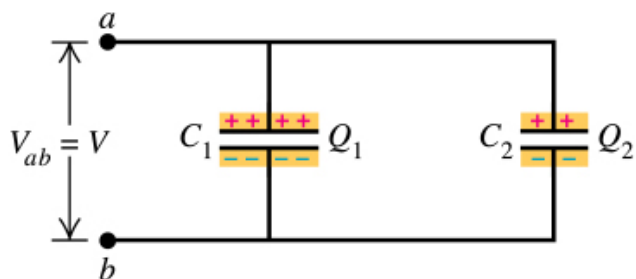
(a)



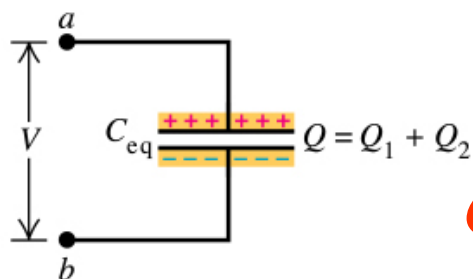
(b)

$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2$$

(a) Dois condensadores em paralelo, (b) condensador equivalente.



(a)



(b)

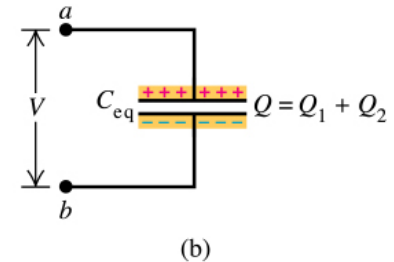
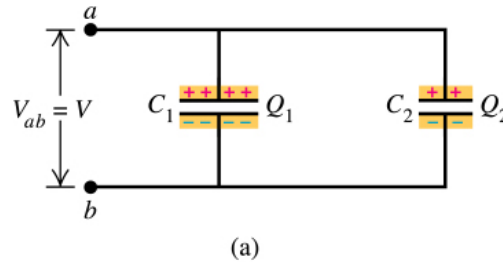
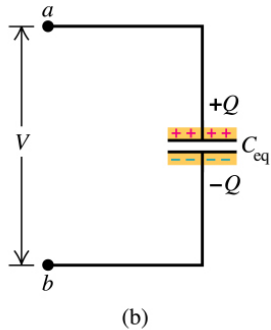
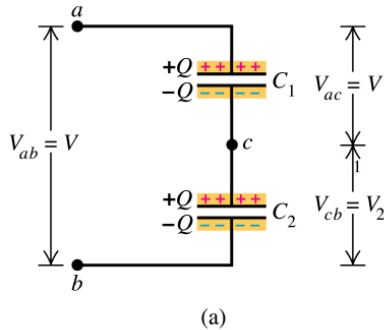
$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Exercícios

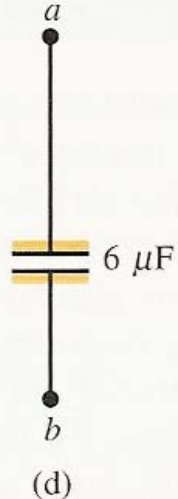
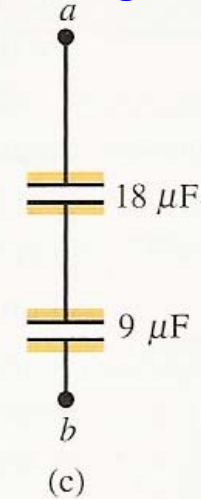
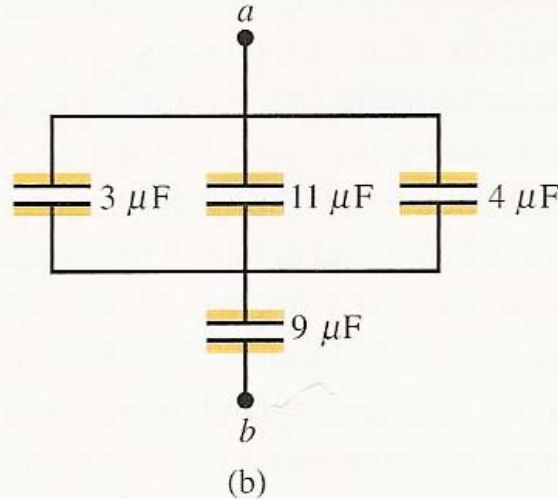
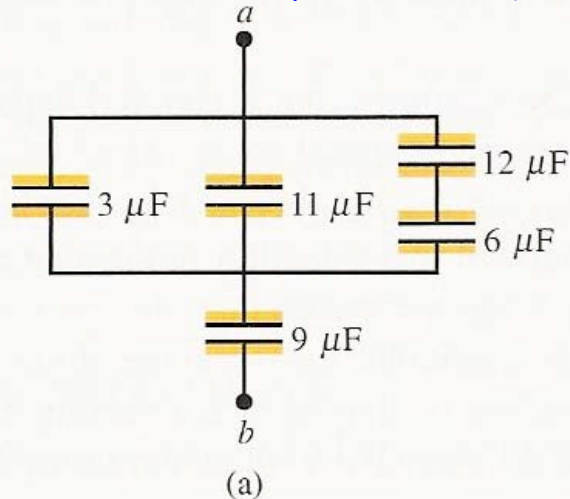
Nas figuras abaixo considere $C_1=6 \mu\text{F}$, $C_2=3 \mu\text{F}$ e $V_{ab}=18 \text{ V}$. Determine a capacidade equivalente, a carga e a diferença de potencial para cada condensador.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$C_{eq}=2 \mu\text{F}$; $Q=36 \mu\text{C}$; $V_1=6 \text{ V}$; $V_2=12 \text{ V}$; $C_{eq}=9 \mu\text{F}$; $Q_1=108 \mu\text{C}$; $Q_2=54 \mu\text{C}$; $Q_1+Q_2=Q$

Determine a capacidade equivalente da rede de condensadores da figura abaixo.

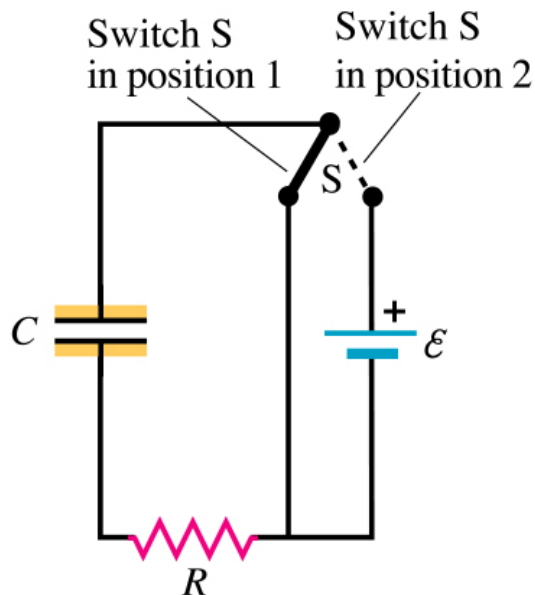




Carga e descarga de um condensador

O circuito RC abaixo pode ser usado para carregar e descarregar um condensador (através de uma resistência).

Descarga: carga:



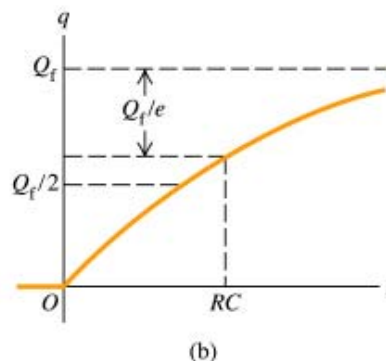
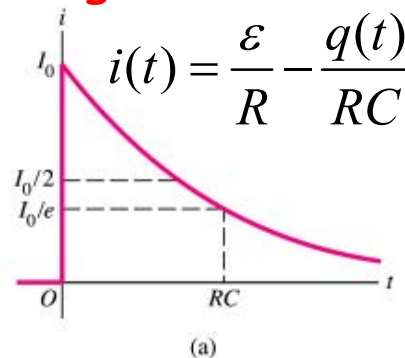
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Carga

$$\epsilon - i(t)R - \frac{q(t)}{C} = 0 \quad \text{ou} \quad \epsilon - R \frac{dq(t)}{dt} - \frac{q(t)}{C} = 0$$

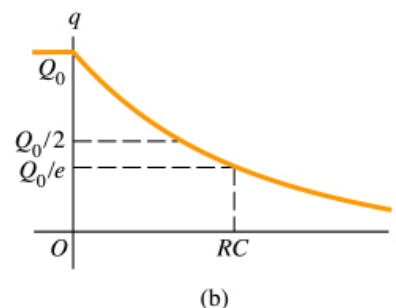
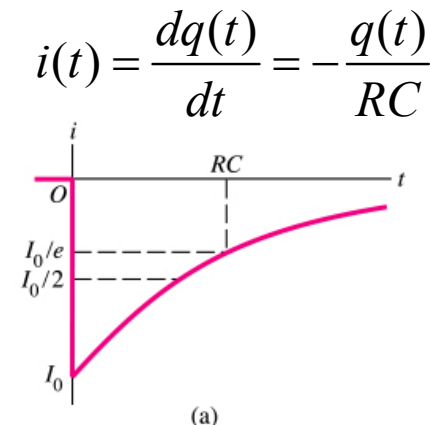
$$\text{Solução do tipo: } q(t) = Q_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

Carga:



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Descarga:



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Constante de tempo do circuito $\tau = RC$





Energia armazenada num condensador

Os condensadores podem armazenar energia potencial eléctrica

O potencial V aumenta à medida que a carga é transferida entre as placas ($V = Q/C$, $v = q/C$). Uma vez que V cresce com o aumento de Q , a energia total armazenada obtém-se por integração de todas as pequenas quantidades de carga " dq " que vão sendo adicionadas às placas ($dU = v dq = q dq / C$), obtendo-se

$$U = \int du = \int v dq = \int q/C dq = 1/C \int q dq = 1/2 Q^2 / C.$$

Usando a expressão $Q = C V$, obtemos

$$U = 1/2 Q^2 / C = 1/2 C V^2 = 1/2 Q V$$

Portanto, a energia armazenada no condensador pode ser pensada como a energia potencial armazenada num sistema de cargas positivas que estão separadas das cargas negativas, da mesma forma que uma mola esticada tem potencial energia ($k x^2 / 2$).





Energia do campo eléctrico e densidade de energia

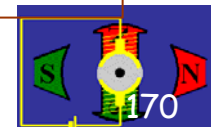
Há outro modo de pensar na energia armazenada num condensador. Podemos carregar um condensador movendo electrões directamente de uma placa para outra. Isto requer a realização de trabalho contra o campo eléctrico entre as placas. Assim, podemos pensar que a energia está a ser armazenada no campo eléctrico na região entre as placas.

Energia por unidade de volume - densidade de energia u

Se considerarmos que o espaço entre as placas contém uma energia igual a $\frac{1}{2}CV^2$, podemos determinar a densidade de energia u (J/m^3). O volume entre as placas é a área \times a separação entre as placas, $A \cdot d$. A densidade de energia u é (recordando que $C = \epsilon_0 A/d$ e $V = Ed$):

$$u = \frac{1}{2}CV^2/Ad = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$$

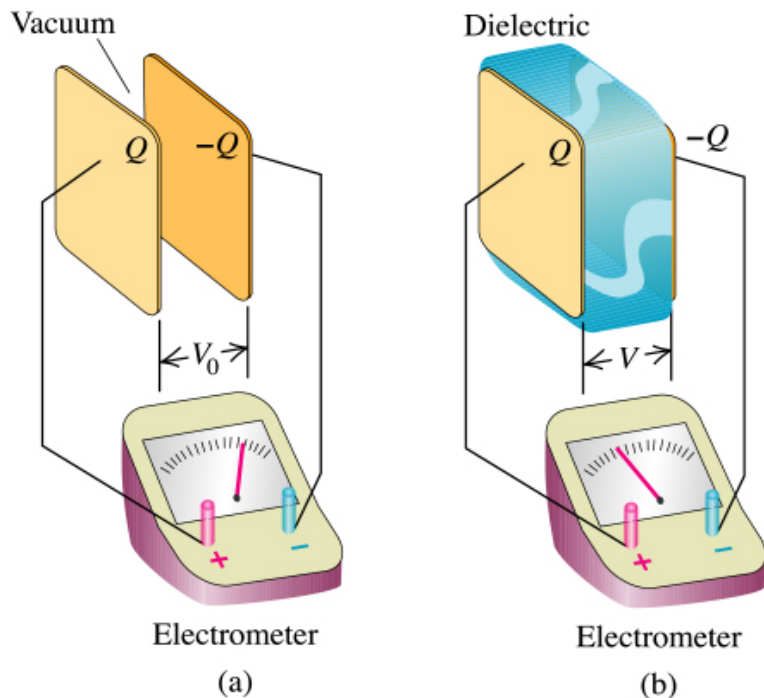
Este resultado é válido para qualquer configuração de campo eléctrico no vácuo. Este facto tem importantes implicações: em geral pensamos no vácuo como um espaço onde não há matéria, mesmo assim, o vácuo pode ter um campo eléctrico e portanto energia. **Este espaço "vazio" afinal não é tão vazio como isso, como iremos ver mais adiante: se produzirmos um campo eléctrico *propagante* podemos enviar ou transmitir energia e informação através do espaço vazio !!!**





Dieléctricos

A maioria dos condensadores possuem materiais dieléctricos entre os condutores. Vamos analisar o efeito da inclusão de um dieléctrico entre as placas de um condensador plano de placas paralelas.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

A carga permanece sempre a mesma!

Seja $C_0 = Q/V_0$ a capacidade do condensador da esquerda e $C = Q/V$ a capacidade do condensador da direita. Como V é menor que V_0 , conclui-se que a capacidade do condensador com dieléctricos C é maior que C_0 . Quando o espaço entre as duas placas é completamente preenchido pelo dieléctrico, a razão $\epsilon_r = K = C/C_0$ chama-se permitividade eléctrica estática relativa do material:

$$\epsilon_r = K = C/C_0$$

Quando $Q = C_0 V_0 = CV$ ($C/C_0 = V_0/V$)

$$V = V_0/K$$

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





Permitividade eléctrica estática

A permitividade eléctrica estática relativa de um material é uma medida da capacidade que o material tem de concentrar linhas de fluxo de um campo electrostático. É a razão entre a quantidade de energia eléctrica armazenada pelo meio quando uma ddp é aplicada e a energia que seria armazenada no vácuo. A permitividade eléctrica estática relativa é a permitividade eléctrica relativa medida em condições electrostáticas ($f=0$ Hz). No teflon vale 2.1; na mica 3-6; papel ~3.5.

Não existem dieléctricos perfeitos. Existem sempre fugas de corrente entre os condutores carregados, que nós iremos ignorar. Acresce também que qualquer dieléctrico quando sujeito a uma diferença de potencial suficientemente elevada sofre o processo de disrupção que corresponde a um "salto" de uma faísca entre dois corpos carregados de electricidade em resultado da ionização total ou parcial do meio que permite a criação de percursos de condução. No caso do ar, o valor do campo eléctrico é da ordem de 3MV/m.

Quando ocorre disrupção, o dieléctrico torna-se condutor: os electrões são arrancados das moléculas e átomos e chocam com outros átomos e moléculas libertando mais electrões, dando origem a um processo de avalanche de cargas em deslocamento, formando uma faísca ou uma descarga de arco. Devido à disrupção do dieléctrico, nos condensadores é indicada a tensão máxima que podem suportar. O valor máximo do campo eléctrico chama-se campo **eléctrico de disrupção**.





Cargas induzidas e polarização

Quando um material dieléctrico é introduzido entre as placas de um condensador, mantendo a carga nas armaduras, a diferença de potencial entre as placas diminui pelo factor ϵ_r . Portanto, o campo eléctrico entre as placas deve diminuir pelo mesmo factor.

Se E_0 é o valor do campo no vácuo e E é o valor com o dieléctrico, tem-se: As cargas induzidas nas superfícies do dieléctrico reduzem do campo eléctrico:

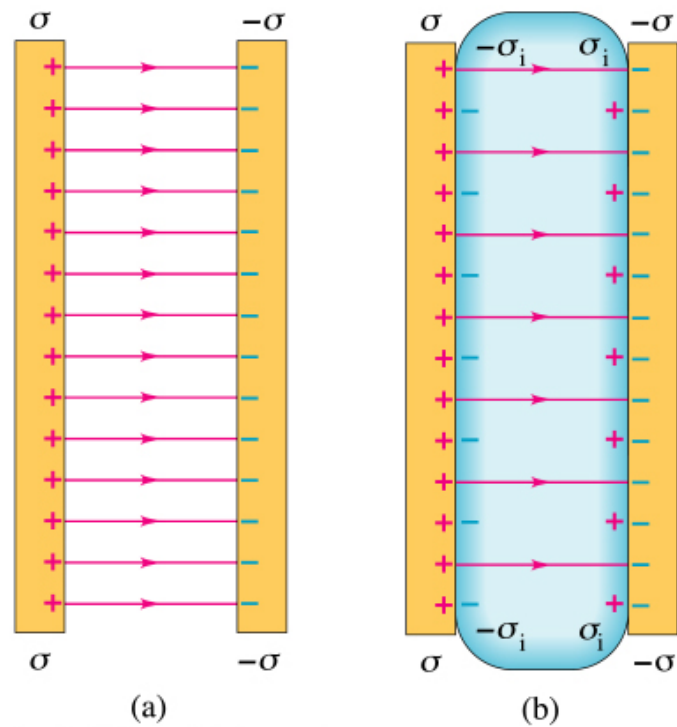
$$E = E_0 / \epsilon_r$$

Se o valor do campo diminui, a densidade de carga superficial global também decresce. Como a densidade de carga superficial nos condutores não diminui, é criada uma densidade superficial de carga de sinais contrários nas superfícies do dieléctrico (polarização do dieléctrico):

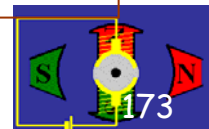
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \text{e} \quad E = \frac{\sigma_{ef}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} \rightarrow \sigma_i = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)$$

A **permissividade do dieléctrico** é:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

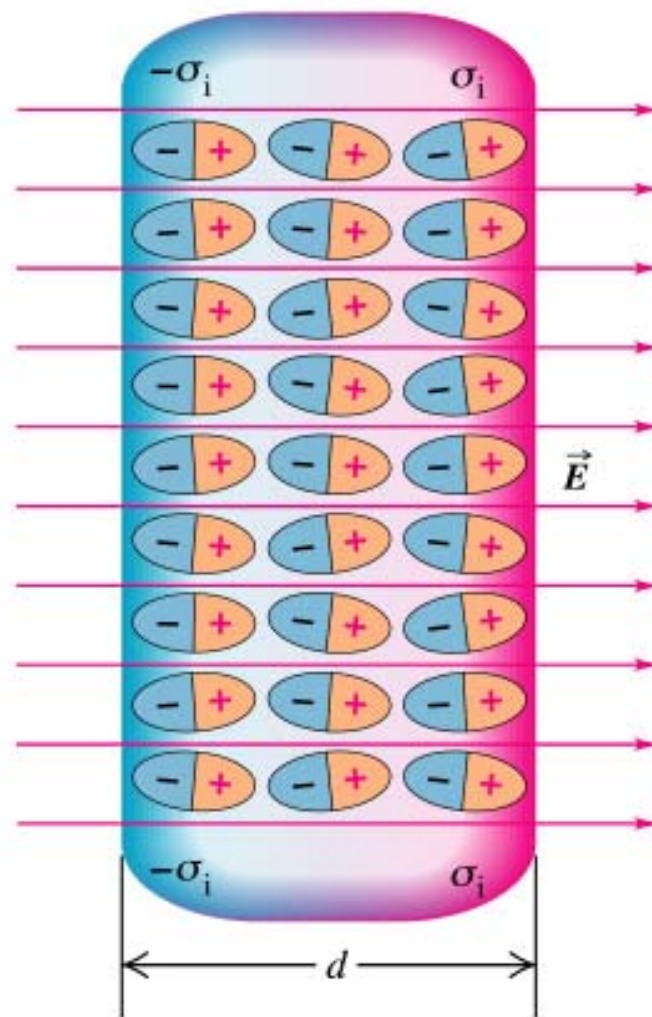


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Polarização

A "polarização" do dielétrico num campo eléctrico \vec{E} dá origem a camada de "cargas ligadas" nas superfícies, criando as densidades espaciais de carga $+\sigma_i$ e $-\sigma_i$.

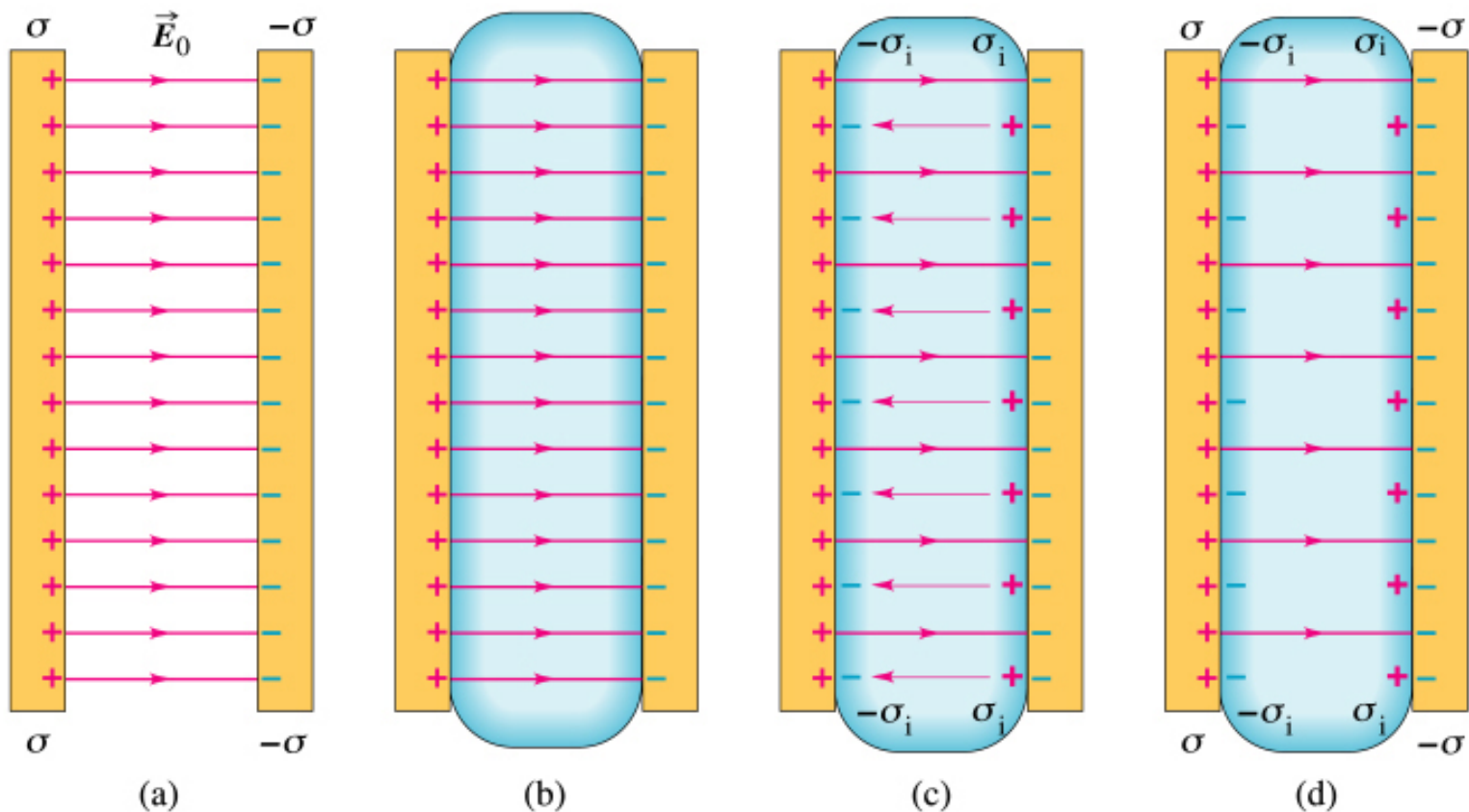


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

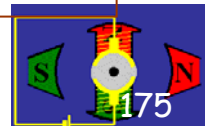


Polarização (2)

“Polarização” de um dielétrico na presença de um campo eléctrico \vec{E} .



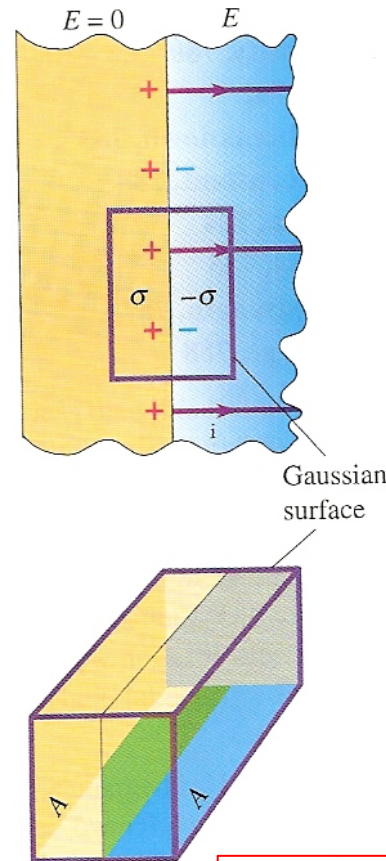
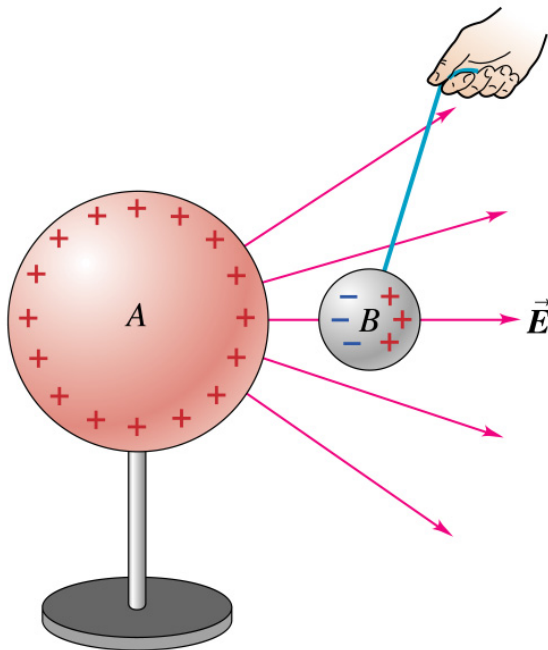
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Lei de Gauss em dieléctricos

Uma esfera neutra B na presença de um campo eléctrico criado por uma esfera carregada A é atraída pela esfera carregada devido à polarização.



$$EA = \frac{(\sigma - \sigma_i)A}{\epsilon_0}$$

$$\sigma_i = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)$$

$$\sigma - \sigma_i = \frac{\sigma}{\epsilon_r}$$

$$EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$\epsilon_r EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

$$\oint \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc-free}}{\epsilon_0}$$

Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.





Magnetostática

-

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.) área 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.»).





Interacção magnética

As forças magnéticas estão presentes na nossa vida quotidiana: são o coração dos motores, dos tubos de televisão, fornos de microondas, dos alto-falantes, impressoras, discos duros. O aspecto mais familiar do magnetismo são os imanes permanentes que atraem objectos de ferro não magnetizado e podem atrair ou repelir outros magnetes. Quando uma bússola se orienta com o campo magnético da Terra estamos perante uma interacção magnética.

A natureza fundamental do magnetismo reside na interacção entre cargas eléctricas em movimento. Ao contrário das interacções eléctricas, que actuam entre cargas eléctricas mesmo que estejam em movimento ou não, as forças magnéticas actuam somente em cargas eléctricas em movimento.

Um campo magnético pode ser criado por magnetes permanentes, por correntes eléctricas em condutores ou por cargas individuais em movimento. Este campo magnético, por sua vez, exerce forças em cargas em movimentos e em correntes eléctricas em condutores.

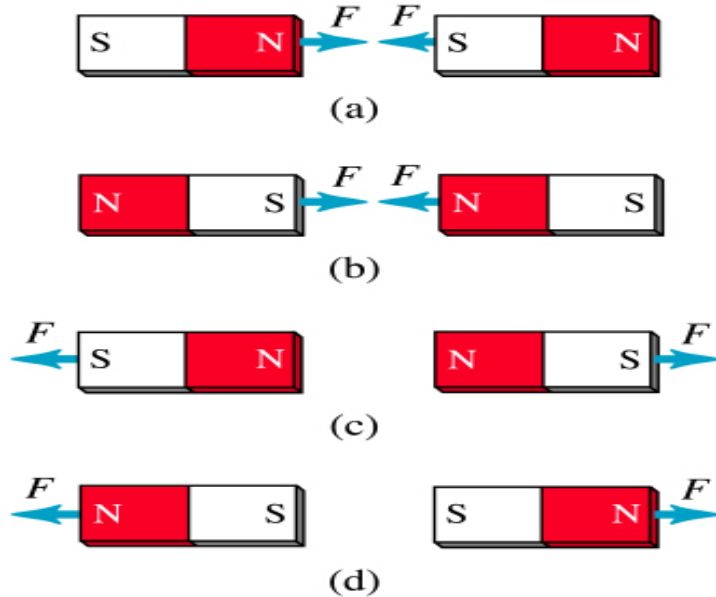
Os primeiros registos de observação de fenómenos magnéticos datam de à cerca de 2500 anos, na cidade grega de Magnésia (actual Manisa, Turquia).

Por analogia com as interacções eléctricas, dizemos que um íman permanente cria um campo magnético no espaço em seu redor e que um segundo corpo responde ao campo magnético criado pelo íman. A agulha de uma bússola tende a alinhar-se com o campo magnético local na posição da bússola.

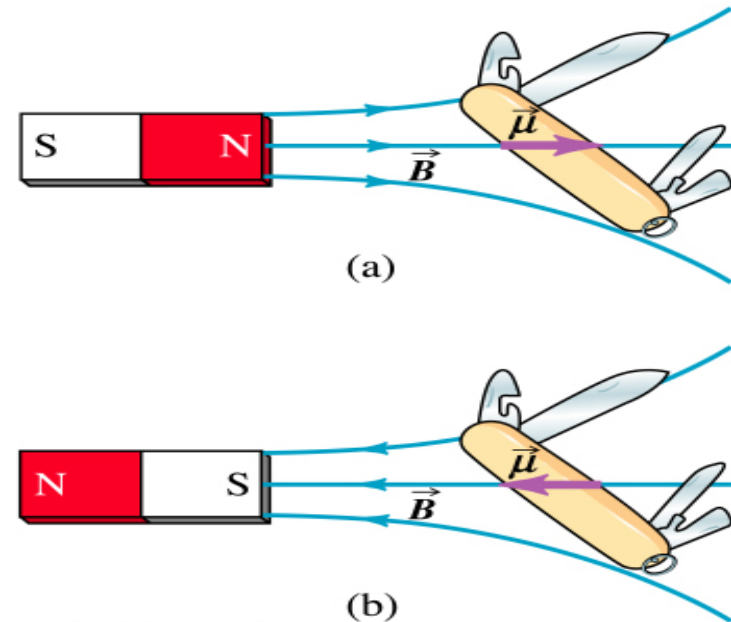




Forças entre ímanes permanentes



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Não existem evidências da existência de "cargas" magnéticas ou pólos magnéticos isolados. Os pólos magnéticos aparecem sempre aos pares. Quando quebramos um íman, cada um dos novos lados torna-se um pólo.

Quem demonstrar experimentalmente a existência de monopólos magnéticos será coberto de honras *globais* como, por exemplo, o Nobel.





Campos magnéticos B e H

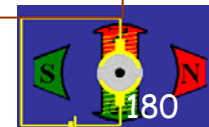
O campo magnético é caracterizado por 2 grandezas vectoriais: H e B. H é a intensidade de campo magnético (unidade SI: ampère por metro) B representará a densidade superficial de fluxo magnético (unidade SI: tesla, T), também chamada **indução magnética**: $B = \mu H$, onde μ representa a permeabilidade 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)

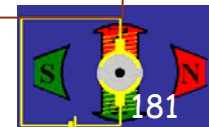




Magnitudes do campo magnético

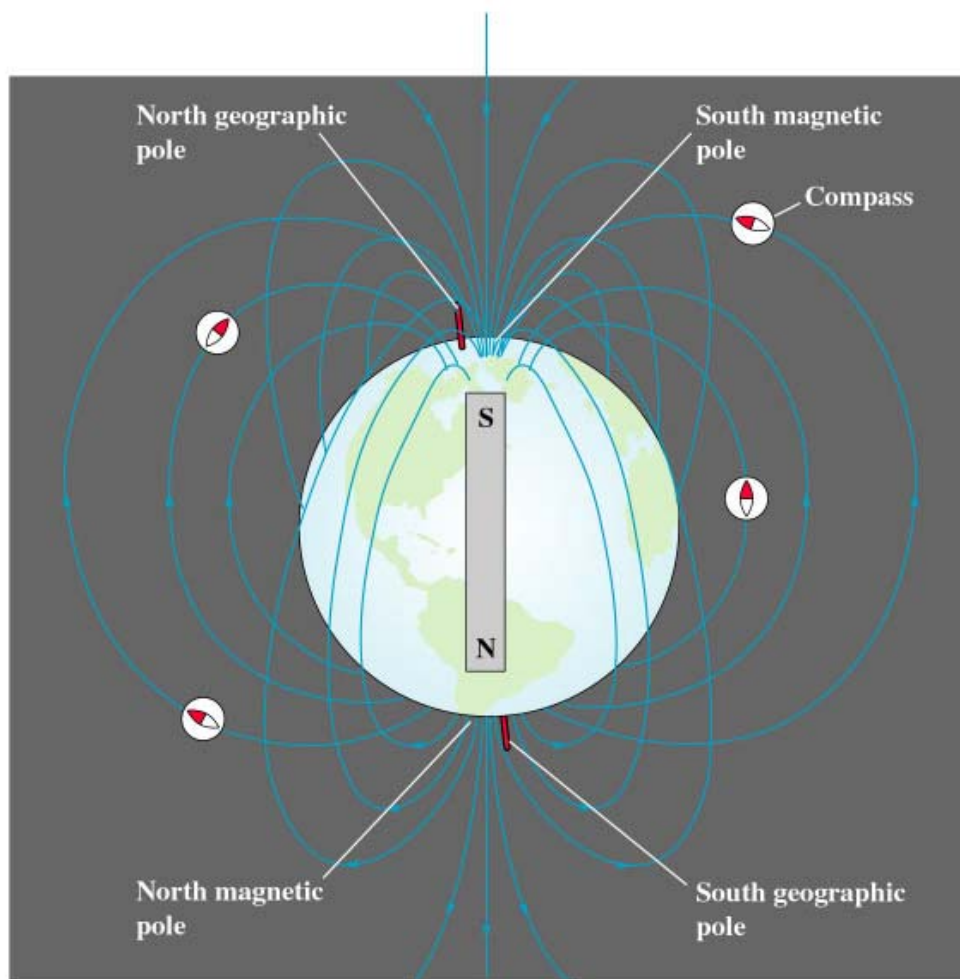
Some Approximate Magnetic Field Magnitudes	
Source of Field	Field Magnitude (T)
Strong superconducting laboratory magnet	30
Strong conventional laboratory magnet	2
Medical MRI unit	1.5
Bar magnet	10^{-2}
Surface of the Sun	10^{-2}
Surface of the Earth	0.5×10^{-4}
Inside human brain (due to nerve impulses)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





Terra: um íman permanente



erson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

<http://www.wikipedia.org/>

O campo magnético da Terra assemelha-se a um dipolo magnético com seus pólos próximos aos pólos geográficos da Terra. Uma linha imaginária traçada entre os pólos sul e norte magnéticos apresenta uma inclinação de aproximadamente $11,3^\circ$ relativa ao eixo de rotação da Terra.

A teoria do dínamo é a mais aceite para explicar a origem do campo.

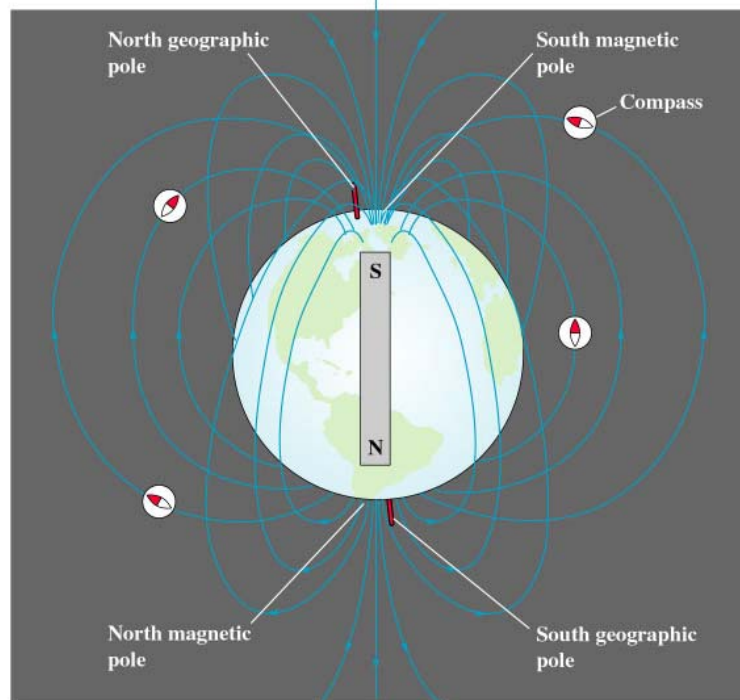
O efeito do campo magnético terrestre estende-se por várias dezenas de milhares de quilómetros no espaço formando a chamada de magnetosfera.





Campo magnético da Terra

A intensidade do campo na superfície da Terra neste momento varia de menos de 30 microteslas (0,3 gauss), numa área que inclui a maioria da América do Sul e África Meridional, até superior a 60 microteslas (0,6 gauss) ao redor dos pólos magnéticos no norte do Canadá e sul da Austrália, e em parte da Sibéria.



erson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

A localização dos pólos não é estática, chegando a oscilar vários quilómetros por ano. Os dois pólos oscilam independentemente um do outro e não estão em posição directamente opostas no globo. Actualmente o pólo sul magnético dista mais do pólo sul geográfico que o pólo norte magnético do pólo norte geográfico.

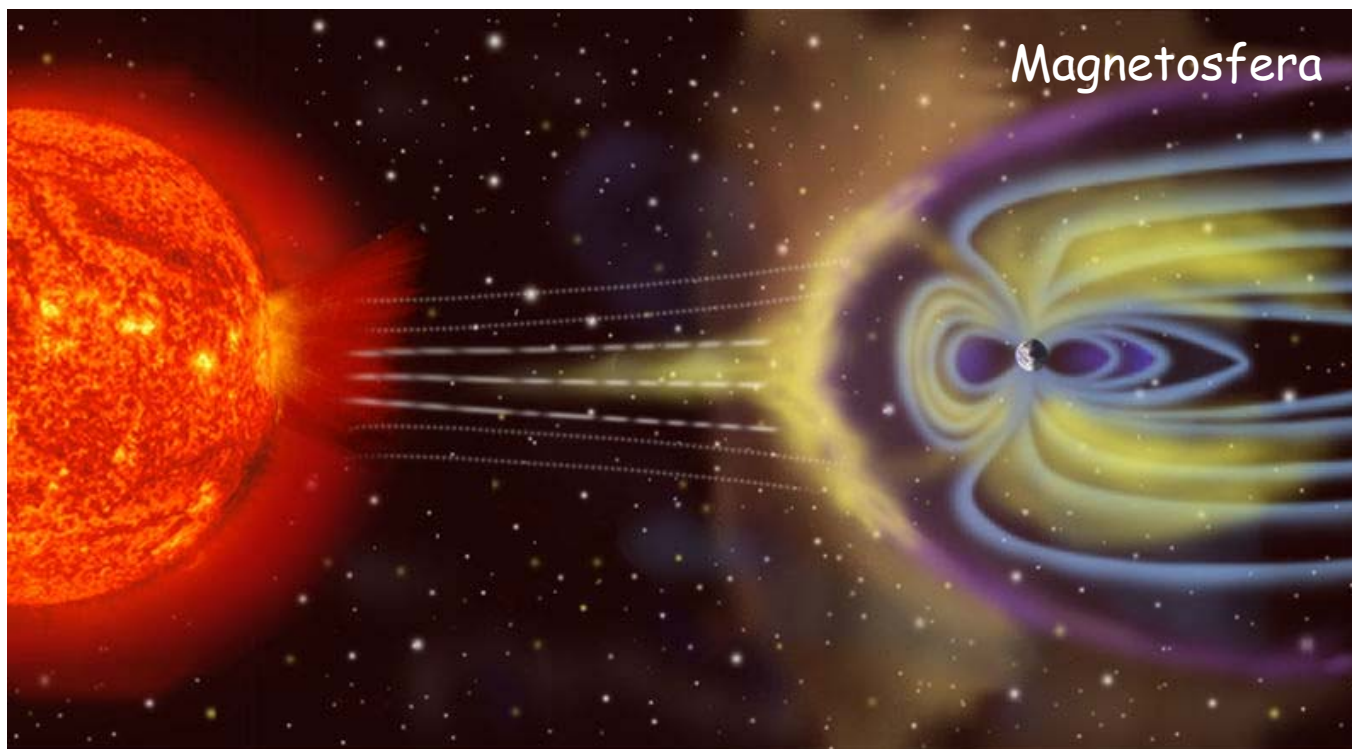
<http://www.wikipedia.org/>

Reversões do campo magnético



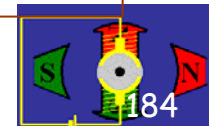


Campo magnético da Terra (2)



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://www.wikipedia.org/>





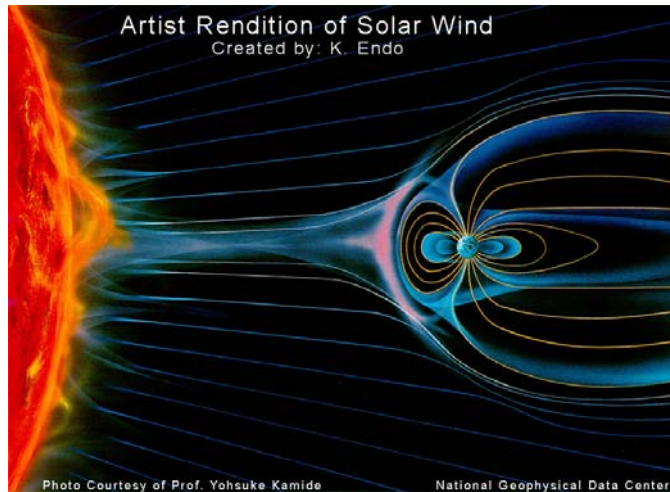
Campo magnético da Terra (2)

Em geofísica, os magnetómetros são usados para detectarem desvios diminutos no campo magnético da Terra causados por artefactos de ferro, fornos para queima de argila e tijolos, alguns tipos de estruturas de pedra, e até mesmo valas e sambaquis. Usando instrumentos magnéticos adaptados a partir de dispositivos desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial para detectar submarinos, as variações magnéticas através do fundo do oceano podem ser mapeadas. O basalto - rocha vulcânica rica em ferro, que compõe o fundo do oceano, contém um mineral magnético (magnetite) que pode distorcer a leitura de uma bússola. Esta distorção foi percebida por marinheiros islandeses no início do século XVIII. Como a presença da magnetite dá ao basalto propriedades magnéticas mensuráveis, estas variações magnéticas forneceram novos meios para o estudo do fundo do oceano. Quando as novas rochas formadas esfriam, as características do campo magnético da Terra local ficando registadas no tempo. 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.





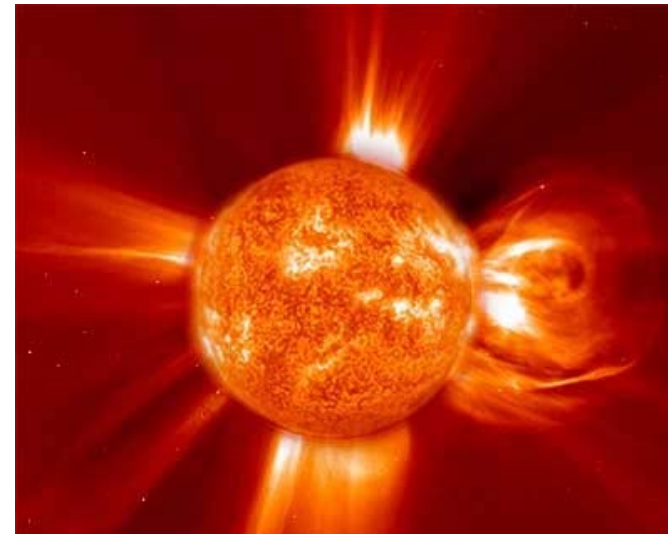
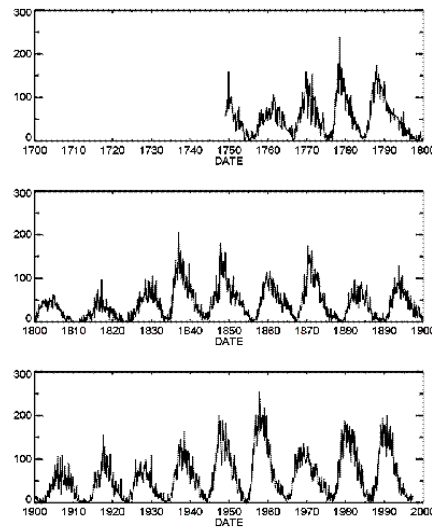
O campo magnético da Terra e as missões espaciais



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 é existe.

Ciclo solar



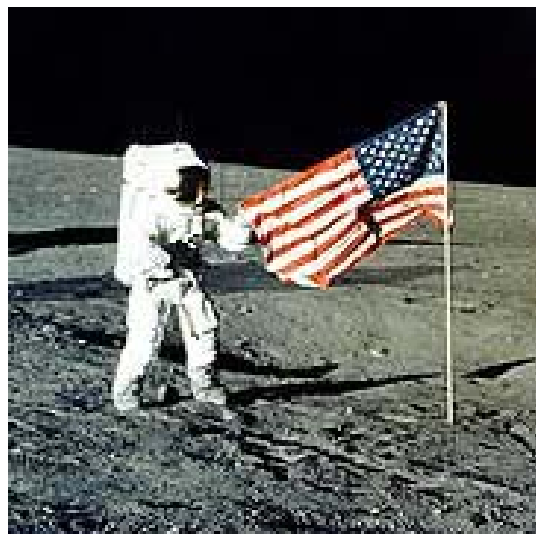


Como proteger os astronautas da radiação?



A ISS encontra-se em órbita em torno da Terra, sendo que se encontra no interior do campo magnético terrestre.

Numa missão à Lua já se sai da cintura de van Allen, pelo que já se está sob o efeito da radiação. Uma missão à Lua dura, por isso, apenas alguns dias e se forem escolhidos períodos de mínimo de actividade solar os riscos para a saúde dos astronautas são mínimos.



Uma missão a Marte durará pelo menos 2 anos, em que pelo menos 1 ano e meio será dispendido no trânsito entre a Terra e Marte.

Durante a viagem, os astronautas ficarão expostos a doses de radiação ionizante muito elevadas.

Solução: **Nanomedicina.**





A electricidade cria MAGNETISMO

Até ao início do XIX, pensou-se que o magnetismo e a electricidade eram duas coisas completamente distintas.

Por volta de 1550, Gerolamo Cardano discute no livro *De Subtilitate* as diferenças entre forças eléctricas e forças magnéticas.

Em 1600 William Gilbert publica *De Magnete*, onde desenvolve um trabalho metódico sobre as propriedades do magnetismo.

As coisas assim permaneceram até ao ano 1819, quando Oersted descobre que a electricidade também cria magnetismo.

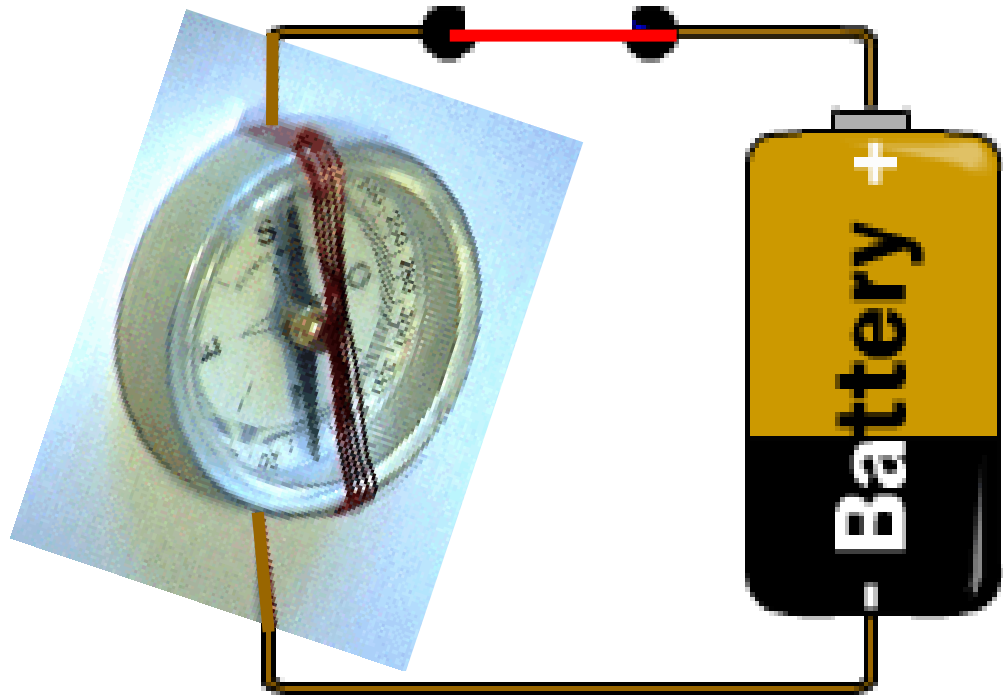
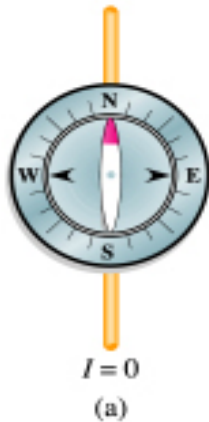




Experiência de Oersted (1819/1820)

A corrente eléctrica comporta-se como um íman.

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



©2000 How Stuff Works

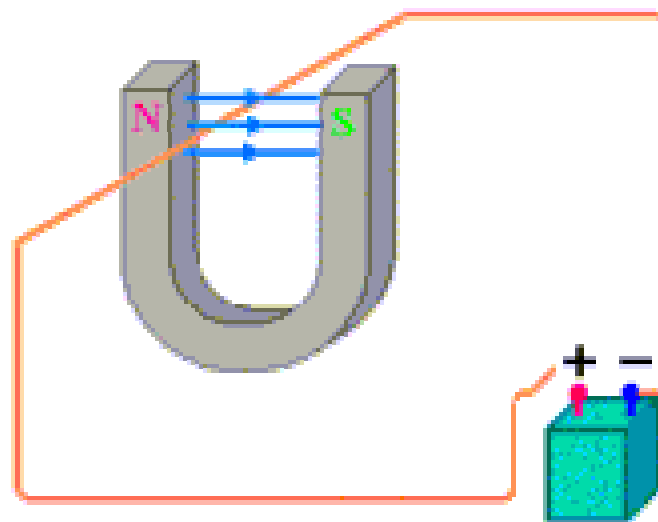
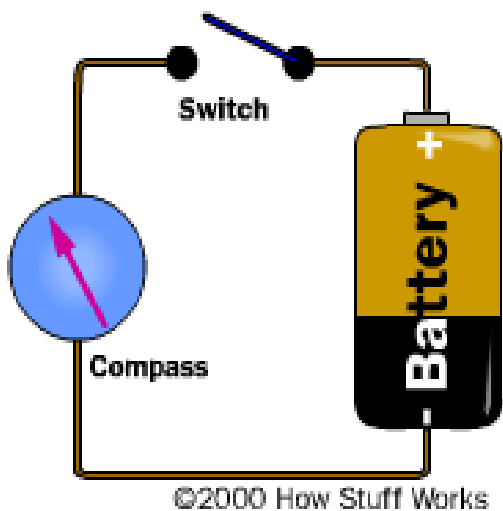
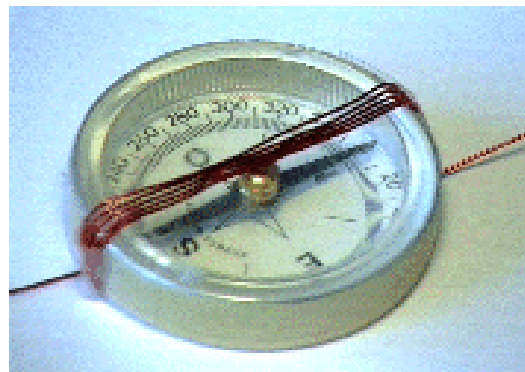
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





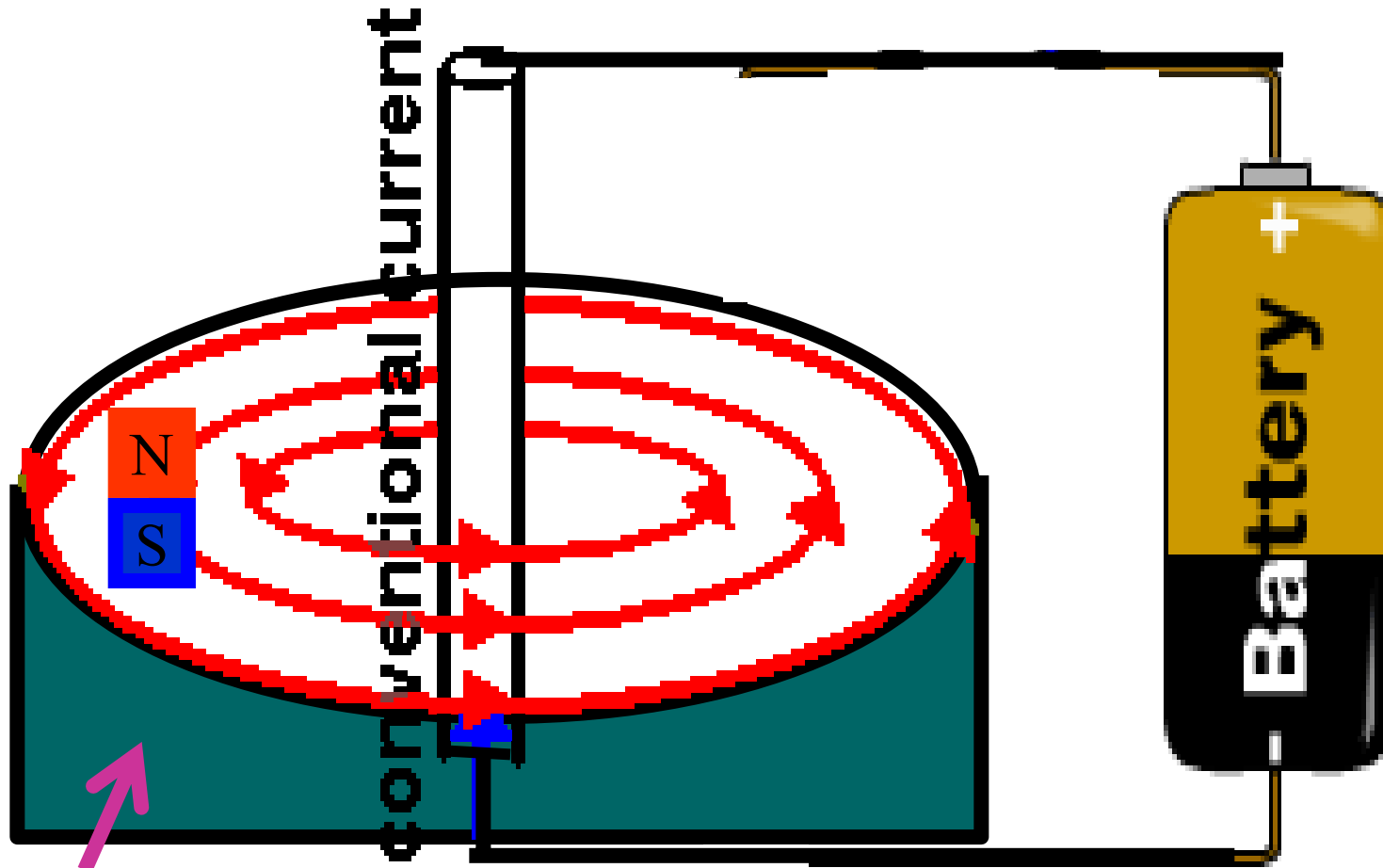
A electricidade cria magnetismo!

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





Primeiro motor eléctrico (1821 Faraday)



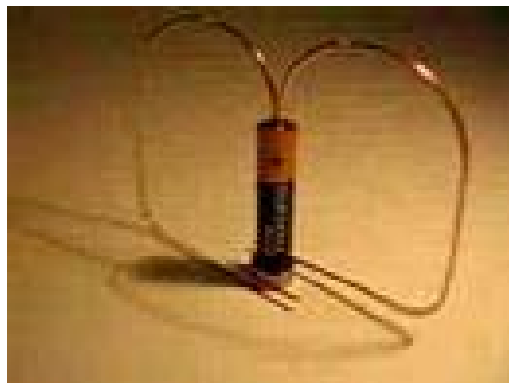
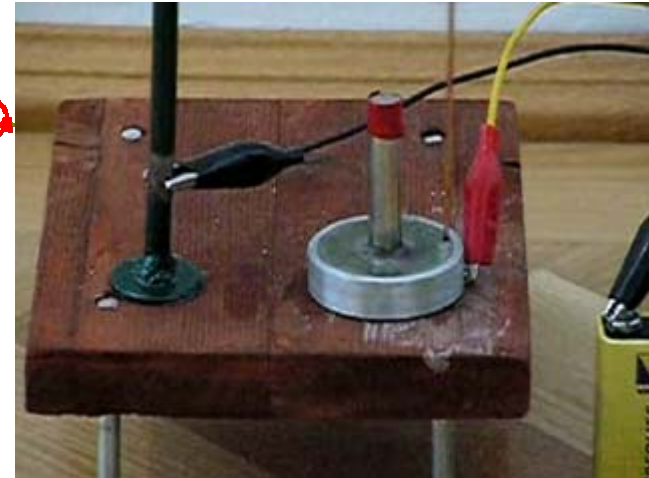
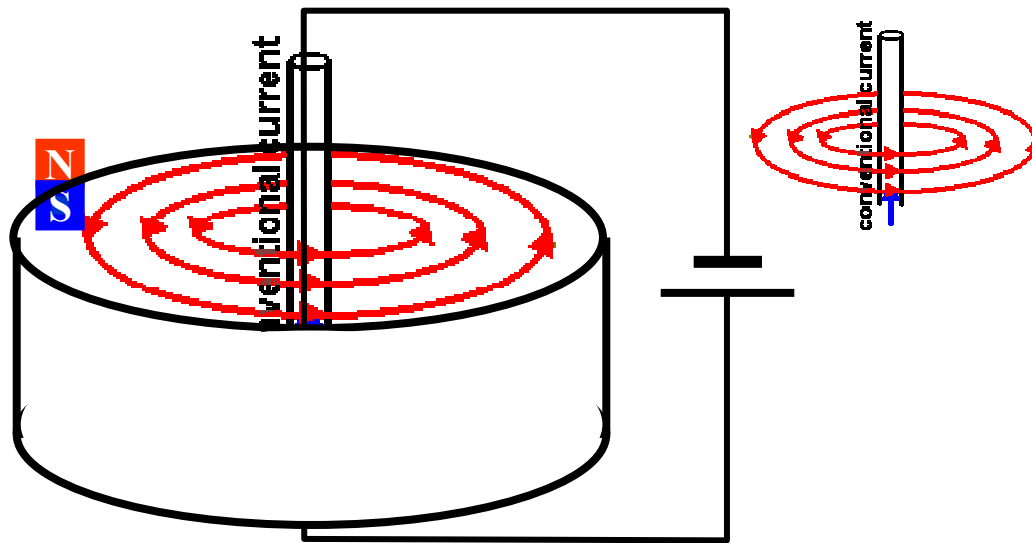
Tina com mercúrio

©2000 How Stuff Works





Outros motores eléctricos simples





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**.

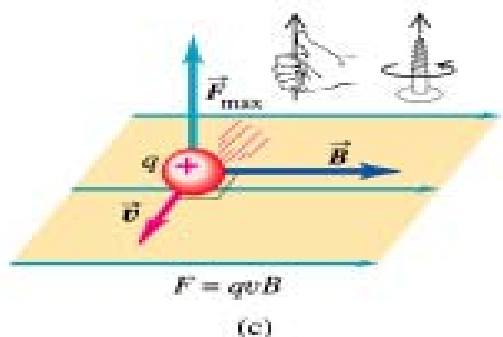
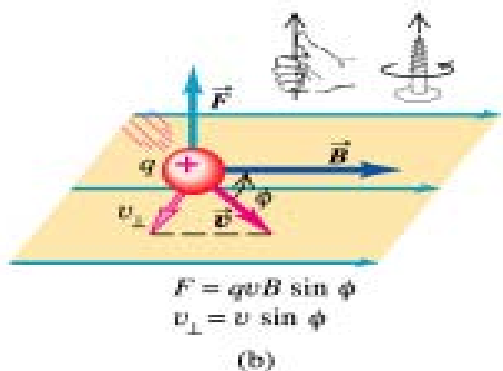
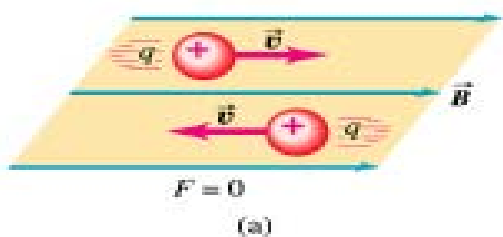
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Força de Lorentz





Força magnética sobre uma carga em movimento



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 que actua na carga quando na mesma região também existe um campo eléctrico \vec{E} :

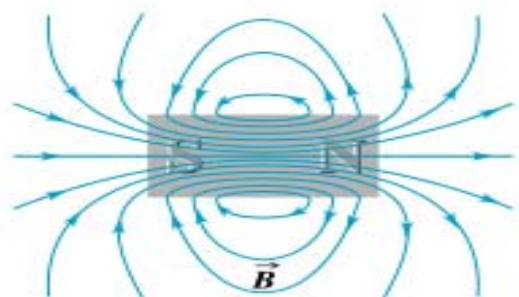
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



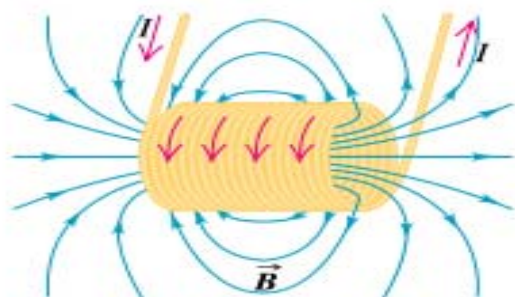


Linhas do campo magnético

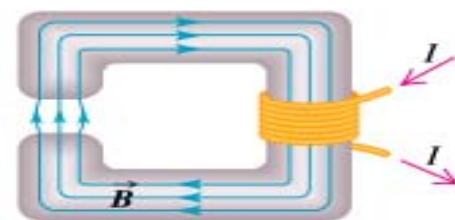
Linhas do campo magnético associadas a magnetes permanentes, a bobines de fio condutor percorrido por uma corrente eléctrica; electromagnete com núcleo de ferro, corrente rectilínea, e a um anel de corrente eléctrica.



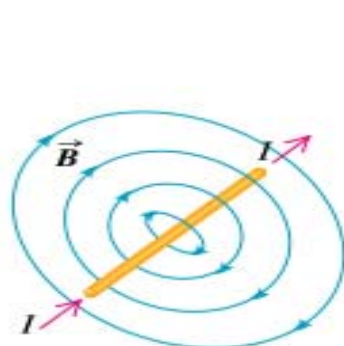
(a)



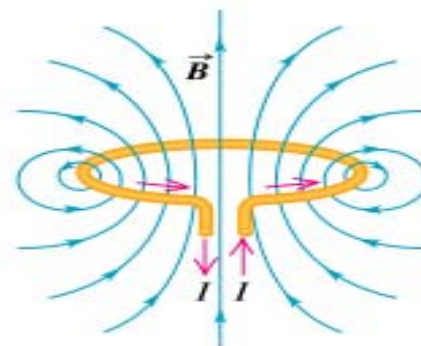
(b)



(c)



(d)



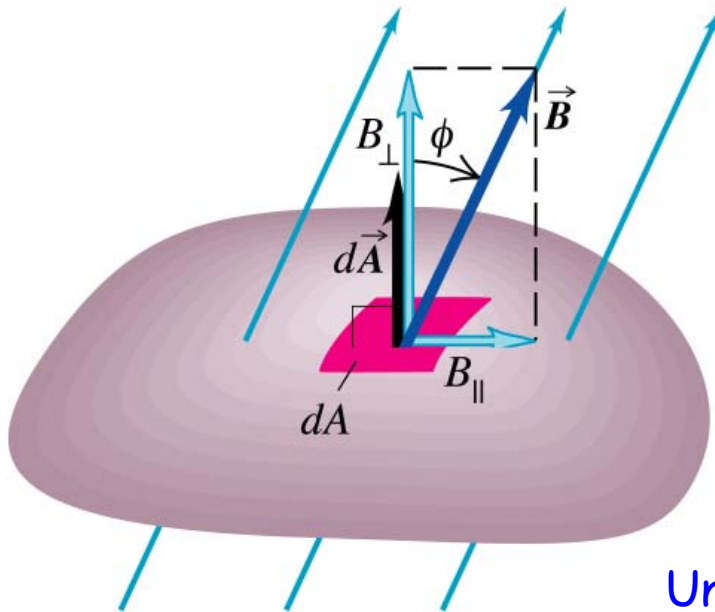
(e)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Fluxo do campo magnético B



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

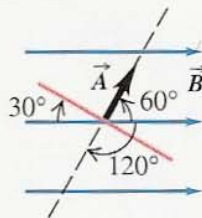
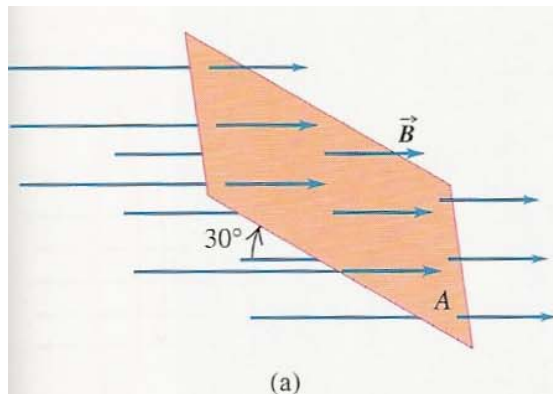
Fluxo do campo magnético B através de um elemento de área dA

$$d\Phi_B = B_{\perp} dA = B \cos \phi dA = \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\Phi_B = \int B_{\perp} dA = \int B \cos \phi dA = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

(magnetic flux through a surface)

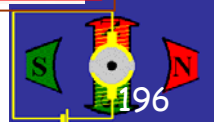
Unidade de fluxo magnético é o weber (Wb):
 $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2 = 1 \text{ Nm/A}$.



28-12 (a) A flat area A in a uniform magnetic field \vec{B} . (b) An edge-on view of the area A. The area vector \vec{A} makes an angle $\phi = 60^\circ$ with \vec{B} . (If we had chosen \vec{A} to point in the opposite direction, ϕ would have been 120° and the magnetic flux Φ_B would have been negative.) If the area rotates to $\phi = 90^\circ$, Φ_B becomes zero; but if the area rotates so that \vec{A} and \vec{B} are parallel, Φ_B has its maximum value.

B: densidade de fluxo magnético
(ver campos magnéticos B e H)

$$B = \frac{d\Phi_B}{dA}$$





Exercício: fluxo do campo magnético B

Example 30.8 Magnetic Flux Through a Rectangular Loop

Interactive

A rectangular loop of width a and length b is located near a long wire carrying a current I (Fig. 30.22). The distance between the wire and the closest side of the loop is c . The wire is parallel to the long side of the loop. Find the total magnetic flux through the loop due to the current in the wire.

Solution From Equation 30.14, we know that the magnitude of the magnetic field created by the wire at a distance r from the wire is

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

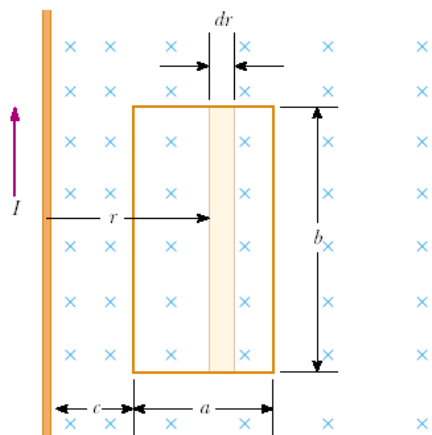


Figure 30.22 (Example 30.8) The magnetic field due to the wire carrying a current I is not uniform over the rectangular loop.

The factor $1/r$ indicates that the field varies over the loop, and Figure 30.22 shows that the field is directed into the page at the location of the loop. Because \mathbf{B} is parallel to $d\mathbf{A}$ at any point within the loop, the magnetic flux through an area element dA is

$$\Phi_B = \int B dA = \int \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dA$$

To integrate, we first express the area element (the tan region in Fig. 30.22) as $dA = b dr$. Because r is now the only variable in the integral, we have

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \int_c^{a+c} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln r \Big|_c^{a+c}$$

$$(1) \quad = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)$$

What If? Suppose we move the loop in Figure 30.22 very far away from the wire. What happens to the magnetic flux?

Answer The flux should become smaller as the loop moves into weaker and weaker fields.

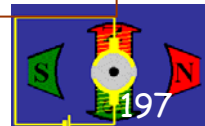
As the loop moves far away, the value of c is much larger than that of a , so that $a/c \rightarrow 0$. Thus, the natural logarithm in Equation (1) approaches the limit

$$\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right) \longrightarrow \ln(1 + 0) = \ln(1) = 0$$

and we find that $\Phi_B \rightarrow 0$ as we expected.



At the Interactive Worked Example link at <http://www.pse6.com>, you can investigate the flux as the loop parameters change.





Lei de Gauss para o campo magnético

O fluxo magnético através de uma superfície fechada qualquer é sempre igual a zero!

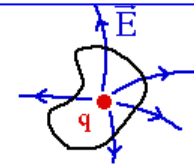
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

2ª equação de Maxwell

Maxwell's Equations

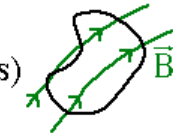
$$\oiint \vec{E} \cdot \hat{n} dS = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Gauss's Law



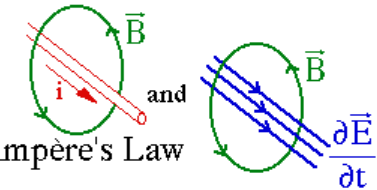
$$\oiint \vec{B} \cdot \hat{n} dS = 0$$

(no monopoles)



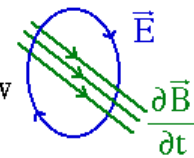
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

Ampère's Law



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

Faraday's Law



$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

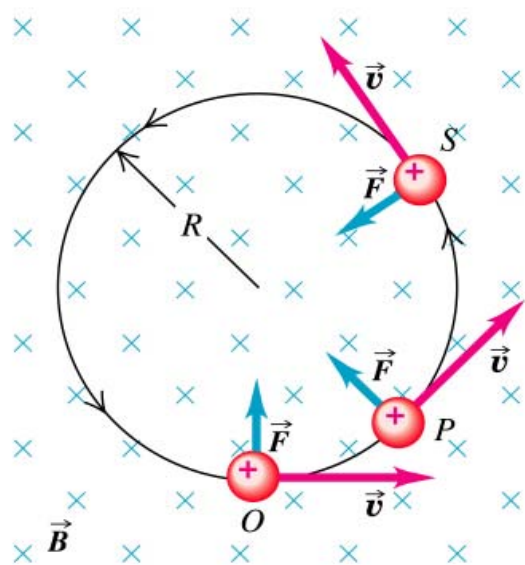
$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Differential Forms)



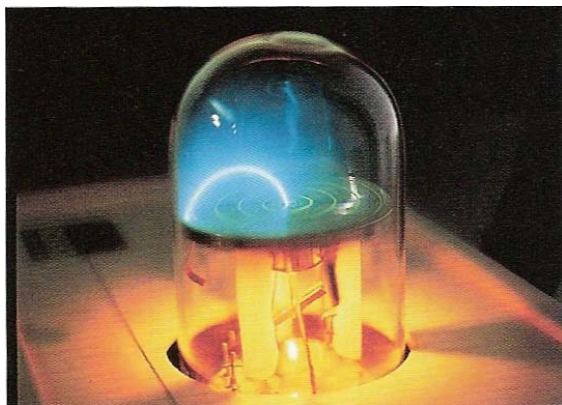


Movimento de partículas num campo magnético



(a)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



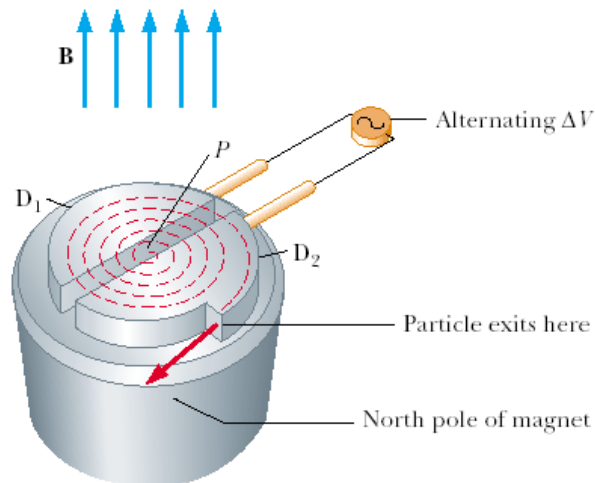
O movimento de uma partícula carregada com carga numa região onde existe um campo magnético é sempre um movimento com rapidez constante (isto é, a magnitude da sua velocidade não varia.)

A órbita de uma partícula com carga q quando a velocidade inicial é perpendicular ao campo B é um círculo. O raio do círculo descrito pela partícula portadora da carga q num campo magnético uniforme é: $R = m v / |q| B$

Se a velocidade da partícula não for perpendicular ao campo B , a partícula descreve um movimento helicoidal. A frequência angular da componente circular do movimento (**frequência do ciclotrão**) é:

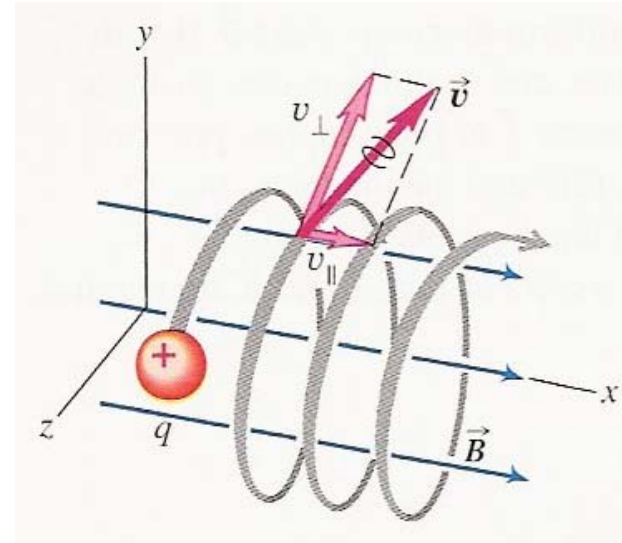
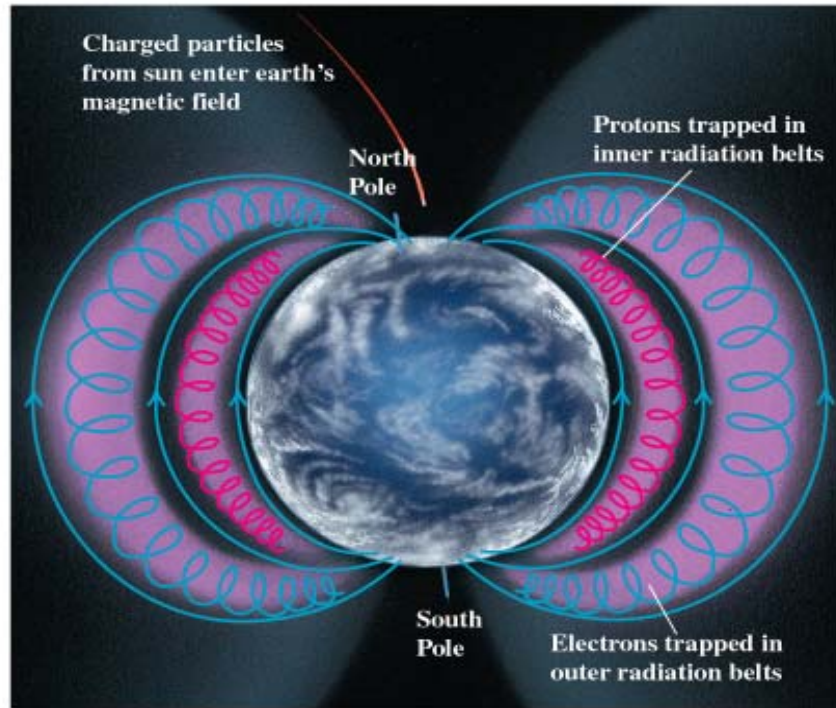
$$\omega = v/R = |q| B/m$$

Ciclotrão





Cintura da 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.

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)

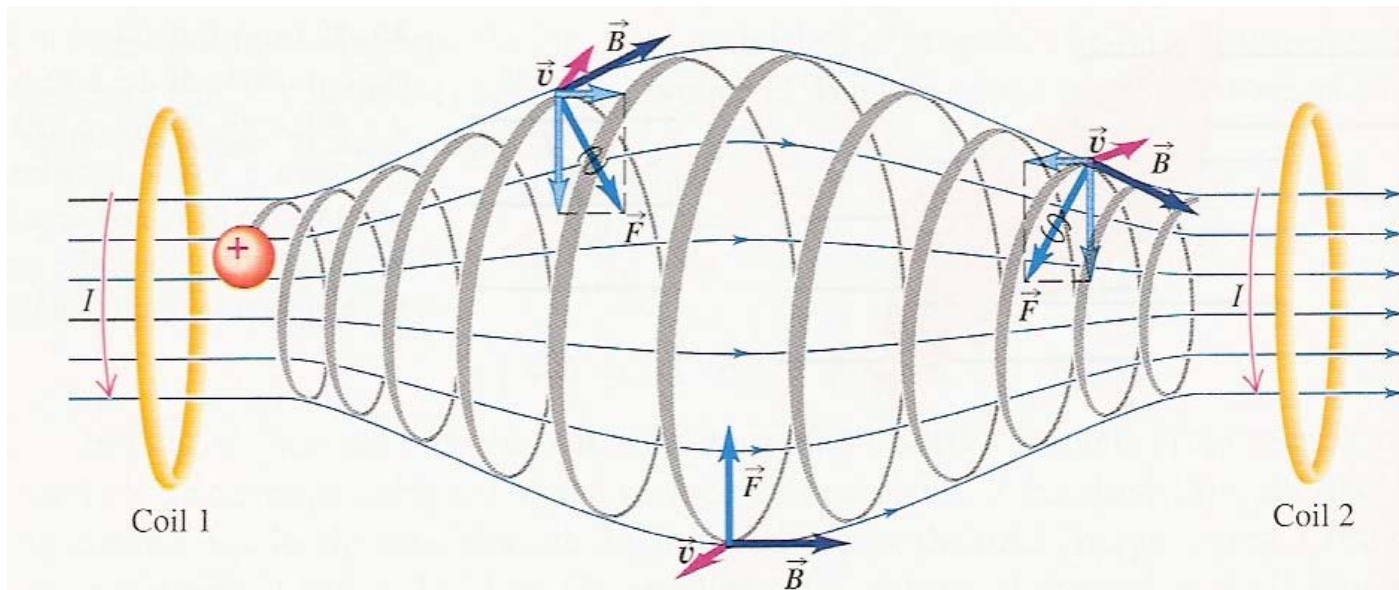




Garrafas magnéticas

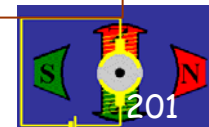
Reactores de fusão nuclear

(<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Nuclear-Engineering/22-012Spring-2006/CourseHome/index.htm>)

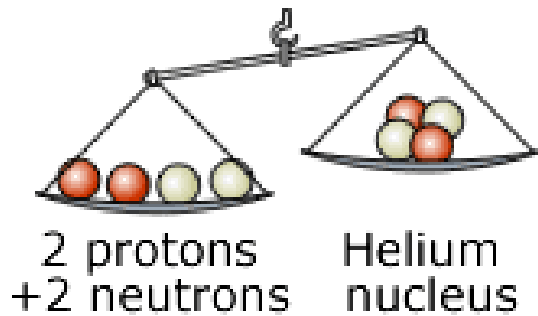
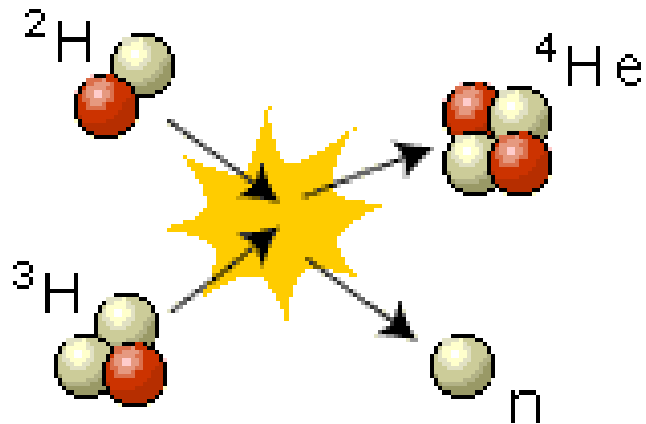


28-15 A magnetic bottle. Particles near either end of the region experience a magnetic force toward the center of the region. This is one way of containing an ionized gas that has a temperature of the order of 10^6 K, which would melt any material container.

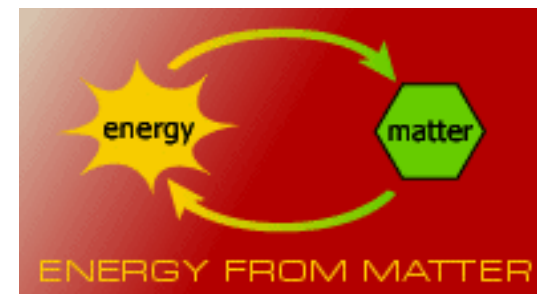
Ver *confinamento* de plasmas, reactores nucleares de fusão (ITER - <http://www.iter.org/> -, etc.), e aceleradores de partículas (http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator).



Fusão nuclear



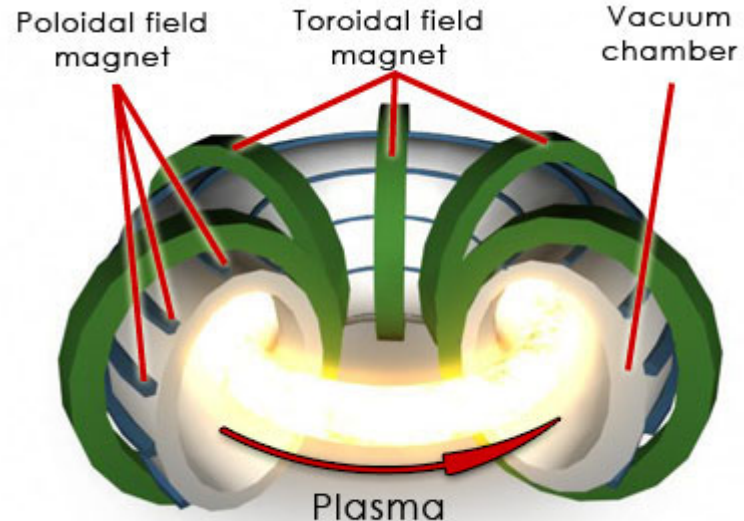
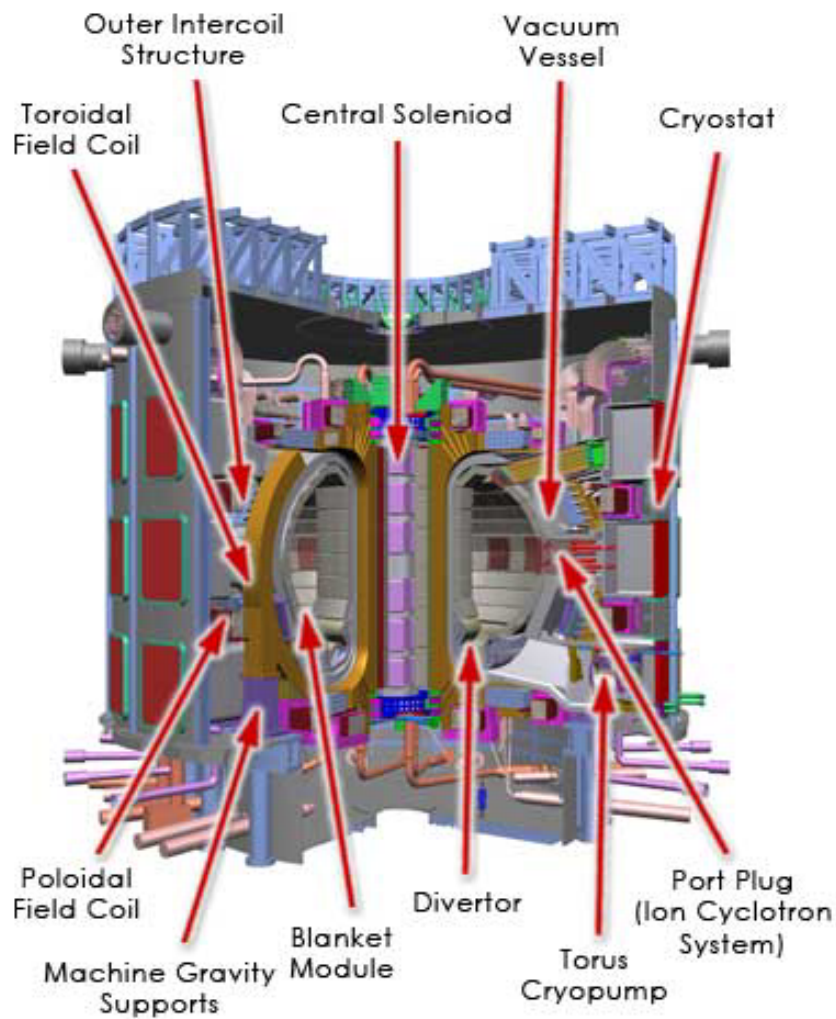
$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$



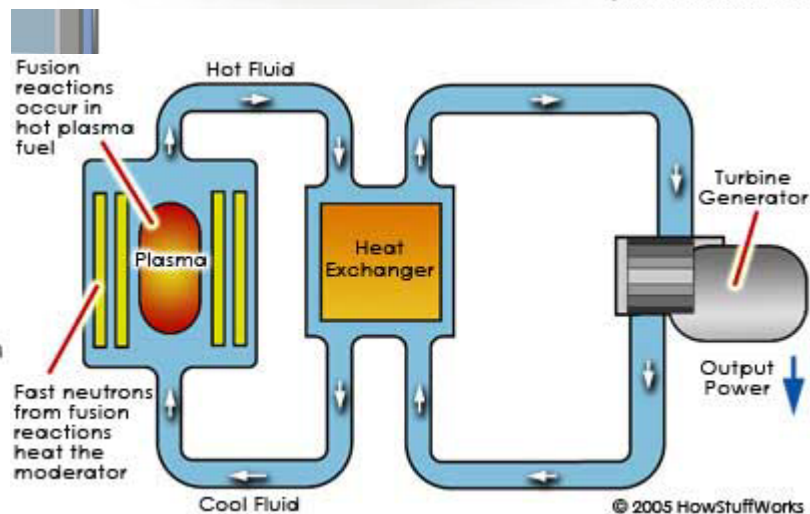
<http://www.wikipedia.org/>



A fusão nuclear por confinamento magnético

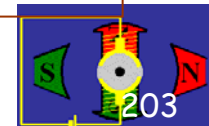


© 2005 HowStuffWorks



© 2005 HowStuffWorks

<http://www.iter.org/index.htm>

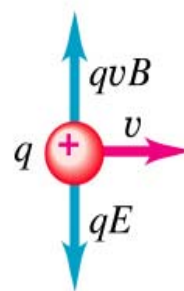
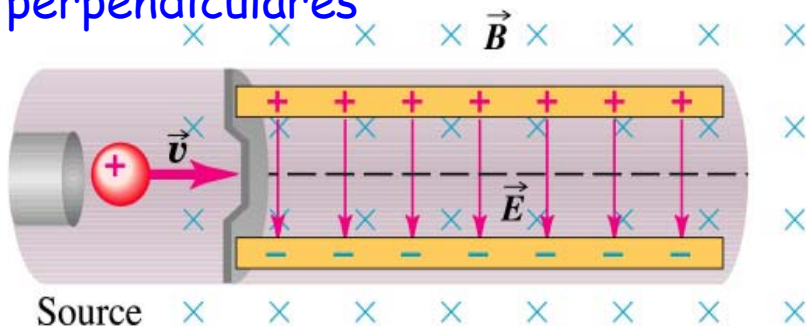




Aplicações do movimento de partículas carregadas

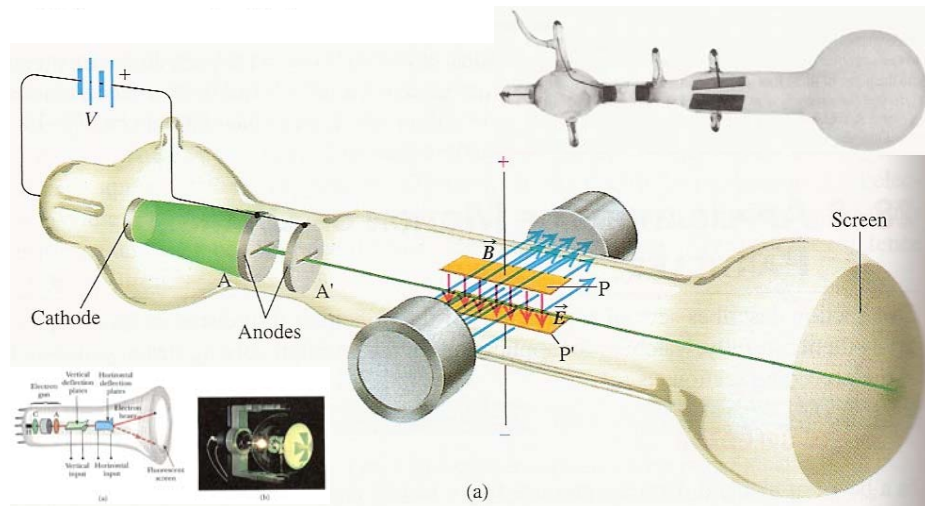
Selector de velocidades

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



$$qvB = qE$$
$$v = E/B$$

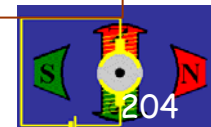
Experiência de Thomson para determinar a razão e/m



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

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 do movimento de partículas carregadas (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:

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

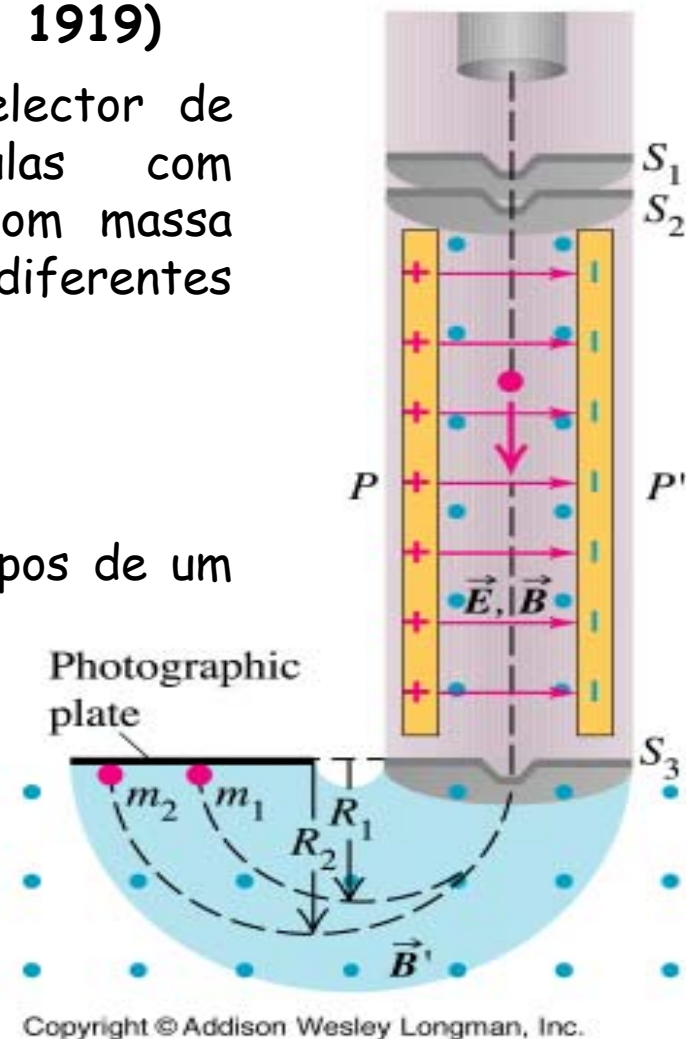
Desta forma é possível separar os isótopos de um mesmo elemento.

Ver, por exemplo:

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

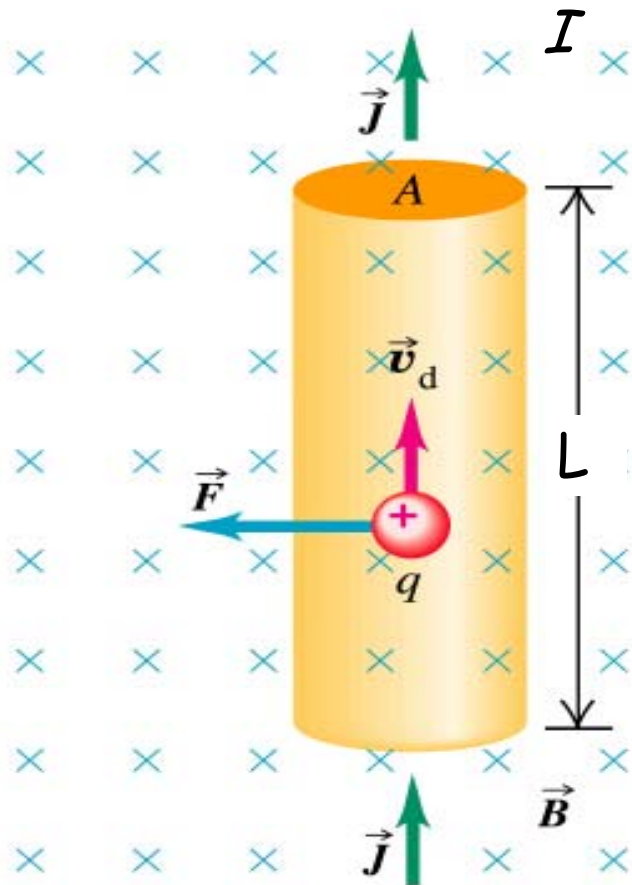
<http://en.wikipedia.org/wiki/Isotope>.

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





Forças magnéticas em condutores percorridos por correntes



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$I = JA = qn v_d A$$

Força magnética numa carga q positiva em movimento num condutor de corrente eléctrica na presença de um campo magnético:

$$\mathbf{F}_{m,q} = q \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$$

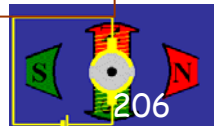
Força magnética nas cargas contida no volume AL de um condutor de corrente eléctrica na presença de um campo magnético:

$$\mathbf{F}_{m,\Sigma q} = nqAL \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$$

Força magnética numa porção dL de um condutor percorrido pela corrente I na presença de um campo magnético:

$$d\mathbf{F}_m = I d\mathbf{L} \times \mathbf{B}$$

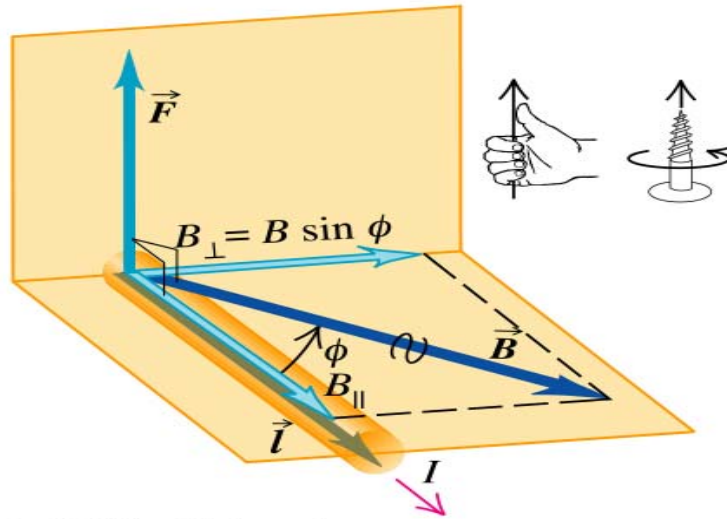
Força magnética numa porção L de um condutor percorrido pela corrente eléctrica I na presença de um campo magnético: $\mathbf{F}_m = I \mathbf{L} \times \mathbf{B}$





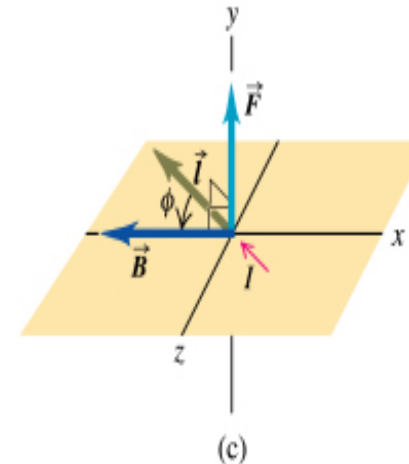
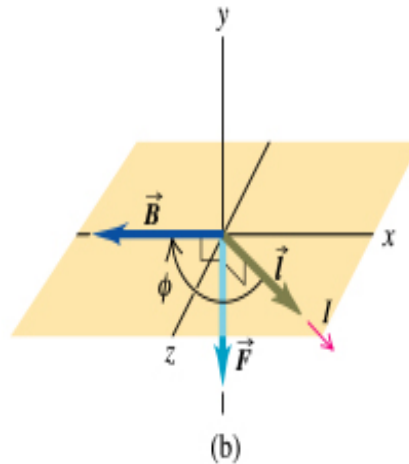
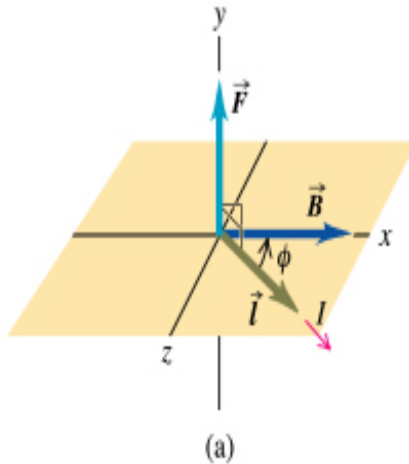
Regra da mão direita

Vectores do campo magnético B , do comprimento L , e da força F no caso de um fio condutor rectilíneo:



$$\vec{F}_m = I \vec{L} \times \vec{B}$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

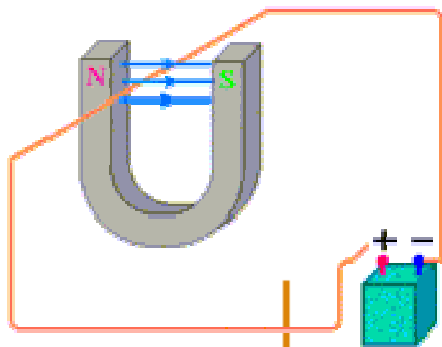


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



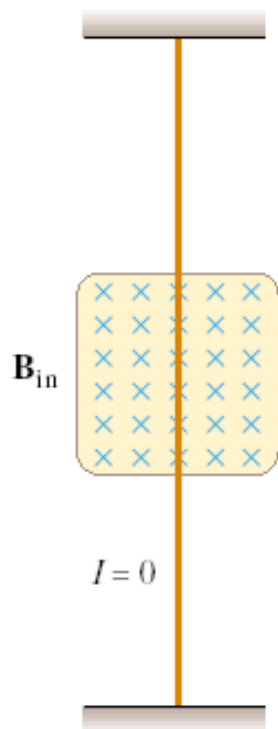


Forças magnética num condutor percorrido por uma corrente I



(a)

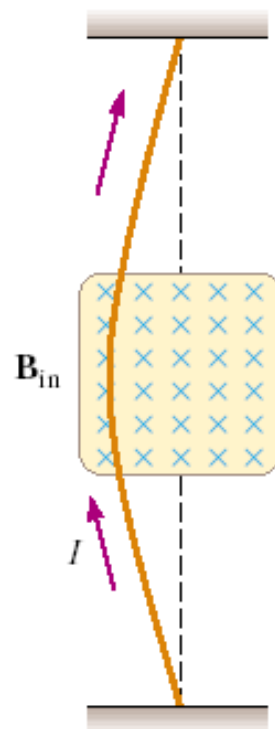
$$F_m = I L \times B$$



B_{in}

$I = 0$

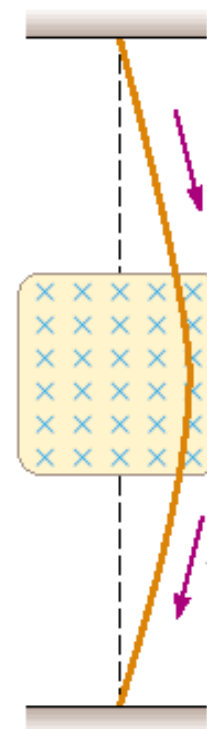
(b)



B_{in}

I

(c)



B_{in}

I

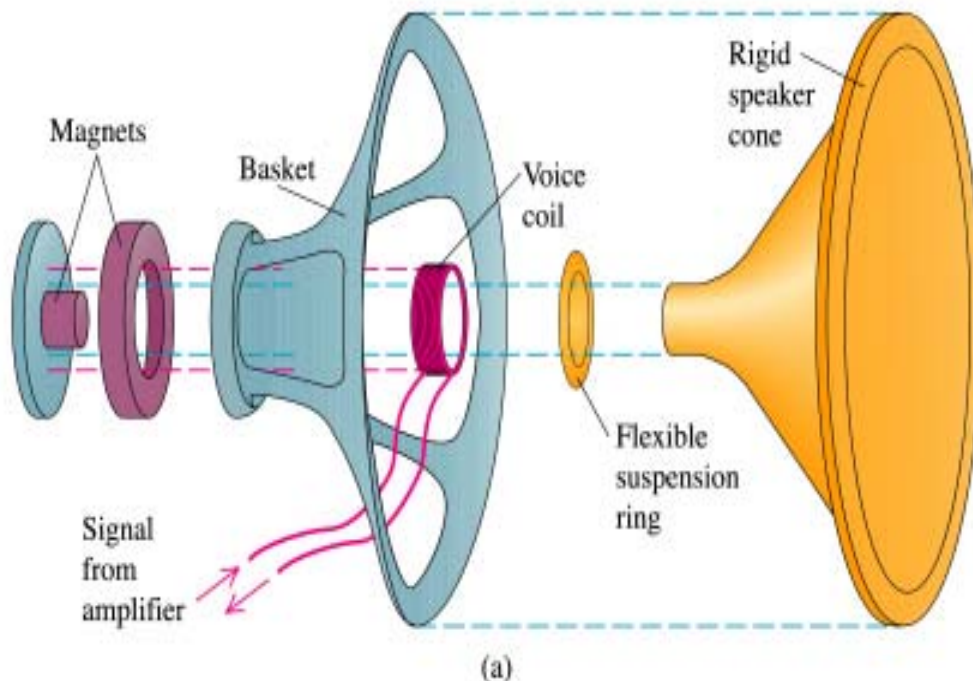
(d)





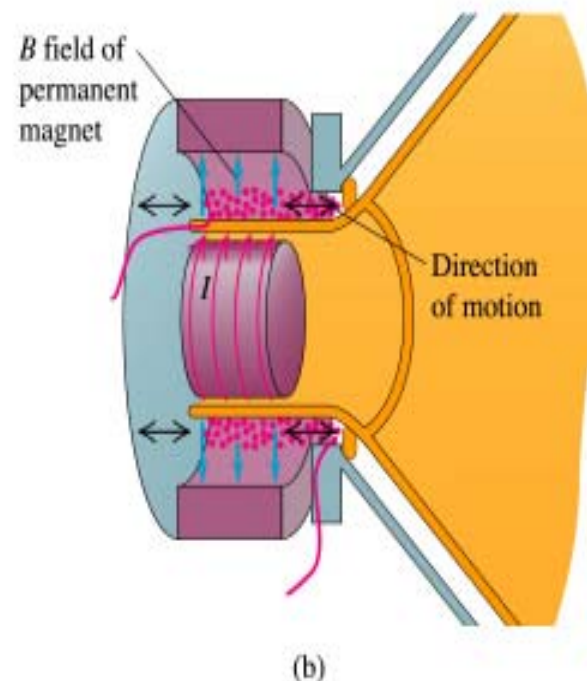
Aplicação: altifalante

Componentes de um altifalante



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$F = I L \times B$$



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/speaker-working.swf>





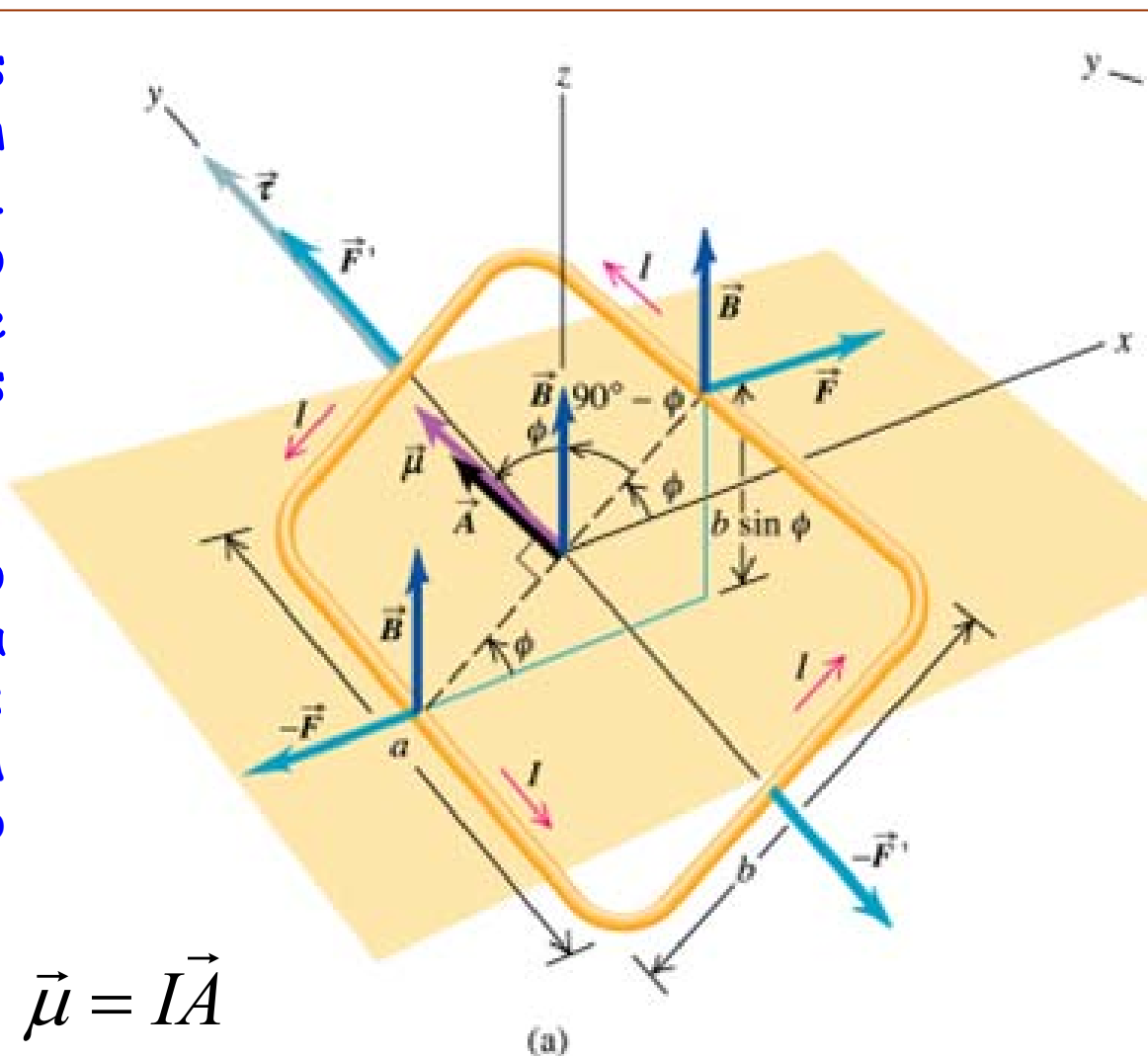
Forças e momento numa espira de corrente

A resultante das forças que actuam numa espira é nula. Contudo, o momento das forças que actuam nos ramos da espira não é nulo.

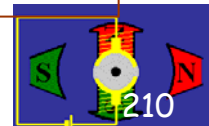
Define-se momento das forças na espira de corrente como: $\tau = \mu \times B$, onde $\mu = IA$ representa o momento magnético da espira

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

$$\vec{\mu} = I\vec{A}$$



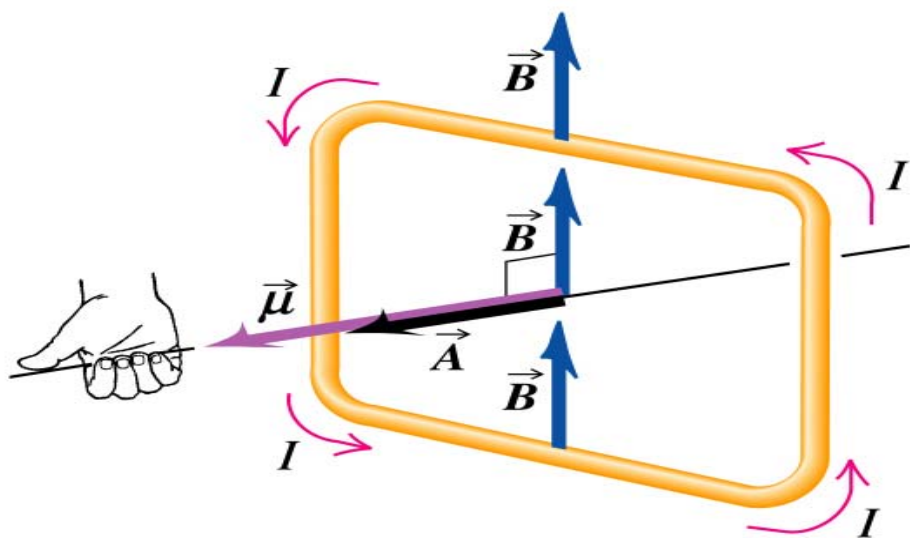
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Momento magnético de uma espira

A fonte mais simples de campo magnético é o chamado *dipolo magnético*. O seu protótipo é um anel de corrente. Se uma corrente I circula em torno de uma área A o (vector) momento magnético associado é $\vec{\mu} = IA$, em que A é um vector de módulo igual à área A , orientado perpendicularmente à superfície com o sentido dado pela regra da mão direita em relação à corrente.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$\vec{\mu} = I\vec{A}$$

Momento das forças de um dipolo magnético num campo magnético:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

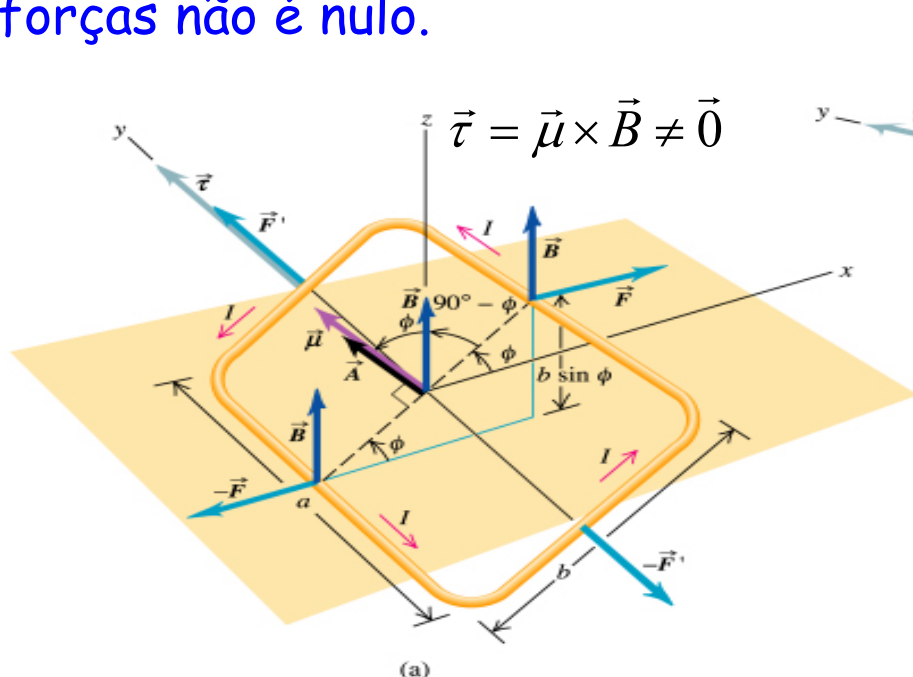
Energia de um dipolo magnético num campo magnético: $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$



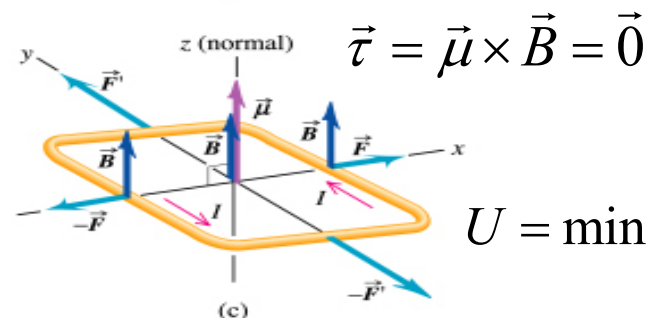
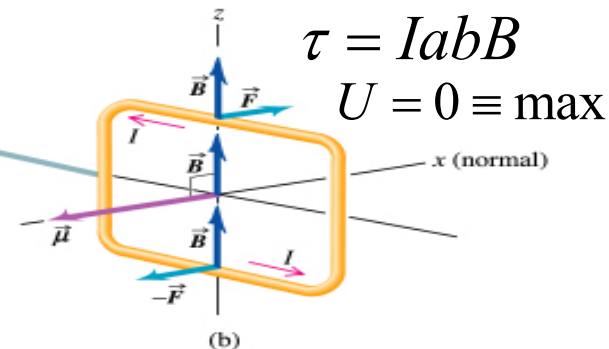


Momento de forças numa espira de corrente

A resultante das forças que actuam nos lados da espira de corrente num campo uniforme é nula. Contudo, o momento das forças não é nulo.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Momento magnético ou momento dipolar magnético: $\mu = IA$

Momento de força num laço de corrente: $\tau = \mu \times B$

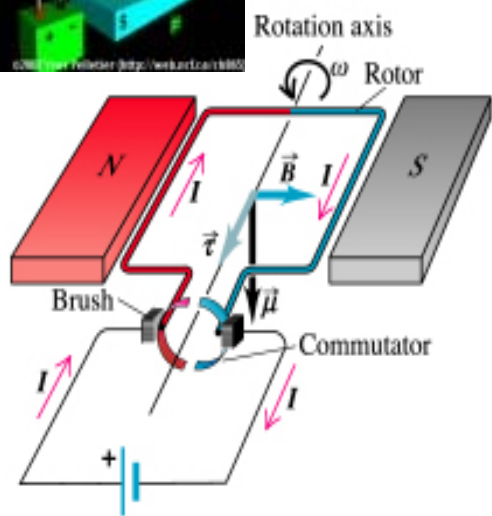
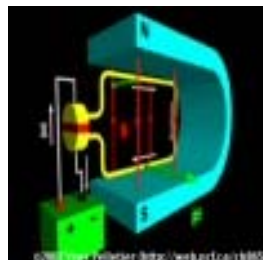
Energia potencial de um momento magnético: $U = -\mu \cdot B$



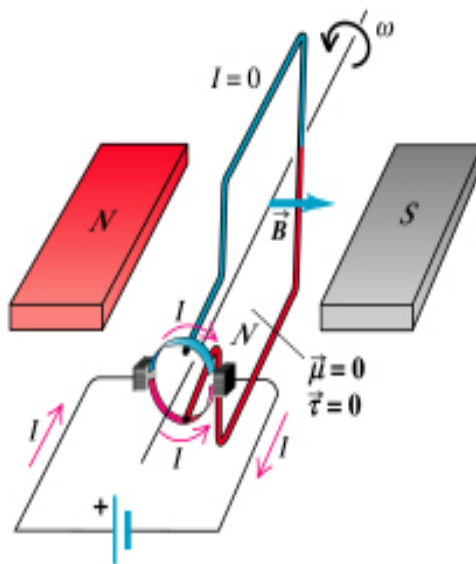


Aplicação: motor de corrente contínua

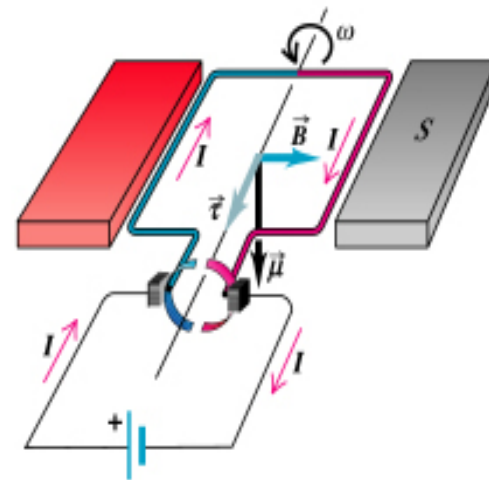
Num motor, o momento da força magnética actua num condutor percorrido por uma corrente e a energia eléctrica é convertida em energia mecânica.



(a)



(b)



(c)

$$\vec{\mu} = I\vec{A}$$

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

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

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

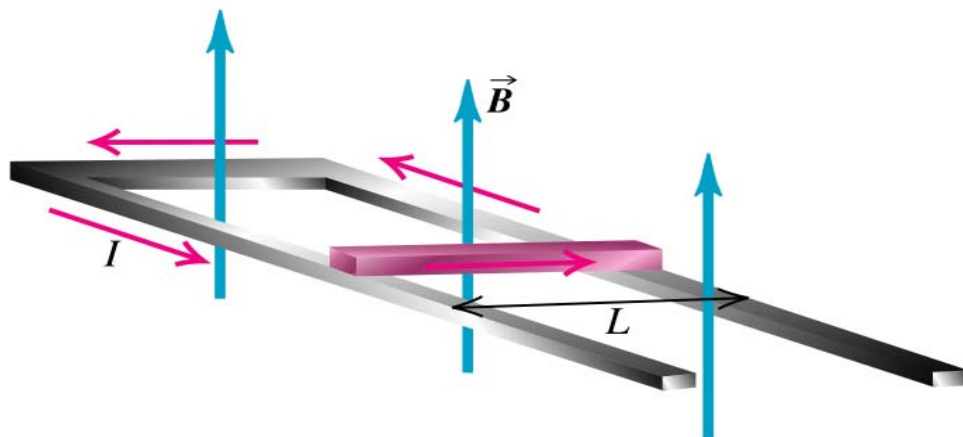
$$P = V_{ab}I$$





Aplicação: pistola electromagnética

Uma barra condutora de massa m e comprimento L desliza sobre uns carris condutores ligados a uma fonte de fem (fonte de tensão). A fonte de tensão mantém uma corrente constante I nos carris e na barra. Se o sistema for colocado numa região onde existe um campo magnético uniforme determine: a) a magnitude e a direcção da força que actua na barra (ignore o atrito, a resistência do ar e a resistência eléctrica da barra); b) a distância que a barra deve percorrer para atingir a velocidade v .



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Tem sido sugerido que um sistema destes poderá ser usado para colocar objectos em orbita da Terra. Determine a distância que a barra teria de percorrer nos carris para atingir a velocidade de escape da Terra. Assuma $B=0.5$ T, $I= 2$ kA; $m=25$ kg; $L= 50$ cm.

$$d = \frac{(1.12 \times 10^4 \text{ m/s})^2 (25 \text{ kg})}{2(2000 \text{ A})(0.50 \text{ m})(0.50 \text{ T})} = 3.14 \times 10^6 \text{ m} = 3140 \text{ km}$$

<http://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun>; <http://en.wikipedia.org/wiki/Railgun>;

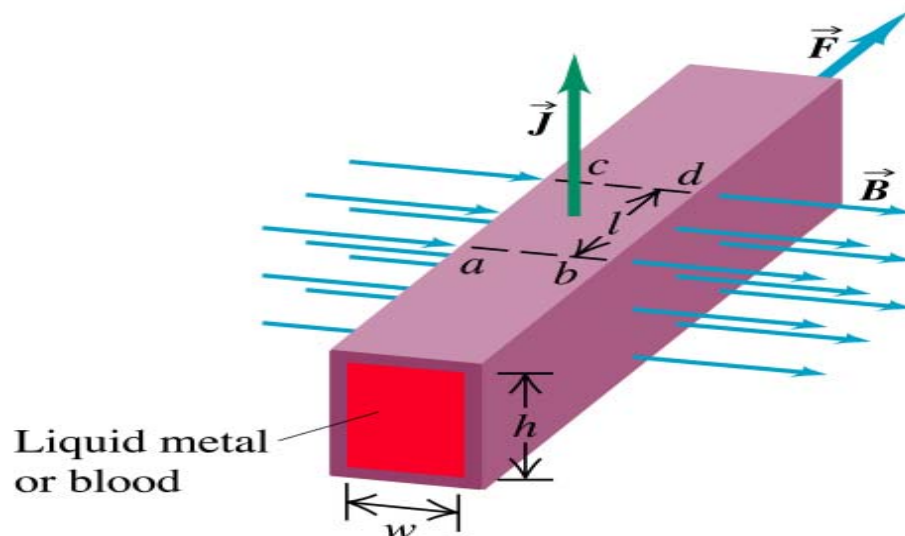
<http://www.powerlabs.org/railgun.htm>; <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?N=4294802535>;





Aplicação: Bomba electromagnética

É possível bombear fluidos condutores usando forças magnéticas. Este método pode ser usado para bombear sangue sem danificar as células (o que não acontece com o bombeamento mecânico). Um dado comprimento L de um tubo horizontal de secção recta (altura h e largura w) é colocado perpendicularmente a um campo magnético uniforme.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

O tubo é preenchido com um fluido condutor e uma densidade de corrente J é mantida na direcção do eixo do tubo. a) mostre que a diferença de pressão entre dois pontos dos planos verticais ab e cd é dada por $\Delta p = JLB$, se não se permitir que o líquido flua; b) qual o valor da densidade de corrente necessária para provocar uma diferença de pressão de 1 atm entre os dois pontos se $B = 2.2 \text{ T}$ e $L = 35 \text{ mm}$.

$$J = \frac{\Delta p}{lB} = \frac{(1.00 \text{ atm})(1.013 \times 10^5 \text{ Pa/atm})}{(0.0350 \text{ m})(2.20 \text{ T})} = 1.32 \times 10^6 \text{ A/m}^2.$$

$J = 1.36 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, so the current density calculated in part (c) is a typical value for circuits.

<http://www.patentstorm.us/patents/5685698-description.html>;





Momento de força num solenóide

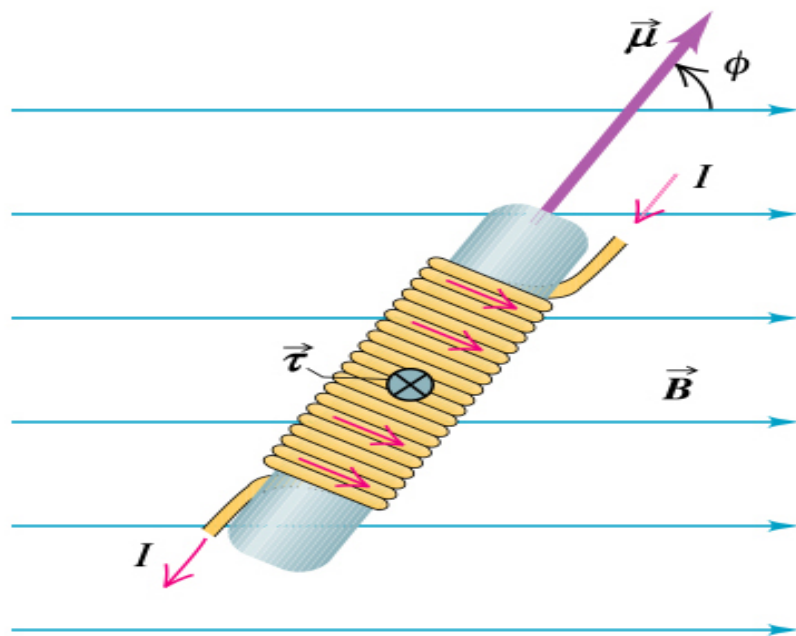
O torque (momento de força) ($\tau = \mu \times B$) no solenóide num campo magnético uniforme tem a direcção para dentro do quadro, fazendo rodar o solenóide no sentido dos ponteiros do relógio

$$\vec{\mu} = NI\vec{A}$$

$$\vec{\mu} = NI\vec{A}$$

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

$$\tau = NIAB \sin \phi$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Solenóide: s. m. (electr.) fio condutor de corrente eléctrica, enrolado em hélice, que se comporta como um íman quando percorrido por uma corrente eléctrica contínua. (Do gr. solenoeidés, «em forma de tubo»)

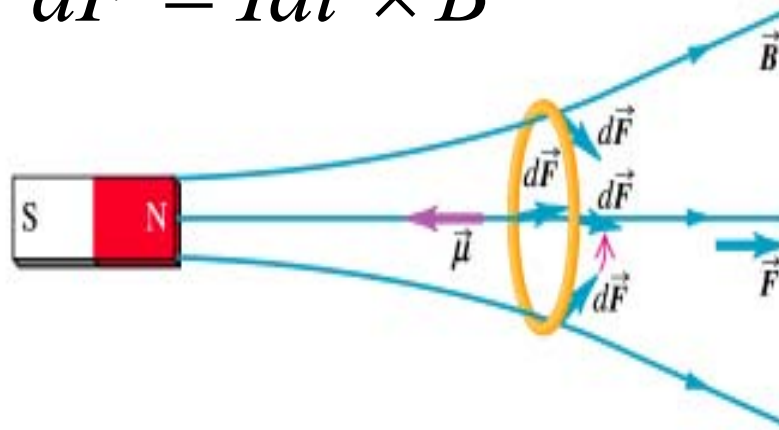




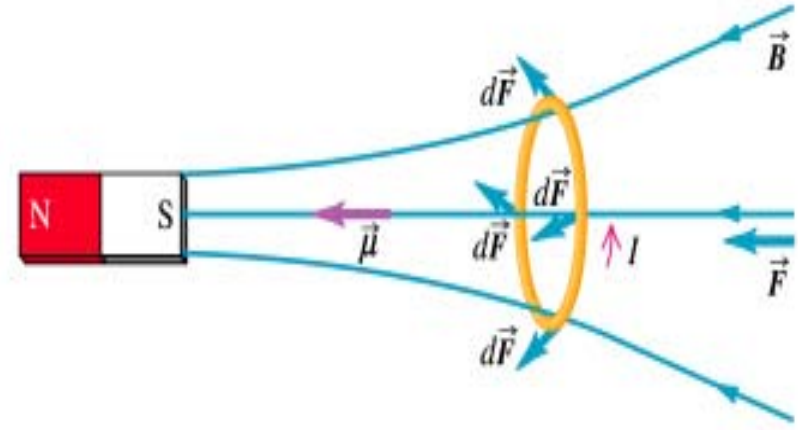
Dipolos magnéticos em campos B não uniformes

$$\vec{\mu} = I\vec{A}$$

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$



(a)



(b)

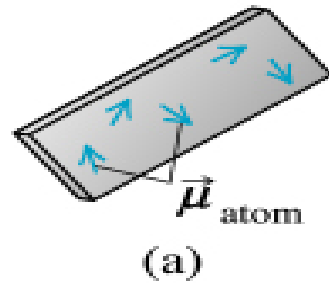
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

As espiras ("loops") de corrente eléctrica numa região onde existe um campo magnético não uniforme são atraída pelo íman.



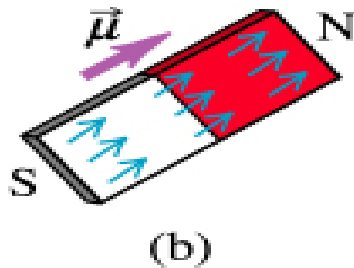


Dipolos magnéticos e materiais magnéticos

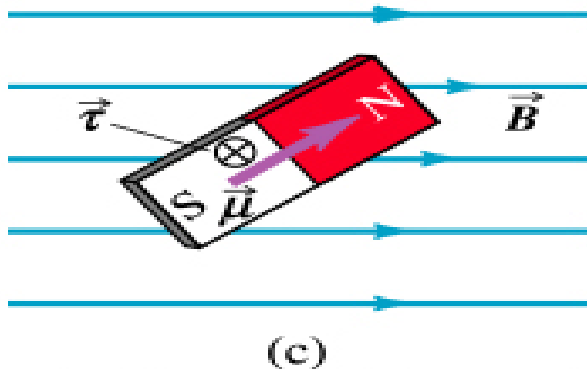


Momentos magnéticos atómicos numa barra de ferro:

(a) Não magnetizada

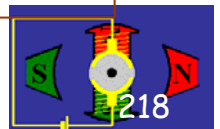


(b) Magnetizada



(c) Momento magnético de uma barra na presença de um campo magnético \vec{B}

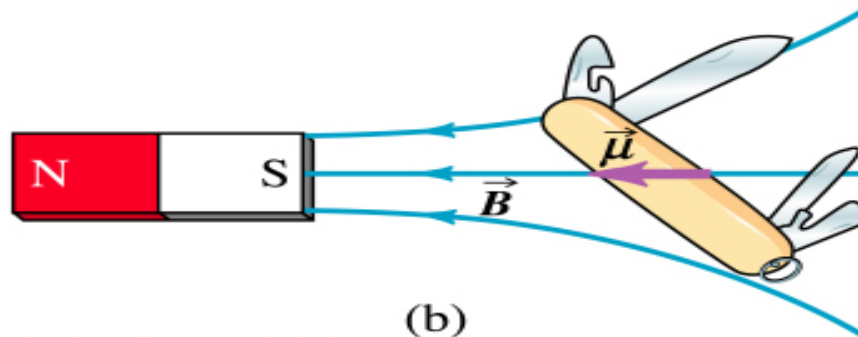
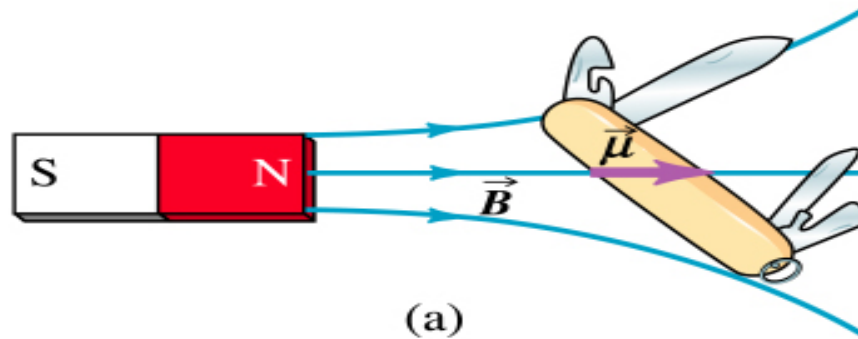
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





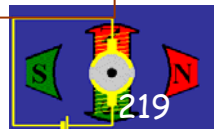
Dipolos magnéticos e materiais magnéticos (2)

Um magnete em barra atrai pedaços de ferro não magnetizado: o campo magnético \vec{B} cria um momento magnético $\vec{\mu}$ efectivo no material.



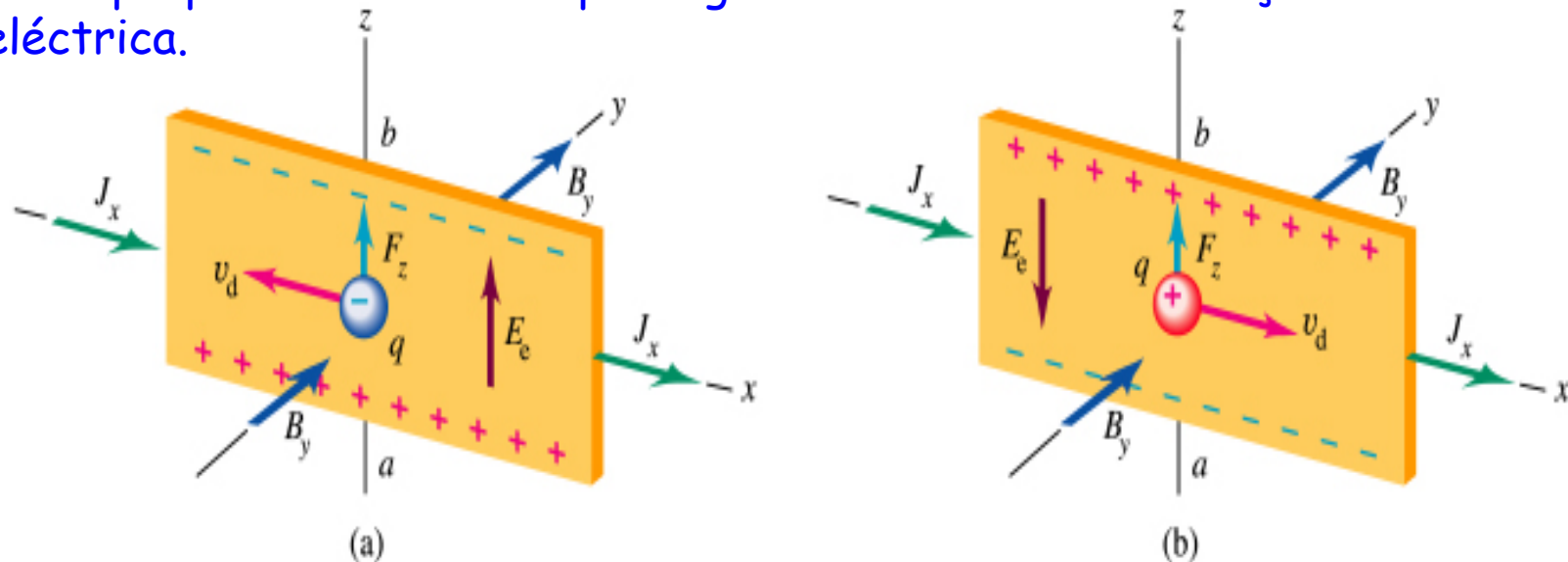
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Como o campo do magnete não é uniforme, o dipolo magnético é atraído pela barra.



Efeito de Hall

Efeito de Hall: forças que actuam nos portadores de carga de um material na presença de um campo magnético, perpendicularmente à velocidade da carga. Estas forças dão origem a um campo eléctrico transversal que se traduz numa diferença de potencial entre as extremidades da barra no plano perpendicular ao campo magnético contendo a direcção da corrente eléctrica.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$qv_d B_y + qE_z = 0 \rightarrow nq = -J_x B_y / E_z$$

Fazendo uma medição da diferença de potencial induzida (tensão de Hall ou fem de Hall) entre as faces do condutor perpendiculars ao campo magnético pode-se determinar se os portadores de carga têm carga positiva ou negativa.



Magnetostática

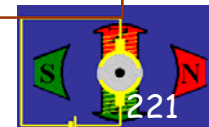
-

Fontes de campo magnético

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

Campo magnético: (fís.) área 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.»).





Fontes de campo magnético

• Até agora não nos preocupamos como os campos magnéticos são criados. Sabemos que os ímanes permanentes e as correntes em electroímanes (ímã temporário formado por um núcleo de ferro macio ou outro material ferromagnético adequado, em volta do qual se enrola uma bobina de fio que é percorrido por uma corrente eléctrica.)

Aprendemos que uma carga eléctrica cria um campo eléctrico e que um campo eléctrico exerce uma força numa carga eléctrica. Contudo, um campo magnético exerce forças apenas em cargas em movimento.

Será que apenas cargas em movimento criam campos magnéticos?





Campo magnético criado por uma carga em movimento

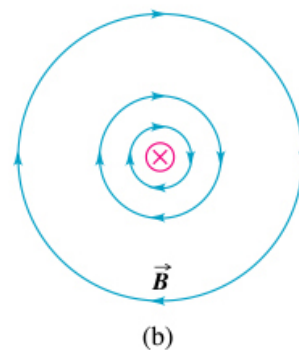
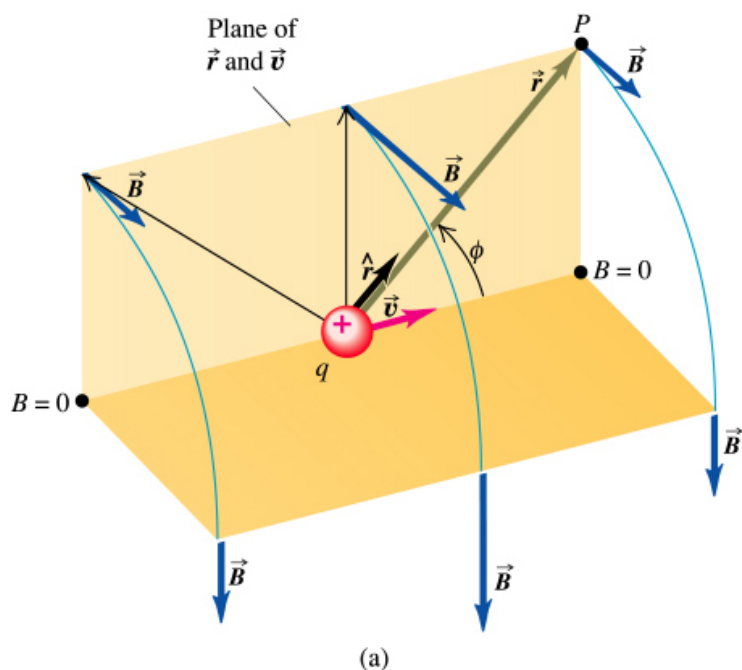
Vectores do campo magnético criado por uma partícula pontual portadora de carga q com **velocidade uniforme**. Em cada ponto, B é perpendicular ao plano contendo r e v . Na Fig. (b) representa-se a carga deslocando para dentro do quadro.

A experiência mostra que:

$$|\vec{B}| \propto |q|, \frac{1}{r^2}, \sin[\angle(\vec{v}, \vec{r})]$$

$$\vec{B} \propto \vec{v} \times \vec{r}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

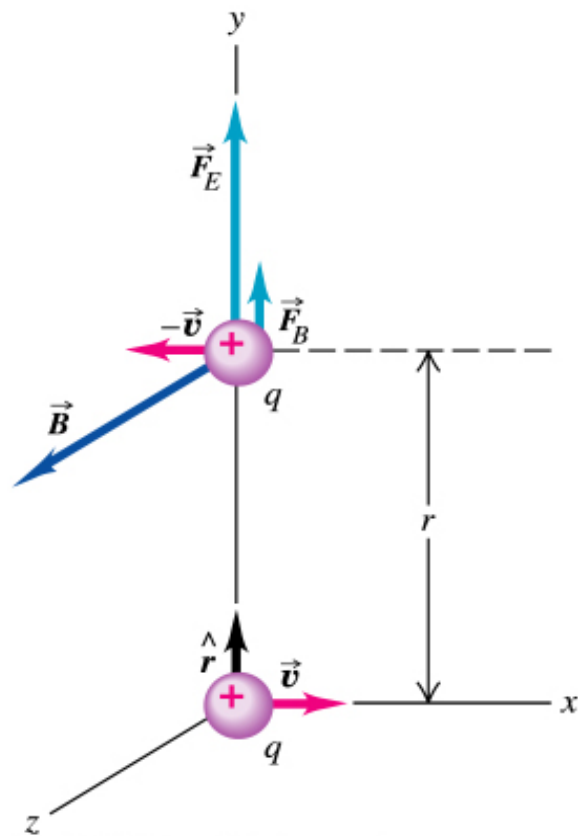
$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$





Força entre dois prótons em movimento

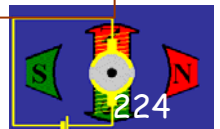
Se a carga q acelerar a expressão do campo será muito complicada. Em geral o efeito da aceleração de cargas um condutor pode ser desprezado. No sistema SI, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Forças eléctrica e magnética num par de prótons movendo-se numa região onde existem campo E e B .

Dois prótons movem-se paralelamente ao eixo x em direcções opostas, com a mesma velocidade v (\ll que a velocidade da luz c). No instante registado, determine as forças eléctrica e magnética no próton superior, e a razão entre as suas magnitudes.

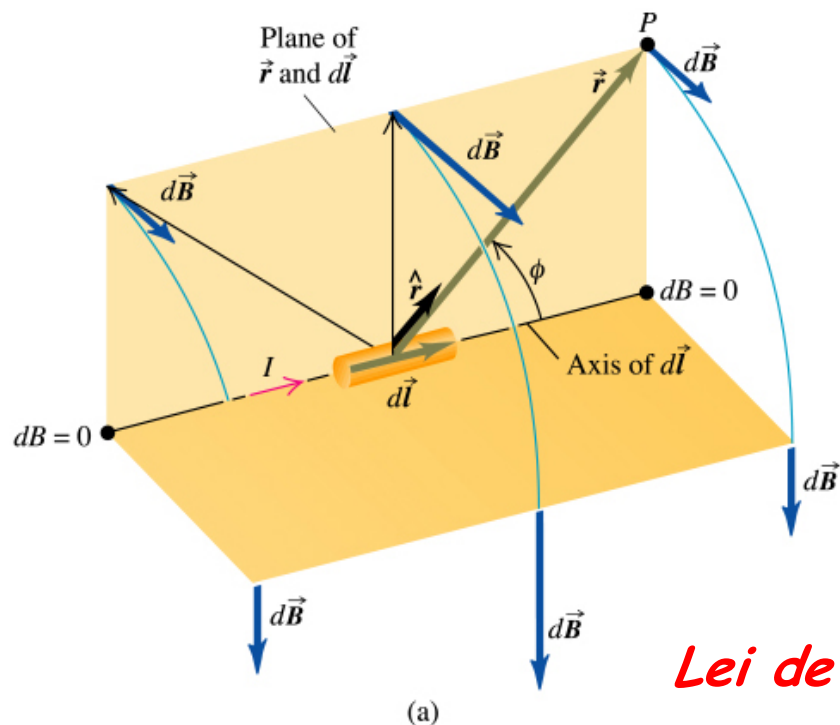




Campo magnético criado por um elemento de corrente

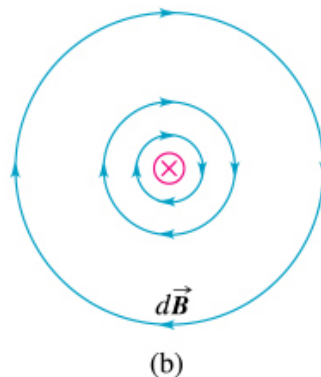
Campo magnético criado por um elemento de corrente dL (similar às linhas de campo devidas a uma carga $q+$ em movimento). Aqui também se aplica o princípio da sobreposição.

Na Fig. (b) a corrente dirige-se para o quadro.



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|dQ| v_d \sin[\angle(\vec{v}_d, \hat{r})]}{r^2}$$

$$dQ = nqAdl$$



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

Lei de Biot e Savart

$$dB = \mu_0 / 4\pi (I dL \times r) / r^3$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





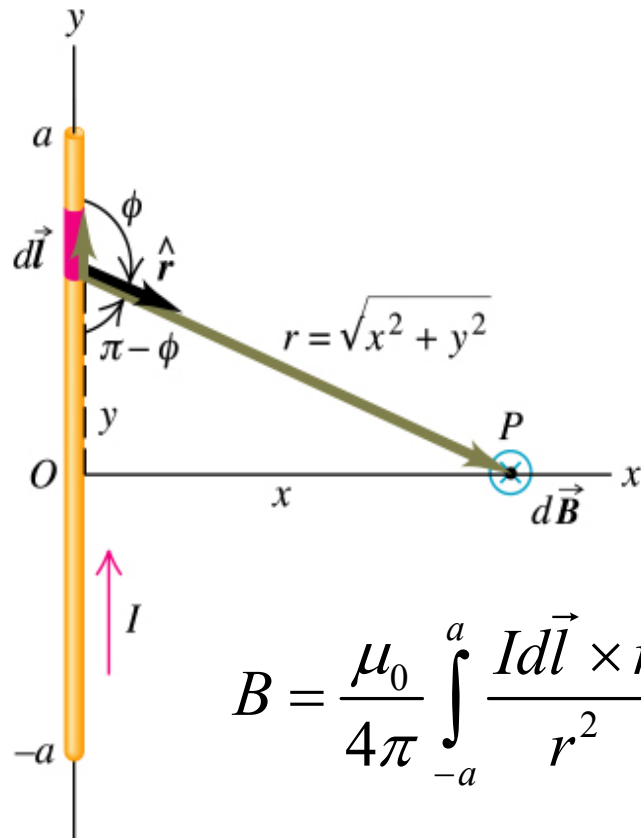
Campo magnético devido a um condutor rectilíneo

Campo magnético produzido por um condutor rectilíneo de comprimento $2a$. A direcção de B no ponto P aponta para dentro da página.

Lei de Biot e Savart

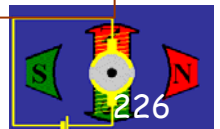
$$d\vec{B} = \mu_0 / 4\pi (I d\vec{L} \times \hat{r}) / r^3$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$



$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{x dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2a}{x\sqrt{x^2 + a^2}}$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

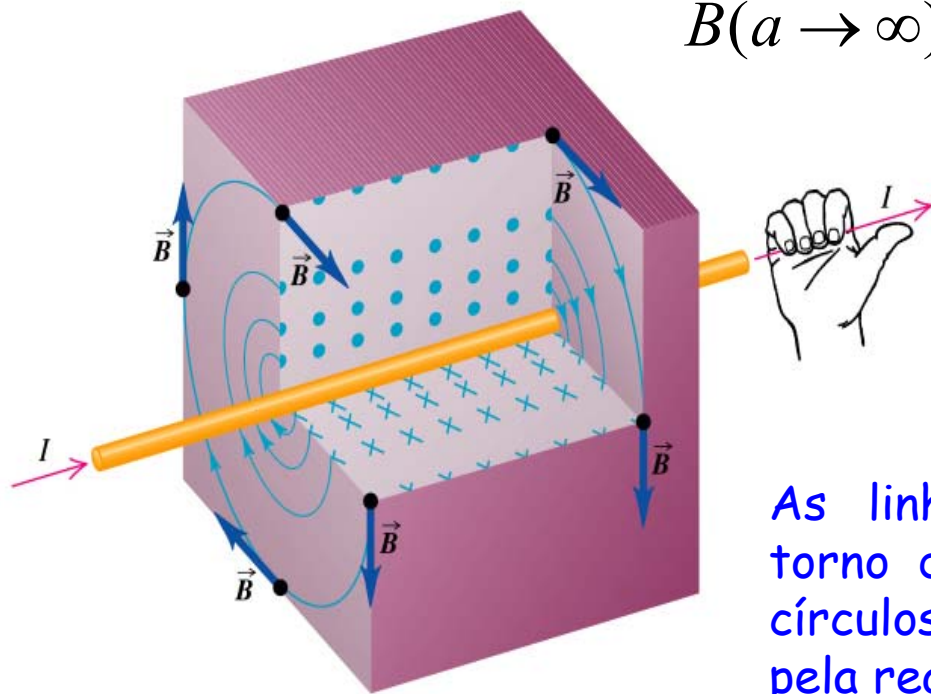




Campo magnético devido a um condutor rectilíneo (2)

Campo magnético produzido por um condutor rectilíneo de comprimento $2a \rightarrow \infty$ ($a \gg x$), pode-se considerar o fio como sendo infinito. A direcção de B no ponto P qualquer à distância r é tangente ao círculo centrado no fio de raio x e pertencente ao plano perpendicular ao fio.

$$B(a \rightarrow \infty) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2a}{x\sqrt{x^2 + a^2}} \rightarrow \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{x}$$



$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{r}$$

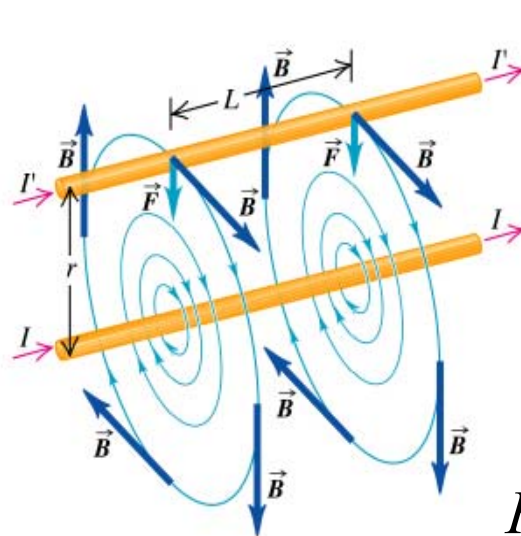
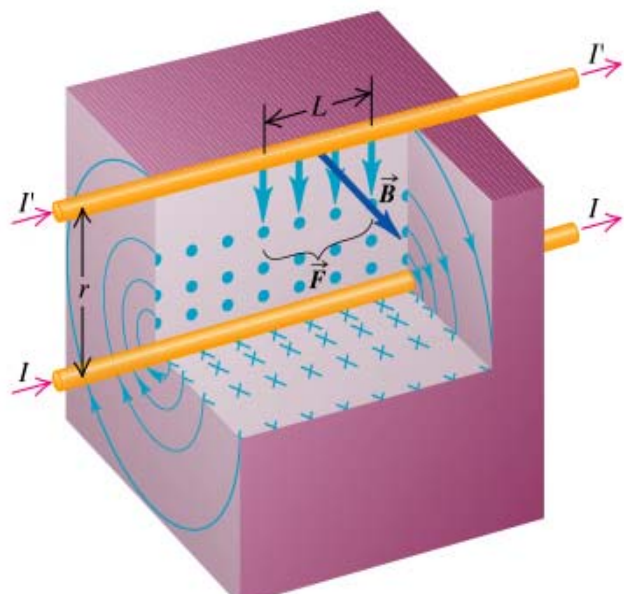
As linhas do campo magnético em torno de um fio longo rectilíneo são círculos, com a direcção determinada pela regra da mão direita.

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Força entre dois condutores paralelos



$$\vec{F} = I' \vec{L} \times \vec{B}$$

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$F = I' L B = \frac{\mu_0 I I' L}{2\pi r}$$

Força por unidade de comprimento: $\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi r}$

(Ver definição de ampere.)

Condutores paralelo percorridos por correntes na mesma direcção atraem-se mutuamente. A força no condutor de cima é exercida pelo campo magnético criado pela corrente que flui no condutor de baixo. (Ver definição de ampere.)

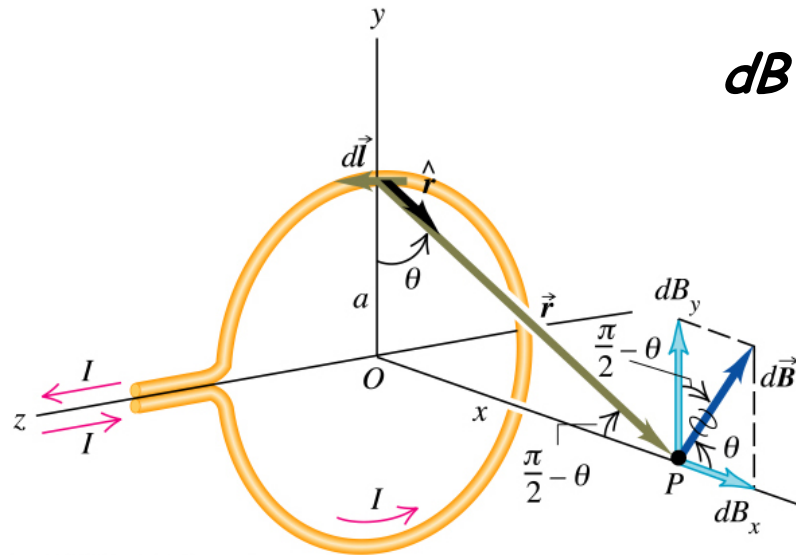
Demonstração (29-04-2008): $I=I'=200$ A, $r=5$ cm, $F/L=0,16$ N (o fio condutor é capaz de atrair um corpo com uma massa da ordem de 20 g).





Campo magnético criado por uma espira de corrente

A corrente no segmento dL cria um campo dB , orientado no plano xy . Usando a lei de Biot e Savart, obtém-se



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$d\mathbf{B} = \mu_0 / 4\pi (I d\mathbf{L} \times \mathbf{r}) / r^3$$

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)}$$

$$dB_x = dB \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)} \frac{a}{\sqrt{(x^2 + a^2)}}$$

$$dB_y = dB \sin \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)} \frac{a}{\sqrt{(x^2 + a^2)}}$$

A simetria rotacional permite concluir que o campo no ponto P apenas terá componente segundo x:

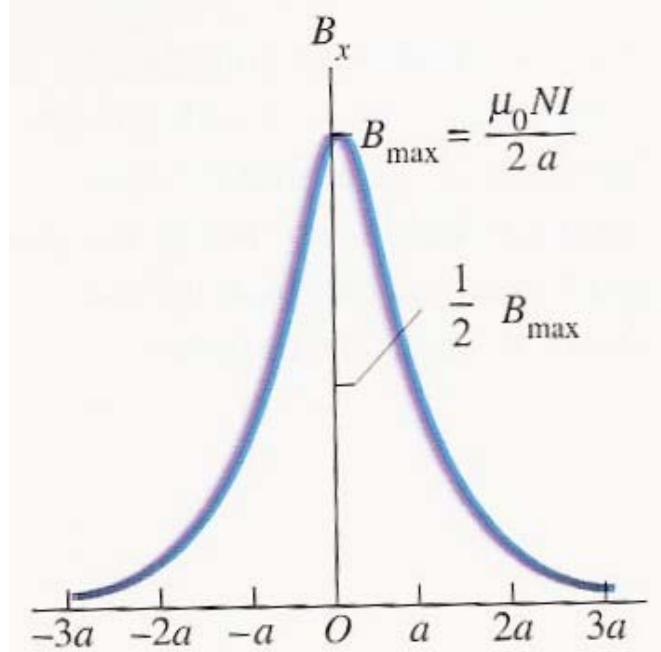
$$B_x = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a dl}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \int dl = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(x^2 + a^2)^{3/2}}$$



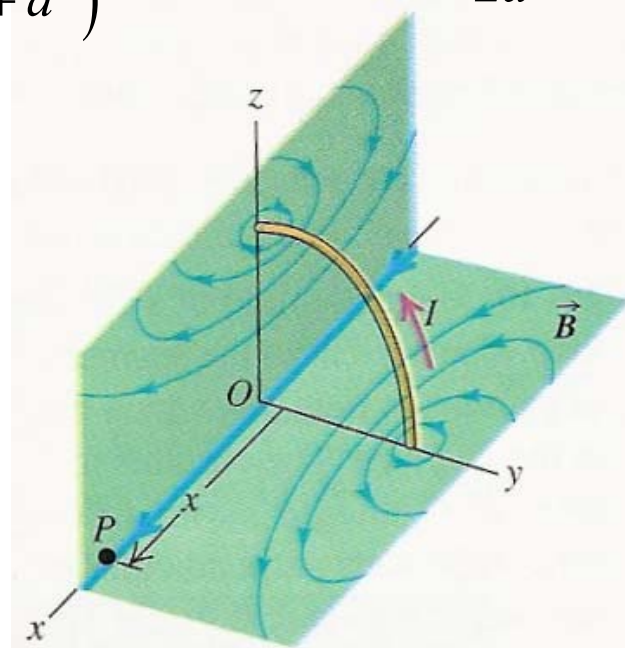


Campo magnético criado por N espiras de corrente

Se tivermos N espiras: $B_x = N \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}$; $B_{x,\max} = N \frac{\mu_0 I}{2a}$



29-11 Graph of the magnetic field along the axis of a circular coil with N turns. When x is much larger than a , the field magnitude decreases approximately as $1/x^3$.



29-12 Magnetic field lines produced by the current in a circular loop. At points on the axis the \vec{B} field has the same direction as the magnetic moment of the loop.





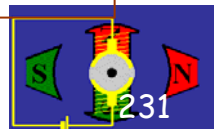
Lei de Ampere

A lei de Ampere afirma que o integral de B ao longo de qualquer percurso fechado é igual a μ_0 vezes a corrente confinada nesse percurso fechado, $I_{encircled}$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{encl}$$



Iremos usar a lei de Ampere para determinar o campo B usando percursos simples ao longo dos quais a magnitude do campo magnético é constante (ou independente de dl). Deste modo, após calcularmos o produto interno, podemos passar o factor $|B|$ para fora do sinal de integral, tornando o cálculo deste muito simples.

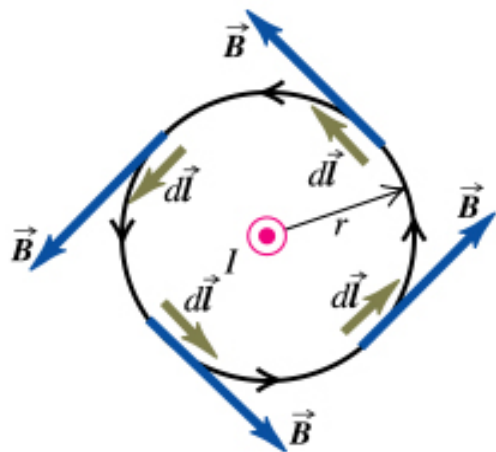




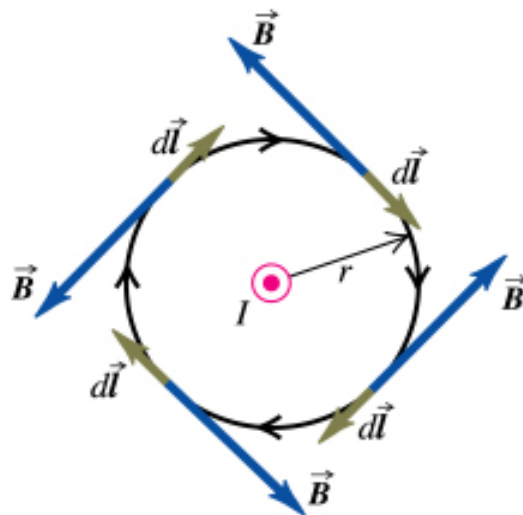
Lei de Ampere (2)

Alguns integrais de caminho para o campo \vec{B} na vizinhança de um fio condutor rectilíneo, usados na lei de Ampere.

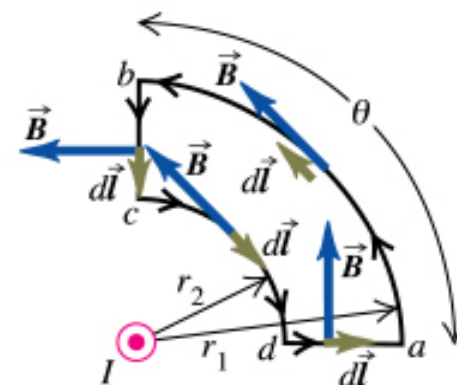
O caminho (c) não é útil porque não envolve a corrente que percorre o condutor.



(a)

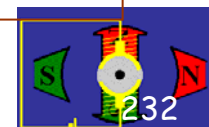


(b)



(c)

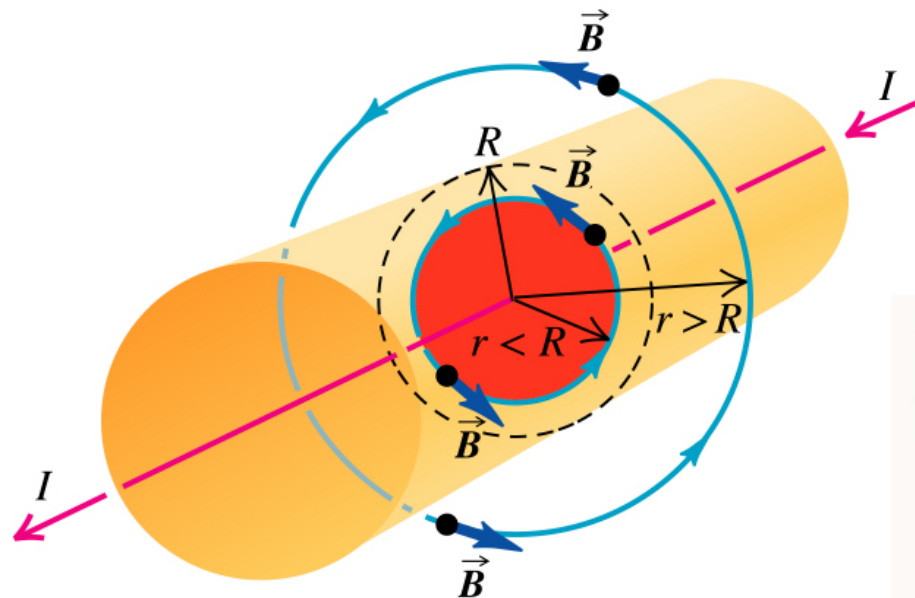
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Aplicações da lei de Ampere

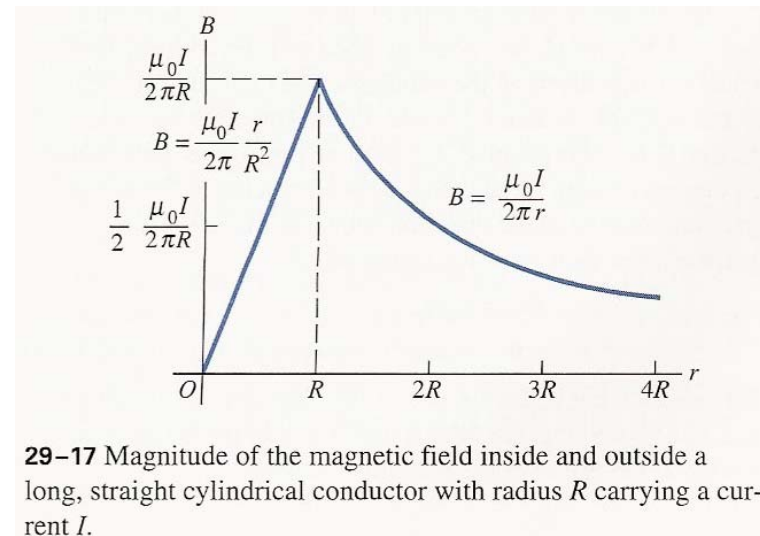
Para encontrar o campo magnético num ponto $r < R$, aplicamos a lei de Ampere usando como percurso um círculo que contém a área a vermelho. Para $r > R$, o círculo contém todo o condutor.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r \quad r < R$$

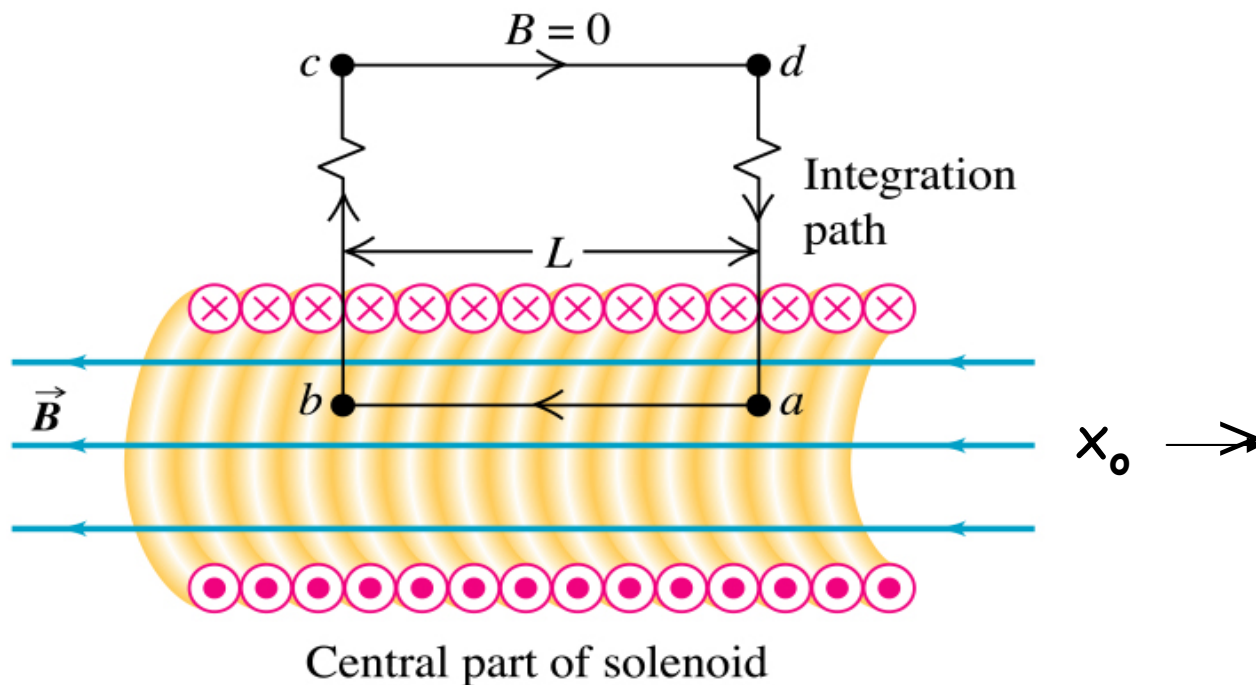
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad r > R$$





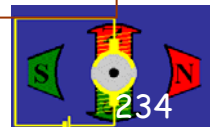
Aplicações da lei de Ampere: solenóide

A secção de um solenóide centrado no eixo x , mostrando as linhas de campo magnético no interior do solenóide e a corrente



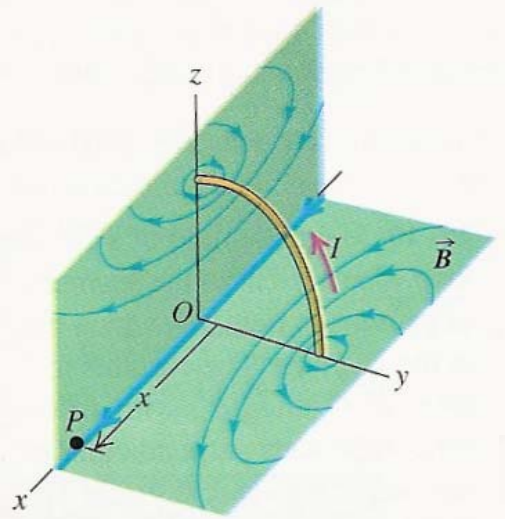
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$B = \mu_0 n I, \text{ com } n = N / L$$

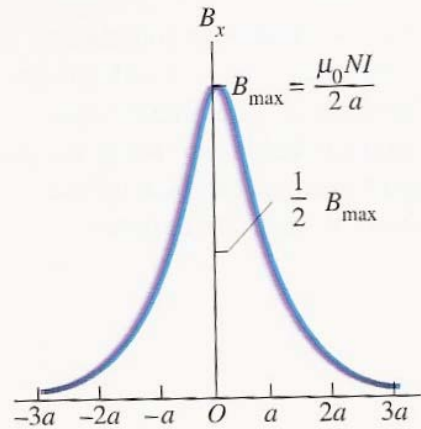




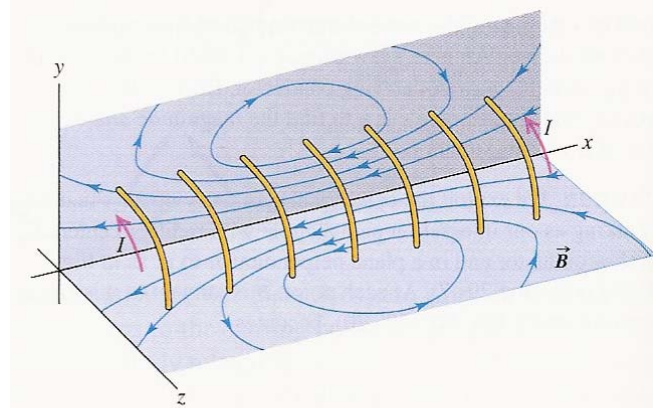
Aplicações da lei de Ampere: solenóide (2)



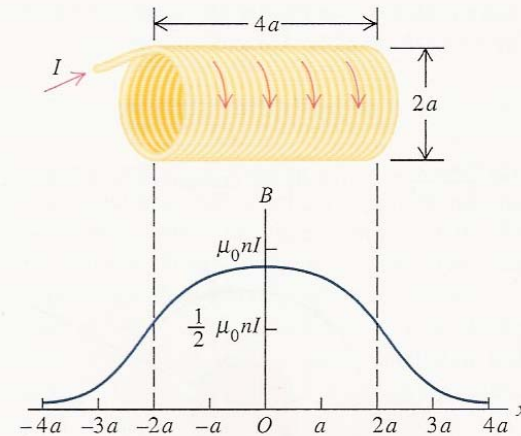
29-12 Magnetic field lines produced by the current in a circular loop. At points on the axis the \vec{B} field has the same direction as the magnetic moment of the loop.



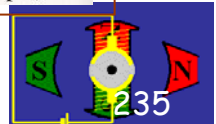
29-11 Graph of the magnetic field along the axis of a circular coil with N turns. When x is much larger than a , the field magnitude decreases approximately as $1/x^3$.



29-18 Magnetic field lines produced by the current in a solenoid. For clarity, only a few turns are shown.

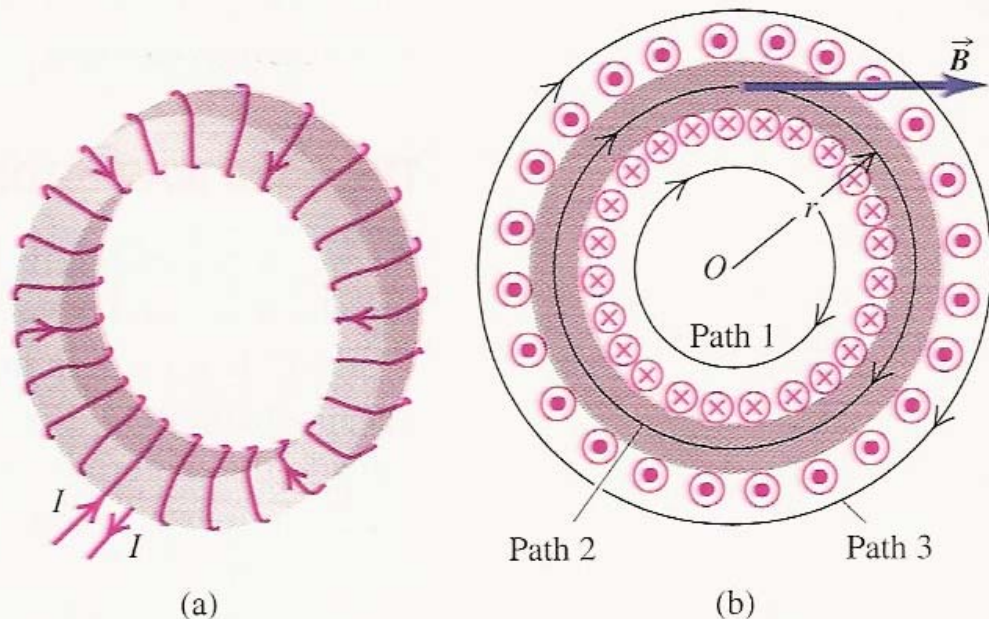


29-20 Magnitude of the magnetic field at points along the axis of a solenoid with length $4a$, equal to four times its radius a . The field magnitude at each end is about half its value at the center. (Compare with Fig. 29-11 for the field of N circular loops.)





Aplicações da lei de Ampere: solenóide toroidal



29–21 (a) A toroidal solenoid. For clarity, only a few turns of the winding are shown. (b) Integration paths (black circles) used to compute the magnetic field \vec{B} set up by a current in a toroidal solenoid. The field is very nearly zero at all points except those within the space enclosed by the windings.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{encl}$$

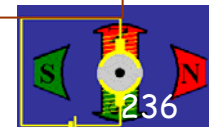
$$2\pi r B = \mu_0 N I$$

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}$$

$$n = N / 2\pi r \rightarrow$$

$$B = \mu_0 n I$$

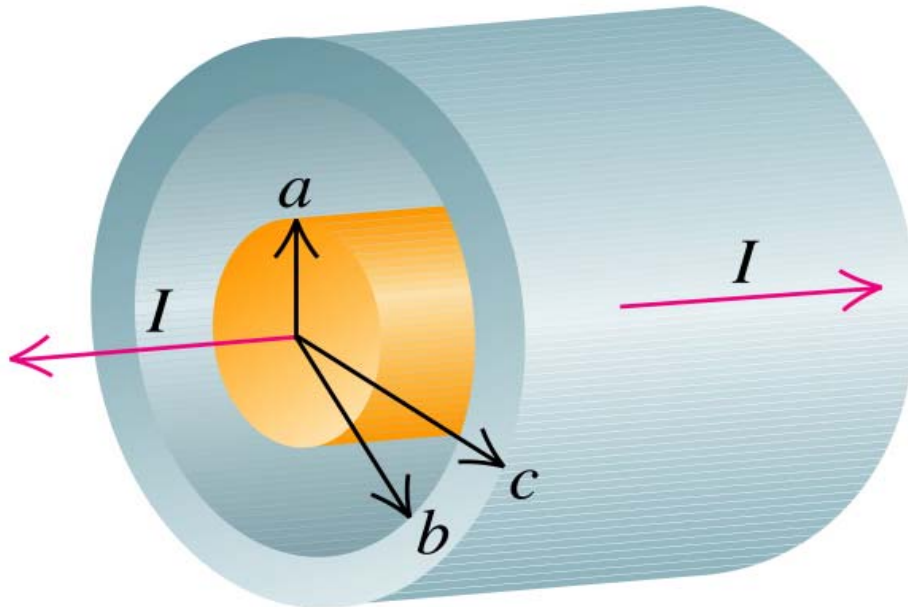
As principais configurações magnéticas usadas no confinamento de um plasma são as configurações toroidais conhecidas pelas designações de tokamak, stellarator e "reversed field pinch". (<http://www.cfn.ist.utl.pt/pt/consultorio/listB.html>)





Aplicações da lei de Ampere: cabo coaxial

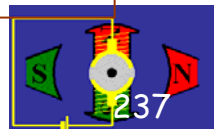
Cabo coaxial: forma especial de uma linha de transmissão de radiofrequência, que permite a transmissão simultânea de vários sinais eléctricos de um ponto para outro. É formado por um condutor sólido com raio a isolado de um condutor cilíndrico com raio interior b e raio exterior c .



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Determine a magnitude do campo magnético:

- no espaço entre o condutor central e o condutor cilíndrico exterior;
- no pontos exteriores ao condutor cilíndrico exterior.





Materiais magnéticos e magnetização

Quando se grava informação num disco duro do pc está-se a orientar um conjunto de magnetes permanentes microscópicos na disco. Do ponto de vista das propriedades magnéticas os materiais podem ser **paramagnéticos**, **diamagnéticos** ou **ferromagnéticos**.

Os átomos contêm electrões que no modelo clássico orbitam o núcleo. O movimento dos electrões é equivalente a correntes microscópicas que produzem campo magnéticos. Em muitos materiais estas correntes estão orientadas aleatoriamente e não causam campo magnético macroscópico. Contudo, em certos materiais, na presença de um campo magnético externo, estas espiras de corrente orientam-se numa direcção privilegiada, e, portanto, os campos por elas criados somam-se ao campo externo - diz-se que o material se encontra magnetizado. Cada electrão comporta-se como uma corrente $I=e/T=ev/2\pi r$. Onde r , v e T são o raio da órbita, a velocidade orbital e o período de revolução do electrão. O momento magnético é, portanto, $\mu=IA=evr/2=eL/2m$, onde L e m são o momento angular e a massa do electrão. Há átomos que apresentam momentos magnéticos da ordem de $\mu_B=(e/2m)(h/2\pi)$ - magnetão de Bohr ($9,274\times 10^{-24}$ Am²), $L=h/2\pi$. (Ignora-se o **spin** do electrão.) Define-se o vector **magnetização**, \mathbf{M} , como o momento magnético total por unidade de volume. O campo magnético adicional no interior do material é $\mathbf{B}=\mu_0\mathbf{M}$. O campo total é $\mathbf{B}=\mathbf{B}_{ext}+\mu_0\mathbf{M}$.





Permeabilidade magnética relativa e paramagnetismo

O campo magnético efectivo (campo externo + campo produzido pelos átomos) num material pode ser maior ou menor que o campo externo aplicado. Define-se **permeabilidade magnética relativa**, μ_r , de um material como a razão entre campo magnético no material e o campo magnético no vácuo.

Paramagnetismo; s. m. (fís.) propriedade que têm certas substâncias de possuir uma susceptibilidade magnética superior à do vazio ou uma **permeabilidade magnética relativa superior à unidade**, em consequência do que são atraídas para a região onde haja maior densidade de linhas de força num campo magnético não uniforme; complexo de fenómenos magnéticos exibidos por materiais formados de átomos ou moléculas que possuam momentos magnéticos permanentes. (De para- + magnetismo);

Paramagnético adj. (fís.) que manifesta paramagnetismo; diz-se de uma substância cuja susceptibilidade magnética é positiva e cuja **permeabilidade magnética relativa é, portanto, superior à unidade**; que se magnetiza como o ferro, mas muito mais fracamente. (De para- + magnético).

Diamagnetismo: s. m. (fís.) propriedade geral da matéria, devida à presença de electrões com spins emparelhados, que se caracteriza pelo facto de a substância ser repelida por um campo magnético não uniforme, embora essa propriedade possa não ser observada se a substância contiver centros de paramagnetismo. (De dia- + magnetismo);





Diamagnetismo, ferromagnetismo e histerese

Diamagnético adj. (fís.) designativo das substâncias cuja susceptibilidade magnética é negativa ou a permeabilidade magnética relativa é ligeiramente inferior a 1. (De dia- + magnético)

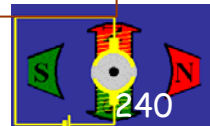
Ferromagnetismo: s. m. (fís.) propriedade de certas substâncias cristalinas (ferromagnéticas) capazes de serem magnetizadas por campos magnéticos muito fracos, apresentando permeabilidade magnética relativas muito superiores a 1. (De ferro- + magnetismo);

Ferromagnético (fís.) diz-se de metais (como ferro, níquel e cobalto), de compostos e de várias ligas metálicas que, além de se magnetizarem fortemente, têm uma susceptibilidade magnética decrescente quando a temperatura aumenta, mas apresentam uma temperatura de transição.

Ver, por curiosidade, <http://pt.wikipedia.org/wiki/Alnico>

Histerese: s. f. (fís.) fenómeno físico que consiste em os pares de valores correspondentes de duas grandezas, que são função uma da outra - campo magnético indutor e intensidade de magnetização, por ex. -, não se repetirem do mesmo modo quando variam no mesmo sentido ou em sentido contrário. (Do gr. hystéresis, «falta; penúria», pelo fr. hystérèse, «histerese»)

Ver, por exemplo, <http://pt.wikipedia.org/wiki/Histerese>;



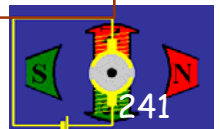


Indução electromagnética

•

Indução electromagnética

Indução electromagnética: (electr.) estabelecimento de uma força electromotriz num circuito, e, se o circuito é fechado, de uma corrente, causada por uma variação do fluxo de um campo magnético através do circuito; (Do lat. inductiōne-, «indução»)





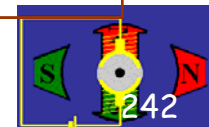
Indução electromagnética

• Como vimos, para que exista um fluxo de corrente terá que haver algures uma fonte de força electromotriz. Em muitos casos, a fonte de fem é uma bateria. Contudo, para a grande maioria dos equipamentos eléctricos e electrónicos a fonte de energia não é uma bateria, mas uma central eléctrica, podendo ser central hidroeléctrica, central termoeléctrica, central eólica, central nuclear, etc.

Estas centrais produzem energia eléctrica convertendo outras formas de energia: energia potencial gravítica; energia química, energia eólica, energia nuclear, etc.

Mas como ocorre esta conversão de energia. Isto é, qual é a física por detrás da produção da quase totalidade de energia eléctrica que usamos?

A resposta é: fenómeno da indução electromagnética.





Indução electromagnética (2)

Se o fluxo magnético através de um circuito varia, é induzida uma força electromotriz, o que dará origem a uma corrente no circuito.

Numa central de produção de energia eléctrica, ímãs permanentes movem-se relativamente a enrolamentos de fios condutores, produzindo um fluxo magnético variável no tempo e, portanto, uma fem nos fios.

Os transformadores ((electr.) aparelhos cujo objectivo é transferir energia eléctrica, em corrente alternada, de um circuito de baixa tensão para outro de alta tensão, ou vice-versa.) também depende de fem induzidas.

O princípio central da indução electromagnética (IE) é a lei de Faraday. Esta lei relaciona a fem induzida com a variação do fluxo magnético num percurso fechado qualquer, incluindo um circuito eléctrico ou electrónico.

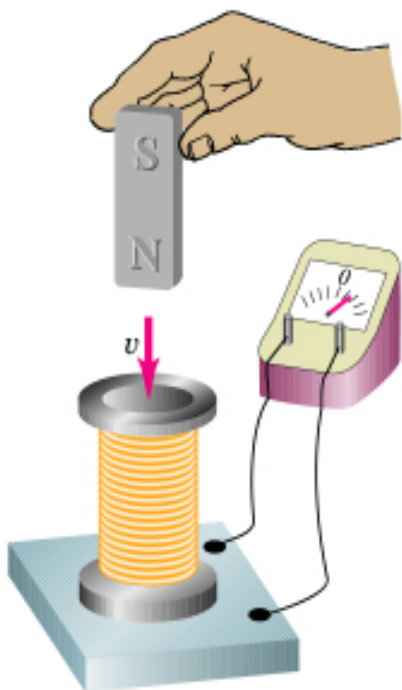
Quando a indução electromagnética foi descoberta, foi recebida como uma mera curiosidade de laboratório. Uma vez perguntaram a Faraday para que é que a IE poderia servir. Faraday respondeu: quem a usar vier usar ainda vai ter que pagar impostos. Actualmente, é a IE que faz mover a economia mundial (motores, geradores, transformadores, etc.).





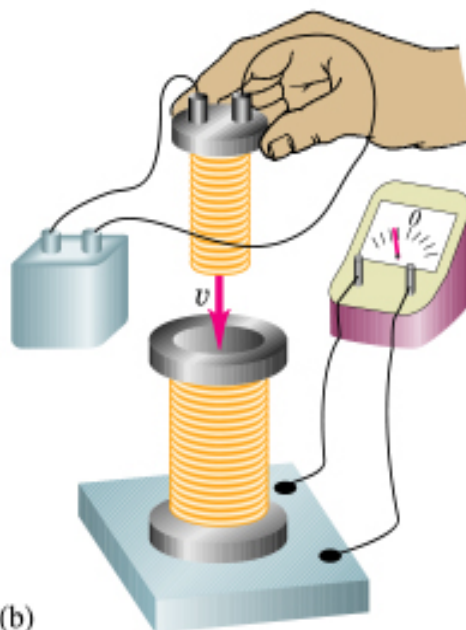
Experiências de indução

Corrente induzida numa bobine de fio condutor. (Bobina: (electr.) dispositivo usado em circuitos eléctricos, constituído por um enrolamento (geralmente cilíndrico) de fio condutor; ~ de indução: aparelho transformador da tensão de correntes eléctricas, formado por dois enrolamentos condutores, isolados, coaxiais e sobrepostos.)

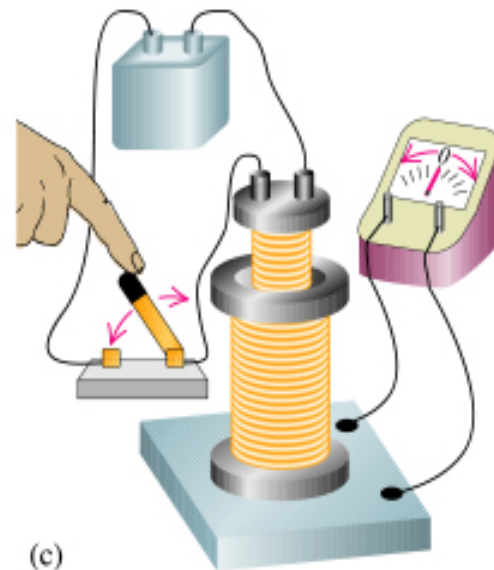


(a)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



(b)



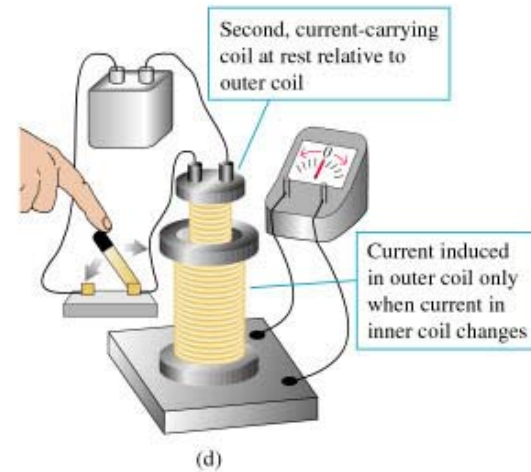
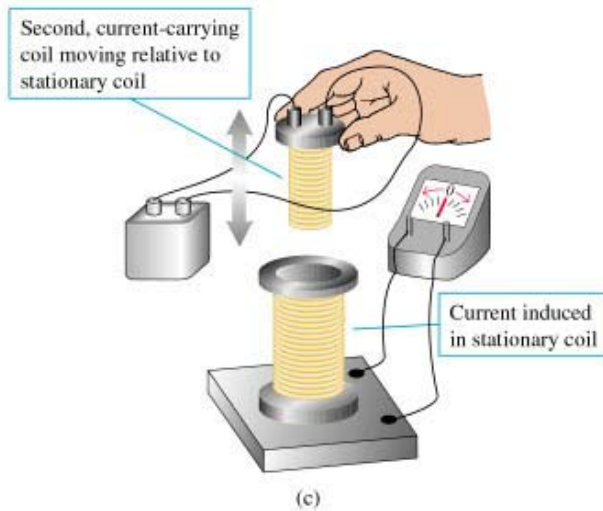
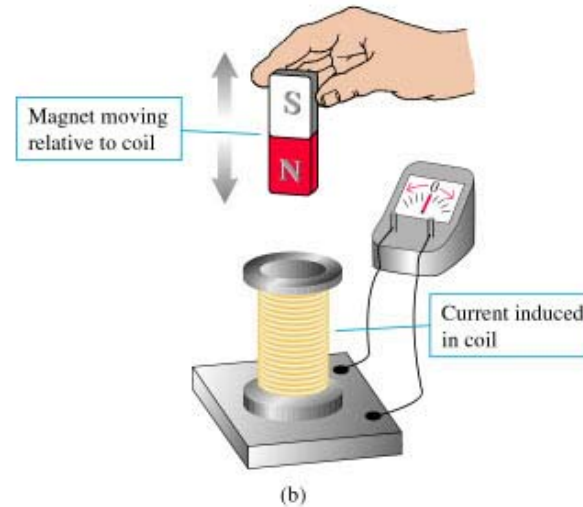
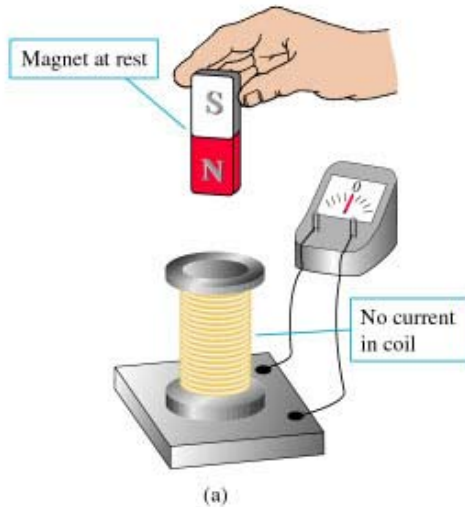
(c)

F1 F2 F3





Experiências de indução (2)

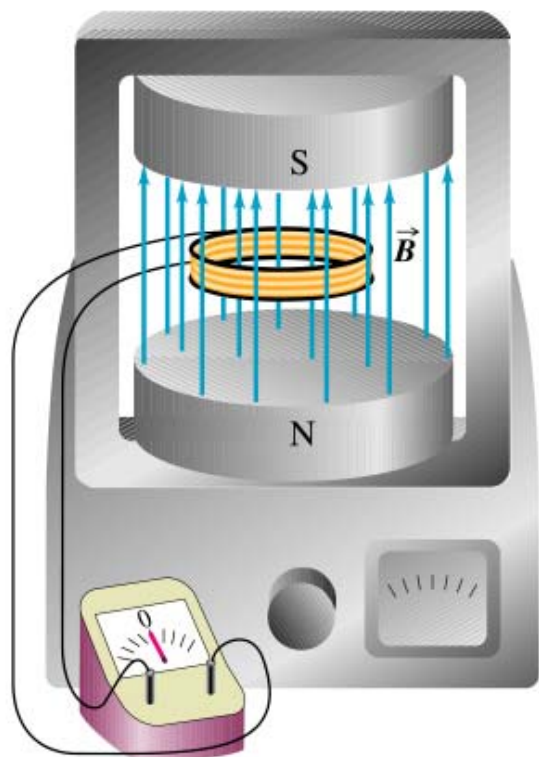


Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.





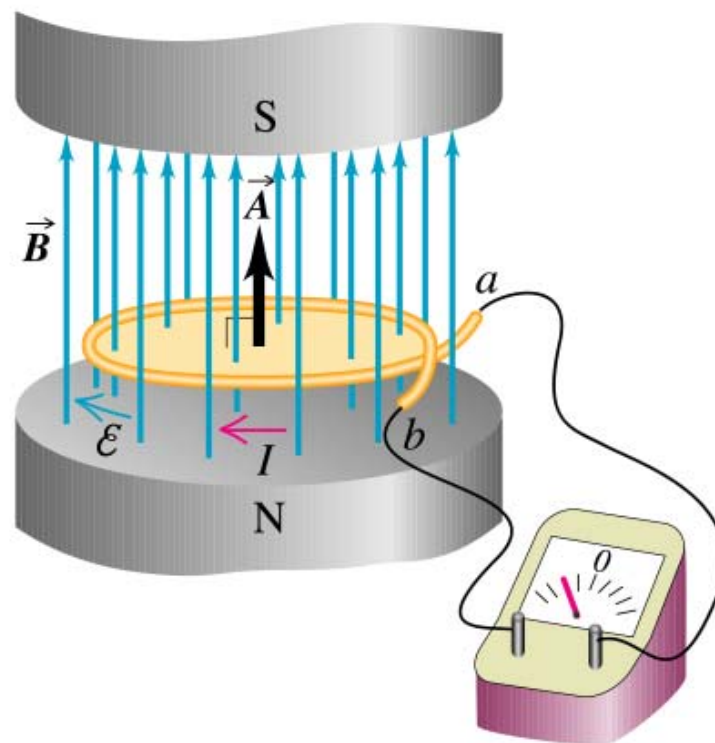
Experiências de indução (3)



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Se o campo magnético B não variar, e a forma, a posição e a orientação da bobine não se alterarem, a corrente induzida é zero.

Se, por exemplo, a magnitude do campo magnético B variar, é induzida uma fem e, portanto, uma corrente na espira do circuito.

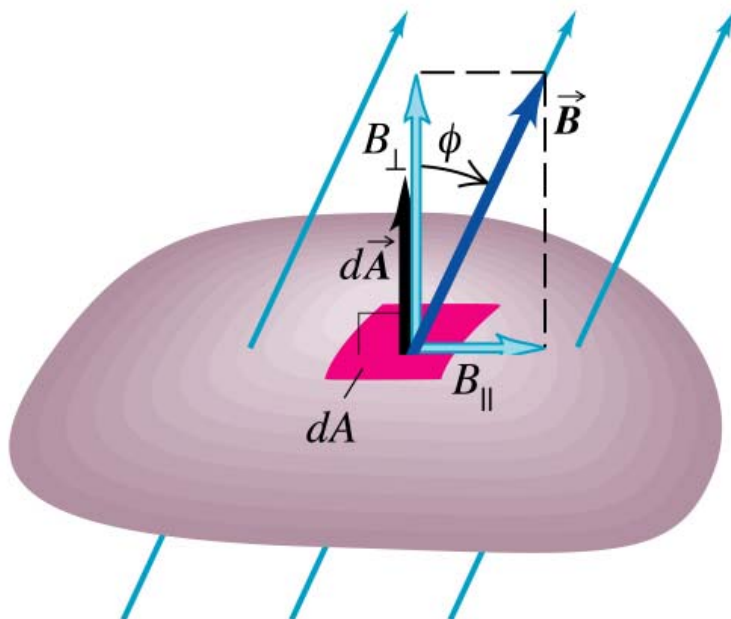


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Lei de Faraday

Fluxo magnético através de uma superfície



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Fluxo do campo magnético \mathbf{B} através de um elemento de área $d\mathbf{A}$:

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = B dA \cos \phi$$

$$\Phi_B = \int d\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B dA \cos \phi$$

Se o vector \mathbf{B} for uniforme numa superfície de área \mathbf{A} , então:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi$$

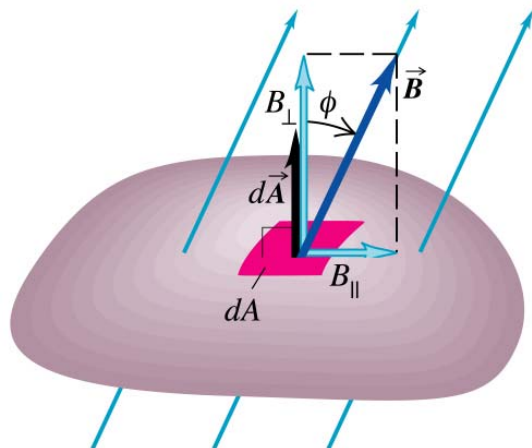
Unidade de fluxo magnético é o weber (Wb): $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2 = 1 \text{ Nm/A}$.

Lei de Faraday: A força electromotriz induzida num percurso fechado é igual a menos a taxa de variação temporal do fluxo magnético através da superfície definida pelo percurso fechado.





Lei de Faraday (2)



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Fluxo do campo magnético \vec{B} através de um elemento de área $d\vec{A}$:

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = BdA \cos \phi$$

$$\Phi_B = \int d\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int BdA \cos \phi$$

Lei de Faraday: a força electromotriz induzida ε num percurso fechado é igual ao simétrico da taxa de variação temporal do fluxo magnético através de uma superfície qualquer definida pelo percurso fechado, isto é:

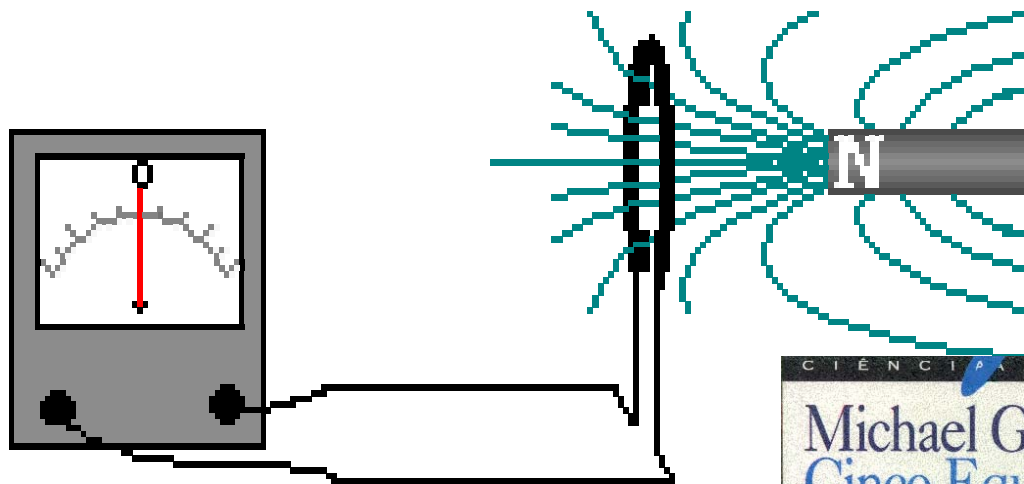
$$\varepsilon_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int d\Phi_B = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int BdA \cos \phi$$



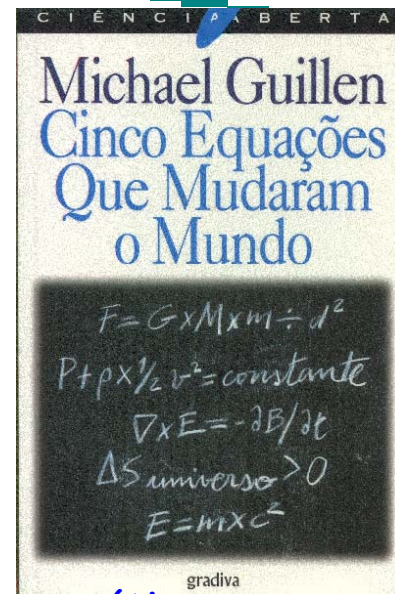


Lei de Faraday: o magnetismo cria electricidade!

Um íman pode produzir corrente eléctrica (1831 Faraday)



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

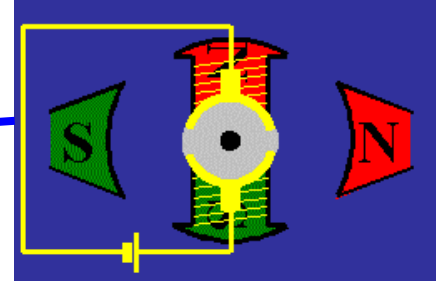
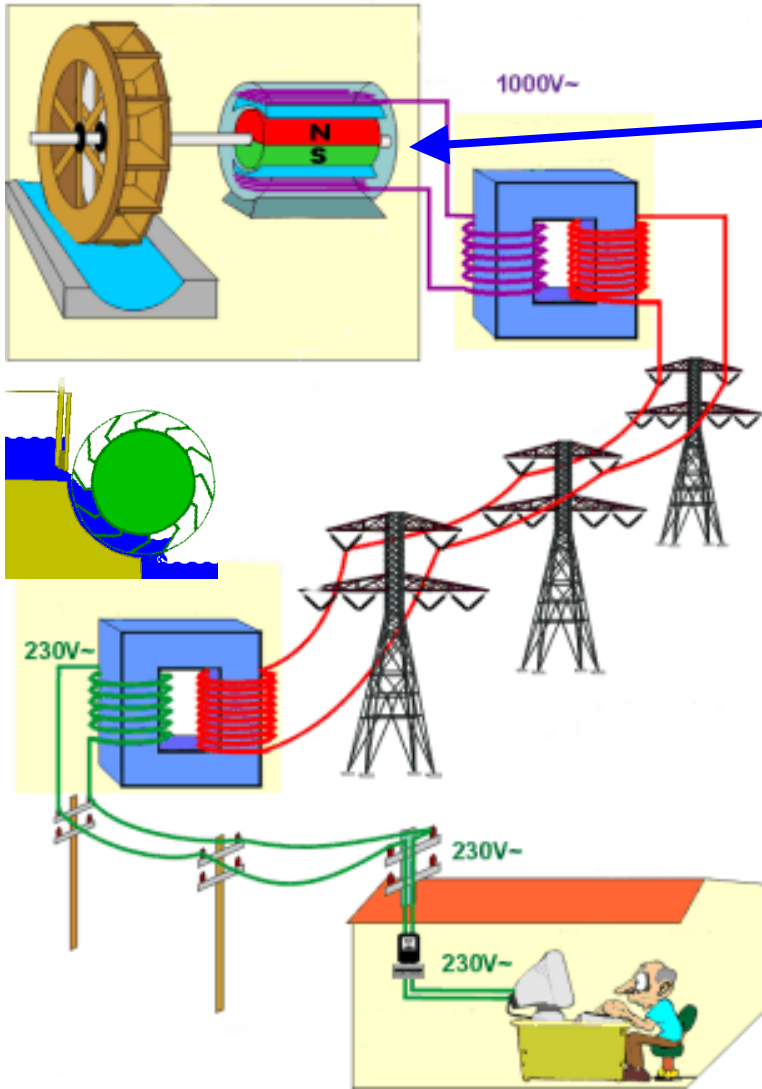


ACTO DE CLASSE: [Michael Faraday e a lei da indução electromagnética](#)



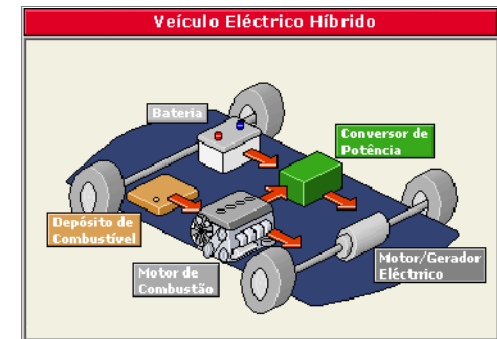
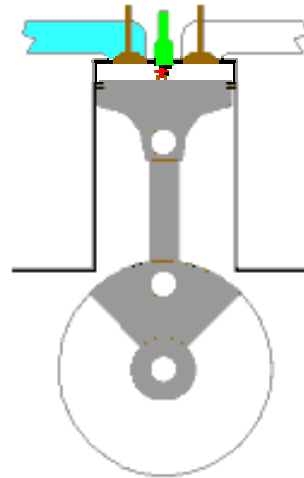
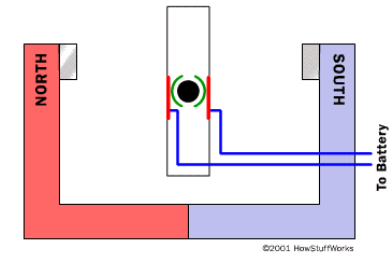


Faça-se electricidade!



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

Motores e máquinas eléctricas



Electromagnetismo e Óptica, José Figueiredo, DF, UALG
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EO.htm>)



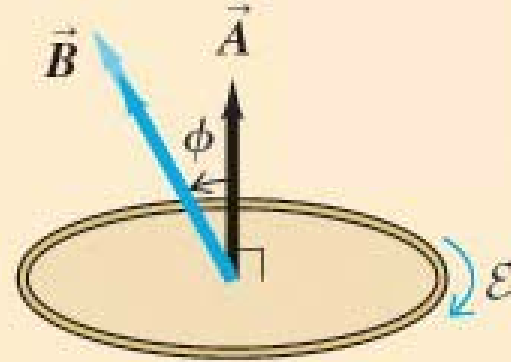


Lei de Faraday: campo eléctrico induzido E_{ind}

Uma variação de fluxo magnético causa (induz) uma fem num circuito fechado, e, portanto, uma corrente se o percurso for condutor: princípio de funcionamento dos geradores eléctricos, leitores de cartões, transformadores, etc., baseia-se na lei de Faraday.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int d\Phi_B = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$



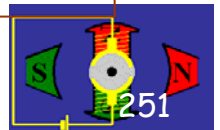
Se existe uma fem induzida, existirá também um **campo eléctrico induzido**, tal que:

$$\oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = \mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int d\Phi_B = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int B dA \cos \phi$$

Importante: este campo eléctrico induzido E_{ind} **não é conservativo.**

Ver, por exemplo, <http://www.youtube.com/watch?v=eqjl-qRy71w>

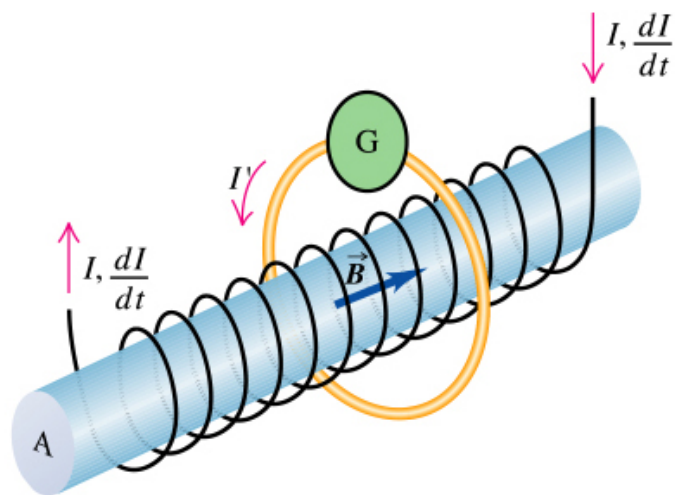
<http://www.youtube.com/watch?v=1bUWcy8HwpM&feature=related>



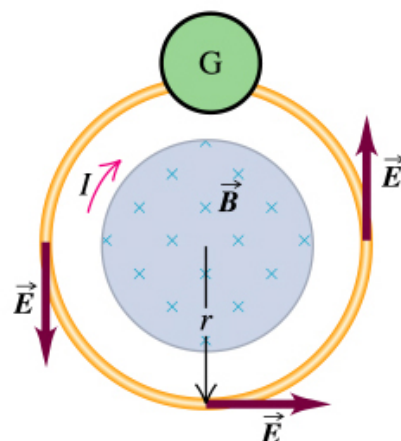


Lei de Faraday: campo eléctrico induzido \mathbf{E}_{ind} (2)

Um solenóide com uma corrente a **aumentar** induz uma fem no fio amarelo (espira): é "criada" a corrente induzida I' na espira amarela em resultado do campo eléctrico induzido no fio da espira associado à fem induzida.



(a)



(b)

$$\Phi_B = BA = \mu_0 nIA$$

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\mu_0 nA \frac{dI}{dt}$$

$$I_{\text{ind}} = I' = \mathcal{E}_{\text{ind}} / R$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$\oint \vec{E}_{\text{ind}} \cdot d\vec{l} = \mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Importante: este campo eléctrico induzido \mathbf{E}_{ind} não é conservativo.





Falta um bocadinho para termos as 4 equações de Maxwell

The relationships between electric and magnetic fields and their sources can be stated compactly in four equations, called Maxwell's equations. Together they form a complete basis for the relation of \vec{E} and \vec{B} fields to their sources.

As relações entre campos eléctricos e campos magnéticos e as suas fontes podem ser escritas de forma compacta em quatro equações chamadas:

equações de Maxwell.

Juntas formam um "corpo de conhecimento completo" das relações entre os campos E e B , e entre as suas fontes.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \quad (29.18)$$

(Gauss's law for \vec{E} fields)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (29.19)$$

(Gauss's law for \vec{B} fields)

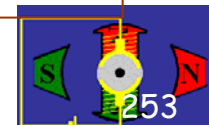
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_C + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{\text{encl}} \quad (29.20)$$

(Ampere's law including displacement current)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (29.21)$$

(Faraday's law)

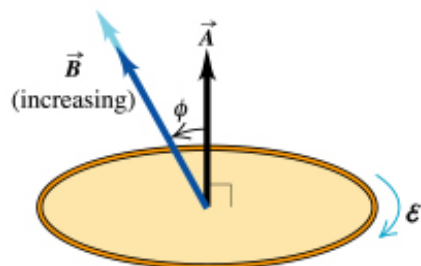
* Ainda não conhecemos este termo.



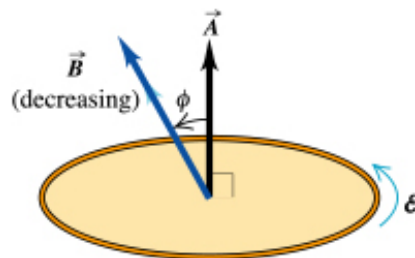


Direcção da fem induzida

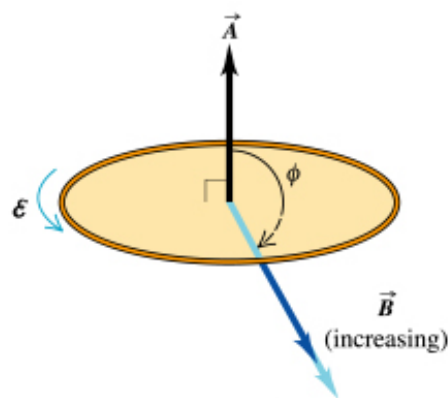
Variação do fluxo magnético através de uma espira de condutora.



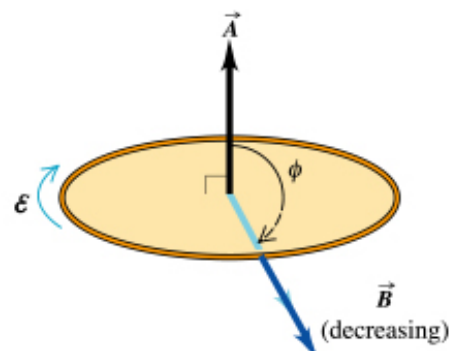
(a) $\Phi_B > 0, \frac{d\Phi_B}{dt} > 0$



(b) $\Phi_B > 0, \frac{d\Phi_B}{dt} < 0$



(c) $\Phi_B < 0, \frac{d\Phi_B}{dt} < 0$



(d) $\Phi_B < 0, \frac{d\Phi_B}{dt} > 0$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Para determinar o sentido da fem, começa-se por:

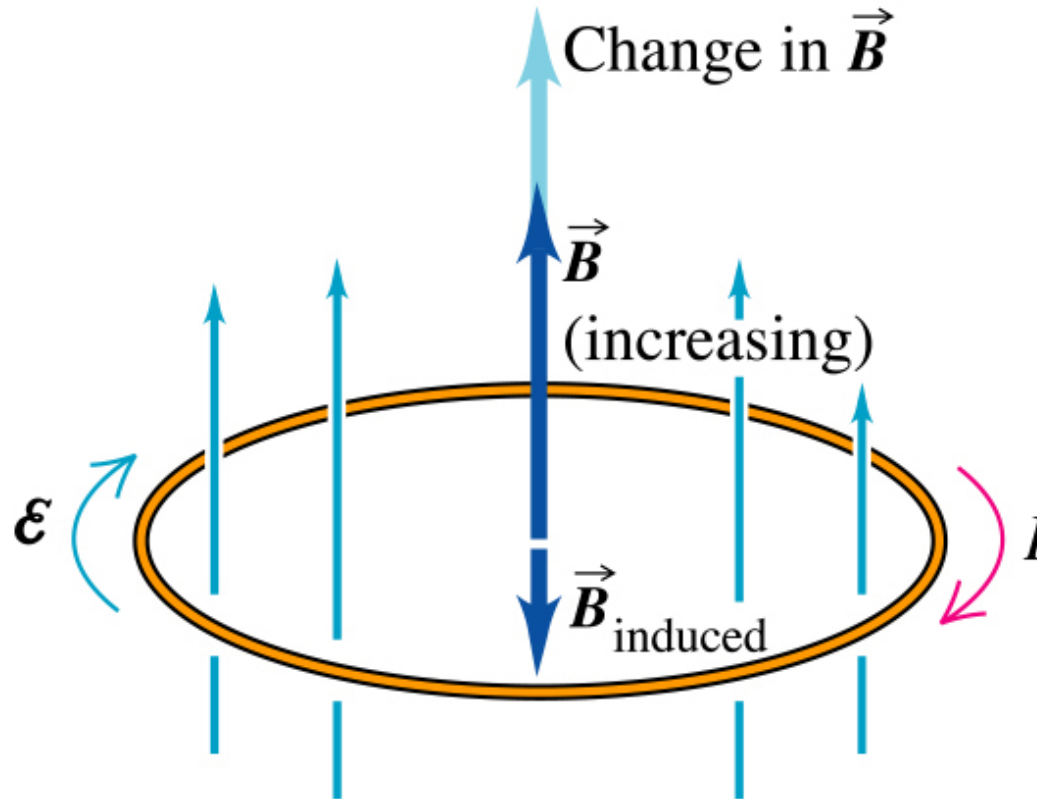
1. Escolher um sentido positivo para o vector área **A**.
2. Determinar o sinal do fluxo magnético e a respectiva taxa de variação.
3. Se o fluxo aumenta, a fem é negativa; se o fluxo diminui, a fem é positiva.
4. A direcção da fem ou corrente induzida é determinada usando a regra da mão direita. Se a fem for positiva, terá a direcção dos dedos; se for negativa tem a direcção oposta.



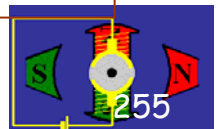


Lei de Lenz

Lei de Lenz: a força electromotriz e a corrente induzidas tendem sempre a contrariar ou anular as alterações que lhes deram origem.



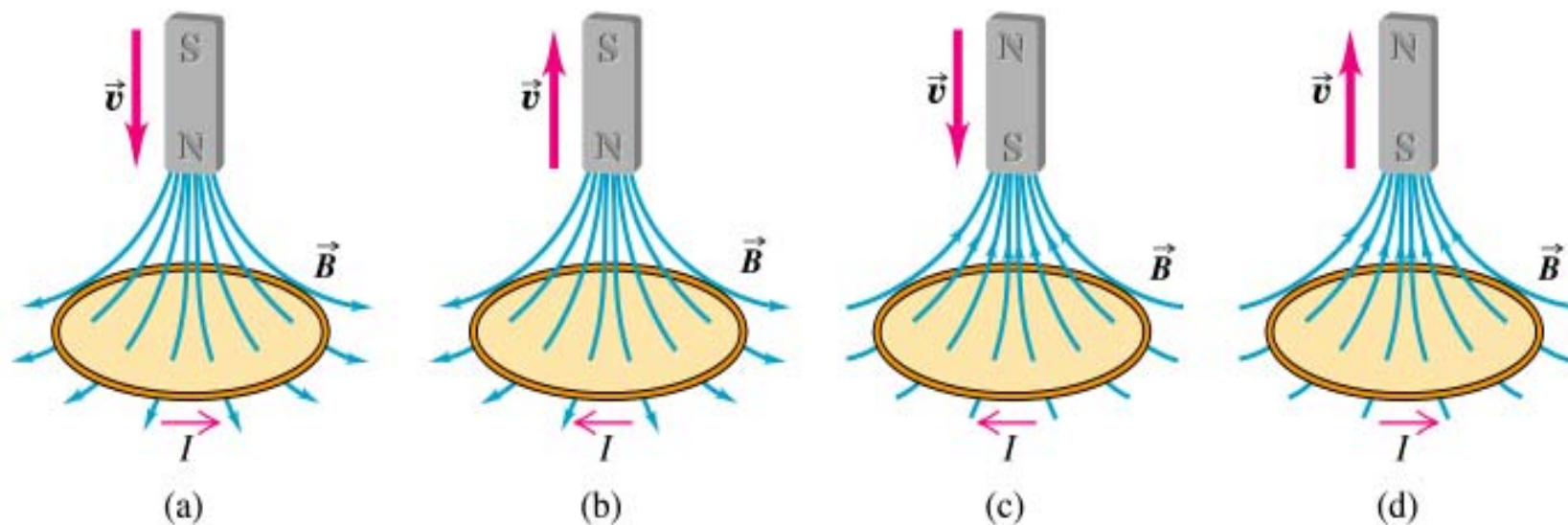
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Lei de Lenz (2)

A direcção de qualquer efeito magnético induzido é tal que se opõe à causa que lhe deu origem.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Correntes (I) induzidas na espira condutora

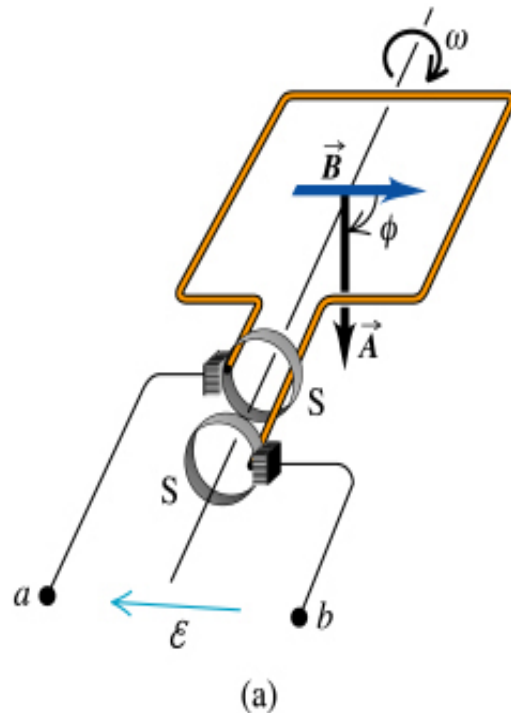




Alternador simples (gerador ac)

Alternador: gerador síncrono de corrente eléctrica alternada. (De alternar + -dor)

Corrente alternada: diz-se da corrente eléctrica cujo sentido se inverte periodicamente, cujo valor médio durante um período é nulo e que passa através do seu ciclo de valores uma vez em cada período.

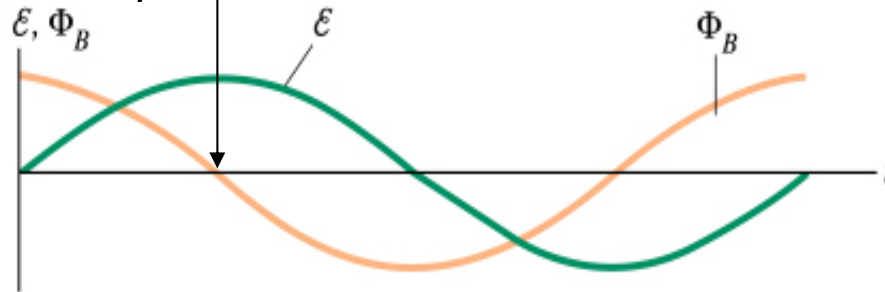


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

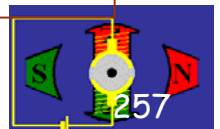
$$\Phi_B = BA \cos \phi = BA \cos(\omega t)$$



$$\phi = 90^\circ$$



$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = \omega BA \sin(\omega t)$$

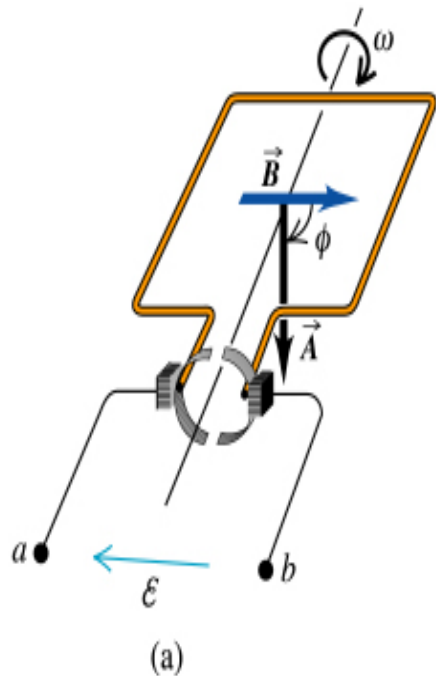




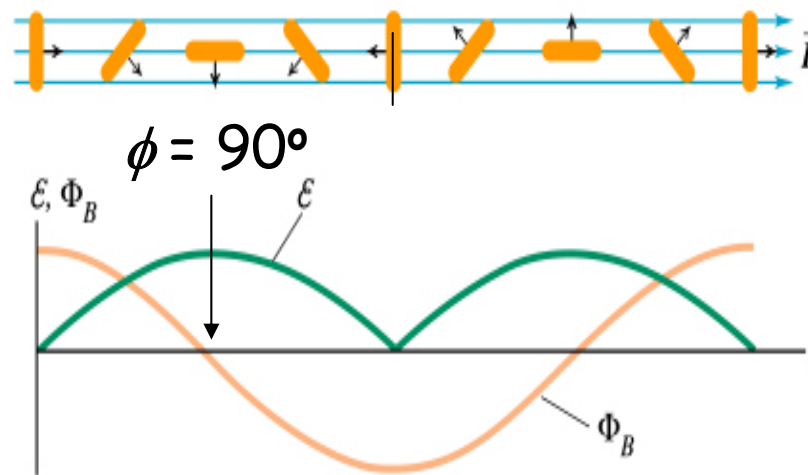
Gerador de corrente contínua (dc)

Corrente contínua: (electr.) corrente eléctrica cujo sentido é sempre o mesmo;

Corrente alternada: diz-se da corrente eléctrica cujo sentido se inverte periodicamente, cujo valor médio durante um período é nulo e que passa através do seu ciclo de valores uma vez em cada período.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



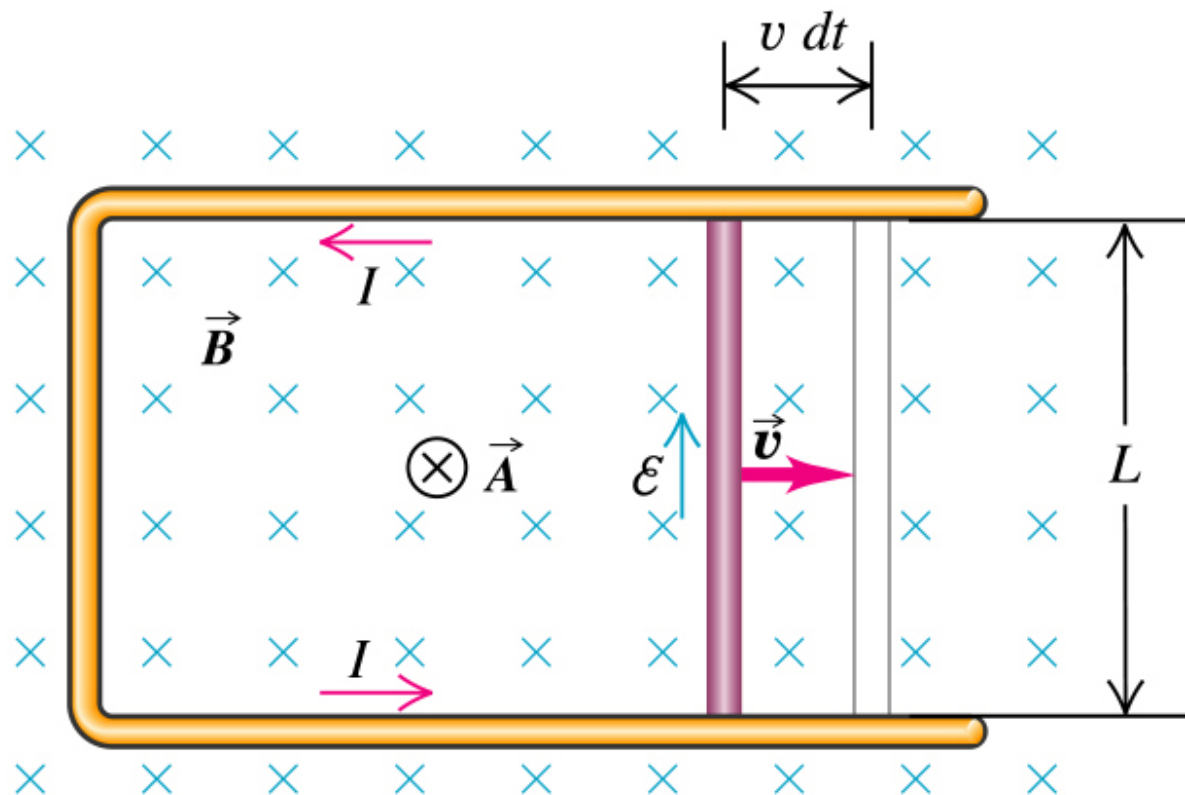
$$|\varepsilon_{\text{ind}}| = \left| -\frac{d\Phi_B}{dt} \right| = N\omega BA |\sin(\omega t)|$$





Gerador eléctrico dinâmico

"Slidewire generator"



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$d\Phi_B = B dA = BLv dt$$

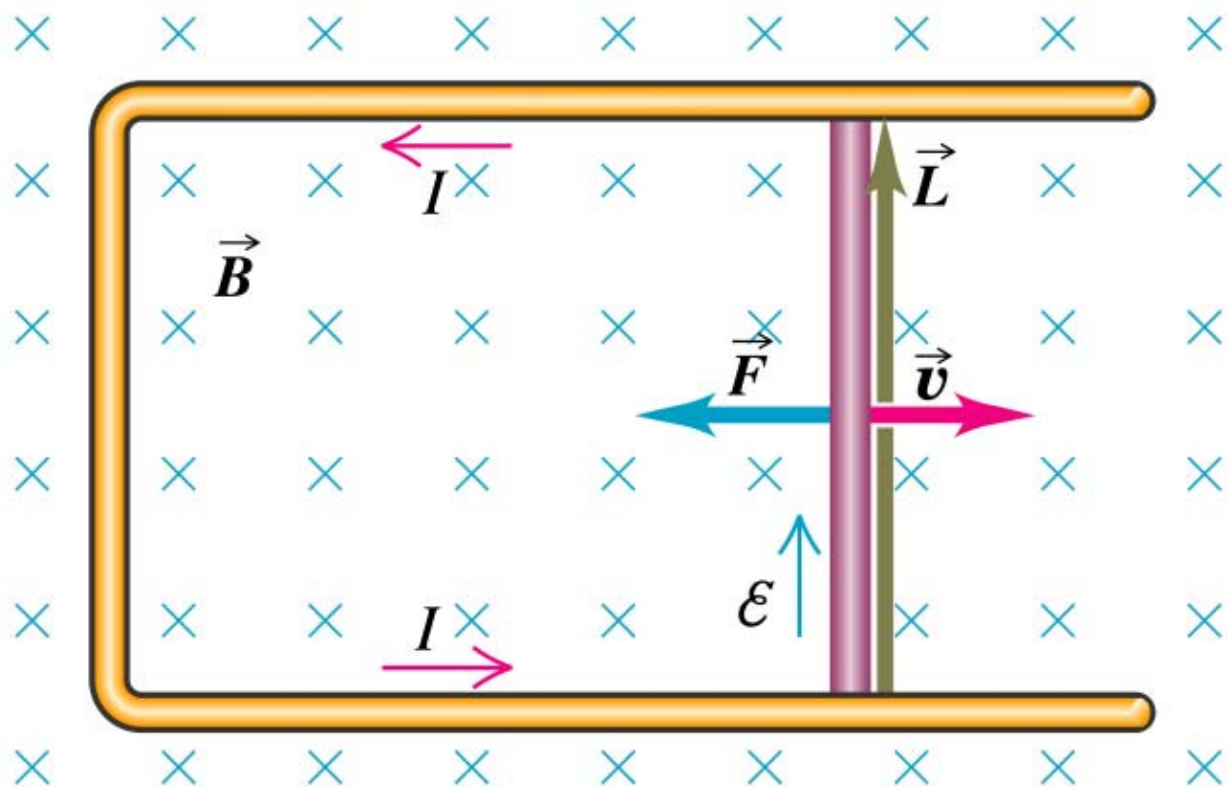
$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -BLv$$





Gerador eléctrico dinâmico (2)

A força magnética ($F = IL \times B$) devido à corrente induzida é para a esquerda, oposta a v .

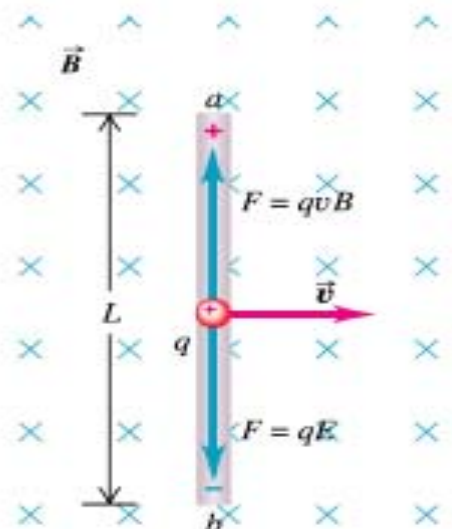


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

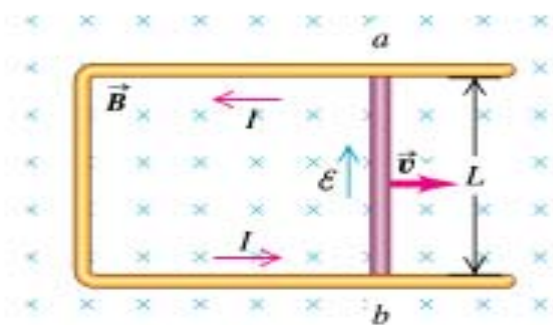




Força electromotriz dinâmica



(a)



(b)

Força electromotriz cinemática induzida fem (ϵ) é

$$\epsilon = v B L$$

A diferença de potencial entre a e b é

$$\epsilon = \Delta V = \text{energia/carga} = W/q$$

$$\Delta V = F \times \text{distância} / q$$

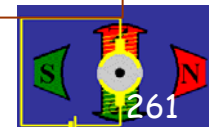
$$\Delta V = (q v B)L/q$$

Resultando $\epsilon = v B L$

O comprimento L e a velocidade v são perpendiculares a B .

Ver também disco-dinamo de Faraday

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Correntes de Foucault ("eddy" ou redemoinho)

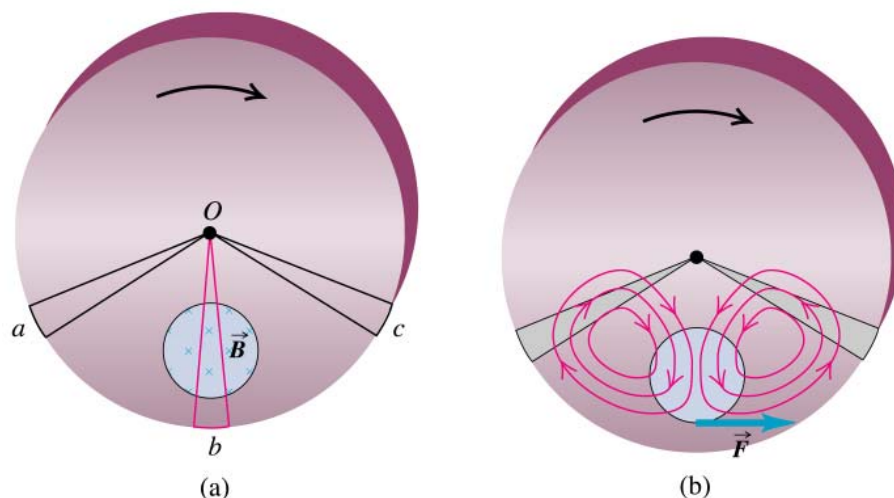
Corrente de Foucault (ou **corrente de eddy**) é o nome dado à corrente induzida em um condutor quando o fluxo magnético através de uma amostra razoavelmente grande de material condutor varia. Em alguns casos a corrente de Foucault pode produzir resultados indesejáveis, como a dissipação por efeito Joule, o que faz com que a temperatura do material aumente. Para evitar a dissipação por efeito Joule, os materiais sujeitos a campos magnéticos variáveis são frequentemente laminados ou construídos com placas muito pequenas isoladas umas das outras. O Efeito pelicular em condutores é uma forma de manifestação da corrente de Foucault, no qual a corrente eléctrica tende a fluir na periferia do condutor. Correntes de **Foucault** "criadas" pela fem induzida num disco metálico em rotação.

Lei de Joule (também conhecida como **efeito Joule**) expressa a relação entre a energia térmica gerada por uma corrente eléctrica que percorre um condutor num intervalo de tempo:

$$E_{enterm} = \int RI^2 dt$$

Potência dissipada

$$P = RI^2$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Travão electromagnético

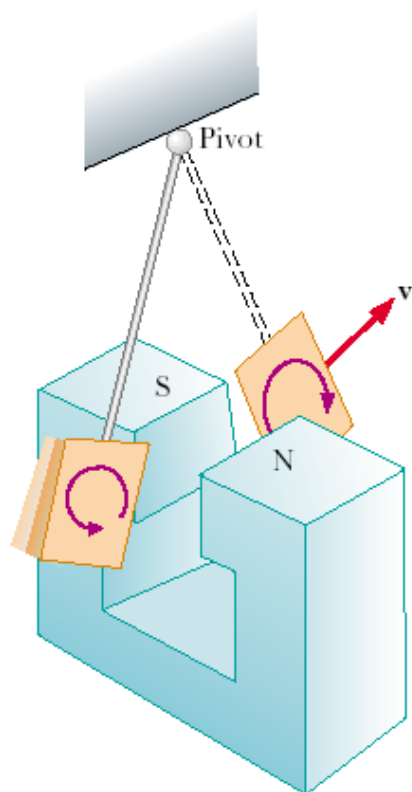
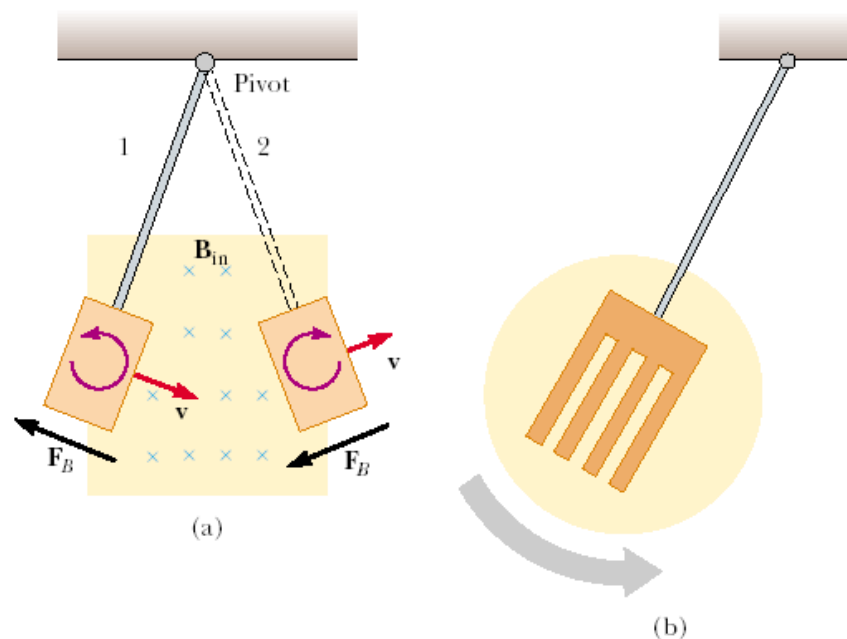


Figure 31.25 Formation of eddy currents in a conducting plate moving through a magnetic field. As the plate enters or leaves the field, the changing magnetic flux induces an emf, which causes eddy currents in the plate.



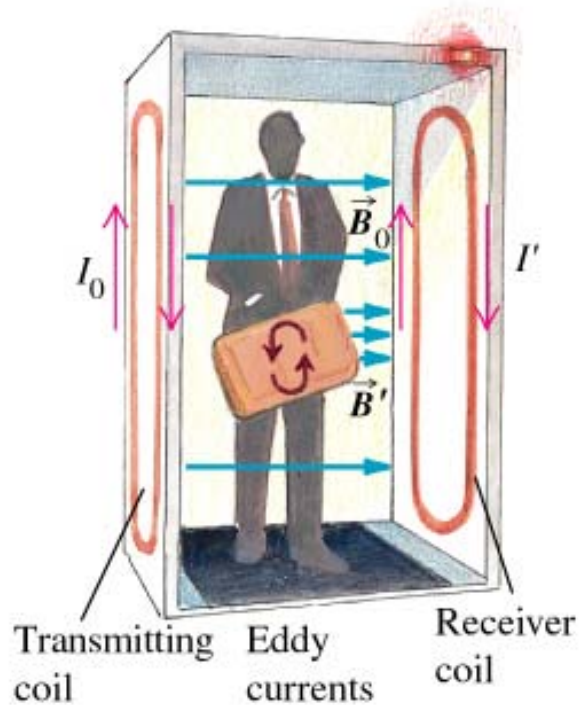
Active Figure 31.26 (a) As the conducting plate enters the field (position 1), the eddy currents are counterclockwise. As the plate leaves the field (position 2), the currents are clockwise. In either case, the force on the plate is opposite the velocity, and eventually the plate comes to rest. (b) When slots are cut in the conducting plate, the eddy currents are reduced and the plate swings more freely through the magnetic field.



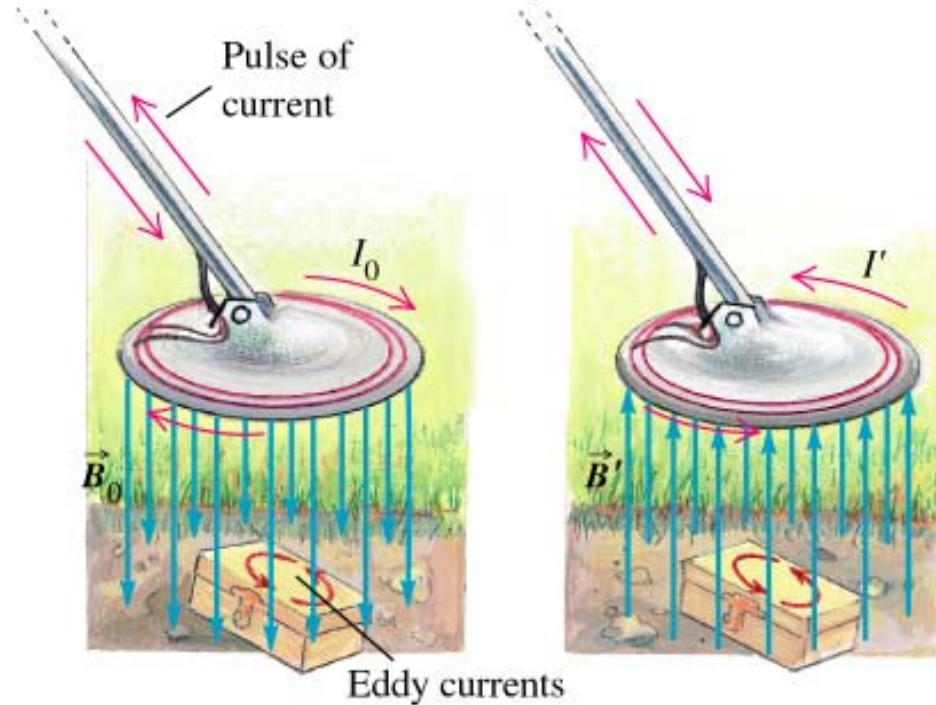


Detector de metais

Detector de metais - um campo magnético alternado B_0 induz correntes de eddy num objecto condutor movido através do detector. A correntes de eddy produzem, por sua vez, um campo magnético alternado B' , que induz uma corrente no anel do receptor do detector.



(a)



(b)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





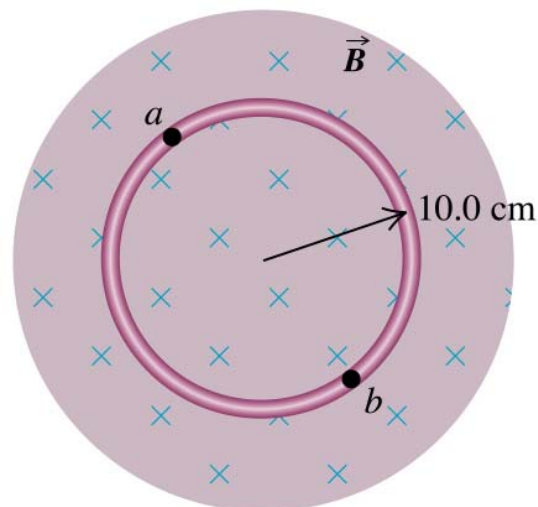
Exercício: lei de Lenz

Considere uma espira de corrente numa região do espaço onde existe um campo magnético uniforme. Determine o sentido da corrente induzida quando:

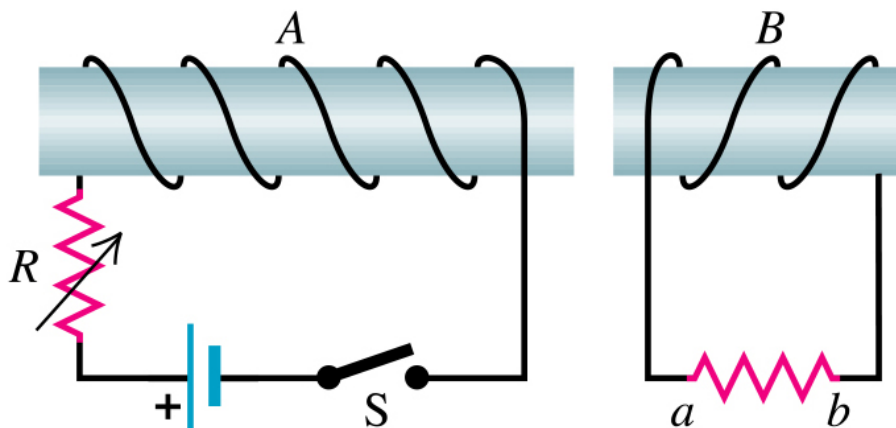
- a) B crescente
- b) B decrescente
- c) B é constante e igual a B_0

Explique o seu raciocínio.

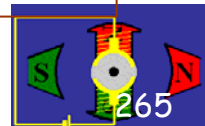
Determine a direcção da corrente na resistência ab , quando a) o interruptor S é aberto após ter sido mantido fechado durante vários minutos; b) a bobina B é aproximada de A com o interruptor fechado; c) a resistência de R é reduzida enquanto o interruptor permanece fechado.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



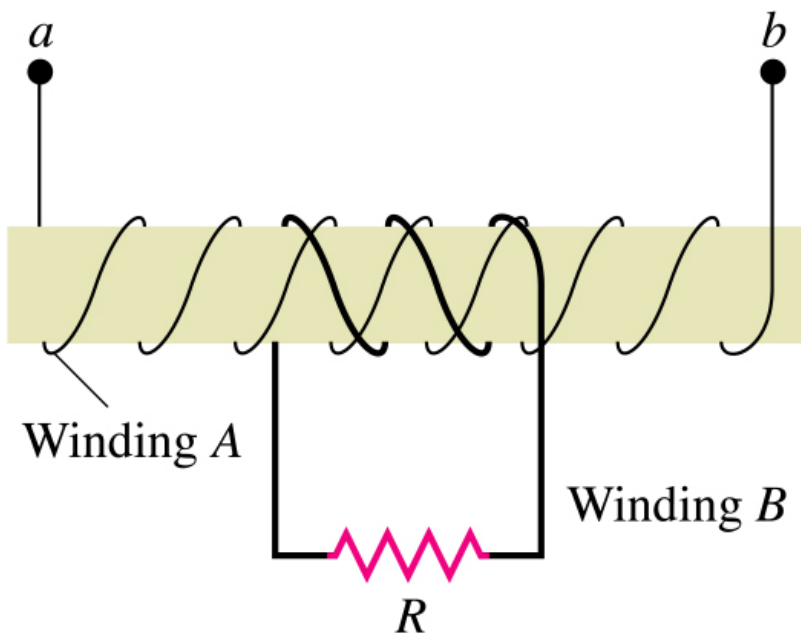
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Exercício: lei de Lenz (2)

Um tubo de cartão é envolto por duas bobinas de fios isolados enroladas em direcções opostas. O terminais a e b do enrolamento A podem ser conectados ao terminais de uma bateria com um interruptor reversível. Diga qual a direcção da corrente na resistência R nas seguintes circunstâncias: a) a corrente no enrolamento A é de a para b e está a aumentar; b) a corrente no enrolamento A é de b para a e está a diminuir; c) a corrente no enrolamento A é de b para a e está a aumentar;



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

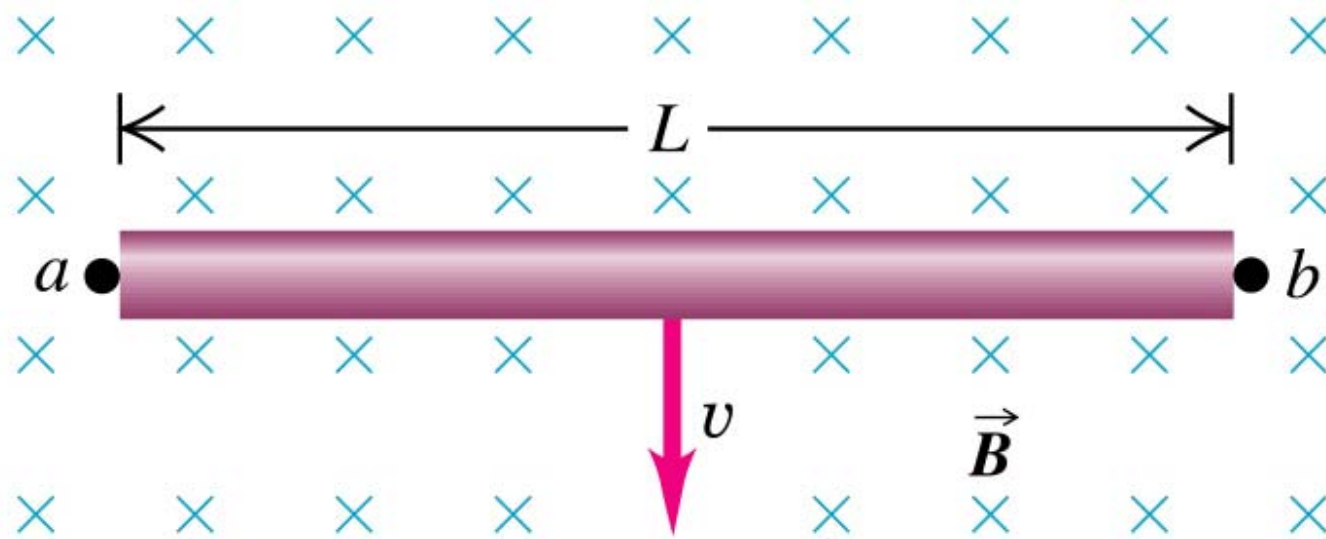




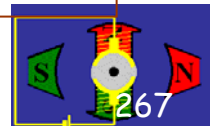
Exercício: fem cinemática

Uma vareta condutora de comprimento 30 cm move-se com $v=5$ m/s numa região onde existe um campo magnético B de magnitude 0,45 T direccionado para o interior do plano da página.

- a) Qual é a fem induzida cinética na vareta?; b) qual é a diferença de potencial entre as extremidades da vareta?; c) Qual é o ponto a ou b que está a maior potencial?; d) quando as cargas na vareta estão em equilíbrio, qual é a magnitude e direcção do campo eléctrico no interior da vareta?; e) quando as cargas estão em equilíbrio, qual dos pontos a ou b tem excesso de carga positiva?



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

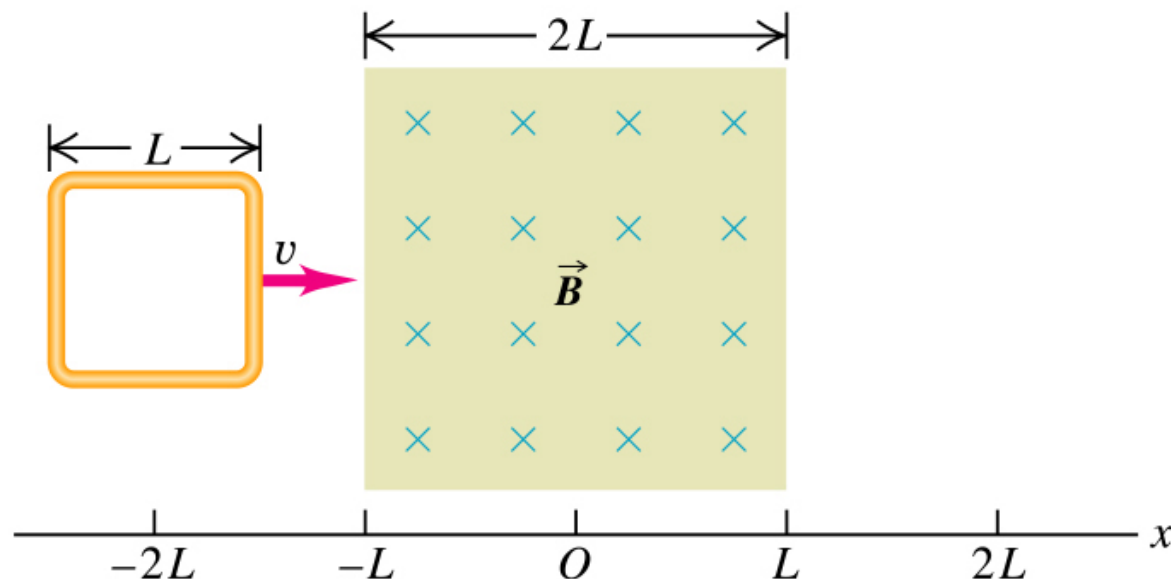




Exercício: fem cinemática (2)

Uma espira quadrada de um fio condutor com resistência R move-se a velocidade constante através de um campo magnético uniforme confinado numa região quadrada cujos lados tem dobro do comprimento do lado da espira. a) represente graficamente a força externa necessária para mover a espira a velocidade constante em função da coordenada x de $-2L$ a $+2L$ (a coordenada x é medida do centro da região de campo magnético ao centro da espira, é negativa quando o centro da espira se encontra à esquerda do centro do campo; considere que a força é positiva se apontar para a direita);

b) represente graficamente a corrente induzida na espira em função de x . Assuma que as correntes no sentido contrário aos ponteiros do relógio são positivas.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Indução electromagnética e a Teoria da Relatividade*

Teoria da Relatividade: (mat., fís.) teoria matemática e física formulada por A. Einstein, físico alemão (1879-1955), que, alargando os conceitos de espaço, tempo e movimento, provocou profundas alterações na física clássica;

Princípio da ~: (fís.) princípio segundo o qual as leis dos fenómenos físicos são as mesmas para diferentes grupos de observadores em movimento de translação uniforme (relatividade restrita) ou uniformemente acelerada (relatividade generalizada) de uns relativamente aos outros, em consequência do que a duração dos fenómenos varia conforme é medida por observadores em repouso ou por observadores em movimento relativamente aos fenómenos;

* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.

VOLTEMOS À EXPERIÊNCIA DE FARADAY. EU SEGURO O ARO E O ZÉ SEGURA O ÍMAN. QUANDO EU ME MEXO, O PONTEIRO DO GALVANÓMETRO TAMBÉM SE MEXE.

ISTO É FÁCIL DE ENTENDER. O FIO TEM CARGAS QUE, QUANDO SE MOVEM, SENTEM A FORÇA MAGNÉTICA LATERAL QUE AS CONDUZ AO LONGO DO ARO.

E QUANDO O ZÉ SE MOVE E EU FICO PARADA?

HUM... DEIXA VER... BEM...

SABEMOS QUE UMA CORRENTE É INDUZIDA. MAS O QUE É QUE A INDUZ? SE AS CARGAS NÃO SE MOVEM NO INÍCIO, COMO PODE O ÍMAN AFFECTÁ-LAS?

SE APENAS OS CAMPOS MAGNÉTICOS E ELÉTRICOS PODEM DESLOCAR CARGAS, DEVE HAVER UM CAMPO ELÉCTRICO ENVOLVIDO!

BRAVO!

O ZÉ DEDUZIU ALGO CUYA EXPLICAÇÃO EXIGIU O CÉREBRO DE EINSTEIN. EINSTEIN APERCEBEU-SE DE QUE EM DETERMINADAS CIRCUNSTÂNCIAS A CORRENTE É DEVIDA A UM CAMPO MAGNÉTICO E NOUTRAS A UM CAMPO ELÉCTRICO, DEPENDENDO DE QUEM SE ESTÁ A MOVER.

O QUE PARA UM OBSERVADOR É UM CAMPO MAGNÉTICO PARA OUTRO É UM CAMPO ELÉCTRICO.

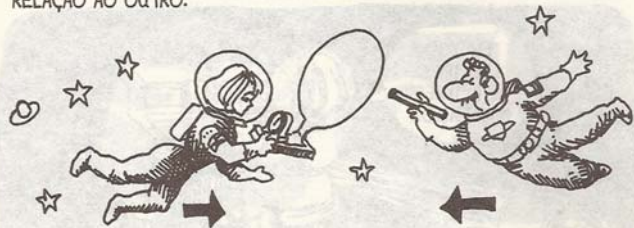
170





Indução electromagnética e a Teoria da Relatividade*

VOLTEMOS À EXPERIÊNCIA DE FARADAY, MAS AGORA NO ESPAÇO INTERESTELAR, ONDE JAMAIS PODEREMOS DEFINIR QUAL DOS DOIS SE ESTÁ A MOVER! SABEMOS APENAS QUE CADA UM SE MOVE EM RELAÇÃO AO OUTRO.



JULGO QUE ESTOU PARADO E QUE O ZÉ É QUE SE ESTÁ A MOVER! DETECTO UM CAMPO MAGNÉTICO, MAS QUE NÃO CONSEGUE MOVER CARGAS. TAMBÉM DEVE HAVER UM CAMPO ELÉCTRICO, CAUSADO PELA VARIACÃO DO CAMPO MAGNÉTICO.

O ZÉ PENSA QUE ESTÁ PARADO E QUE SOU EU QUE ESTOU A MOVER-ME. ELE APENAS DETECTA UM CAMPO MAGNÉTICO E CARGAS A MOVEREM-SE, QUE EXPLICAM A CORRENTE INDUZIDA.



A MARTA VÊ DOIS CAMPOS.



O ZÉ APENAS VÊ O CAMPO MAGNÉTICO.

OS FÍSICOS DESIGNAM OS CAMPOS MAGNÉTICOS COM A LETRA B.

O ZÉ E EU NÃO ESTAMOS DE ACORDO SOBRE OS CAMPOS PRESENTES!



171

DE FACTO, ISSO É TÍPICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE: DOIS OBSERVADORES, TAL COMO EU E O ZÉ, MOVENDO-SE UM RELATIVAMENTE AO OUTRO, DISCORDARÃO CLARAMENTE A RESPEITO DE CERTAS GRANDEZAS FÍSICAS IMPORTANTES DO UNIVERSO!



UMA EXPLICAÇÃO AINDA MAIS SIMPLES: UMA CARGA CRUZA-SE NO ESPAÇO COM O ZÉ:



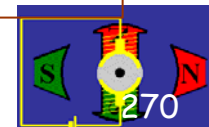
O ZÉ VÊ A CARGA MOVER-SE, ISTO É, UMA CORRENTE QUE PRODUZ UM CAMPO MAGNÉTICO, E A BÚSSOLA DO ZÉ DETECTA ESSE CAMPO!

CONTUDO, SE EU ME MOVER JUNTAMENTE COM A CARGA, VEJO-A PARADA. NÃO HÁ CAMPO MAGNÉTICO NENHUM E A MINHA BÚSSOLA NÃO DETECTA NADA!



172

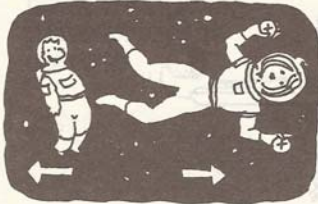
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.



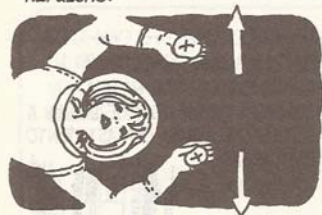


Indução electromagnética e a Teoria da Relatividade*

E AGORA A DEMONSTRAÇÃO FINAL: PRESTE ATENÇÃO! AGORA LEVO DUAS CARGAS LADO A LADO, À FRENTE DO ZÉ.



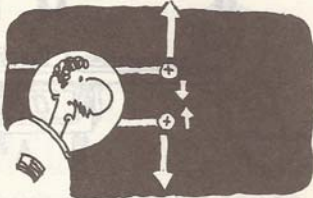
MAS PARA MIM AS CARGAS ESTÃO PARADAS, E EU SÓ VEJO A REPULSÃO.



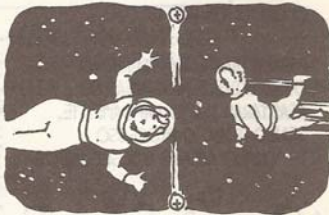
AGORA VEM A PARTE MAIS ESTRANHA: O ZÉ VÊ UMA ATRAÇÃO MAGNÉTICA ENTRE CARGAS, QUE COMPENSA PARCIALMENTE A REPULSÃO ELÉCTRICA, E ENTÃO VÊ AS CARGAS AFASTAREM-SE MAIS DEVAGAR DO QUE EU AS VEJO.



AS CARGAS REPELEM-SE ELECTRICAMENTE, MAS O ZÉ VÊ-AS EM MOVIMENTO: SÃO DUAS CORRENTES PARALELAS QUE SE ATRAEM MAGNETICAMENTE E SE REPELEM ELECTRICAMENTE!



QUANDO SOLTO AS CARGAS ELAS AFASTAM-SE.

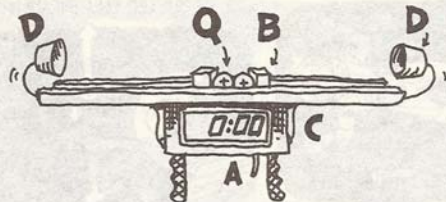


PERCEBEU? O ZÉ, QUE SE ESTÁ A MOVER RELATIVAMENTE A MIM, CHEGA A UM VALOR INFERIOR AO MEU AO MEDIR A VELOCIDADE DE AFASTAMENTO DAS CARGAS.



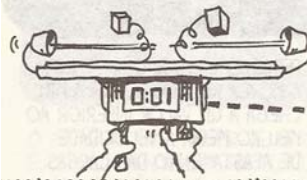
173

EIS UM APARELHO QUE MEDE A VELOCIDADE DE AFASTAMENTO DAS CARGAS.



PREMINDO O INTERRUPTOR A, SOLTAM-SE OS BLOCOS B, ACCIONANDO O CRONÓMETRO C AO MESMO TEMPO QUE AS CARGAS Q PARTEM UMA PARA CADA LADO. AS CARGAS ATINGEM OS DETECTORES D, QUE DESLIGAM O CRONÓMETRO C.

PARADA DIANTE DO APARELHO, OBSERVO QUE AS CARGAS SE AFASTARAM MUITO RAPIDAMENTE, TENDO TODO O PROCESSO DEMORADO APENAS 0,01 SEGUNDOS.



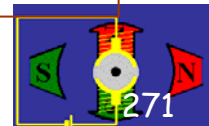
MAS O ZÉ, COMO VIMOS, ESTÁ CONVENCIDO DE QUE HÁ UMA ATRAÇÃO MAGNÉTICA QUE DIMINUI A REPULSÃO E ATRASA O AFASTAMENTO DAS CARGAS.



O ZÉ MEDE UM TEMPO MAIOR PARA O PROCESSO, 0,02 SEGUNDOS. TAMBÉM VÊ QUE O MEU CRONÓMETRO SÓ ANDOU 0,01 SEGUNDOS ENQUANTO O DELE REGISTOU 0,02 SEGUNDOS. QUE CONCLUÍMOS?

174

* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.





Indução electromagnética e a Teoria da Relatividade*

QUE DEVE PENSAR O ZÉ?
VISTO QUE ELE VÊ QUE
O MEU RELÓGIO MARCA
0,01 s E O DELE 0,02 s,
SÓ PODERÁ CONCLUIR
UMA COISA:

QUE O MEU MOVIMENTO
RÁPIDO FAZ O MEU
RELÓGIO ATRASAR-SE!

OU ISSO, OU ENTÃO
O MEU FATO
ESPACIAL TEM
UM BURACO...



ESTA NÃO É A ÚNICA CONCLUSÃO «ESQUISITA» DA TEORIA DA RELATIVIDADE. AINDA HÁ MAIS: DE ACORDO COM EINSTEIN, UM OBSERVADOR PARADO VÊ OS SEGUINTE EFEITOS EM OBJECTOS QUE SE MOVEM MUITO RAPIDAMENTE:

- * O TEMPO PASSA MAIS DEVAGAR
- * AS DISTÂNCIAS DIMINUEM (NA DIRECÇÃO DO MOVIMENTO)
- * AS MASSAS AUMENTAM

POR OUTRAS PALAVRAS:

ALGUMAS DAS NOSSAS IDEIAS
MAIS SAGRADAS SOBRE O ESPAÇO
E O TEMPO SÃO RELATIVAS
E NÃO ABSOLUTAS!



VIMOS QUE O EFEITO DA DILATAÇÃO DO TEMPO DERIVA DE FACTOS BÁSICOS OBSERVADOS RELATIVOS À ELECTRICIDADE E AO MAGNETISMO. OS FÍSICOS JÁ SABIAM, NO FINAL DO SÉCULO XIX, QUE AS EQUAÇÕES DO ELECTROMAGNETISMO NÃO ESTAVAM DE ACORDO COM A MECÂNICA DE NEWTON, E A MAIORIA DELES SABIA QUE A RESPOSTA ESTAVA EM MUDAR AQUELAS EQUAÇÕES DE ALGUMA FORMA...



TALVEZ SE USARMOS UM APAGADOR...

MAS SÓ EINSTEIN VIU QUE NÃO ERA O ELECTROMAGNETISMO QUE TINHA DE SER MUDADO, MAS SIM OS PRÓPRIOS CONCEITOS DE ESPAÇO E DE TEMPO...



* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.



Para mais detalhes ver, por exemplo, <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Resumos-aulas-de-TR-IFQR.pdf>, página 15.





Indução electromagnética

-

Indutância

Indutância s. f. (electr.) propriedade de um circuito eléctrico que depende da sua disposição geométrica e do meio em que está mergulhado; razão entre o fluxo magnético que atravessa esse meio e a intensidade da corrente que o percorre. (Do fr. inductance, «id.»)





Indutância

Como é que uma bateria de 12 volts pode fornecer milhares de volts necessários para produzir uma faísca através da vela de ignição do motor de um carro? A resposta está na indução electromagnética.

Fazendo variar a corrente numa bobina induz uma fem numa bobina adjacente. O acoplamento entre bobinas é descrito pela indutância mutua. Um variação de corrente numa bobina também induz uma fem na própria bobina. Uma bobina que tira proveito deste efeito designa-se indutor. A relação entre a corrente e a fem é descrita pela grandeza indutância (auto-indutância) da bobina.

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente eléctrica, um decrescimento da corrente implica um dispêndio de energia. Este é o princípio dos sistemas de ignição dos automóveis.

Um componente percorrido por uma corrente eléctrica i cria um fluxo Φ_B . A auto-indutância quantifica a capacidade de um circuito contrariar o fluxo magnético criado por ele próprio.

O parâmetro de proporcionalidade entre o fluxo Φ_B e a corrente i que o cria corresponde à auto-indutância L do componente: $\Phi_B = Li$.

Auto-indutância

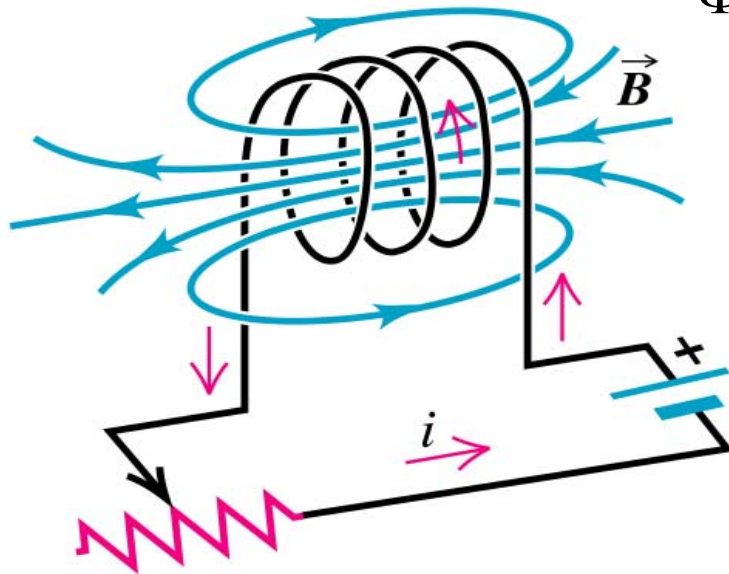
Quando a corrente num circuito varia, o fluxo magnético também varia, induzindo uma fem no circuito. A fem induzida opõe-se sempre à variação de corrente que produz a fem induzida (lei de Lenz). O parâmetro de proporcionalidade entre a variação de corrente e a variação do fluxo magnético é a auto-indutância.

$$\Phi_B = L \cdot i \rightarrow \Delta\Phi_B = L\Delta i \rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

A fem induzida é, portanto:

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

A auto-indutância depende apenas das características geométricas do elemento/componente. A unidade SI de indutância é o **henry**, $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A} = 1 \text{ Vs/A} = 1 \Omega\text{s} = 1 \text{ J/A}^2$.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

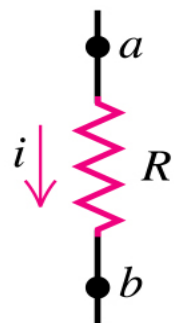
Seja uma bobina com N espiras:

$$B = \mu_0 N \cdot i / l \rightarrow \Phi_B = \pi r^2 N \mu_0 N \cdot i / l = L \cdot i \rightarrow L = \mu_0 \pi r^2 N^2 / l$$



Auto-indutância (2)

Um condutor apresenta sempre uma auto-indutância. A auto-indutância opõe-se as variações de corrente. Nos circuitos com indutâncias tem que se aplicar a lei de Faraday, uma vez que a lei das malhas de Kirchhoff não é válida. Ver: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Faraday'sLaw-lecsup41.pdf>.



$$V_{ab} = iR$$

(a)



$$V_{ab} = \frac{di}{dt} L$$

(b)

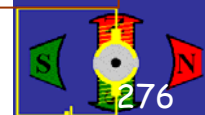
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Numa resistência o campo eléctrico aponta sempre na direcção da corrente, e, portanto, no caso da figura ao lado, o potencial diminui de a para b. Contudo, num indutor o sentido da fem induzida depende de taxa temporal da variação da corrente que a percorre. Se a corrente aumenta, a fem induzida é negativa e o potencial diminui de a para b; se a corrente diminui a fem é positiva e o potencial aumenta de a para b.

O campo eléctrico electrostático num indutor é sempre nulo (condutor ideal). A diferença de potencial aos terminais da bobine é dada por:

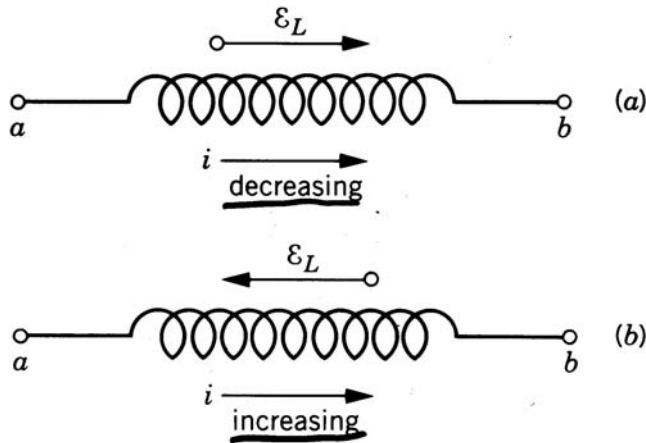
$$V_{ab} = V_a - V_b = L \frac{di}{dt}$$

Ter em atenção que uma auto-indutância não se opõe à própria corrente, mas apenas a qualquer variação na corrente. Este comportamento é muito diferente do comportamento de uma resistência.





Auto-indutância (3)



(a) Uma corrente decrescente induz no condutor uma fem que se opõe à diminuição de corrente.

(b) Uma corrente crescente induz no condutor uma fem que se opõe ao aumento. (Lei de Lenz).

Physics, Halliday, Resnick, and Krane, 4th edition, John Wiley & Sons, Inc. 1992.

O campo eléctrico num indutor é sempre nulo, admitindo que o condutor é ideal. A diferença de potencial aos terminais da bobine é dada por:

$$V_{ab} = V_a - V_b = L \frac{di}{dt}.$$

Ter em atenção que uma auto-indutância não se opõe à própria corrente, mas apenas a variações da corrente. Este comportamento é muito diferente do da resistência.

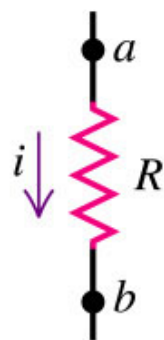
De ora em diante, as correntes cujo valor varia no tempo são representadas por i . As correntes cujo valor é constante são representadas por I .





Energia num campo magnético

Uma resistência é um componente no qual a energia é sempre irreversivelmente dissipada.



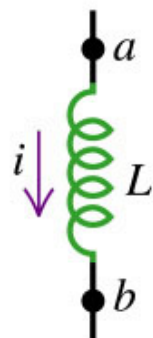
Resistor with current i :
energy is *dissipated*

Power = energy/time

$$P = \Delta V_{ab} i = (i R) i = i^2 R$$

$$U = i^2 R (\text{time})$$

A energia armazenada num indutor quando se estabelece uma corrente pode ser recuperada quando a corrente diminui para zero e o campo magnético \mathbf{B} colapsa.



Inductor with current i :
energy is *stored*

Power = energy/time

$$P = \Delta V_{ab} i = i L \frac{di}{dt}$$

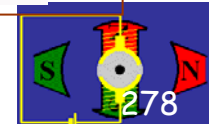
$$dU = L i di$$

$$U = L \int_0^I i di = \frac{1}{2} LI^2$$

Energy density of \mathbf{B} field is

$$u = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

© Wesley.

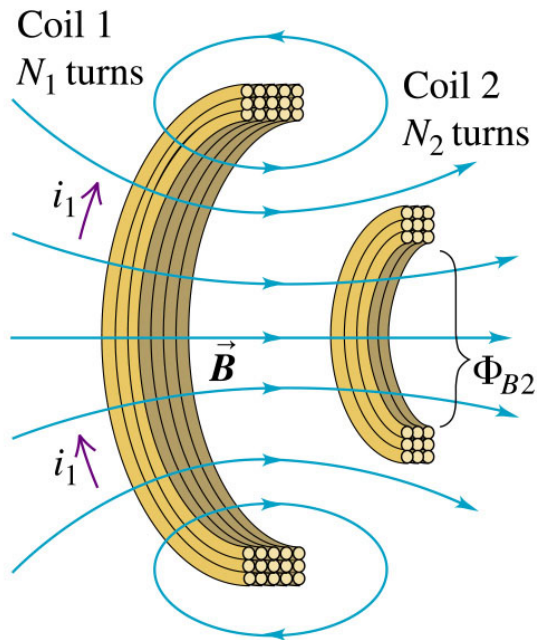




Indutância mutua

Dois fios percorridos por uma corrente estacionária, interagem entre si. A corrente num dos condutores cria um campo magnético que exerce uma força na corrente do segundo condutor e vice versa. Uma interacção adicional ocorre quando a corrente num dos condutores varia.

Considerem-se duas bobinas de fio condutor vizinhas uma da outra.



A corrente i_1 (i_2) na bobina #1 (#2) dá origem a um fluxo através da bobine #2 (#1). Se i_1 (i_2) variar, é induzida uma fem na bobina #2 (#1), de acordo com a lei de Faraday:

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_{B_2}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}$$

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{d\Phi_{B_1}}{dt} = -M \frac{di_2}{dt}$$

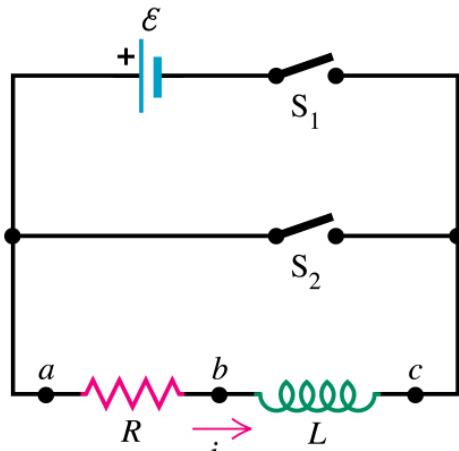
A grandeza M chama-se indutância mutua.

Education, Inc., publishing as Addison Wesley.





Corrente num circuito RL



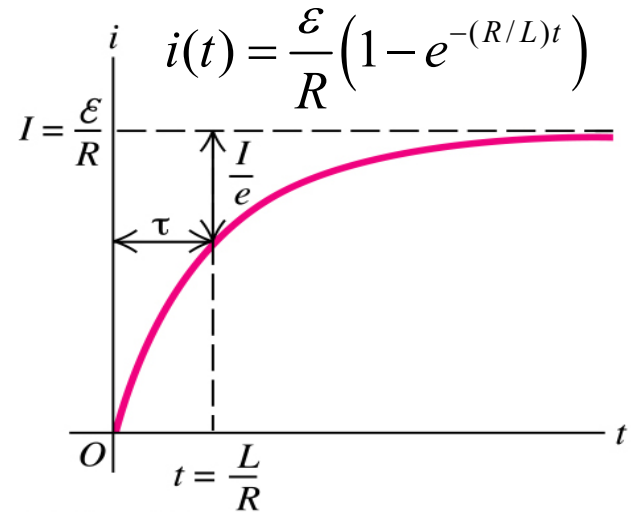
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Quando se fecha S_1 , mantendo S_2 aberto, a corrente através da resistência aumenta gradualmente. A equação das malhas do circuito é:

$$0 + iR - \varepsilon = -L \frac{di}{dt}$$

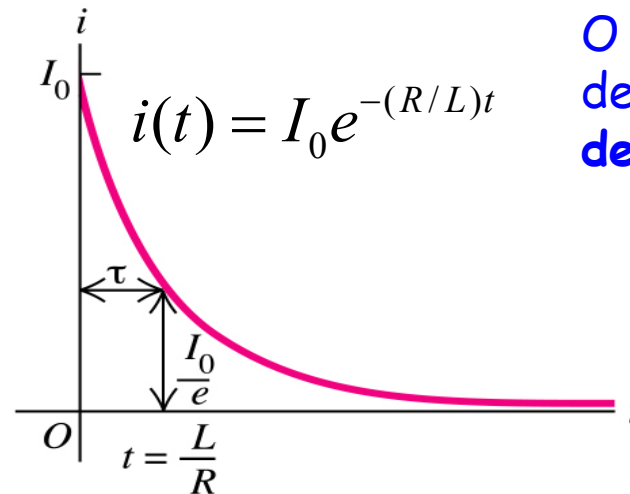
Quando se fecha S_2 , imediatamente após abrir S_1 , a corrente através da resistência diminui gradualmente, até se extinguir. A equação das malhas do circuito é:

$$0 + iR - 0 = -L \frac{di}{dt}$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

O parâmetro $\tau = R/L$ designa-se **constante de tempo do circuito**.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

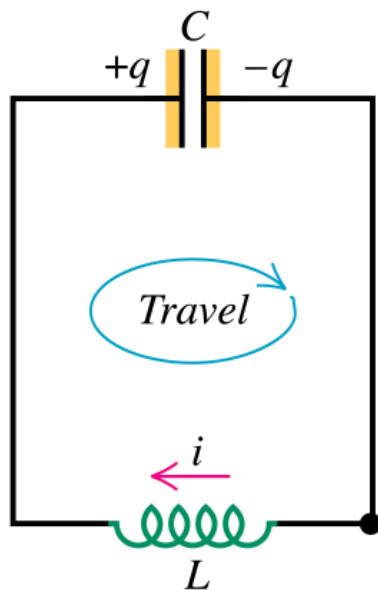
Rever circuitos com condensadores





Oscilações num circuito LC

Num circuito LC, a energia é periodicamente transferida entre o campo eléctrico entre as placas do condensador e o campo magnético no enrolamento da bobine. A transferência de energia ocorre com a frequência ω (radianos/segundo).



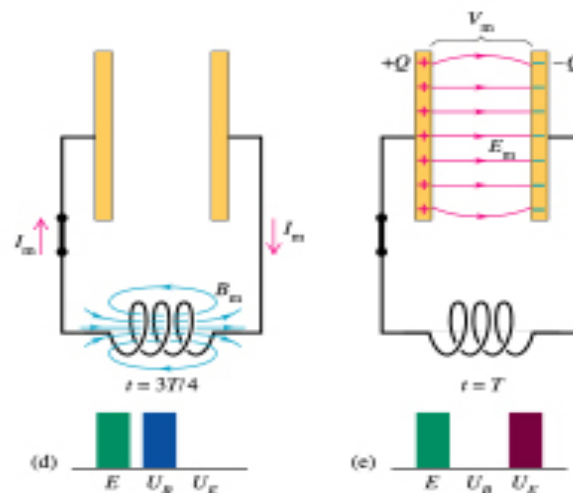
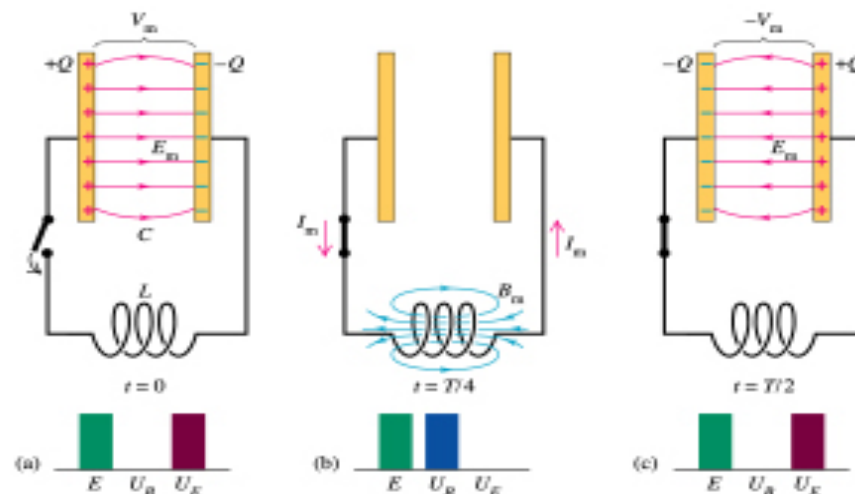
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

A equação das malhas do circuito é:

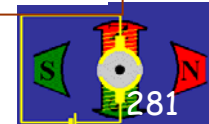
$$0 + \frac{q}{C} = -L \frac{di}{dt}$$

A solução é do tipo: $q(t) = Q_0 \cos(\omega t)$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

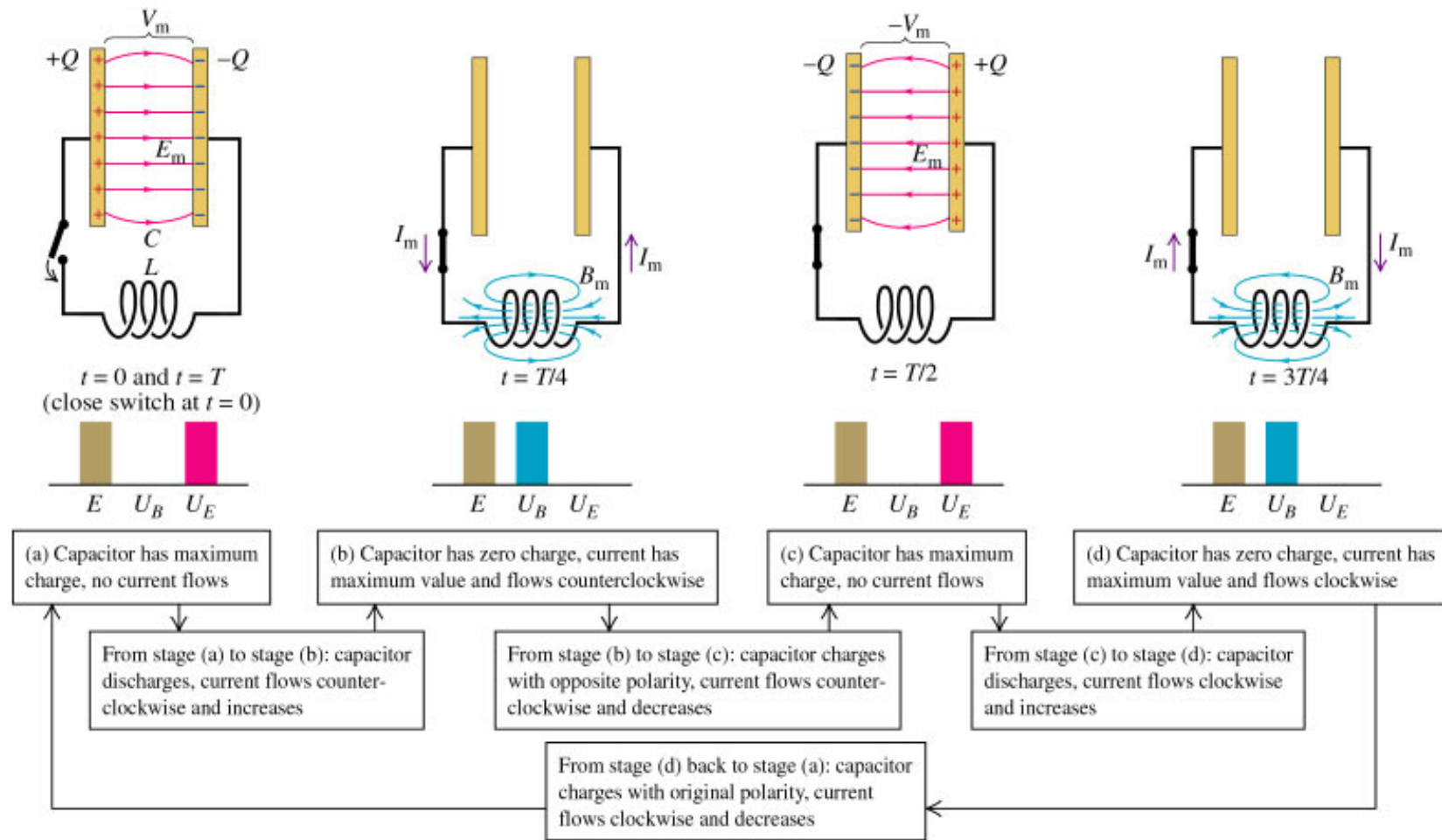


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

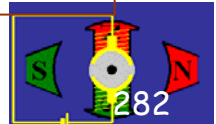




Oscilações num circuito LC

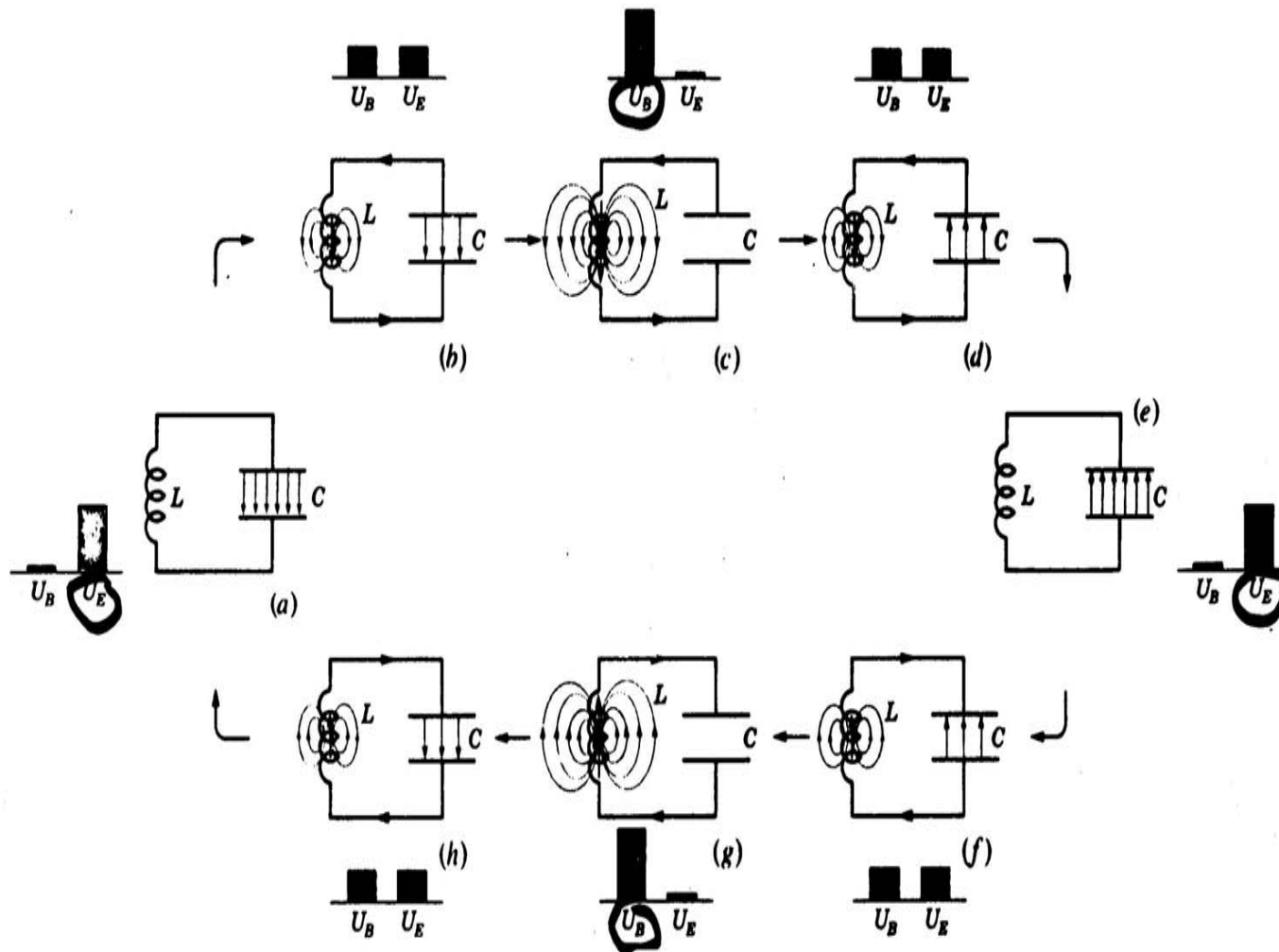


A energia é transferida entre o campo eléctrico entre as placas do condensador e o campo magnético no enrolamento da bobine.





Transferências de energia num circuito LC



c. *Physics*, Halliday, Resnick, and Krane, 4th edition, John Wiley & Sons, Inc. 1992.



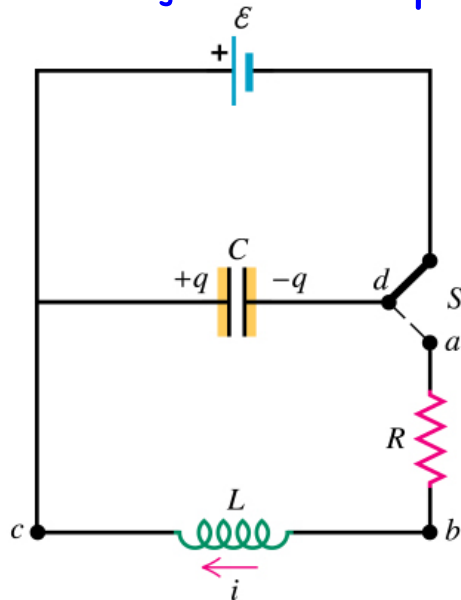


Circuito RLC série

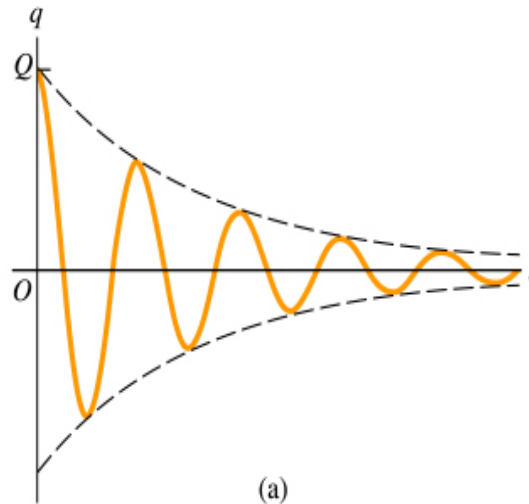
Considere o circuito abaixo. Inicialmente o interruptor está na posição d, conectando a fonte de tensão ao condensador. Após o condensador "estar carregado", o interruptor muda para a posição a, ligando o contacto a ao contacto d.

A equação das malhas do circuito é: $0 + iR + \frac{q}{C} = -L \frac{di}{dt}$

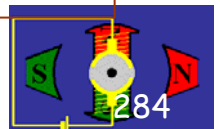
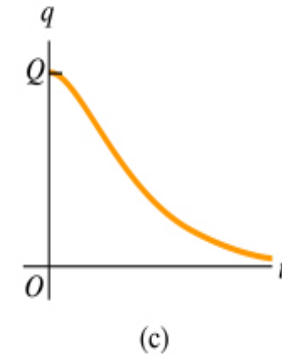
A solução é do tipo: $q(t) = Qe^{-(R/2L)t} \cos(\omega t)$ $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Corrente alternada (ac, ca)

Nos finais do século 19 foi marcado por um intenso debate entre os inventores de dois métodos de distribuir energia eléctrica. Thomas Adison, favorável ao método que usava corrente contínua, e George Westinghouse que defendia o método que empregava corrente alternada, com correntes e tensões variando sinusoidalmente. A opinião de Westinghouse prevaleceu, e hoje as sociedades são "alimentados" usando corrente alternada. Uma corrente alternada é uma corrente eléctrica cujo sentido se inverte periodicamente, cujo valor médio durante um período é nulo e que passa através do seu ciclo de valores uma vez em cada período. A distribuição de energia eléctrica na forma de corrente alternada apresenta a vantagem de poder ser distribuída usando tensões muito elevadas e correntes muito pequenas, minimizando as perdas por efeito de Joule (Ri^2), tirando partido dos transformadores.

Um gerador de corrente alternada representa-se pelo símbolo: 

A tensão sinusoidal é descrita como $v(t) = V \cos \omega t$. Na Europa a tensão tem amplitude e a frequência linear ~ 311 V e 50 Hz, respectivamente. Nos Estado Unidos e Canada são ~ 160 V e 60 Hz, respectivamente. Da mesma forma, a corrente pode ser descrita como: $i(t) = I \cos \omega t$.

Ver + em http://w3.ualg.pt/~jlongras/Notas_IE1_2006-07.pdf, página 43.





Transformadores: Simbologia

Transformador: (electr.) aparelho cujo objectivo é transferir energia eléctrica, em corrente alternada, ca, de um circuito de baixa tensão para outro de alta tensão, ou vice-versa. (De transformar + -dor).

Transformador com núcleo de ar		
Transformador com núcleo de ferrite		
Transformador com núcleo de ferro		



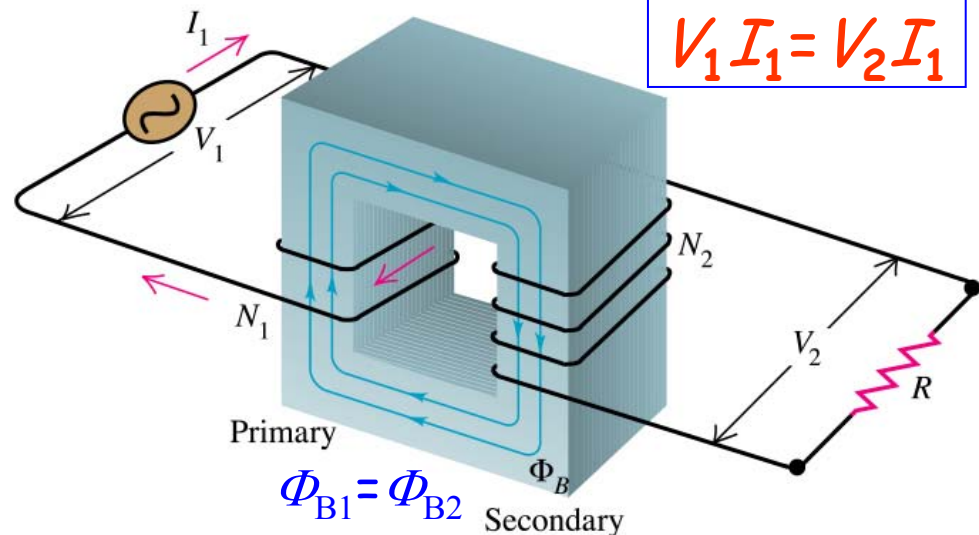
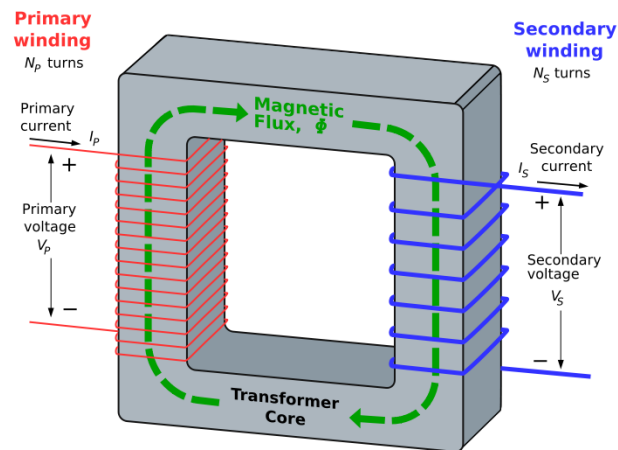
Transformador

Uma fonte de tensão ac de amplitude V_1 , produz uma corrente I_1 que provoca um campo magnético no enrolamento N_1 e no enrolamento N_2 . Assume-se que todas as linhas de campo magnético estão confinadas ao núcleo de ferro, e, portanto, o fluxo magnético é o mesmo para todas as espiras. A fem induzida no enrolamento N_1 é: $\varepsilon_1 = -N_1 d\Phi_B / dt$. A fem induzida no enrolamento N_2 é: $\varepsilon_2 = -N_2 d\Phi_B / dt$. A razão entre as duas fem induzidas é:

$$\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = N_2 / N_1$$

Uma vez que se considere nula a resistência dos fios a potencia fornecida pela fonte ao primário iguala a potencia retirada do secundário. Assim, tem-se:

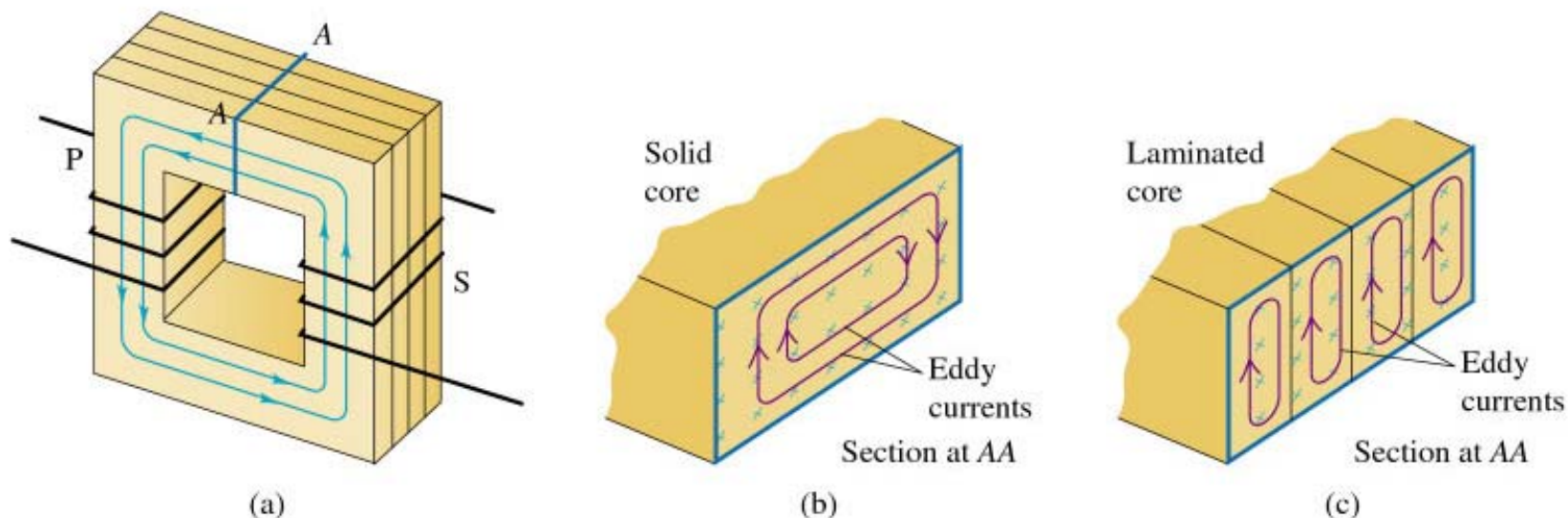
$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$





Correntes de Foucault num transformador

Transformadores com núcleos maciço e transformadores com núcleos laminados.



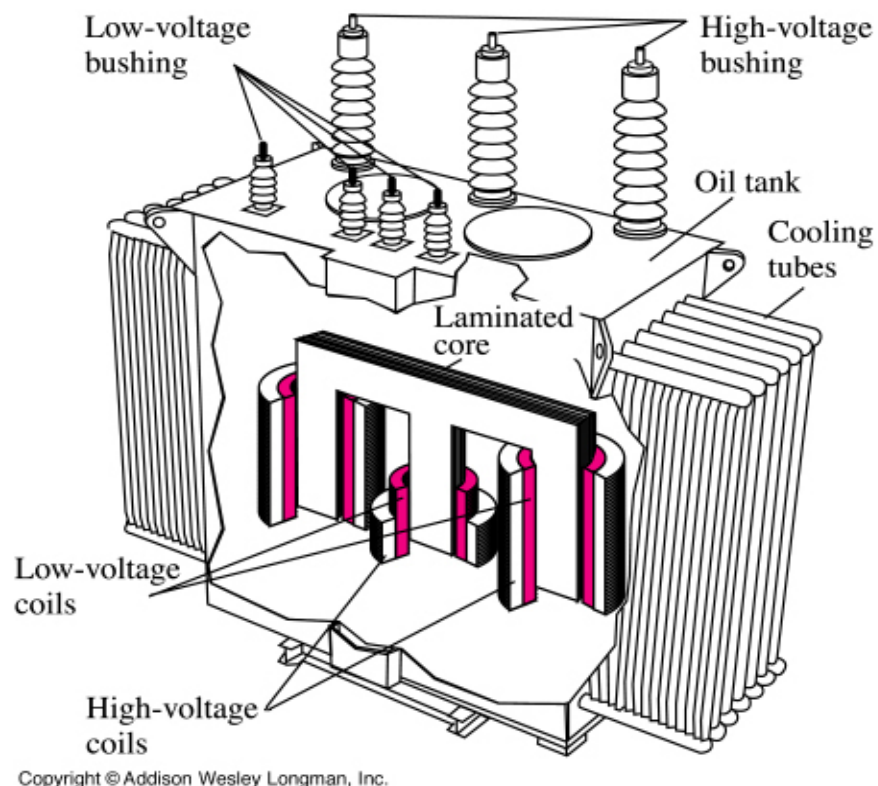
A Fig. (a) mostra os enrolamentos primário e secundário de um transformador. Na Fig. (b) indicam-se as correntes de Foucault na secção recta AA do núcleo de ferro. A Fig. (c) mostra uma secção recta de um núcleo laminado. O uso de núcleos laminados reduz as correntes de Foucault.

Actualmente consegue-se fabricar transformadores com eficiências superiores a 90%, podendo atingir 99%.





Transformadores industriais



Os transformadores usados nas centrais de produção de energia são imersos em tanques de óleo para isolamento e arrefecimento. Os enrolamentos de baixa tensão, os enrolamentos de alta tensão e o núcleo de ferro são mantidos muito próximos para diminuir a dissipação e reduzir os custos de material.





Rectificação de onda completa

Rectificar é converter (uma corrente alternada, ca) em contínua (dc, cc).

É possível transformar uma tensão alternada numa tensão contínua usando uma ponte de díodos (ver figura ao lado). Um diodo semiconductor (D) é um dispositivo que só deixa passar corrente num sentido.

Por exemplo, o adaptador ac/dc de um portátil, converte a corrente ac em corrente dc, reduzindo a tensão.

O valor quadrático médio ou valor eficaz (rms) de uma corrente/tensão alternada **sinusoidal** é:

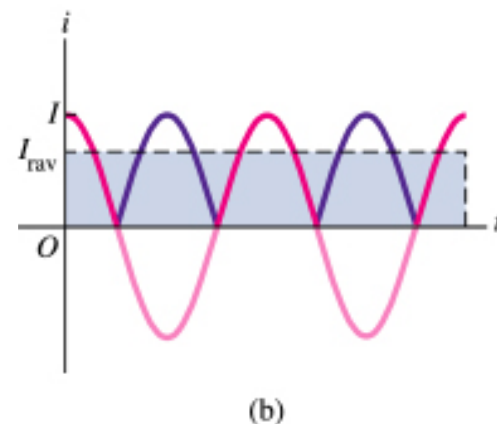
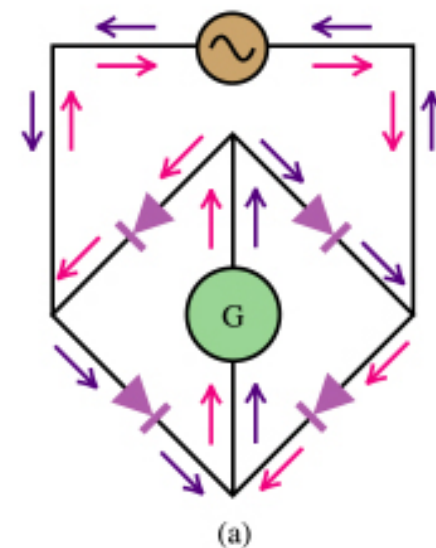
$$I_{\text{rms}} = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

rms: root mean square (valor quadrático médio ou valor eficaz)

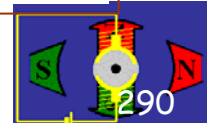
$$V_{\text{rms}} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

Ver + em

http://w3.ualg.pt/~jlongras/Guias_Lab_IE1-2006-07.pdf, página 23.



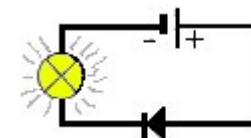
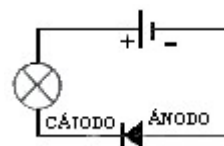
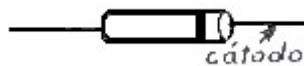
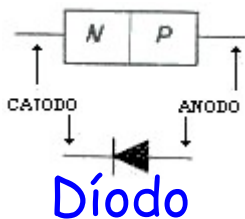
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



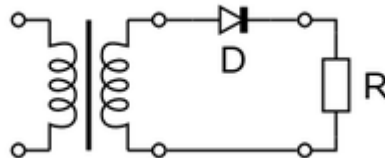
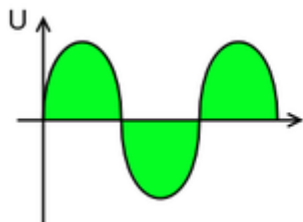


Rectificação de meia onda e onda completa

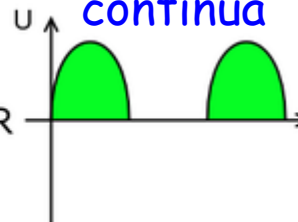
Um díodo semiconductor (D) é um dispositivo que só deixa passar corrente num sentido.



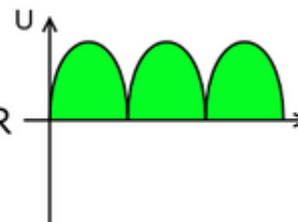
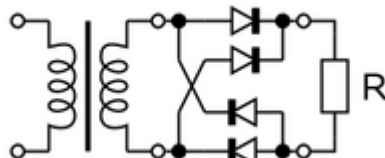
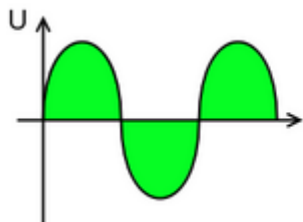
Tensão alternada



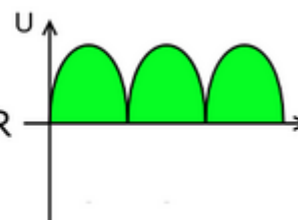
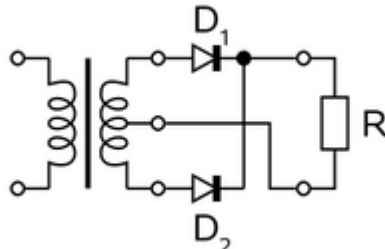
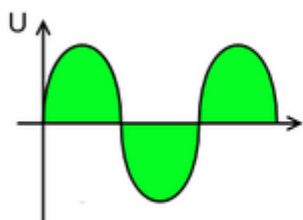
Tensão contínua



Rectificação de meia onda



Rectificação onda completa



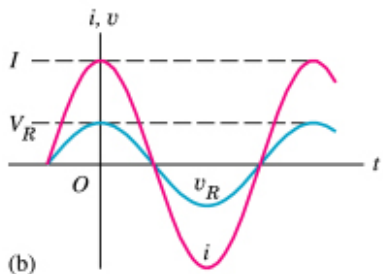
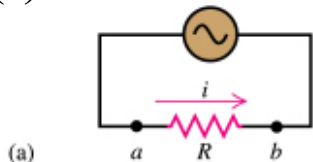
Rectificação onda completa



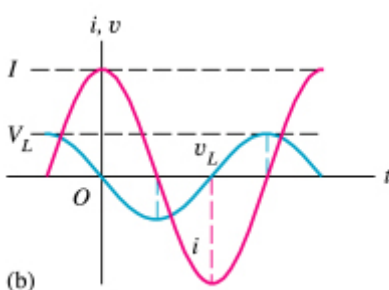
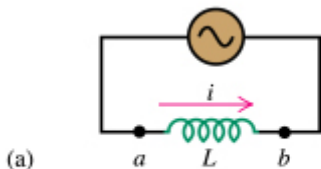


Exemplos de circuitos de corrente alternada

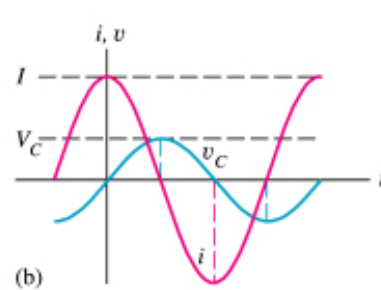
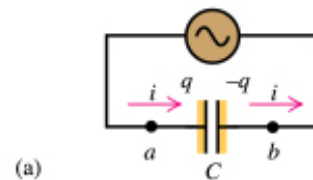
$$i(t) = I \cos \omega t.$$



$$v_R(t) = RI \cos \omega t.$$

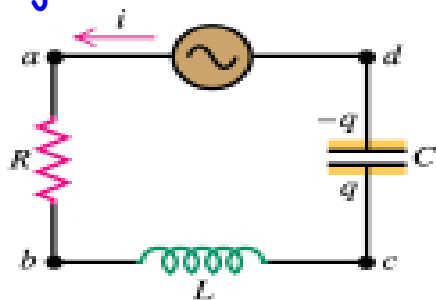


$$v_L(t) = \omega L \cos(\omega t + \pi/2).$$



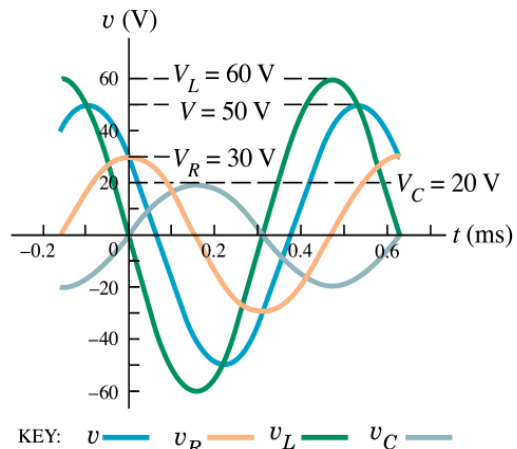
$$v_C(t) = (\omega C)^{-1} \cos(\omega t - \pi/2).$$

Seja o circuito RLC abaixo:



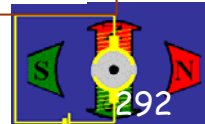
Com $R=300 \Omega$, $L=60 \text{ mH}$;
 $C=0.5 \mu\text{F}$, $V=50 \text{ V}$ e $\omega=10 \text{ krad/s}$

Num circuito de ca existe, em geral, uma diferença de fase entre as corrente e as tensões aos terminais de cada um dos componentes:



KEY: v — v_R — v_L — v_C

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Potencia em corrente alternada

A potência instantânea fornecida a um componente é $p=vi$. Em corrente alternada a potência média depende das amplitudes da tensão e da corrente e também da diferença de fase entre a corrente e a tensão. Em corrente alternada, a potência exprime-se em **kilovolt-ampere** (s. m. (fís.) unidade utilizada para medir a potência aparente em circuitos de corrente alterna, que é igual à potência aparente de um circuito capaz de fornecer ou receber uma corrente de 1 ampere na tensão de 1000 volts (símbolo kVA)).

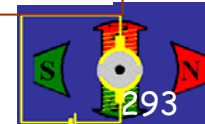
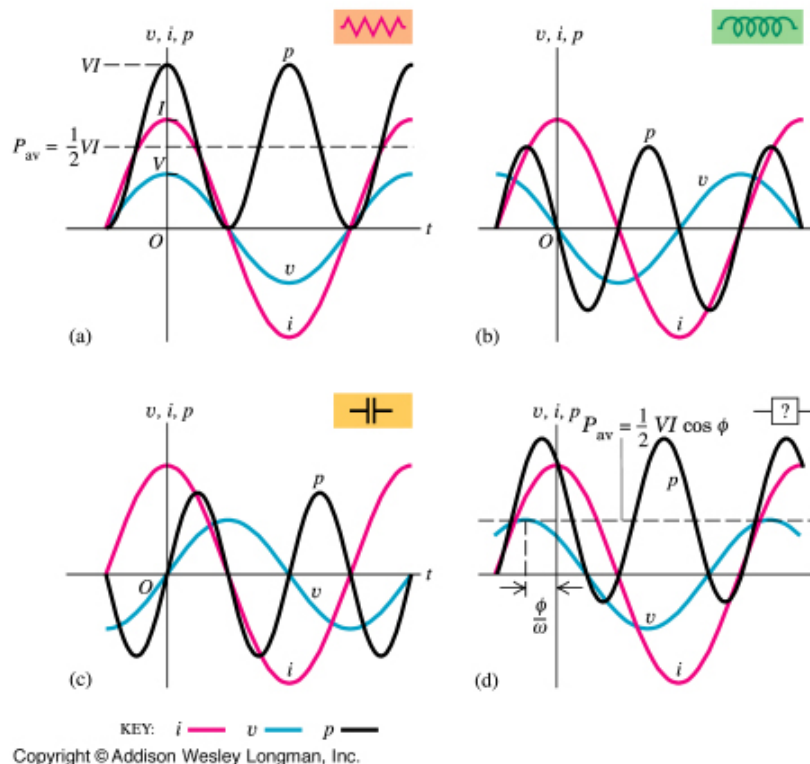
$$i = I \cos \omega t$$

$$v = V \cos(\omega t + \phi)$$

$$P_{av} = \frac{1}{2} VI \cos \phi$$

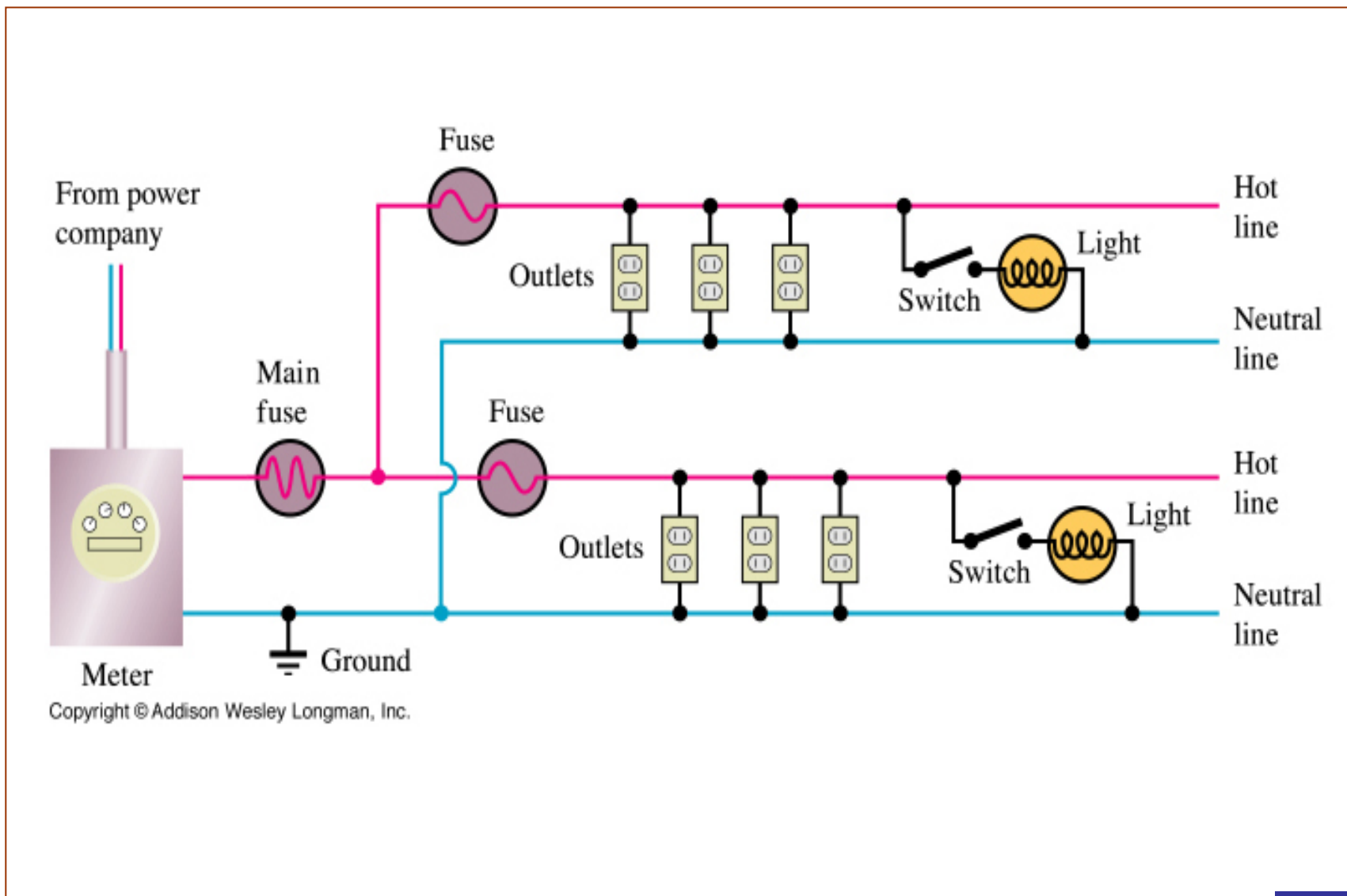
$$= V_{rms} I_{rms} \cos \phi$$

O factor $\cos\phi$ chama-se **factor de potência do circuito**. Para uma resistência pura $\cos\phi=1$; para condensadores ou bobines, $\cos\phi=0$. **É desejável que um circuito tenha $\cos\phi\sim 1$.**





Rede eléctrica doméstica

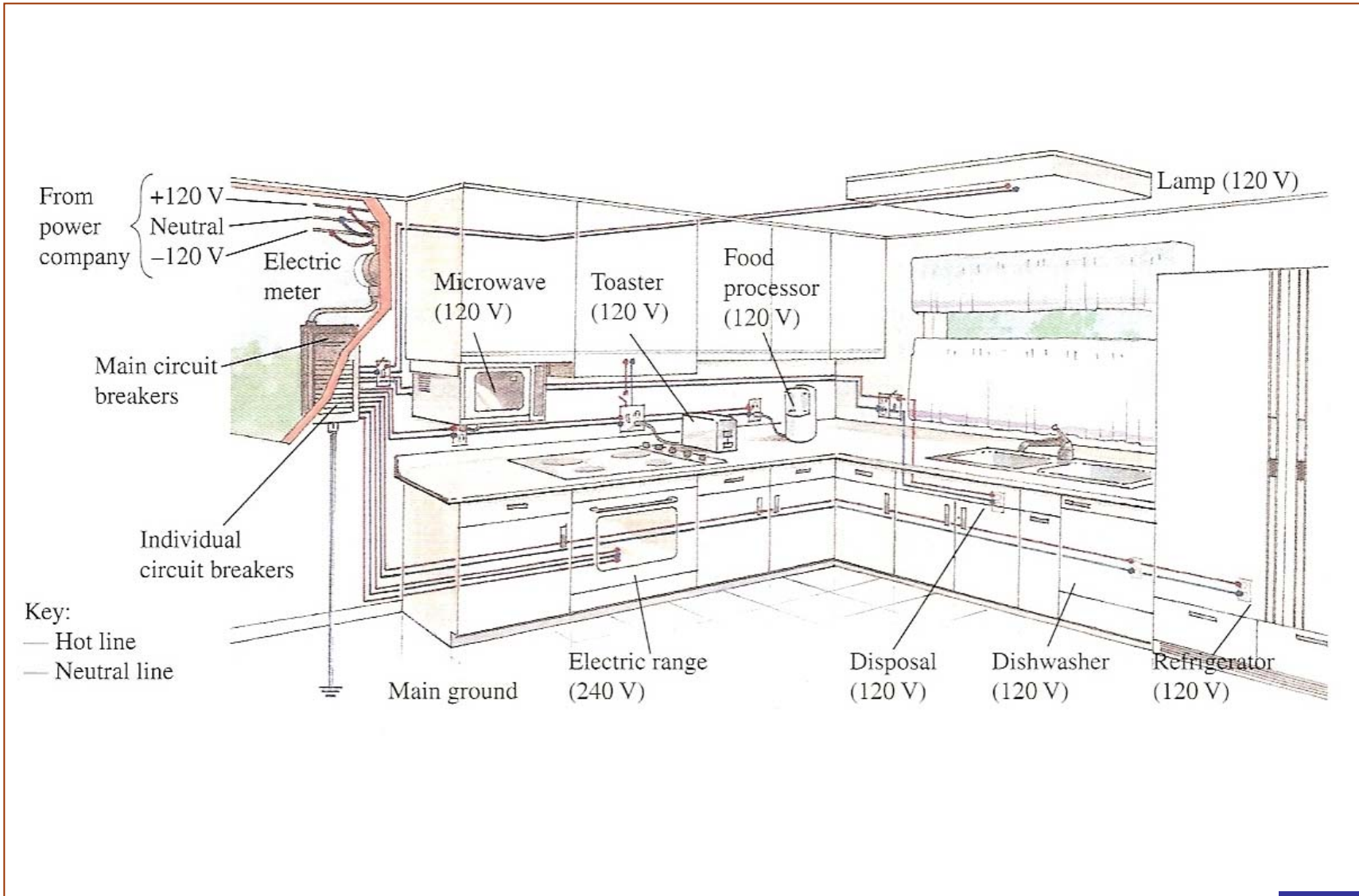


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Rede eléctrica de uma cozinha





Consumo de electricidade

Factura N.º [redacted] de 08 de Abril de 2008 (2008-02-12 a 2008-04-08)

Electricidade

Qtd

Tarifa BTN-Simples 3,45 até 20,7 kVA

Consumo estimado

24

Potencia Contratada (3,45 kVA)

Taxa Exploração DGGE

IVA (5 % * 39,62)

Total

Outros Débitos/Créditos

Qtd

Contribuição áudio-visual (Nota de Débito n.º

IVA (5%* 3.42)

Total

Total do mês

Parcela relativa ao acesso às redes, sem IVA: € 22,86 (valor independente do fornecedor de



Ver, por exemplo:

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

<http://en.wikipedia.org/wiki/Volt-ampere>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Volt-ampere>

http://en.wikipedia.org/wiki/Volt-amperes_reactive





Equações de Maxwell e ondas electromagnéticas



Equações de Maxwell





A teoria de Maxwell do campo electromagnético

Em 1865, James Maxwell demonstrou que a electricidade e o magnetismo têm uma relação tão estreita que frequentemente actuam em conjunto, isto é, os campos eléctrico e magnético em certas condições dão origem uma *nova* interacção que ele designou por **acção electromagnética**, e que é completamente caracterizada por 4 equações, as famosas equações de Maxwell do electromagnetismo.

Uma equação é conhecida por lei de Gauss para o campo eléctrico, e estabelece que as linhas do campo eléctrico divergem das cargas positivas e convergem nas cargas negativas - esta lei corresponde a uma forma mais geral da lei de Coulomb;

Outra equação corresponde à lei de Faraday para a indução, e define que campos magnéticos variáveis induzem campos eléctricos cujas linhas de campo circulam em torno de campos magnéticos variáveis;

Uma terceira equação estabelece que as linhas de campo magnético são sempre curvas fechadas, nunca convergindo nem divergindo - lei de Gauss para o campo magnético;





Lei Ampère-Maxwell

As leis de Gauss para os campos eléctrico e magnético, e a lei de Faraday que estudamos não oferecem discussão. Até ao momento não foram infirmadas pela experiência ou por quaisquer fenómenos.

A quarta equação, lei de Ampère-(Maxwell), corresponde a um momento de inspiração notável, como há pouco em ciência, uma vez que Maxwell percebeu que os resultados experimentais conhecidos levariam ao estabelecimento de uma lei de Ampère incompleta, *determinando* apenas que os campos magnéticos circulam em torno de correntes eléctricas ($\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$).

De facto, cargas em movimento não são a única fonte possível de um campo magnético. Por exemplo, na carga/descarga de um condensador cria-se um campo magnético \mathbf{B} , não nulo, entre as armaduras, indiscernível do campo circundante, apesar da corrente através do condensador ser nula.

Maxwell intuiu que a Natureza não permite **descontinuidades** e tem tendência a privilegiar a **simetria**, propondo que **se** os campos magnéticos variáveis induzem campos eléctricos, também os campos eléctricos variáveis deverão induzir campos magnéticos.





Ainda falta um bocadinho para termos as 4 equações de Maxwell

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \quad (29.18)$$

(Gauss's law for \vec{E} fields)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (29.19)$$

(Gauss's law for \vec{B} fields)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{\text{encl}} \quad (29.20)$$

(Ampere's law including displacement current) ***Ainda não conhecemos a origem deste termo.**

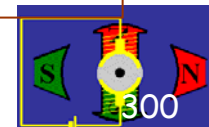
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (29.21)$$

(Faraday's law)

© 2004 Pearson Educational / Addison Wesley

Para obter a forma final da lei de Ampère, Maxwell acrescentou um termo extra à versão experimental ($\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$), a **corrente de deslocamento**, postulando que os campos magnéticos também circulam em torno de campos eléctricos variáveis. Este fenómeno ocorre, por exemplo, quando se carrega um condensador, com a criação de um campo magnético entre as placas do condensador.

A generalização da lei de Ampère permitirá concluir que um campo eléctrico \vec{E} variável está sempre associado a um campo magnético \vec{B} . Esta alteração vai revelar aspectos profundos e fundamentais do comportamento dos campos eléctrico \vec{E} e magnético \vec{B} .

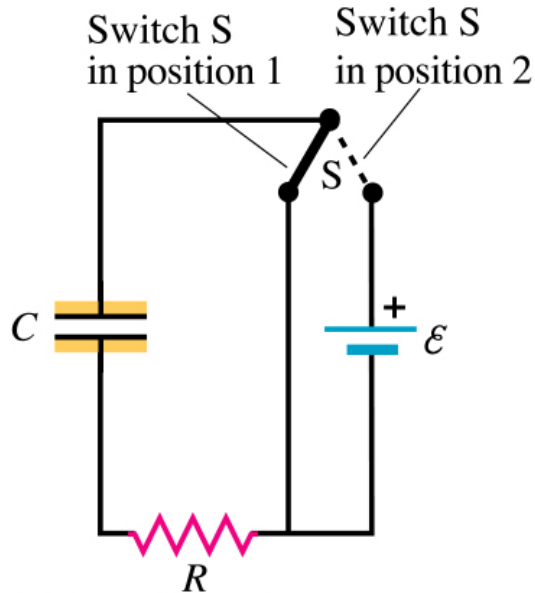




Rever carga e descarga de um condensador

O circuito RC abaixo pode ser usado para carregar e descarregar um condensador (através de uma resistência).

Descarga: carga:



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

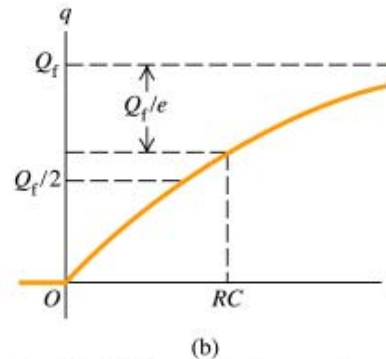
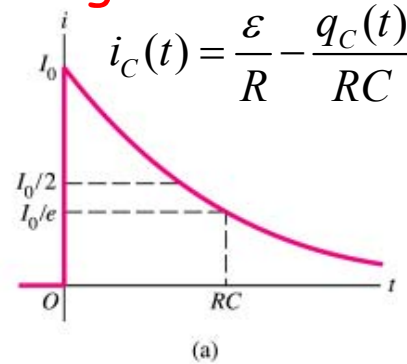
Carga

$$\varepsilon - i(t)R - \frac{q(t)}{C} = 0 \quad \text{ou} \quad \varepsilon - R \frac{dq(t)}{dt} - \frac{q(t)}{C} = 0$$

Solução do tipo: $q_C(t) = Q_0(1 - e^{-t/\tau})$, $\tau = RC$

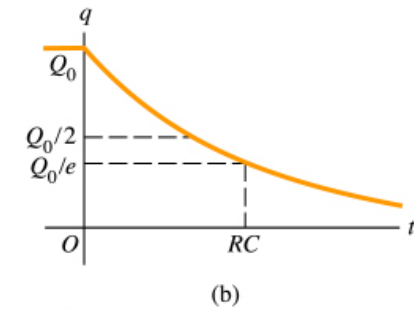
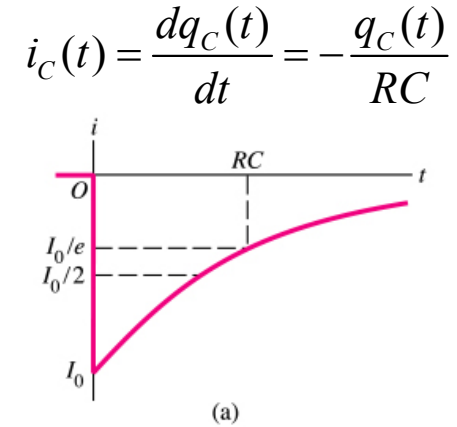
© 2004 Pearson Educational / Addison Wesley

Carga:



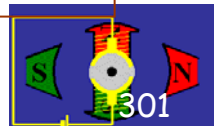
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Descarga:



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Constante de tempo do circuito $\tau = RC$





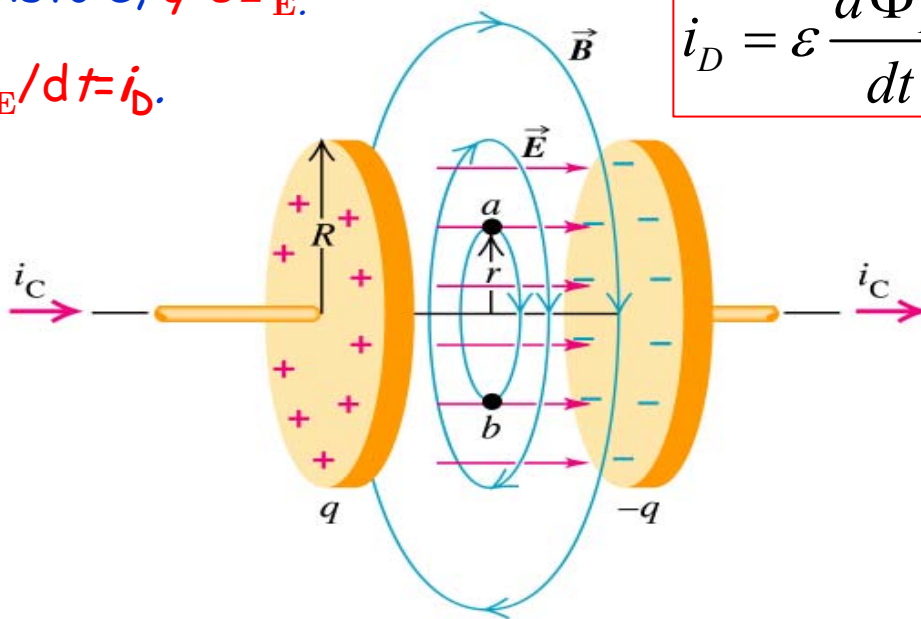
Corrente de deslocamento

Num condensador em carga existe uma **corrente de deslocamento** na região entre as placas $i_D = \epsilon A dE/dt$, igual à corrente de carga i_C . Esta variação do campo eléctrico \mathbf{E} entre as placas pode ser vista como uma fonte de campo magnético entre as placas.

Tendo em conta que $C = \epsilon A/d$ e $\Delta V = Ed$, pode-se escrever $q = CV$ como $q = (\epsilon A/d)(Ed) = \epsilon EA$, isto é, $q = \epsilon \Phi_E$.

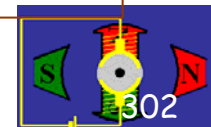
Porém, $i_C = dq/dt = \epsilon AdE/dt = \epsilon d\Phi_E/dt = i_D$.

Verifica-se, assim, que um campo eléctrico variável pode induzir um campo magnético, e, de acordo com a lei de Faraday, um campo magnético variável pode produzir um campo eléctrico, e, portanto, uma fem.



$$i_D = \epsilon \frac{d\Phi_E}{dt}$$

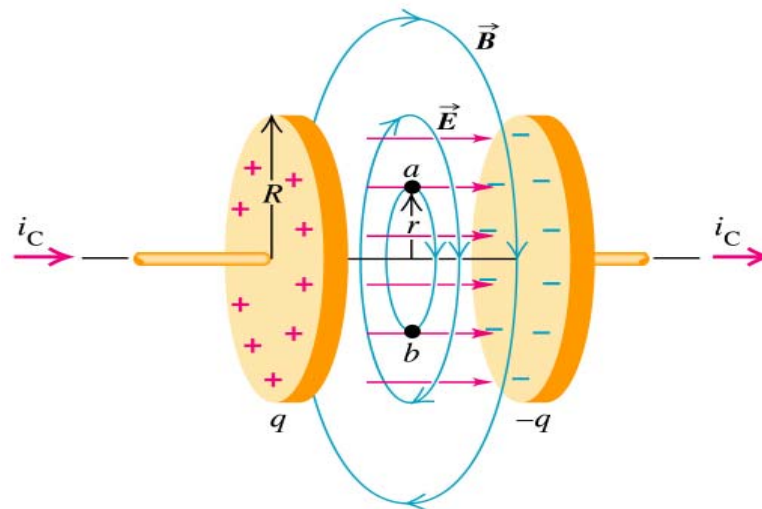
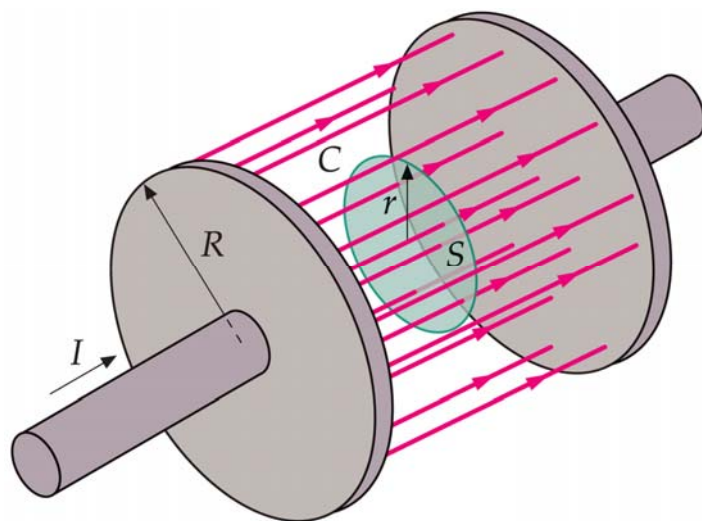
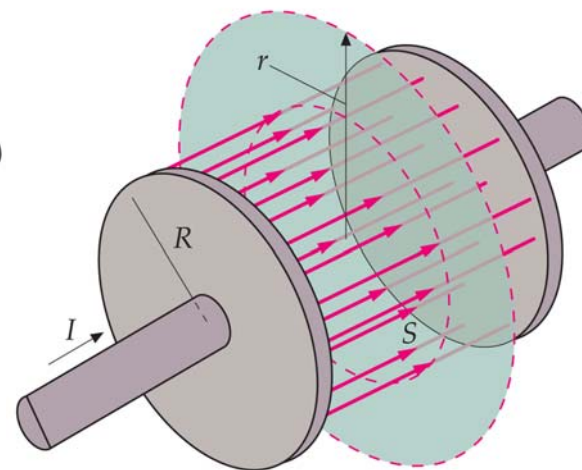
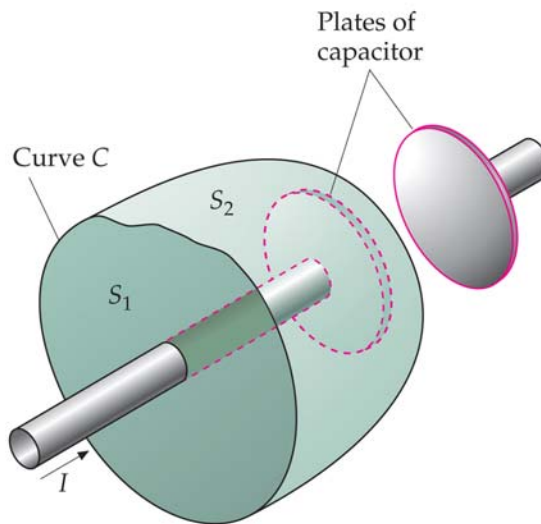
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



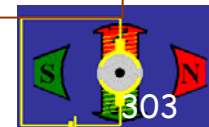


Nova lei de Ampère

$$\oint_{CL} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \iint_A \left(\vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Campo magnético entre as placas de um condensador

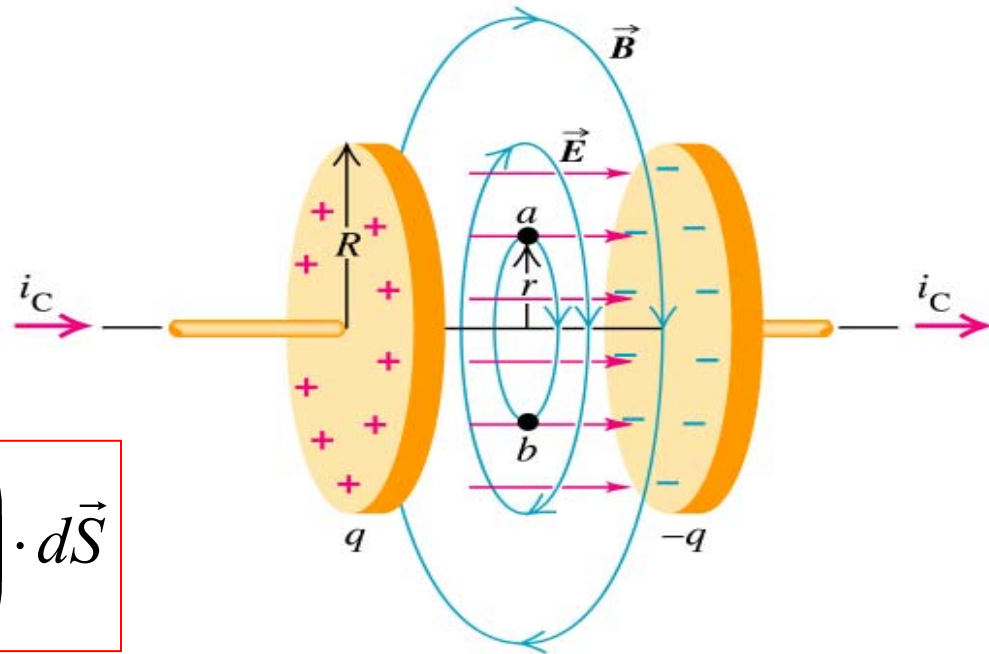
$$E = \frac{\sigma_{free}}{\epsilon} = \frac{Q_{free}}{A\epsilon} : \frac{dE}{dt} = \frac{1}{A\epsilon} \frac{dQ_{free}}{dt} \rightarrow i_D = \frac{dQ_{free}}{dt} = A\epsilon \frac{dE}{dt} = \epsilon \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$\oint_{CL} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{S} = \mu I_{encl} :$$

$$r < R : B2\pi r = \mu \frac{\pi r^2}{\pi R^2} i_D = \mu \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \pi R^2 \epsilon \frac{dE}{dt} = \mu \pi r^2 \epsilon \frac{dE}{dt} \rightarrow B(r) = \mu \epsilon \frac{dE}{dt} \frac{r}{2}$$

$$B(r) = \mu \epsilon \frac{dE}{dt} \frac{r}{2} \quad (r < R)$$

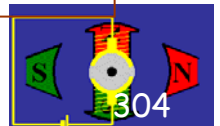
$$B(r) = \mu \epsilon \frac{dE}{dt} \frac{R^2}{2r} \quad (r > R)$$



Lei de Ampère-Maxwell

$$\oint_{CL} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \iint_A \left(\vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.





Equação de Maxwell nas formas integral e local

Em meios uniformes (homogéneos), isotrópicos e lineares e não dispersivos

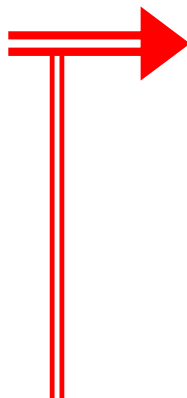
No sistema de unidade SI

$$\oiint_A \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon} \iiint_V \rho dV$$

$$\oiint_A \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \iint_A \left(\vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$



No sistema de unidade SI

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

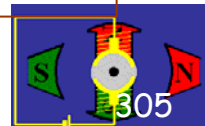
Teorema de Gauss

$$\vec{F} = \vec{f}(x, y, z): \oiint_A \vec{F} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \nabla \cdot \vec{F} dV$$

Teorema de Stokes

$$\oint_C \vec{F} \cdot d\vec{l} = \iint_A \nabla \times \vec{F} \cdot d\vec{S}$$

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Maxwells%20Equations.wmv>



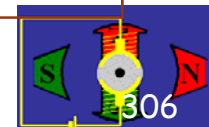


Equações de Maxwell e ondas electromagnéticas

•

Ondas electromagnéticas

Onda: (fís.) perturbação, contínua ou transitória, que se propaga com transporte de energia através de um meio, quer em virtude das propriedades elásticas e de inércia do meio, quer em virtude das propriedades eléctricas ou magnéticas do espaço; **~s curtas:** ondas de comprimento entre 10 e 50 metros; **~s hertzianas:** ondas electromagnéticas de comprimento superior ao das radiações infravermelhas; **~s longas:** ondas de comprimento maior que 1000 metros; **~s médias:** ondas de comprimento entre 200 e 500 metros; **~s ultracurtas:** ondas de comprimento de 1 a 10 metros; **comprimento de ~:** a distância ou espaço de propagação, durante um período, num fenómeno ondulatório; **número de ~:** (fís.) número de ondas por unidade de comprimento, expresso pelo recíproco do comprimento de onda; **superfície de ~:** o lugar geométrico dos pontos com a mesma fase num fenómeno ondulatório.





Equações de onda da onda electromagnética

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}, \text{ com } \nabla^2 = (\nabla \cdot \nabla)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

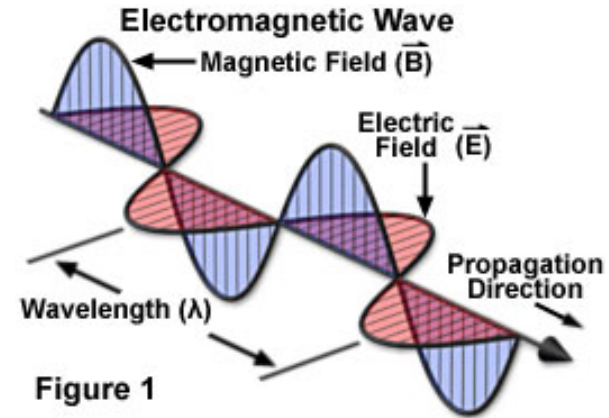
$$\nabla^2 \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

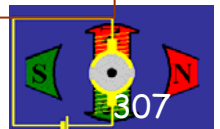
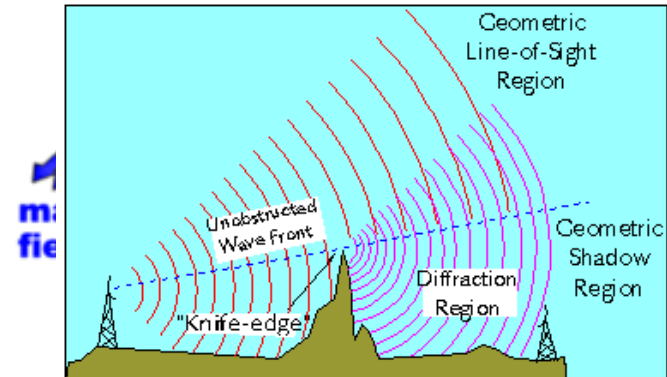
A velocidade da luz no vácuo é de 300 000 km/s;



A partir das equações de onda para **E** e **B** Maxwell concluiu que a luz deveria ser um fenómeno electromagnético, porque a velocidade das OEM coincide com a velocidade da luz.



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





Velocidade da luz

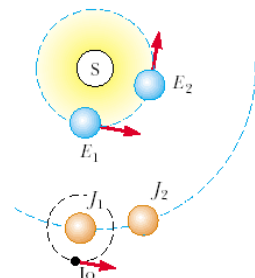
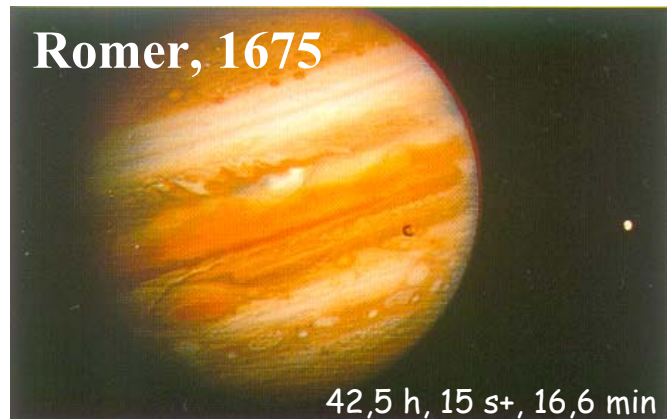
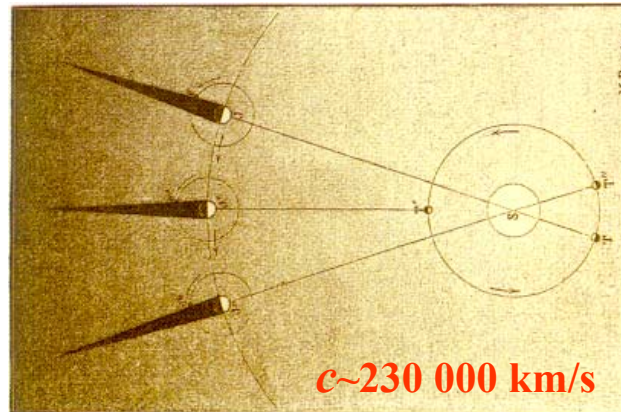


Figure 35.1 Roemer's method for measuring the speed of light. In the time interval during which the Earth travels 90° around the Sun (three months), Jupiter travels only about 7.5° (drawing not to scale).



Fizeau's Method

1849

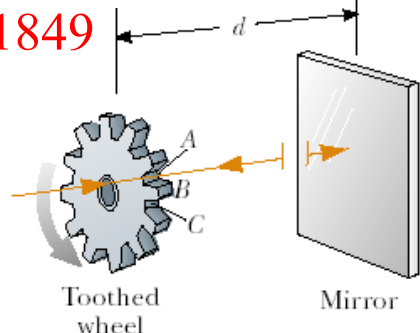


Figure 35.2 Fizeau's method for measuring the speed of light using a rotating toothed wheel. The light source is considered to be at the location of the wheel; thus, the distance d is known.

3.1×10^8 m/s

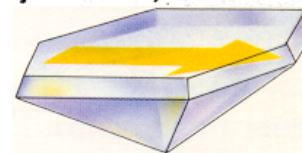
A velocidade da luz no vácuo é de 300 000 km/s; índice de refração do ar 1



A velocidade da luz na água é de 225 000 km/s; índice de refração da água 1,3



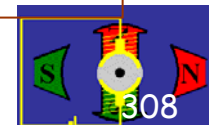
A velocidade da luz no vidro é de 200 000 km/s; índice de refração do vidro 1,5



A luz é uma onda.

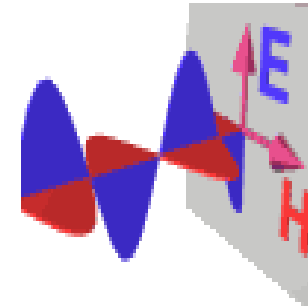
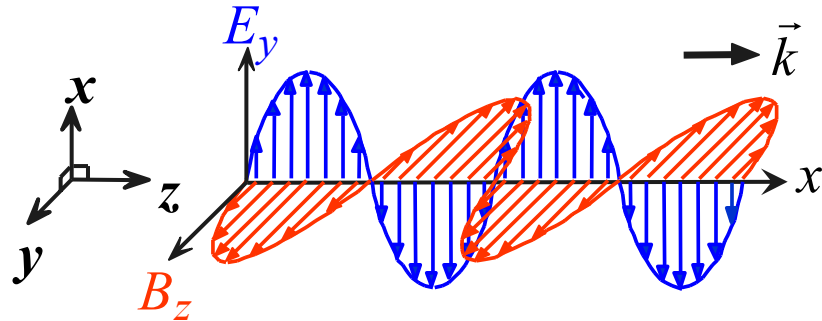
Índice de refração n (de um meio para determinada radiação): razão entre a velocidade da luz no vácuo (que é a mesma para todas as radiações) e a velocidade dessa radiação no meio considerado (e que é variável com a frequência da radiação). (Do lat. refractiōne-«id.»)

Ver também: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Resumos-aulas-de-TR-IFQR.pdf>, páginas 11 e 12 (<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ifqr.html>).





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.

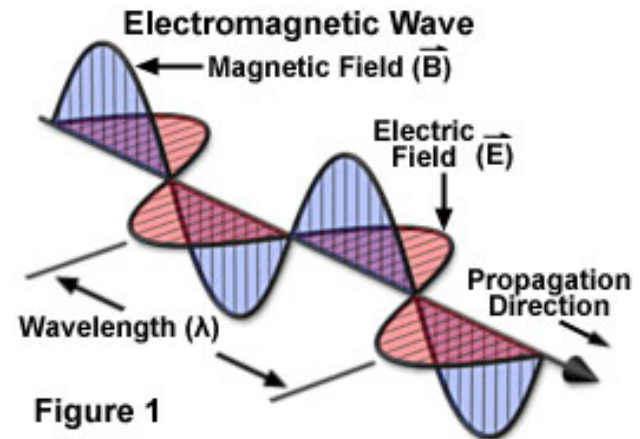
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$c \cong 300\,000$ 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!**

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



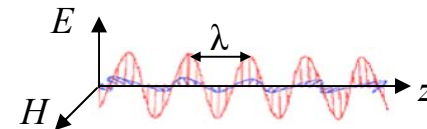


Conceito de onda

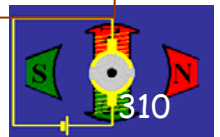
Uma **onda** é uma perturbação, contínua ou transitória, que se propaga com transporte de energia através de um meio, quer em virtude das propriedades elásticas e de inércia do meio, quer em virtude das propriedades eléctricas ou magnéticas do espaço.

A **frequência** (f) da onda corresponde ao número de vezes que a perturbação periódica se repete em cada segundo e apenas depende do processo de geração das ondas (inverso do período T).

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



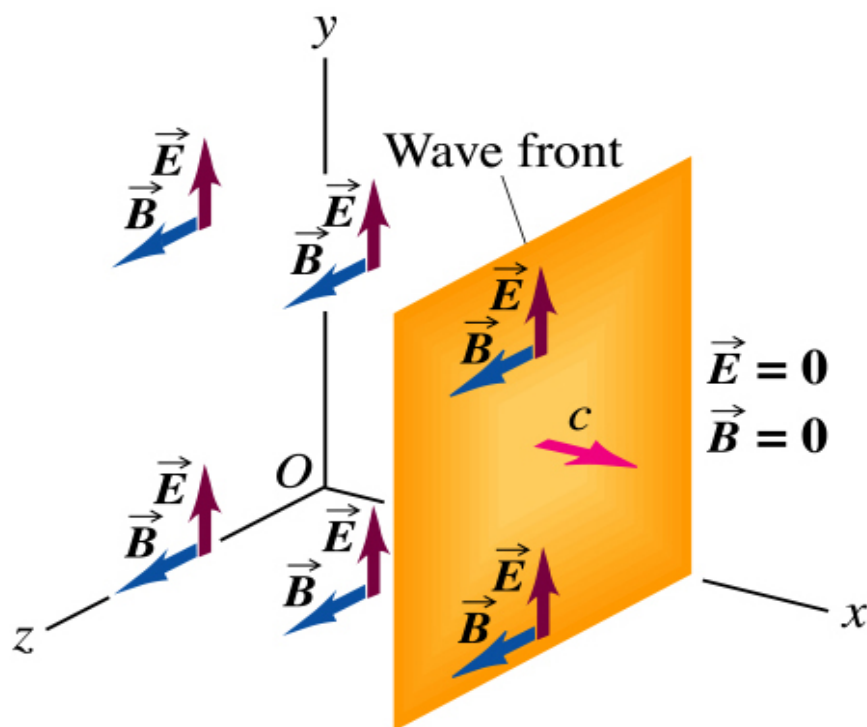
As **velocidades de fase** (v_f) e **de grupo** (v_g) caracterizam as taxas de progresso da onda e da transferência de energia. A v_f , o T , a f , e λ estão relacionados pelas expressões: $v_f = \lambda/T = \lambda f$.





Ondas electromagnéticas planas

Ter em atenção que uma onda plana é uma abstracção matemática. Porém, é muitas vezes usado como primeira aproximação na descrição de ondas electromagnéticas reais.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

A figura representa uma frente de onda de uma onda electromagnética plana.

O plano a amarelo representa a frente de onda que se move para a direita com rapidez c .

Os campos E e B são uniformes em toda a região a montante à frente de onda, e nulos no espaço a jusante à frente de onda.





Ondas electromagnéticas monocromáticas no vácuo

$$\nabla^2 \vec{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{e} \quad \nabla^2 \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

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

Cada uma das componentes do campo electromagnético ($E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z$) é pois solução da equação de onda escalar:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad \Psi = E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z \quad \text{e} \quad v = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$$

Solução geral (ondas planas progressivas):

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega t)$$

$$\vec{B}(x, y, z, t) = \vec{B}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega t), \quad \text{com } k = \frac{2\pi}{\lambda}, v = c = \frac{\omega}{k}, \omega = 2\pi f.$$

$$\text{se } c = \frac{E}{B} = \frac{E_0}{B_0} \left(= \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \right). \quad \vec{k} \equiv \text{vector de onda}, \quad |\vec{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

$$\vec{E} \perp \vec{B}, \vec{E} \perp \vec{k} \quad \text{e} \quad \vec{B} \perp \vec{k}$$

$$\vec{E} \times \vec{B} \propto \vec{k}$$

O vector **k** chama-se vector de onda

E e B diferem apenas de uma constante escalar. Têm a mesma dependência temporal dizem-se em fase em todos os pontos do espaço. Ao conjunto de direcções de oscilação definidas pelo vector campo eléctrico chama-se polarização.





Ondas electromagnéticas planas no vácuo

Seja uma onda plana que se propaga ao longo da direcção do eixo dos x . A intensidade do campo eléctrico é solução da equação de onda para \vec{E} , em que \vec{E} é constante sobre cada um dos (infinitos) planos perpendiculares ao eixo dos x , sendo da forma:

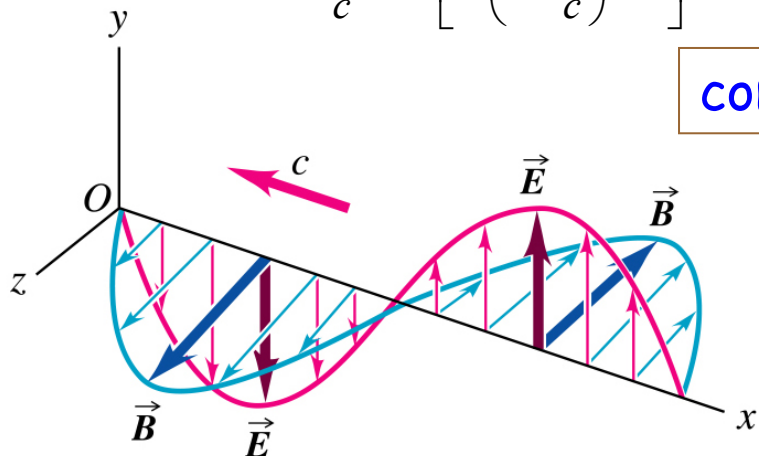
$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_y \hat{y} = E_{0y} \hat{y} \cos \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \theta \right]$$

$$\vec{B}(x, y, z, t) = B_z \hat{z} = - \int \frac{\partial E_y}{\partial x} dt = - \frac{E_{0y} \omega}{c} \int \sin \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \theta \right] dt$$

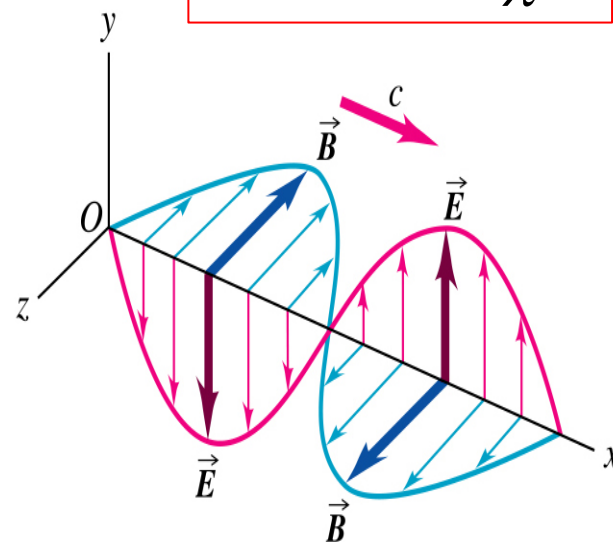
$$\vec{B}(x, y, z, t) = B_z \hat{z} = \frac{E_{0y}}{c} \cos \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \theta \right]$$

com $E_y = cB_z$

$\vec{B} \perp \vec{E}$
 $\vec{E} \times \vec{B} // \vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{x}$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Ao conjunto de direcções de oscilação definidas pelo vector campo eléctrico chama-se **polarização** (ver adiante, cap. 12).





Ondas Electromagnéticas

-

Polarização e polarizadores

Polarização: s. f. acto ou efeito de polarizar; (fís.) modificação de uma radiação luminosa, em virtude da qual as ondas reflectidas ou refractadas deixam de apresentar propriedades idênticas em todas as direcções em torno da direcção da sua propagação;

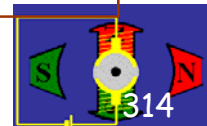
Polarizador: adj. que polariza; s. m. instrumento que serve para polarizar a luz. (De polarizar + -dor)

Dicroico: adj. diz-se do que apresenta dicroísmo. (Do gr. di, por dis, «duas vezes» + khróa, «cor» + -ico)

Dicroísmo: s. m. (min.) propriedade que têm certos cristais de absorver selectivamente as vibrações luminosas num plano e permitir a passagem de vibrações normais a esse plano, originando colorações diferentes (ex.: a turmalina). (Do gr. di, por dis, «duas vezes» + khroismós, «coloração»)

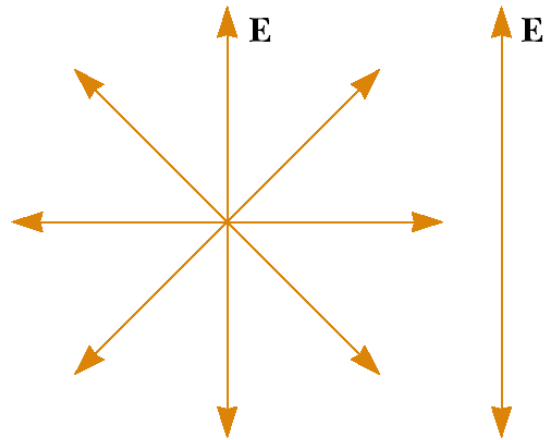
Birrefringente: adj. 2 gén. (fís.) diz-se das substâncias anisotrópicas que têm a propriedade de decompor uma onda luminosa em duas ondas polarizadas de direcções de vibração mutuamente ortogonais. (De bi- + refringente)

Birrefracção: s. f. (fís.) fenómeno óptico de dupla refração. (De bi- + refração)





Luz polarizada e luz não polarizada

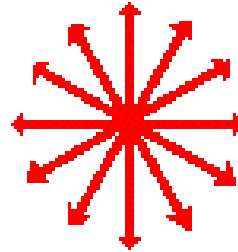


(a)

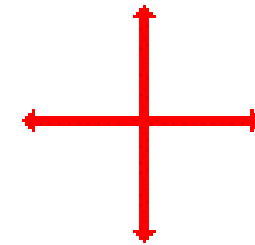
(b)

Figure 38.29 (a) A representation of an unpolarized light beam viewed along the direction of propagation (perpendicular to the page). The transverse electric field can vibrate in any direction in the plane of the page with equal probability. (b) A linearly polarized light beam with the electric field vibrating in the vertical direction.

A light wave is known to vibrate in a multitude of directions ...



... In general, a light wave can be thought of as vibrating in a vertical and in a horizontal plane.



Em geral, a radiação EM de origem térmica é não polarizada. Exemplos: luz do sol, lâmpadas, etc. Uma antena gera, em geral, ondas EM polarizadas. A luz laser pode ser gerada com uma dada polarização.

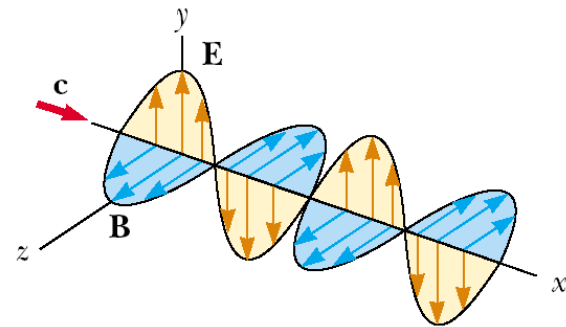


Figure 38.28 Schematic diagram of an electromagnetic wave propagating at velocity c in the x direction. The electric field vibrates in the xy plane, and the magnetic field vibrates in the xz plane.

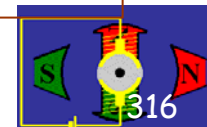
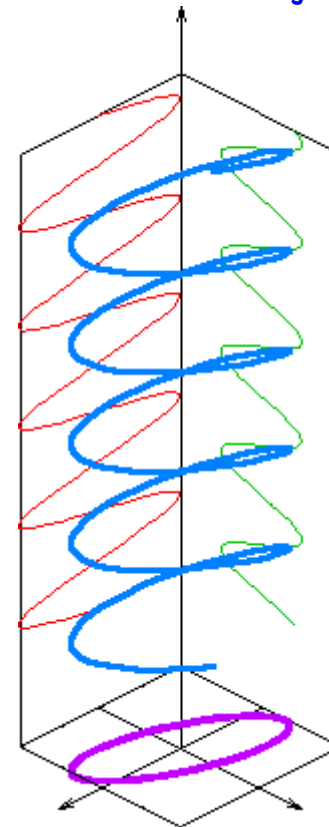
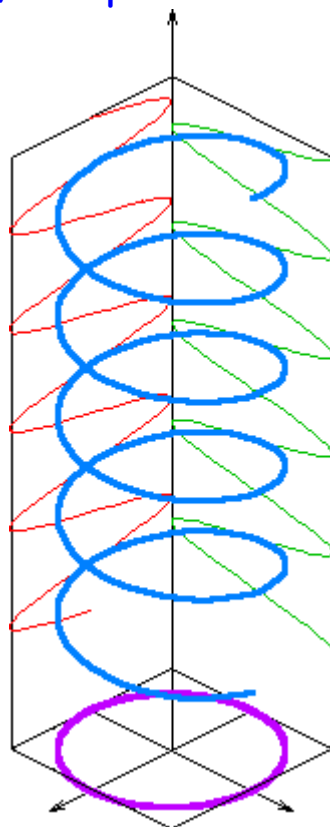
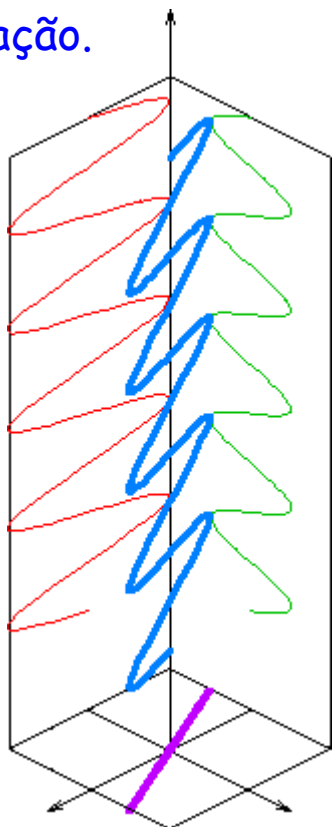
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>





Polarização linear, circular e elíptica

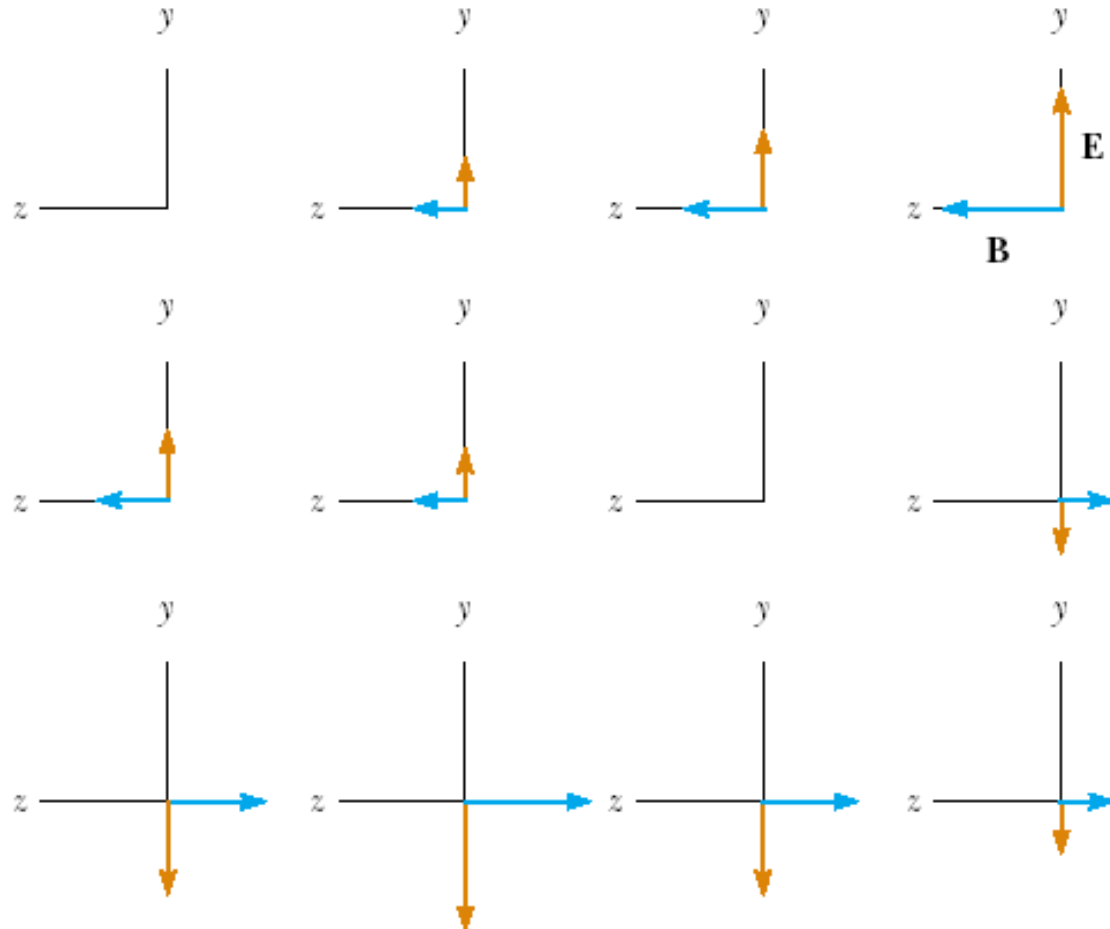
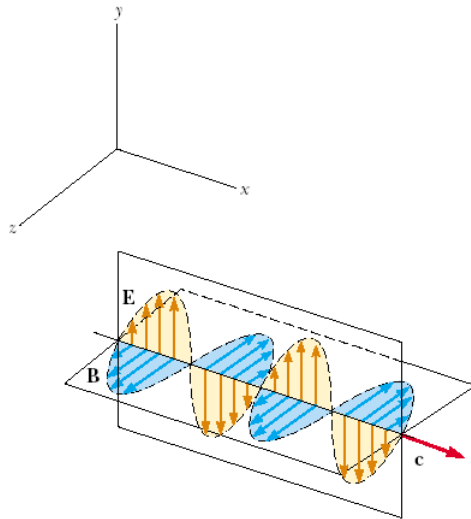
Uma onda diz-se polarizada **linearmente** quando a direcção de oscilação não roda em torno da direcção de propagação. Uma onda está **polarizada circularmente** ou **elípticamente**, quando a direcção de oscilação da componente campo eléctrico do vector campo electromagnético descreve uma circunferência ou uma elipse, respectivamente, em torno da direcção de propagação.





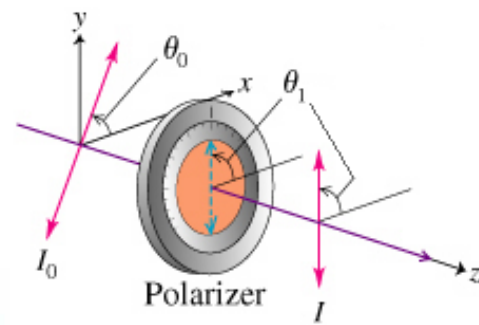
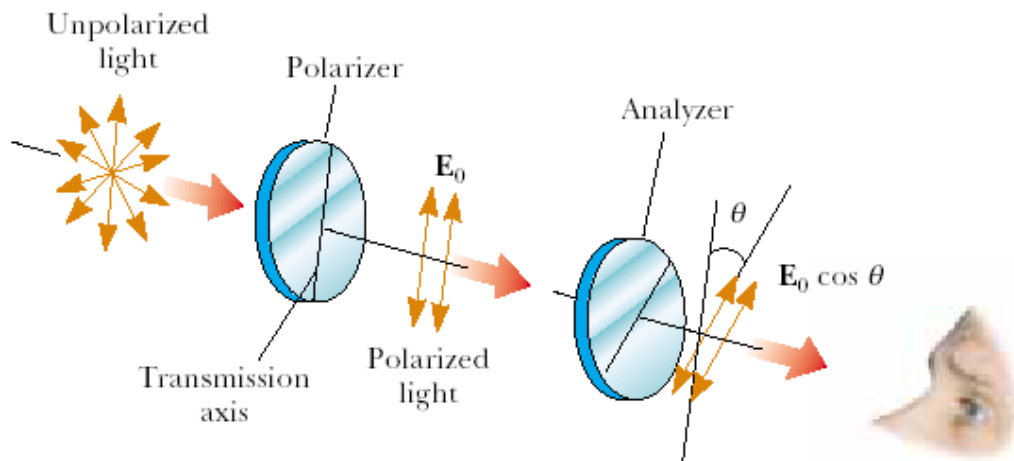
Onda electromagnética plana linearmente polarizada

Diz-se que uma onda está **polarizada** quando a onda não apresenta propriedades idênticas em todas as direcções em torno da direcção da sua prop





Polarização por absorção



Lei de Malus

$$I = I_{\max} \cos^2 \theta$$

Active Figure 38.30 Two polarizing sheets whose transmission axes make an angle θ with each other. Only a fraction of the polarized light incident on the analyzer is transmitted through it.

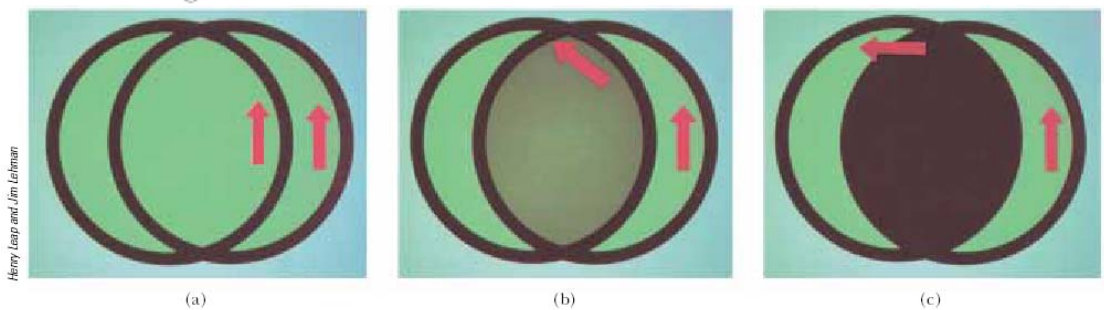
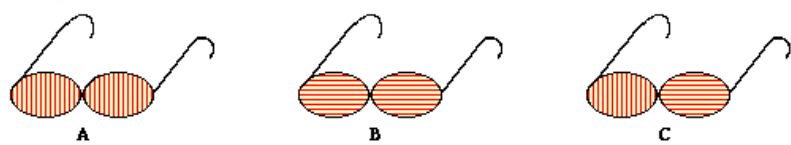


Figure 38.31 The intensity of light transmitted through two polarizers depends on the relative orientation of their transmission axes. (a) The transmitted light has maximum intensity when the transmission axes are aligned with each other. (b) The transmitted light has lesser intensity when the transmission axes are at an angle of 45° with each other. (c) The transmitted light intensity is a minimum when the transmission axes are perpendicular to each other.

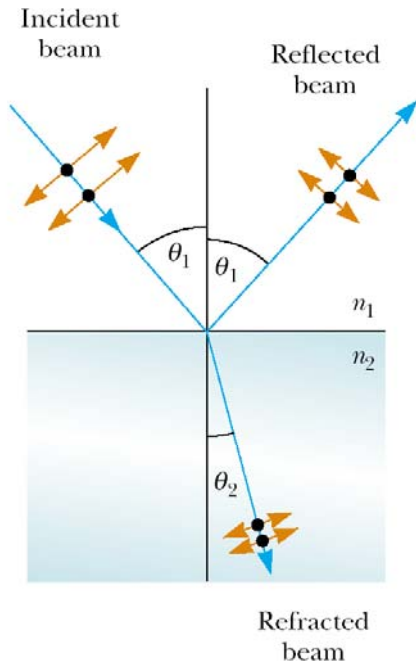


Demonstração: polarização por absorção, lei de Malus - kit de óptica

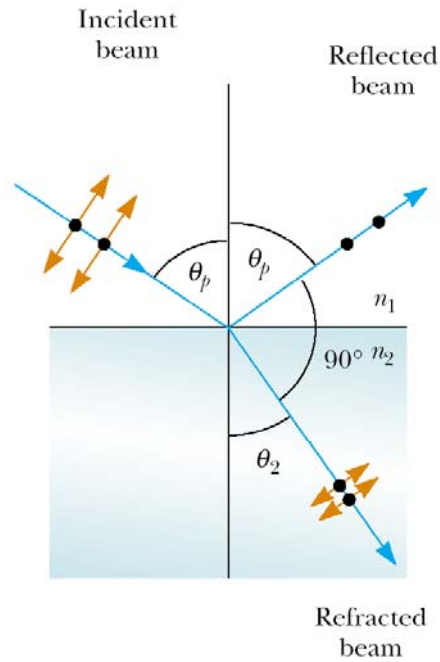




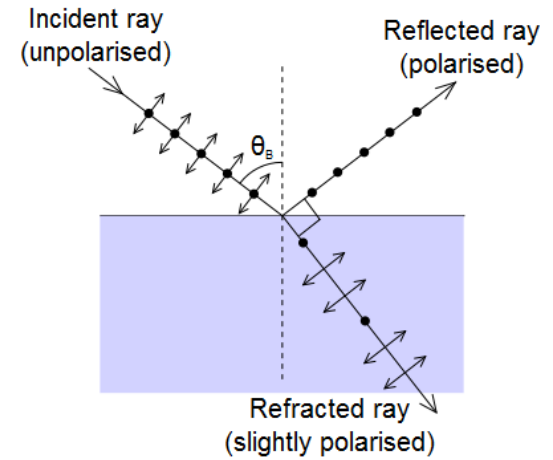
Polarização por reflexão



(a)



(b)



$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_2}$$

$$n = \tan \theta_p$$

n : índice de refração

Figure 38.32 (a) When unpolarized light is incident on a reflecting surface, the reflected and refracted beams are partially polarized. (b) The reflected beam is completely polarized when the angle of incidence equals the polarizing angle θ_p , which satisfies the equation $n = \tan \theta_p$. At this incident angle, the reflected and refracted rays are perpendicular to each other.

Ângulo de Brewster

$$\theta_B = \theta_1 : \theta_1 + \theta_2 = 90^\circ, \theta_B = \arctan \left(\frac{n_2}{n_1} \right),$$





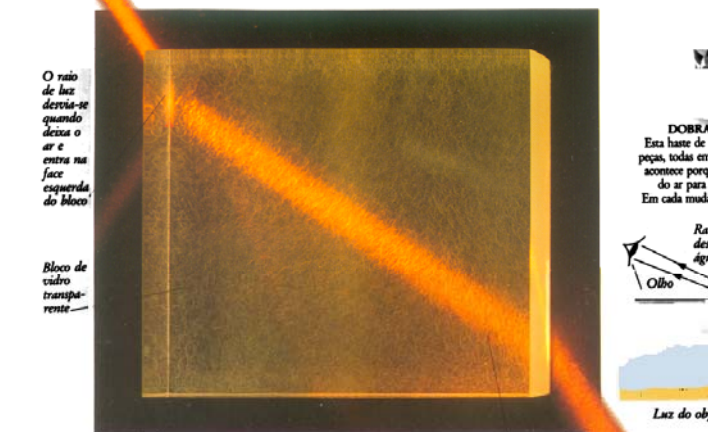
Lei da refração*

*Ver adiante, Cap. 10.

$$n_i = \frac{c}{v_i} : \text{índice de refração do meio } i$$

experiência para investigar quanto a luz era desviada. Inventou uma lei para explicar a refração mas nem mesmo os seus próprios resultados estavam de acordo com a essa lei.

lei da refração. Apicou-a a diversos casos, mas não foi reconhecido. Al-Hazen (pág. 12) investigou a refração, mas não pôde concluir até onde a refração da luz iria. O problema foi resolvido em 1621 por Willebrord Snell e a sua lei ficou conhecida por «lei de Snell».

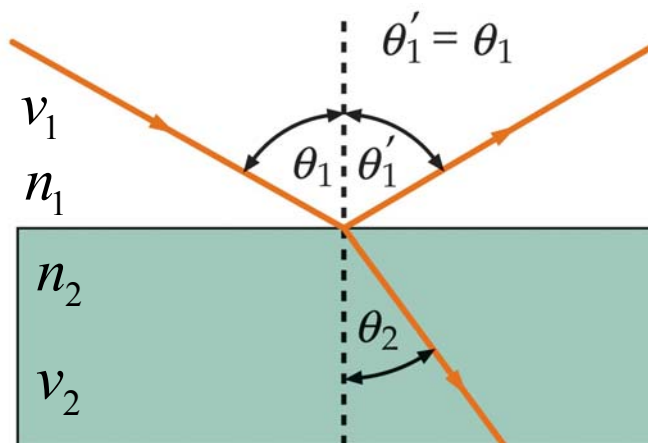


A LEI DE REFRAÇÃO DE SNELL
Nesta experiência um feixe de luz desvia-se quando entra e sai de um bloco de vidro transparente. Quando o feixe atinge o bloco, aproxima-se mais da horizontal. Quando deixa o bloco volta a desviar-se mas na direcção oposta. A medida do desvio é muito precisa. Se o feixe entra ou sai do bloco perpendicularmente não sofre refração. Se entrar ou sair segundo um ângulo haverá refração, que será tanto maior quanto maior for o afastamento da vertical. Em 1621 o matemático holandês, também astrónomo, Willebrord Snell determinou que existia uma relação característica entre o ângulo de incidência do feixe (ângulo antes do desvio) e o seu ângulo de refração (ângulo depois do desvio). A sua lei mostra que cada substância tem um poder de refração próprio, o seu índice de refração. Quanto mais uma substância desvia a luz tanto maior o seu índice de refração.



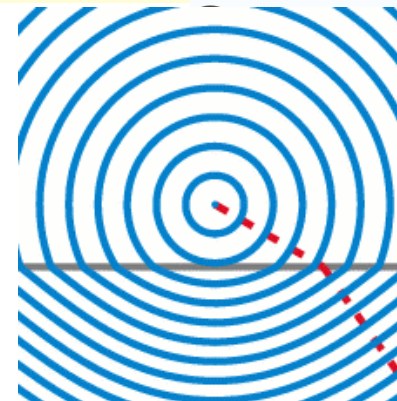
A luz no interior do bloco desvia-se em linha recta

WILLEBRORD SNELL
Willebrord Snell (1580-1626) descobriu uma das mais importantes leis respeitantes à luz. Foi também pioneiro da triangulação, método para medir distâncias usando os ângulos entre diferentes pontos.



Lei de Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Refraction.swf>

<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm>

<http://www.lon-capa.org/~mmp/kap25/Snell/app.htm>

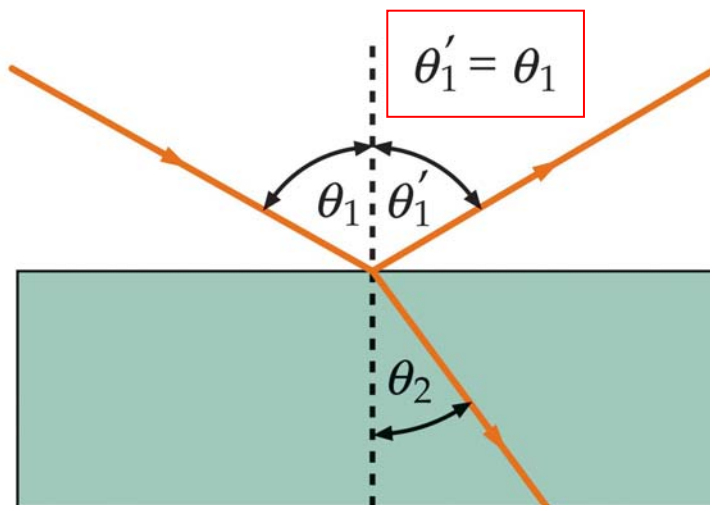
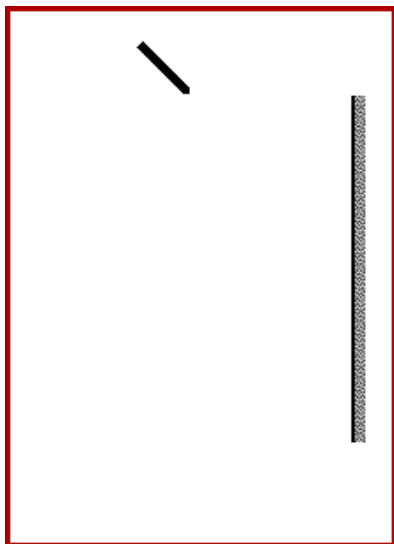
<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm>





Lei da reflexão*

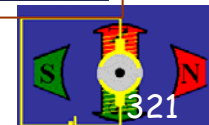
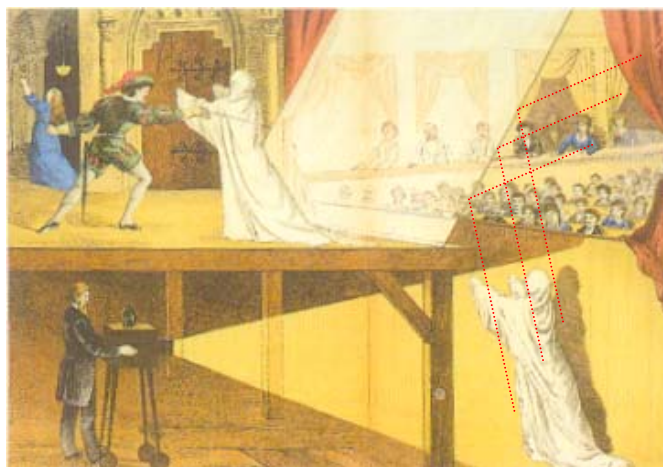
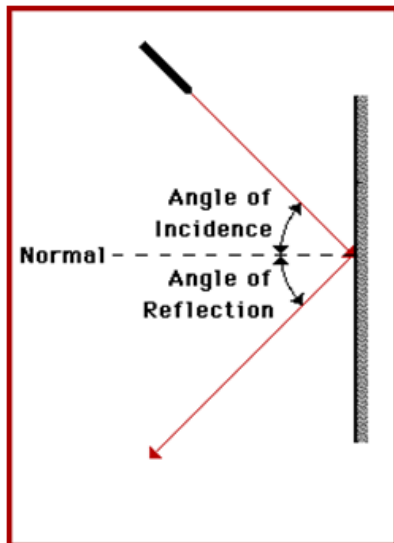
*Ver adiante, Cap. 10.



ESPELHO DE ÁGUA

A superfície de água quieta constitui um espelho natural. Conta uma lenda grega que um jovem chamado Narciso apaixonou-se pela sua própria imagem reflectida num lago. Ao tentar tocar-lhe caiu à água e afogou-se.

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Reflection.swf>





Polarização por dupla refração

Henry Leap and Jim Lehman



Figure 38.35 A calcite crystal produces a double image because it is a birefringent (double-refracting) material.

Unpolarized light

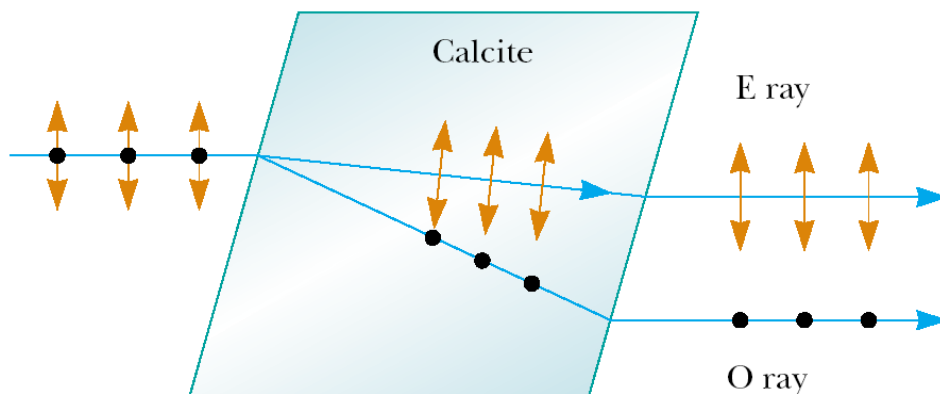


Figure 38.33 Unpolarized light incident on a calcite crystal splits into an ordinary (O) ray and an extraordinary (E) ray. These two rays are polarized in mutually perpendicular directions. (Drawing not to scale.)

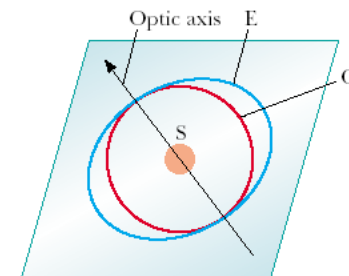
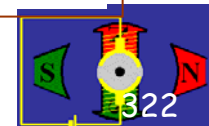


Figure 38.34 A point source S inside a double-refracting crystal produces a spherical wave front corresponding to the ordinary ray and an elliptical wave front corresponding to the extraordinary ray. The two waves propagate with the same velocity along the optic axis.





Polarização por espalhamento

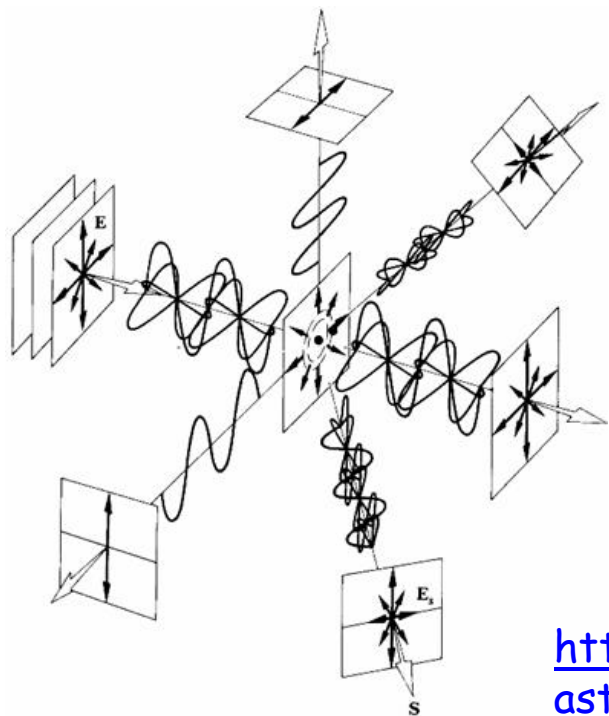
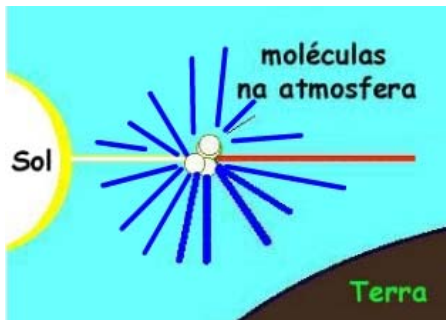


FIGURE 8.36 Scattering of unpolarized light by a molecule.

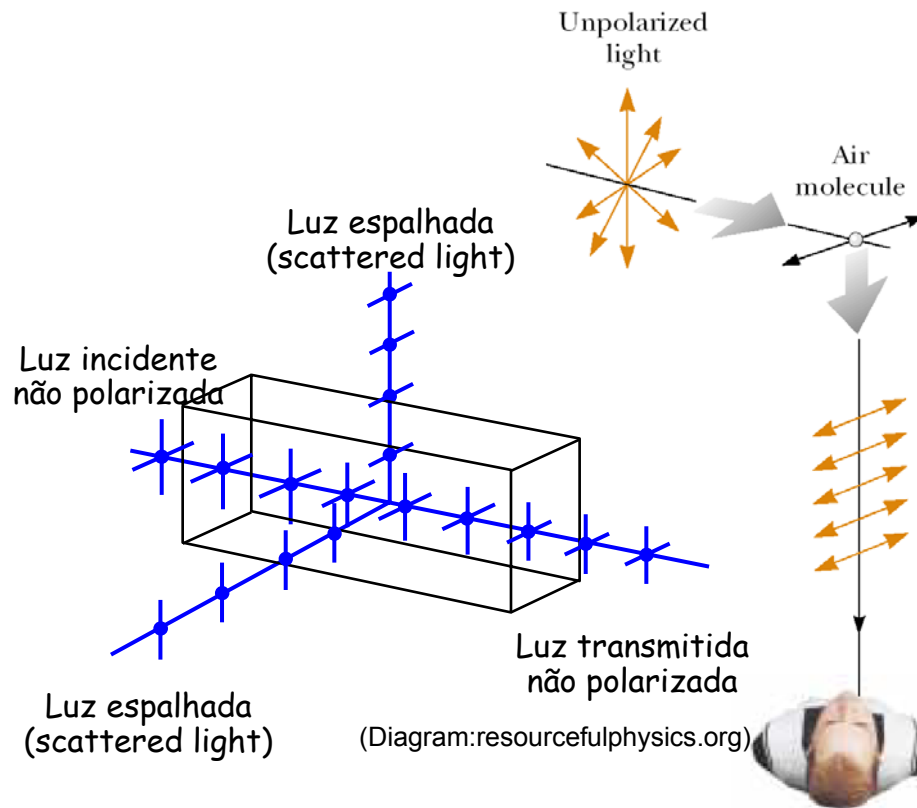
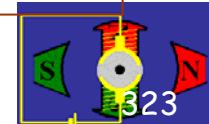
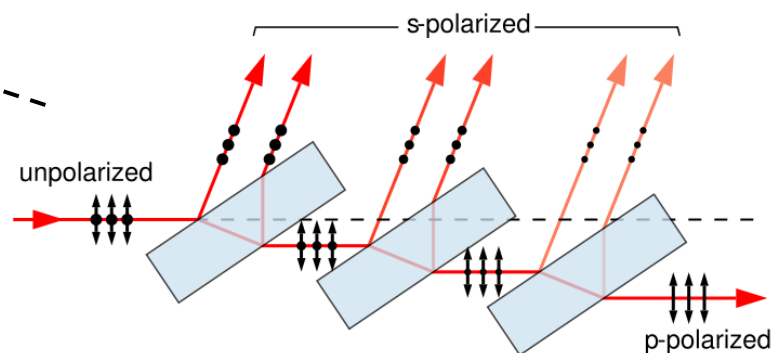
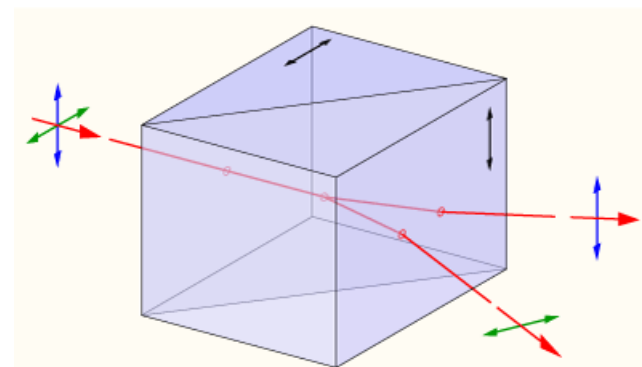
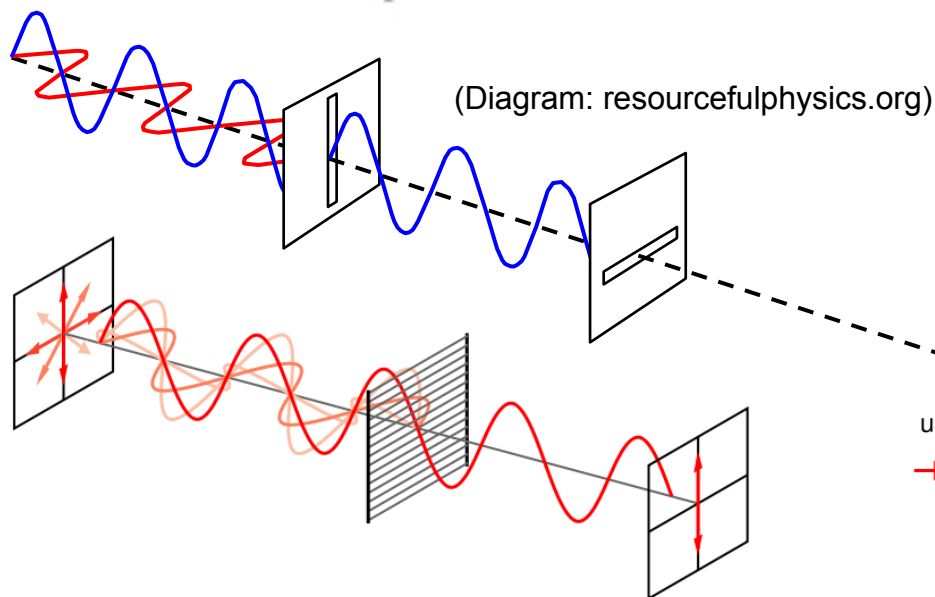
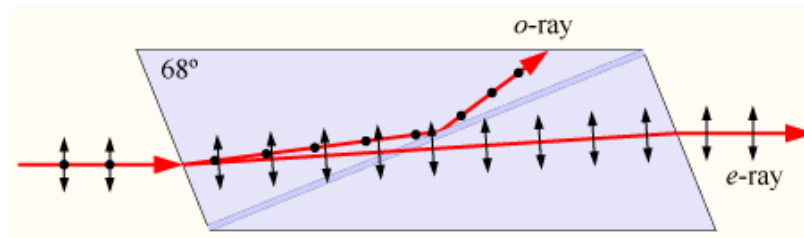
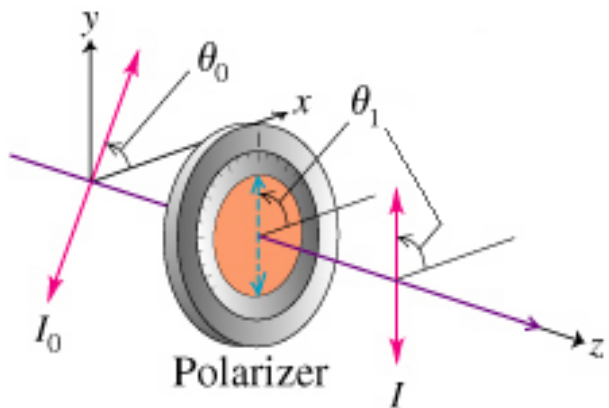


Figure 38.37 The scattering of unpolarized sunlight by air molecules. The scattered light traveling perpendicular to the incident light is plane-polarized because the vertical vibrations of the charges in the air molecule send no light in this direction.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>



Polarizadores



Demonstração: polarização por absorção, lei de Malus - kit de microondas
<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/LDEOC-equipmatdiv.html#cmo>



Polarização e polarizadores

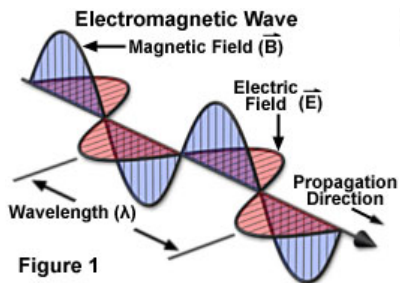


Figure 1

Light Waves Vibrating Perpendicular to the Highway

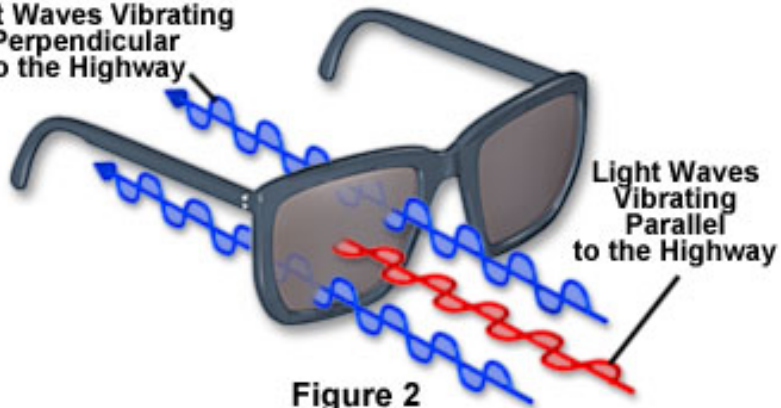
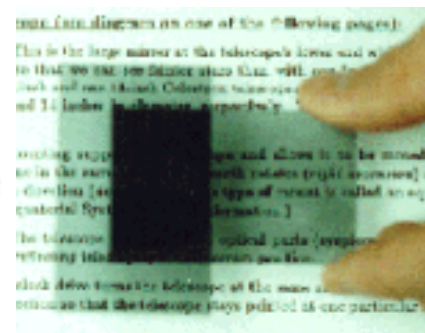


Figure 2



Light Passing Through Crossed Polarizers

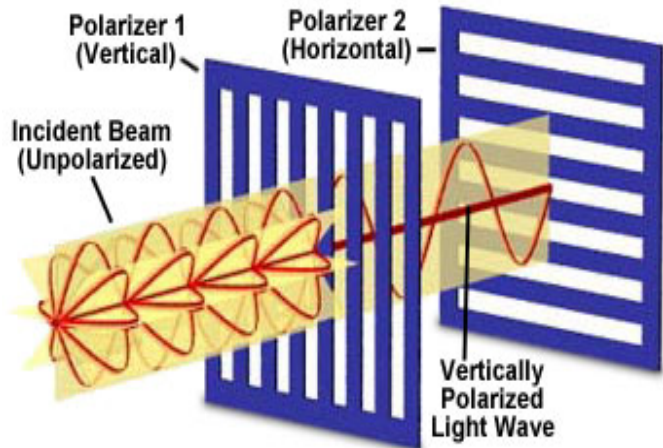
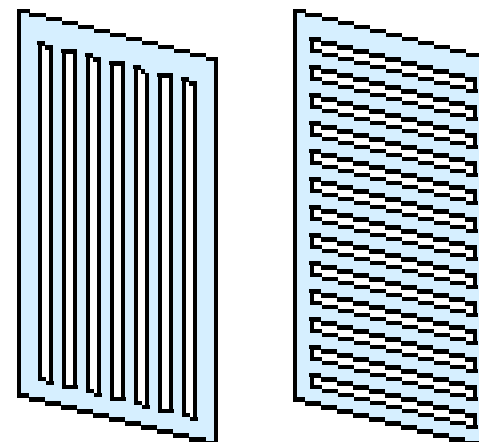


Figure 1



Distribuição de polarizadores pelos alunos.

<http://www.polarization.com/>





Ecrãs de cristais líquidos

Um monitor de cristal líquido (em inglês: liquid crystal display), ou **LCD** é um monitor muito leve e fino, sem partes móveis. Consiste de um líquido polarizador da luz, electricamente controlado, que se encontra comprimido dentro de celas entre duas lâminas transparentes polarizadoras. Os eixos polarizadores das duas lâminas estão alinhados perpendicularmente entre si. Cada cela é provida de contactos eléctricos que permitem que um campo eléctrico possa ser aplicado ao líquido no interior, que controla a orientação das moléculas *polarizadoras* da luz.

<http://electronics.howstuffworks.com/lcd2.htm>

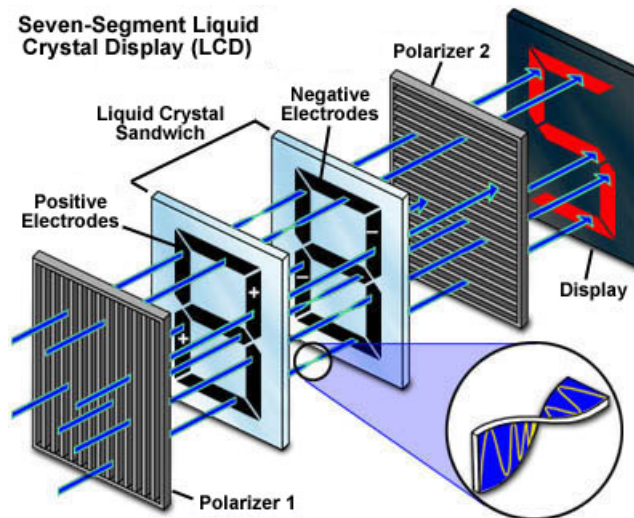
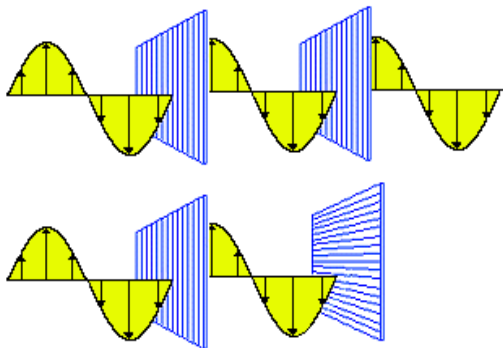
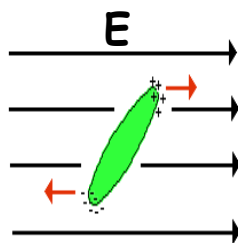
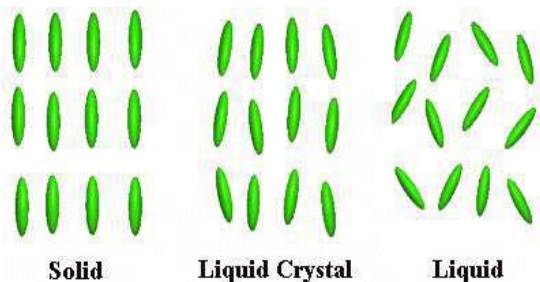
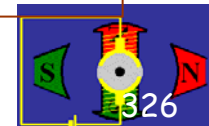


Figure 3

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

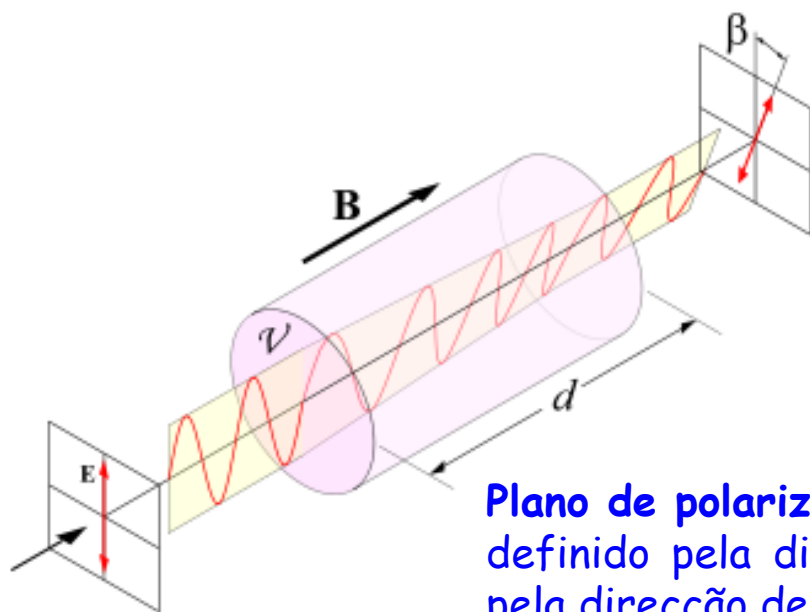
Demonstração usando monitor de portátil





Actividade óptica: efeito de Faraday

Nas suas tentativas de encontrar uma relação entre os fenómenos magnético e os fenómenos luminoso Faraday descobriu, em 1845, que um campo magnético estático faz rodar o plano de polarização de uma onda electromagnética polarizada linearmente: efeito de Faraday ou efeito magnético-óptico, após a sugestão de William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907), para que realizasse uma série de experiências com o propósito de testar as teorias de Faraday sobre a condução de electricidade.



Ângulo de rotação do plano de polarização

$$\beta = vBd$$

v : parâmetro de Verdet do material

Este feito é usado para obter **isoladores ópticos**, componentes muito importantes para os sistemas de comunicação por fibra óptica.

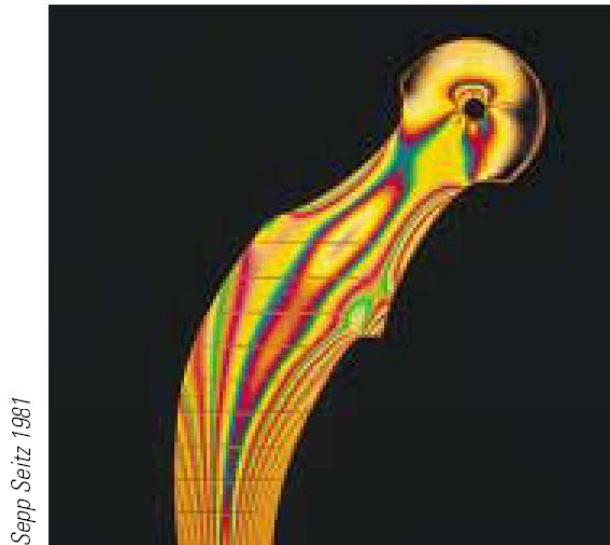
Plano de polarização de uma onda electromagnética: plano definido pela direcção de oscilação do campo eléctrico e pela direcção de propagação da onda electromagnética.



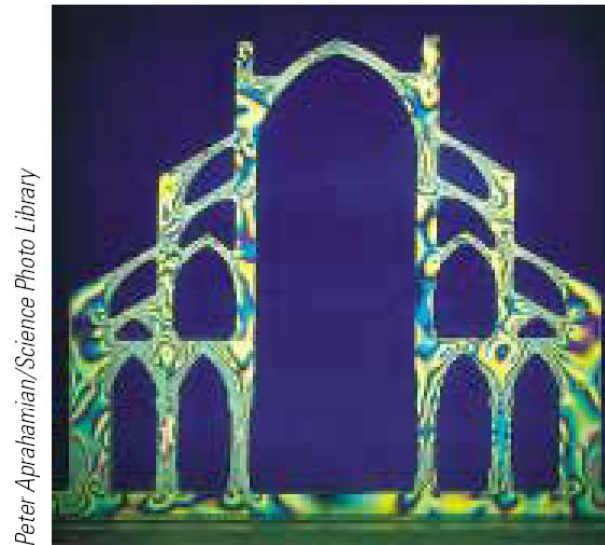


Fotoelasticidade

Fotoelasticidade: s. f. (fís.) método óptico (que utiliza luz polarizada) de análise das tensões, baseado nos fenómenos de dupla refração (temporária) que um sólido homogéneo e isotrópico pode apresentar sob a acção dessas tensões. (De foto- + elasticidade)



(a)



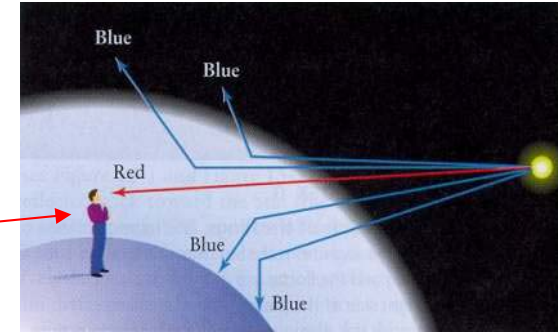
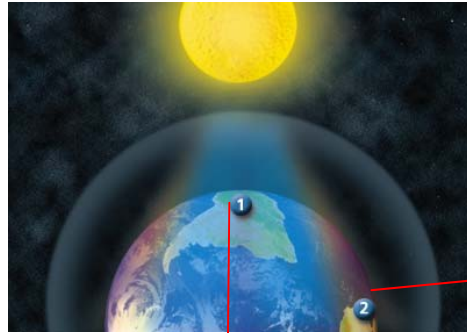
(b)

Figure 38.36 (a) Strain distribution in a plastic model of a hip replacement used in a medical research laboratory. The pattern is produced when the plastic model is viewed between a polarizer and analyzer oriented perpendicular to each other. (b) A plastic model of an arch structure under load conditions observed between perpendicular polarizers. Such patterns are useful in the optimal design of architectural components.





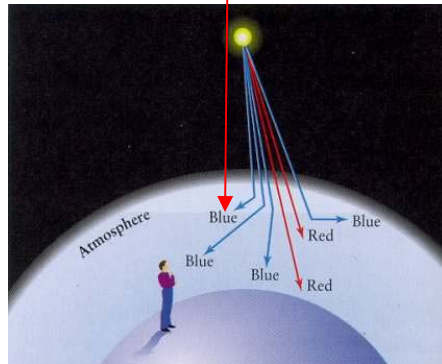
O espalhamento da luz e a cor do céu



Intensidade da luz não polarizada espalhada por partículas de diâmetro d à distância R :

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6$$

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

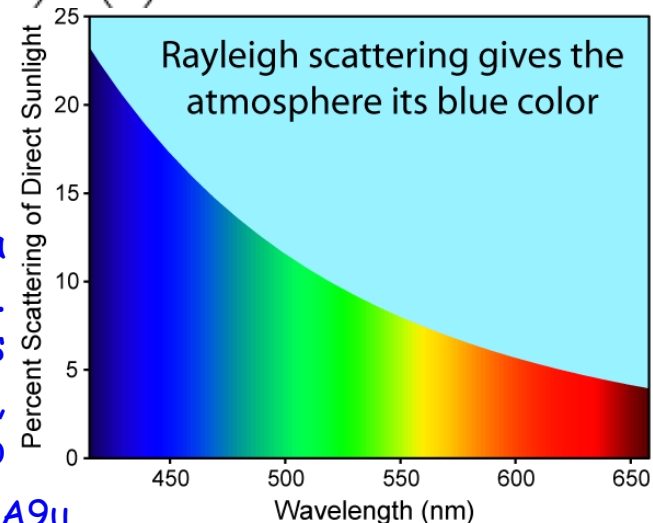


Na atmosfera da Terra:

$$\frac{I(\lambda_{azul})}{I(\lambda_{verm})} = \left(\frac{\lambda_{verm}}{\lambda_{azul}} \right)^4 \approx 10$$

O espalhamento de Rayleigh na atmosfera é cerca de 10 vezes mais intenso no azul que no vermelho. Por isso, ao pôr e ao nascer do Sol a luz que nos chega é essencialmente composta por vermelho, uma vez que a luz azul já foi toda "consumida" pelo espalhamento.

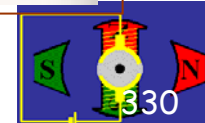
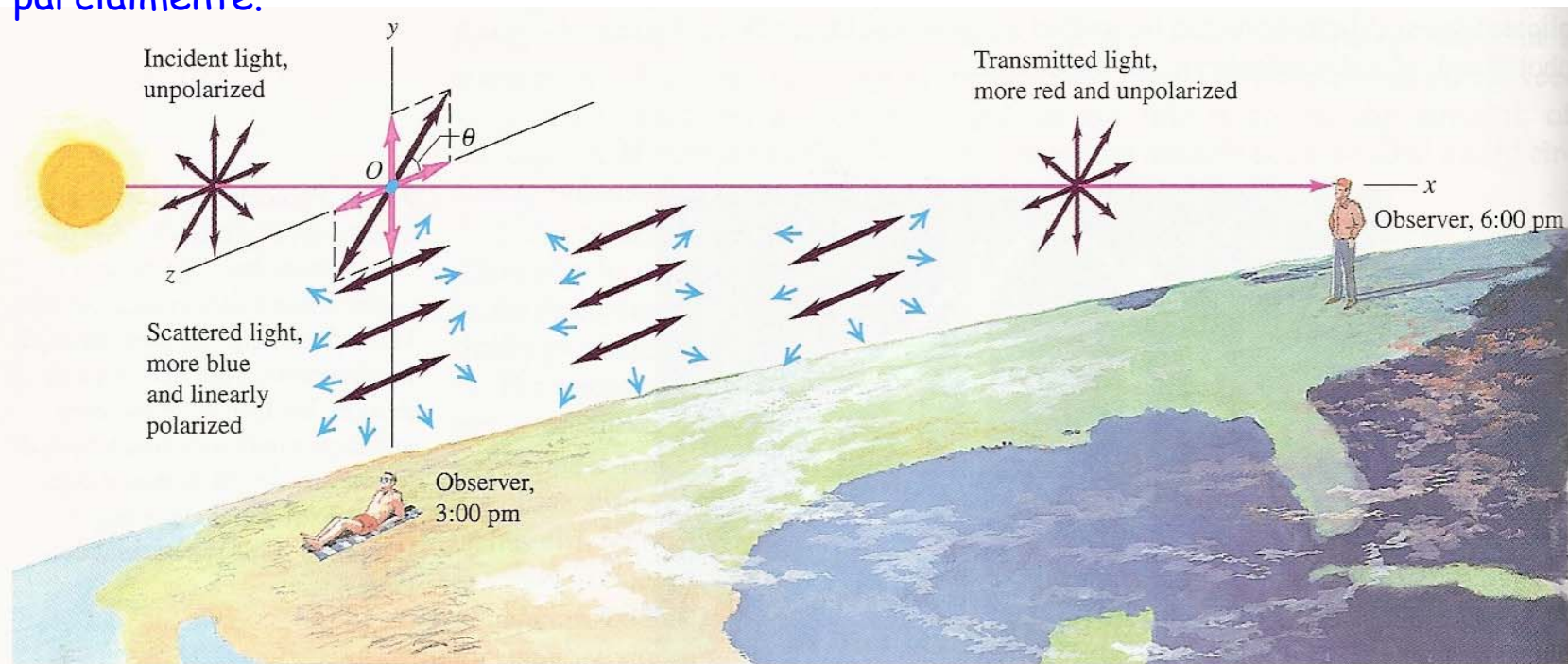
<http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9u>





Espalhamento da luz do Sol pela atmosfera

O espalhamento da luz pelas moléculas de ar produz luz polarizada linearmente no plano perpendicular à direcção da luz incidente. O centros de espalhamento (moléculas de ar) podem ser vistos como nano antenas dipolares que radiam perpendicularmente à sua linha da oscilação. Se as cargas numa molécula oscilação segundo o eixo z , não haverá re-emissão de radiação nessa direcção. Assim, na direcção perpendicular à direcção de propagação do feixe, a luz será polarizada linearmente. Isto faz com que, por exemplo, a luz azul do céu seja polarizada parcialmente.

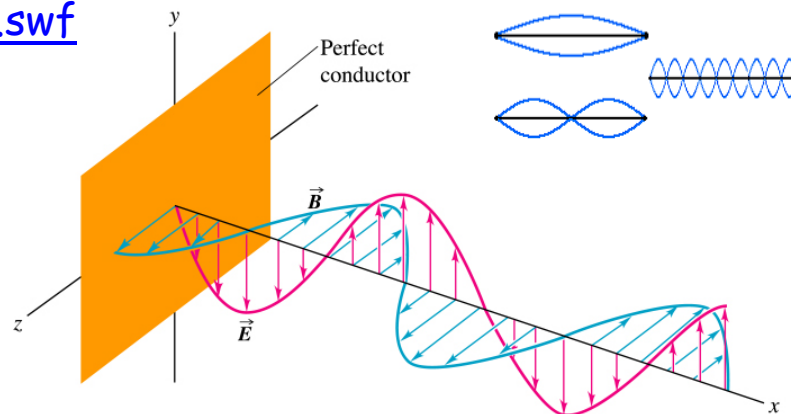




Ondas estacionárias: laser e forno de microondas

Uma onda electromagnética estacionária não se propaga.

<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/standwave.swf>



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

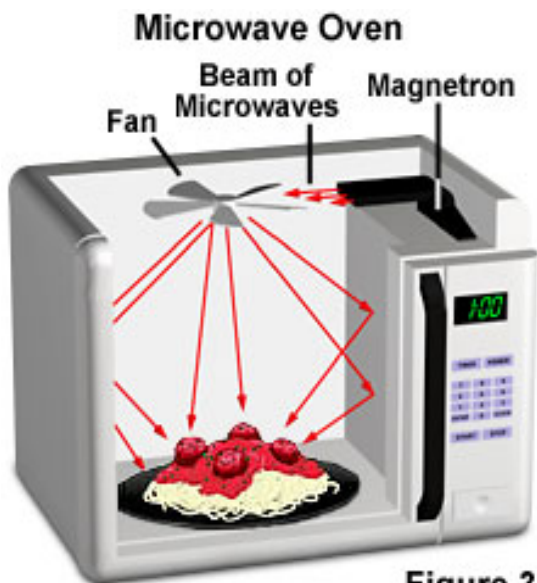
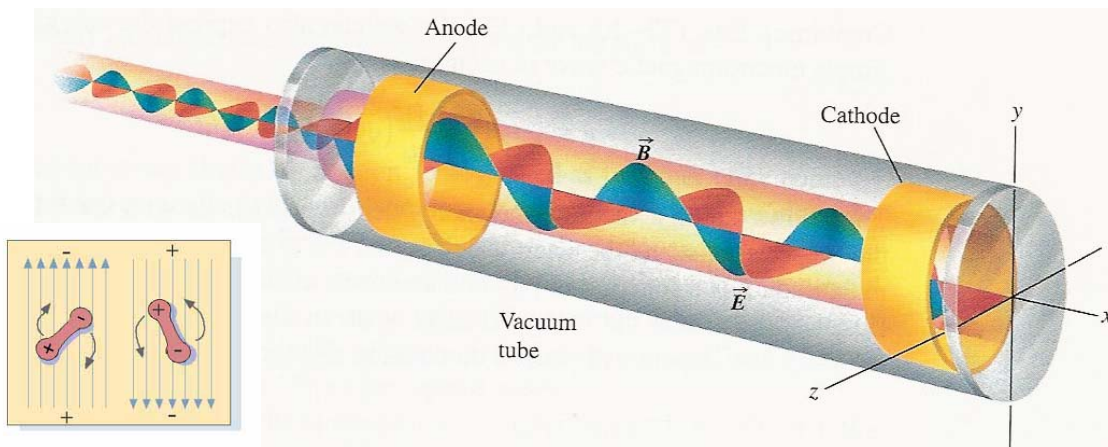
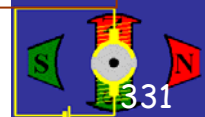


Figure 3



<http://www.youtube.com/watch?v=4h1ESUz2H3E>





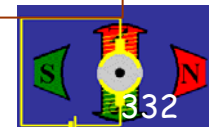
Radiação electromagnética

"Por um pouco de *luz* na história" «debate onda versus partícula»

Luz: (fís.) designação que compreende não só as radiações visíveis mas também as radiações electromagnéticas invisíveis; fluxo radiante capaz de estimular a retina para produzir a sensação visual; clarão produzido por uma substância em ignição;

Difracção: (fís.) 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;

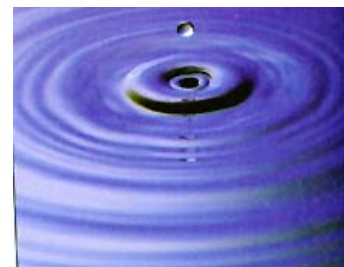
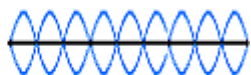
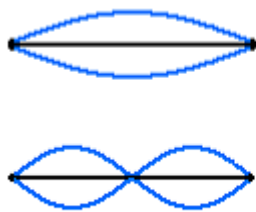
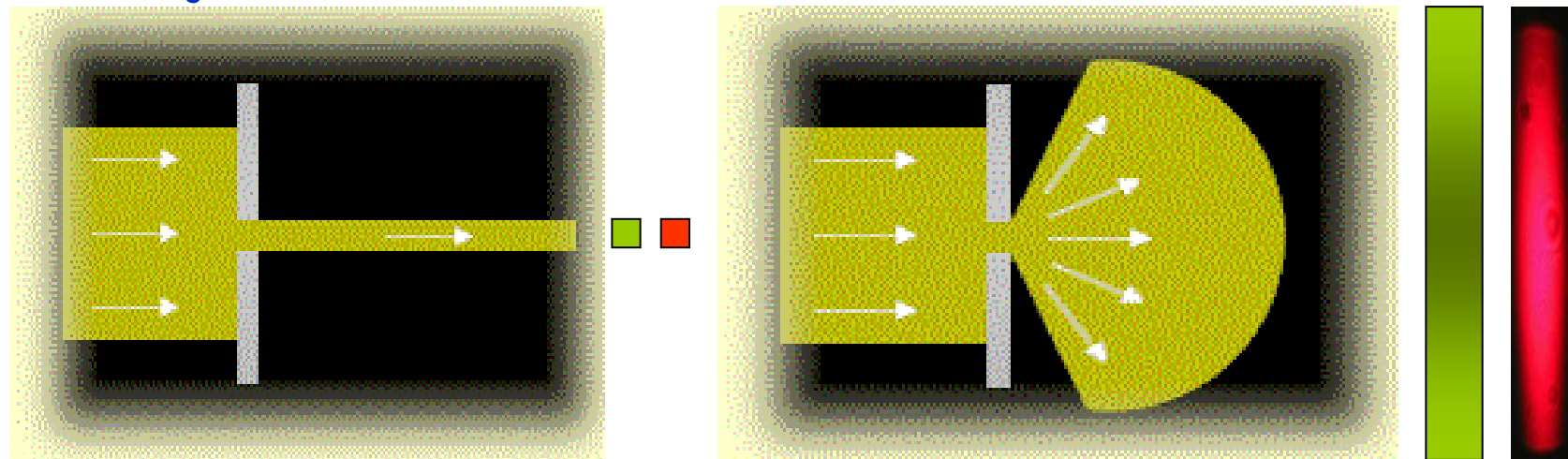
Interferência: fenómeno que se dá quando se combinam dois ou mais movimentos vibratórios; ~ **de luz:** fenómeno que se dá quando se combinam dois feixes luminosos coerentes, que provenham, portanto, da mesma fonte luminosa.



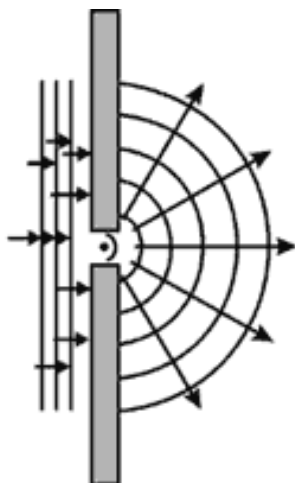


Robert Hooke e Huygens: a luz é uma onda (~1660)

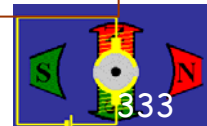
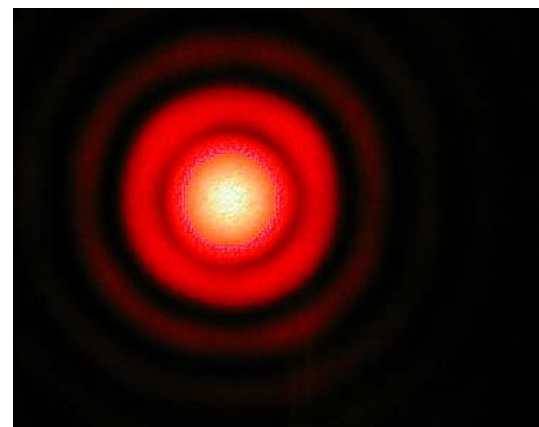
Difracção *Ver adiante, Cap. 14.



Plane waves

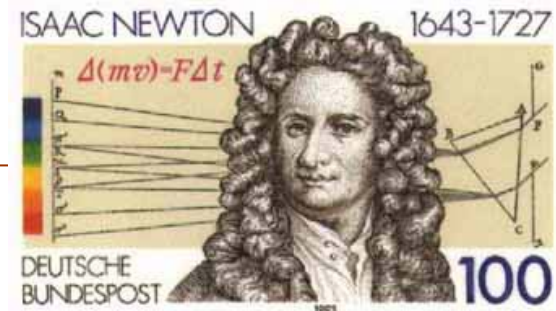


Diffracted waves





O Grande Newton ... ~1675



Alto aí! A luz não é uma onda. A luz é um **fluxo de corpúsculos**. *Dixi Newton*

Decomposição espectral da luz visível (luz branca)

Com esta e outras experiências, Newton concluiu que a luz branca é uma mistura de muitas cores. O seu prisma desviava, ou refractava, as cores em diferentes quantidades, fazendo com que se espalhassem, ou dispersassem, de modo a poderem ser vistas.

is a Bíblia, o arco-íris é um sinal no céu que que o Dilúvio não se repetir. Uma vez há se que quando no pé de um arco-íris se há um pont de ouro. Mas por mais que se se, o pé nunca se alcança, porque os arco-íris são à frente do observador.

A luz branca não sofre alteração de cor ao atravessar o prisma.

Luz branca que não foi refractada.

O primeiro prisma decompõe a luz num espectro de cores.

O espectro projecta-se para um écran.

onde se vêem as cores.

A luz branca encontra um écran.

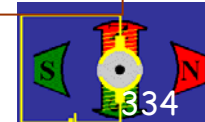
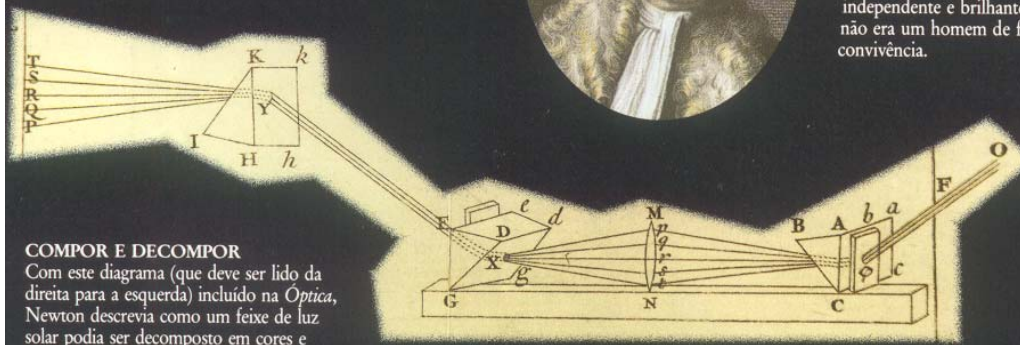


prisma, formando um espectro. O espectro é projectado num écran com uma pequena fenda. Por essa fenda passa a luz de uma só cor, que atravessa outro prisma que a desvia mas não a decompõe em cores. Com esta experiência Newton concluiu que as cores existentes na luz branca não são produzidas pelo prisma.



ISAAC NEWTON

O trabalho de Isaac Newton quase dois séculos. Publicou científicos escritos desde suas leis de movimento que investigava a luz. Em sua mais antiga associação científica, a Grã-Bretanha (fundada por Newton, um pensador independente e brilhante, não era um homem de fácil convivência.

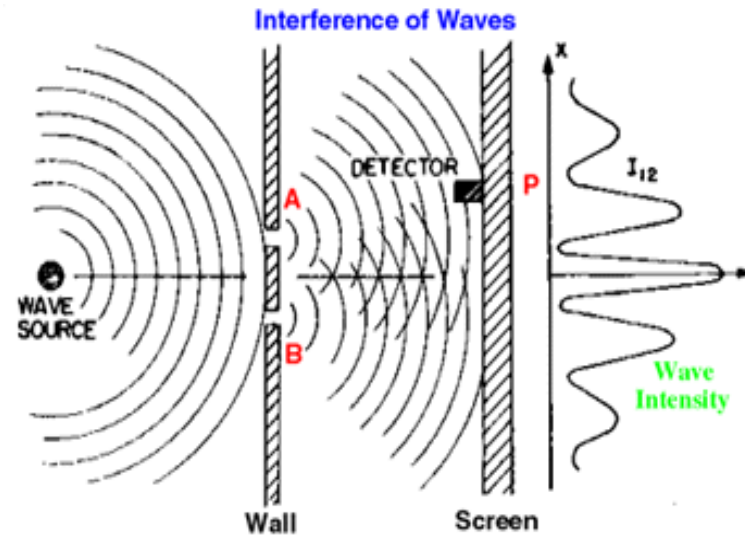
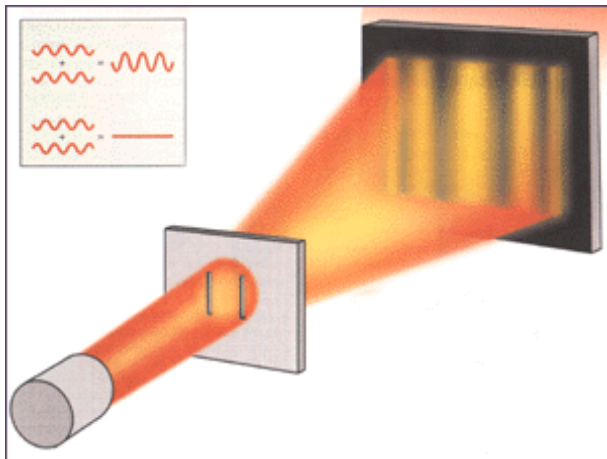
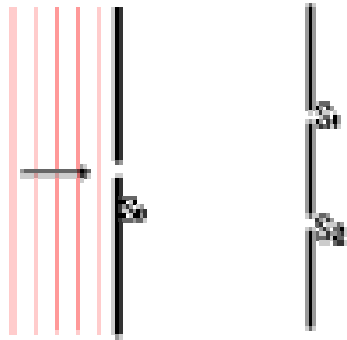




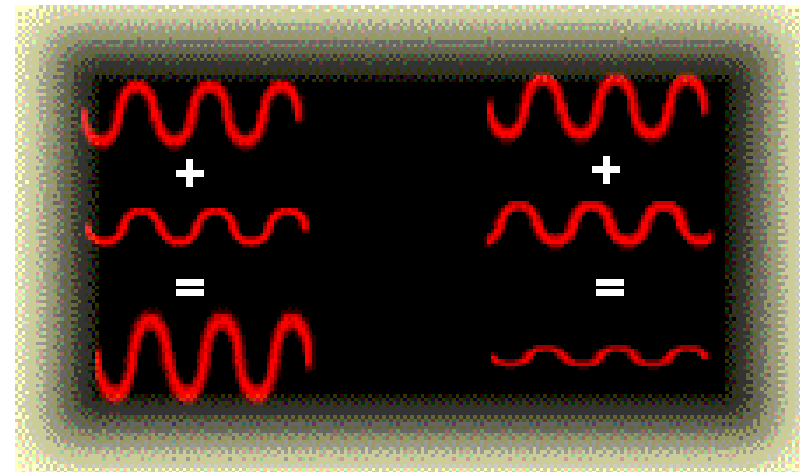
~1801: experiência das Fendas de Young

A luz volta a «ser» uma onda!

Interferência da Luz

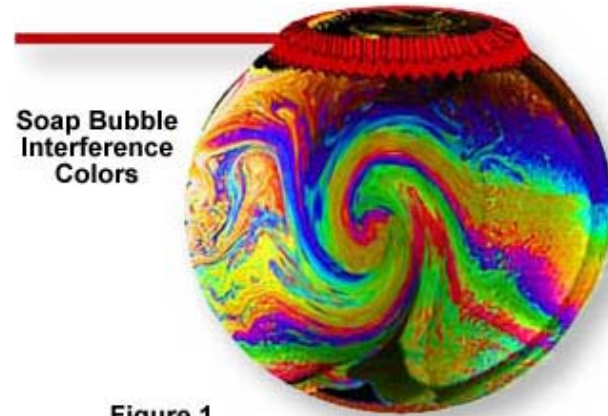


*Ver adiante, Cap. 13.





Exemplos de interferência da luz na Natureza



Soap Bubble Interference Colors

Figure 1



silicato
nadas
os raios
cores
as cores

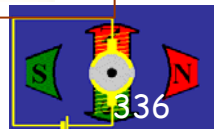
TON
locada
az é

hos coloridos

cauda de um pavão
As cores que vemos
as olhamos. Se
podem at
essas c
dese
muit
refle
es



OPALA IRIDISCENTE

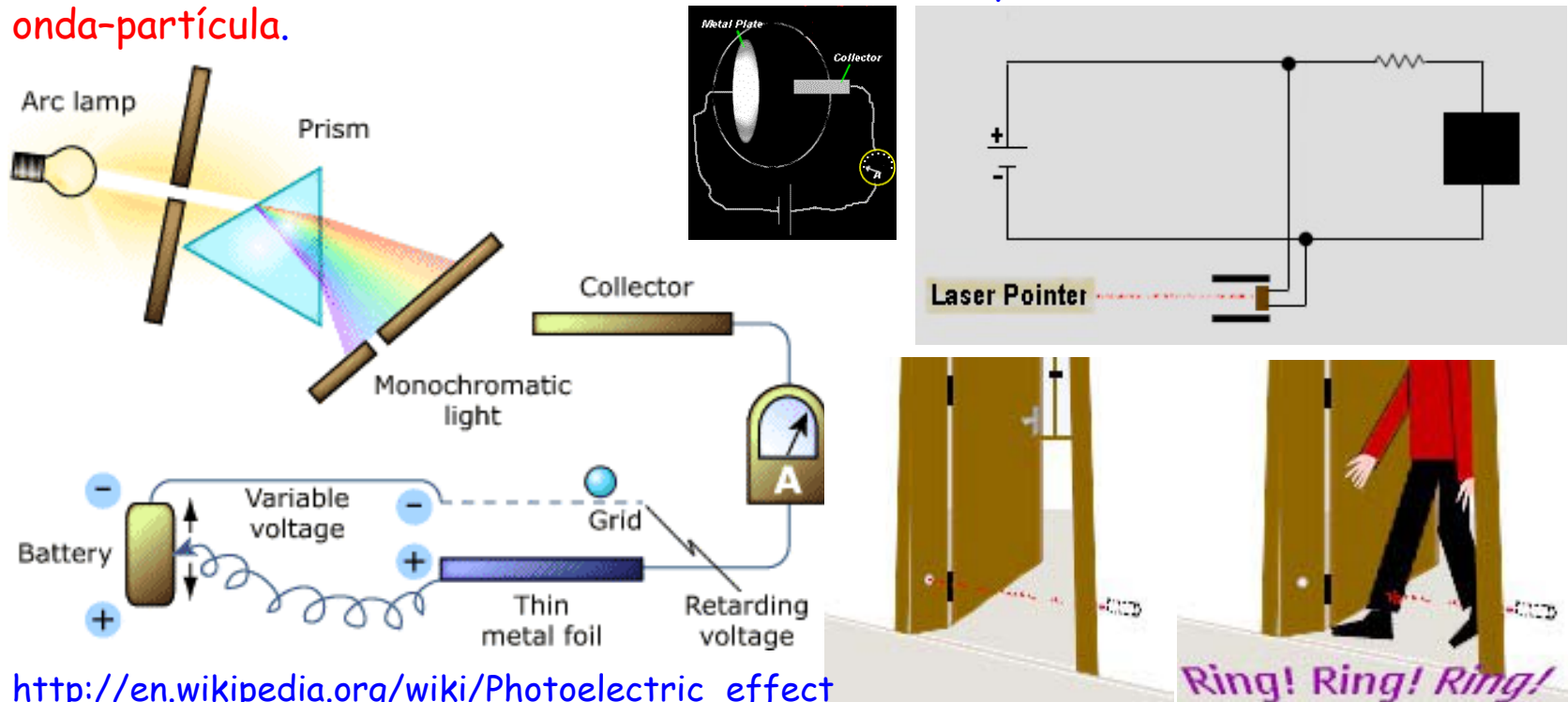




Efeito Fotoelétrico

Hertz - 1886 - descoberta do efeito fotoelétrico: libertação de electrões da superfície de um sólido por acção de radiação luminosa de comprimento de onda adequado.

Einstein - 1905 - explicação do efeito Fotoelétrico: afinal, a luz comporta-se umas vezes como uma onda e outras como um fluxo de partículas (fotões) - dualidade onda-partícula.



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

Ver p. ex.: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Apanhado-Acetatos-das-aulas-de-IFQ-de-IFQR.pdf>,
páginas 4 e 12 (<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ifqr.html>).





Radiação electromagnética

Espectro electromagnético

Espectro: s. m. (fís.) 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;

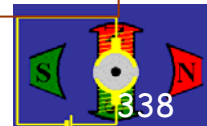
~ **contínuo:** espectro no qual a radiação se distribui numa gama contínua de comprimentos de onda;

~ **de absorção:** riscas ou bandas observadas, para certos comprimentos de onda, em resultado da absorção de radiação electromagnética por átomos, moléculas, iões ou radicais;

~ **de emissão:** riscas ou bandas observadas, para certos comprimentos de onda, em resultado da excitação de átomos ou de moléculas;

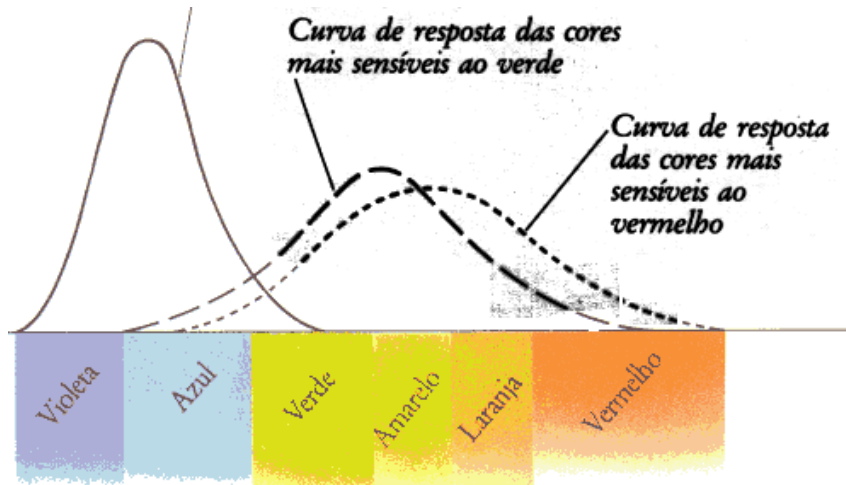
~ **de riscas:** espectro no qual a radiação é limitada a um número discreto de comprimentos de onda que aparecem como riscas bem definidas num espectroscópio;

A intuição de Maxwell

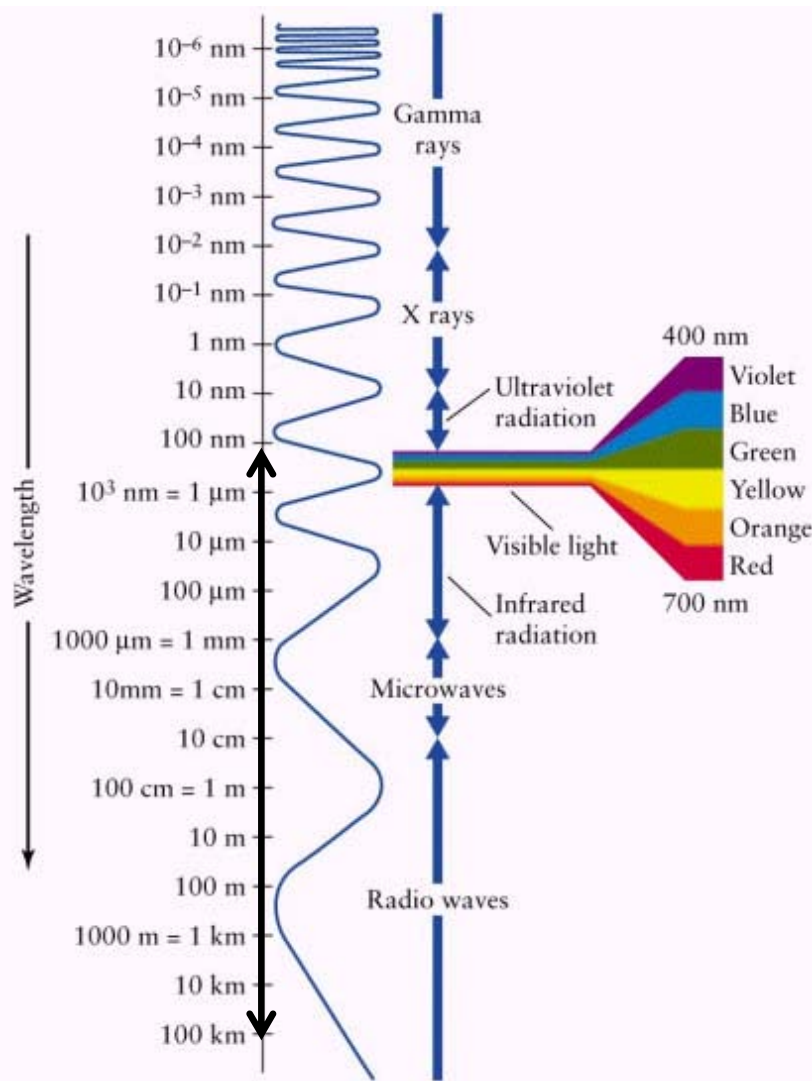
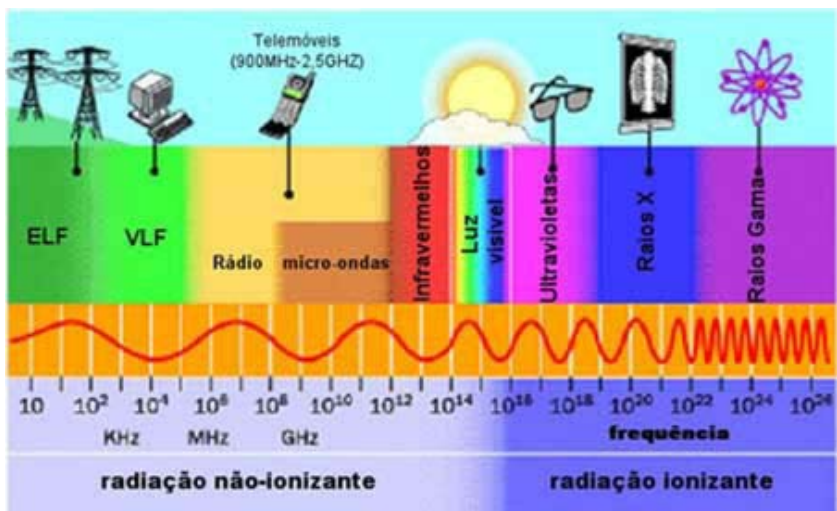




O espectro electromagnético



Resposta dos cones à luz
(medida pela absorção de luz por cada um dos três tipos de cones)

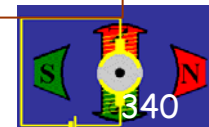
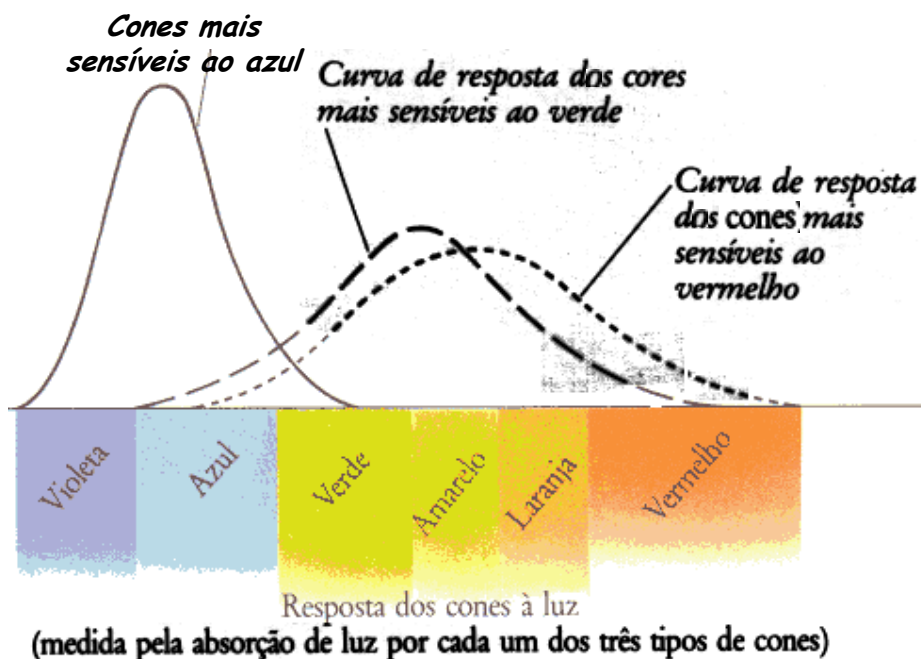
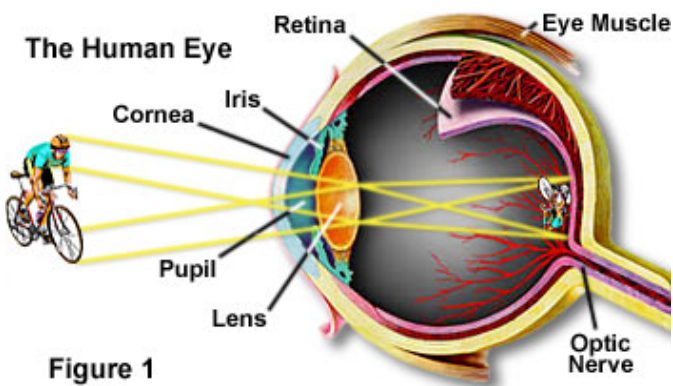
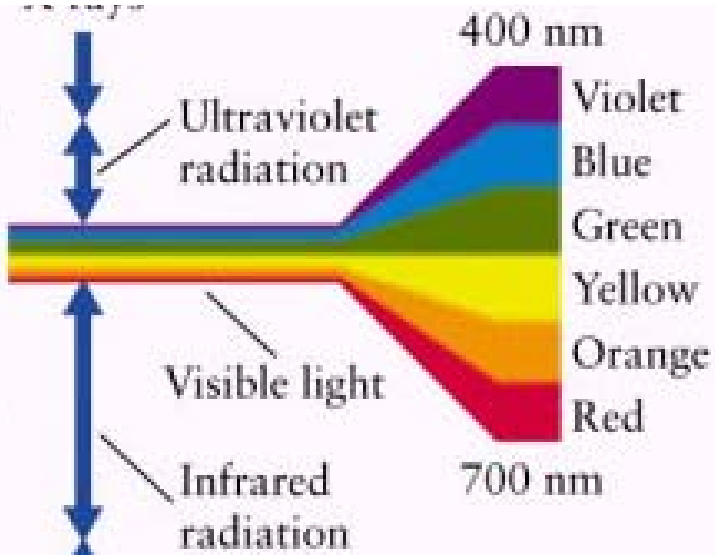




O espectro EM conhecido antes das experiências de Hertz

Até ~1820, a electricidade e o magnetismo eram duas «coisas» sem qualquer relação.

O nosso detector óptico natural é apenas sensível às cores do arco-íris ... e apenas se conhecia a parte vizinha do espectro electromagnético *visível*, e continuava-se sem se saber muito bem o que era a luz (hoje pouco mais sabemos ...)





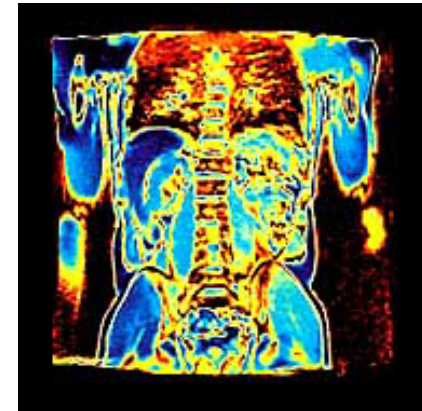
~1800: descoberta da luz infravermelha

uma determinada gama de
ntos de onda. O resto
o electromagnético é
ara o homem.

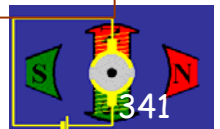
ESPECTRO
a, Herschel investigou
o de cada cor do
pôs a luz com um
o projectar o
an com uma fenda,
ma só cor que fazia
iómetro. Também
cias para observar se



**WILLIAM
HERSCHEL**
Inicialmente
músico, William
Herschel (1738-1822)
tornou-se uma
destacada figura
na história da
astronomia.
Desempenhou
um importante papel
no desenvolvimento do
telescópio de reflexão (págs.
20/21) usando espelhos que
ele próprio fundia e
polia. Em 1781
descobriu o planeta
Úrano.



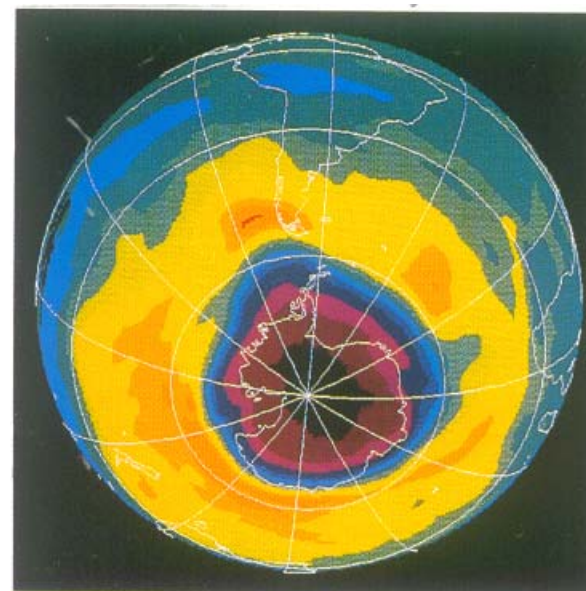
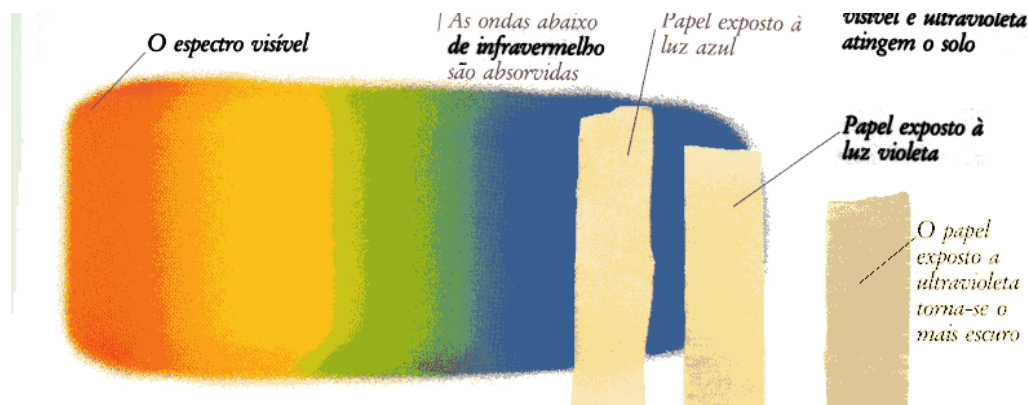
O espectro visível





~1801: descoberta da luz ultravioleta

Carl Wilhelm Scheele descobriu a luz ultravioleta ao estudar o poder «escurecedor» da radiação solar no nitrato de prata.



Fluorescent Mercury Vapor Lamp

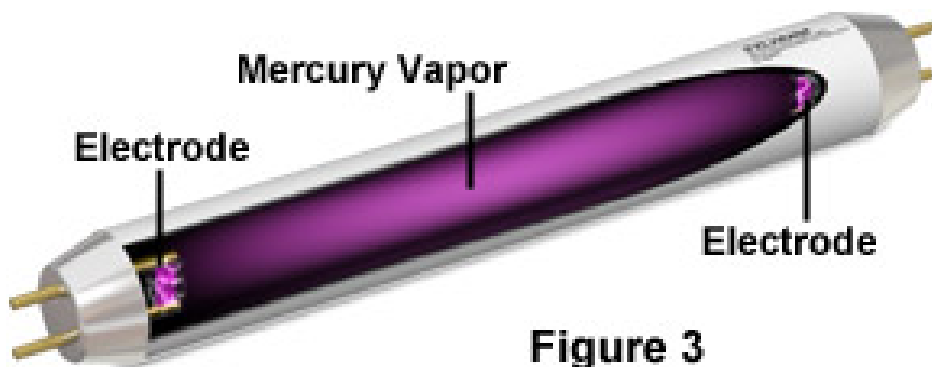
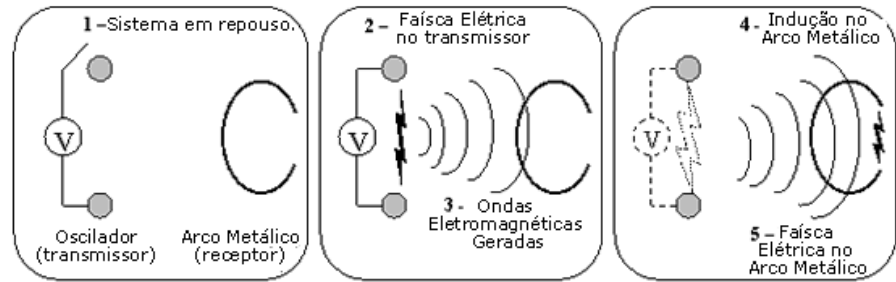
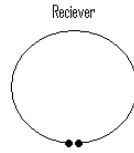
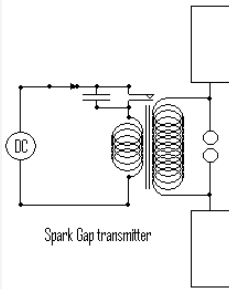


Figure 3

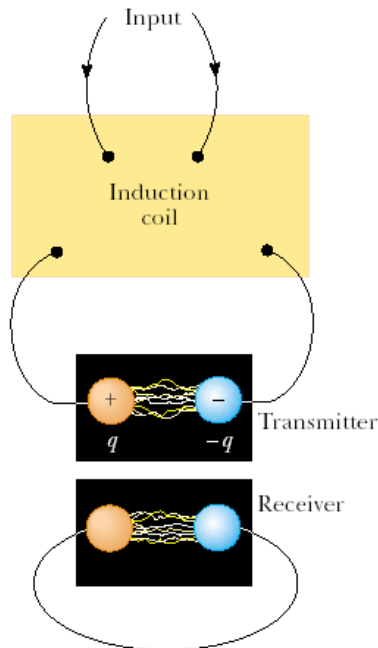




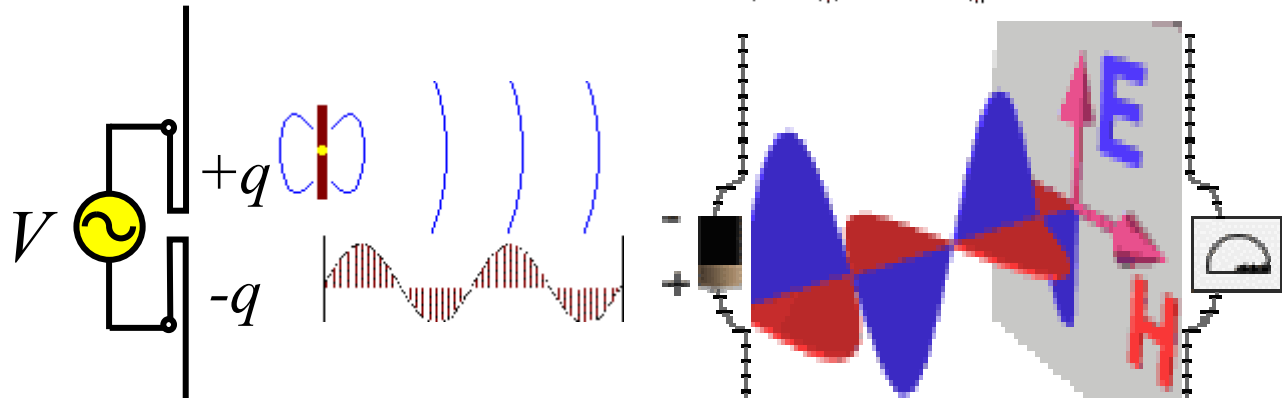
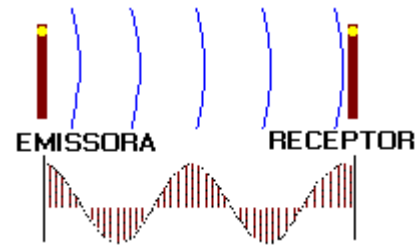
Em 1887 Hertz produz e detecta ondas electromagnéticas



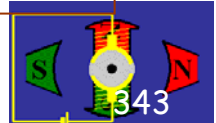
http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Rudolf_Hertz



ondas hertzianas (dipolo oscilante)

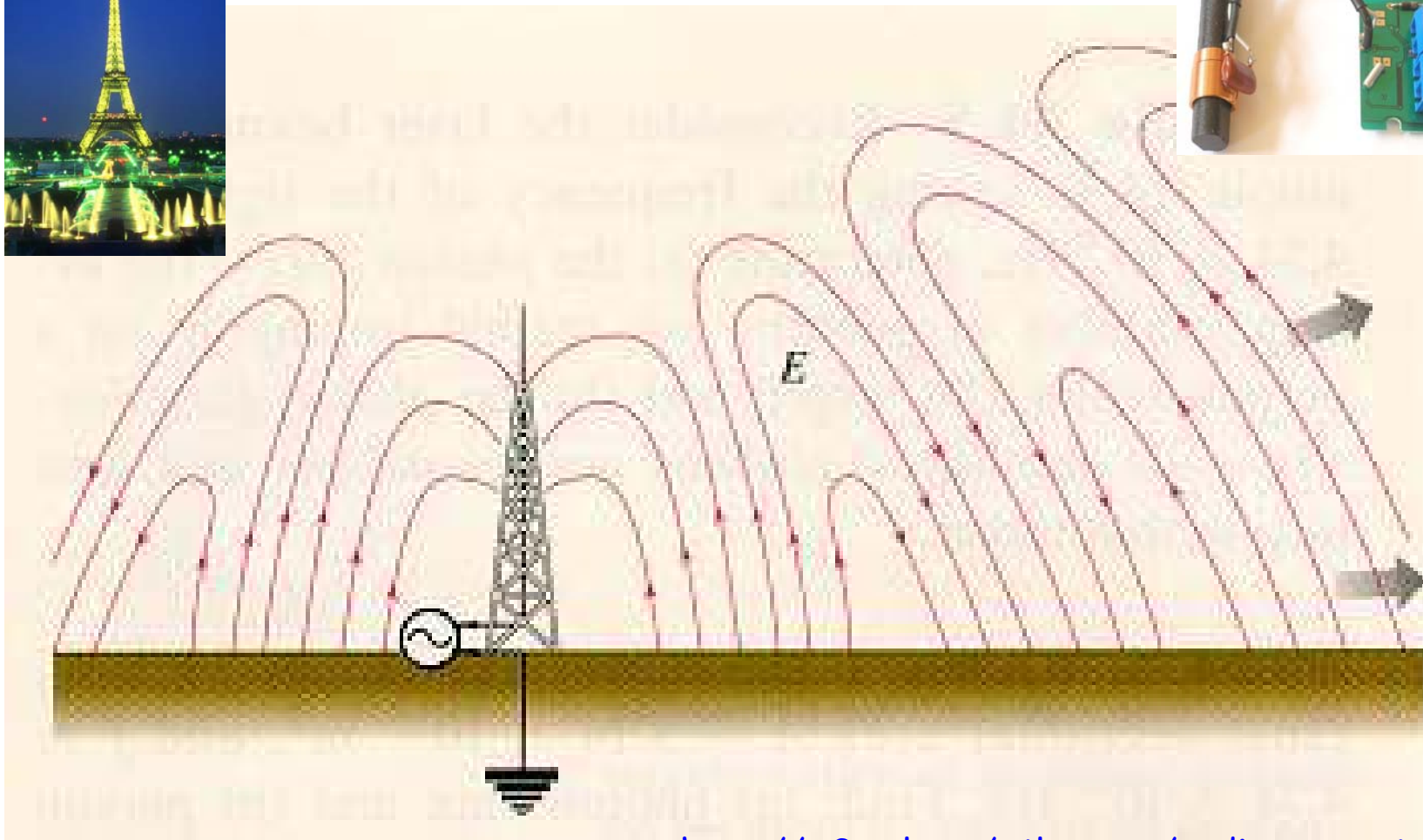
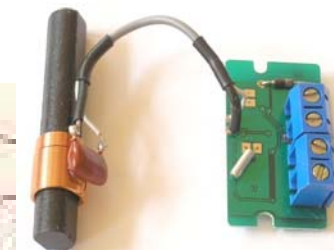


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/TheLightWaveEquation.flv>

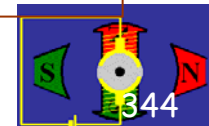




Campo eléctrico emitido por uma antena



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/radio-waves.jar>

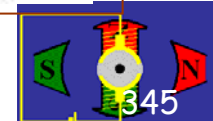
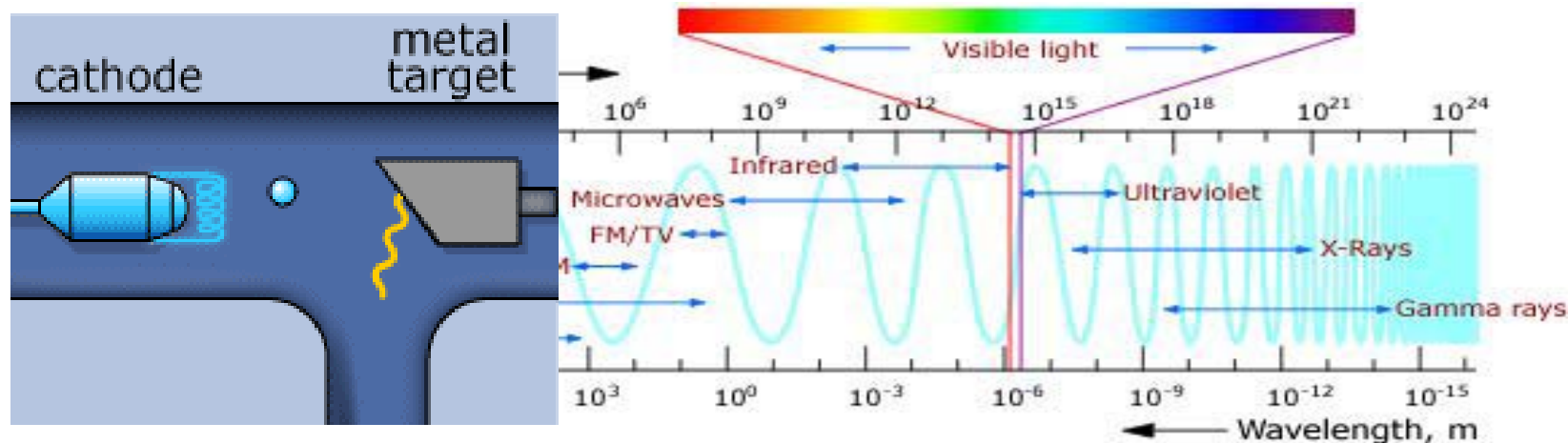




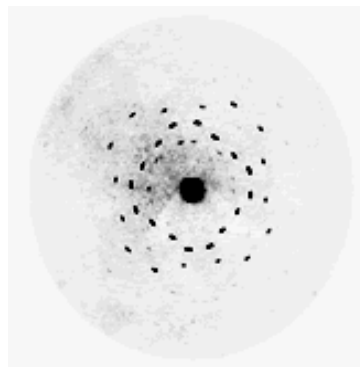
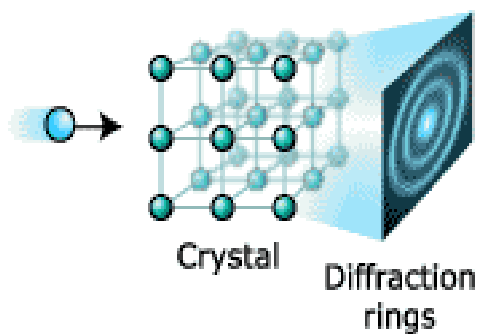
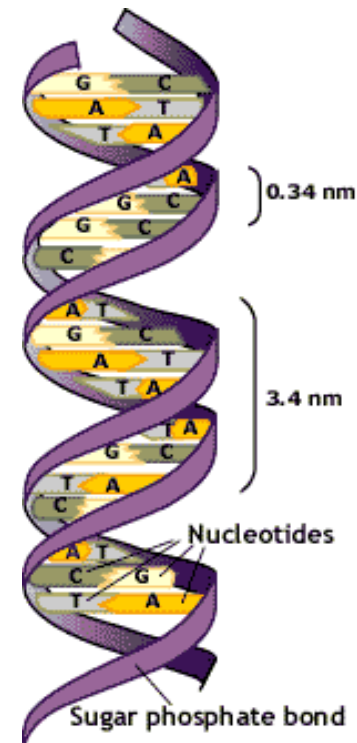
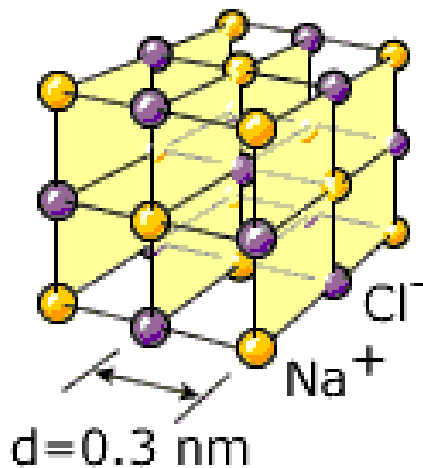
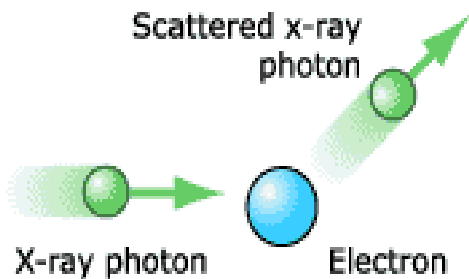
~1895: descoberta dos raios x



Raios X ou raios Roentgen: (fís.) radiações electromagnéticas de pequeníssimo comprimento de onda e de grande poder de penetração, que se produzem quando um feixe de electrões embate contra um obstáculo, e que foram descobertas em 1895 pelo físico alemão W. C. Röntgen, 1845-1923;



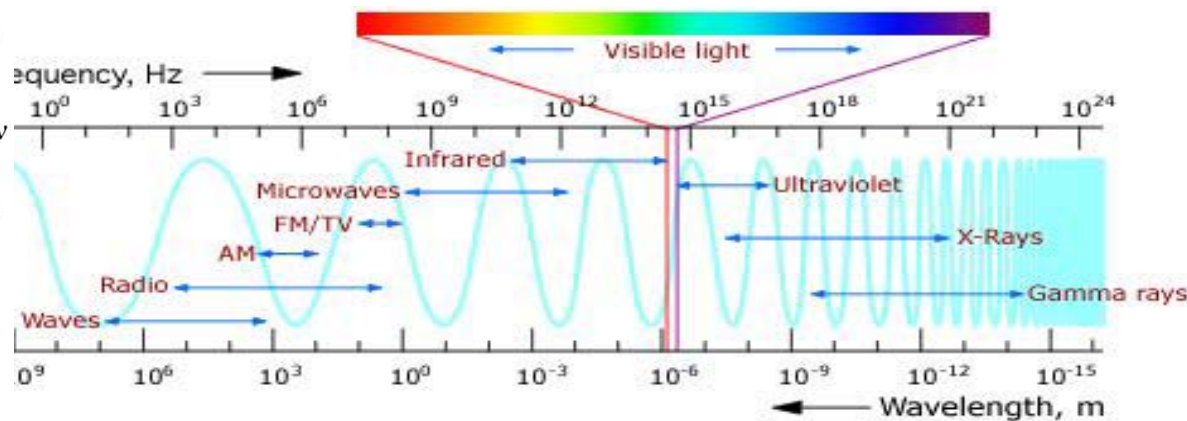
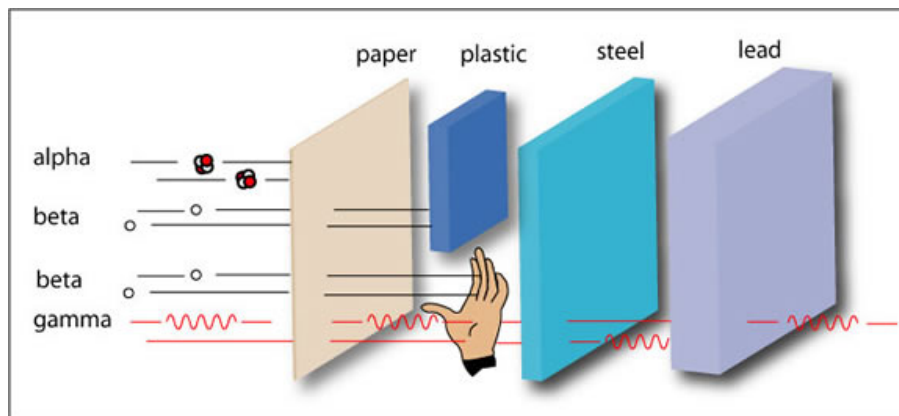
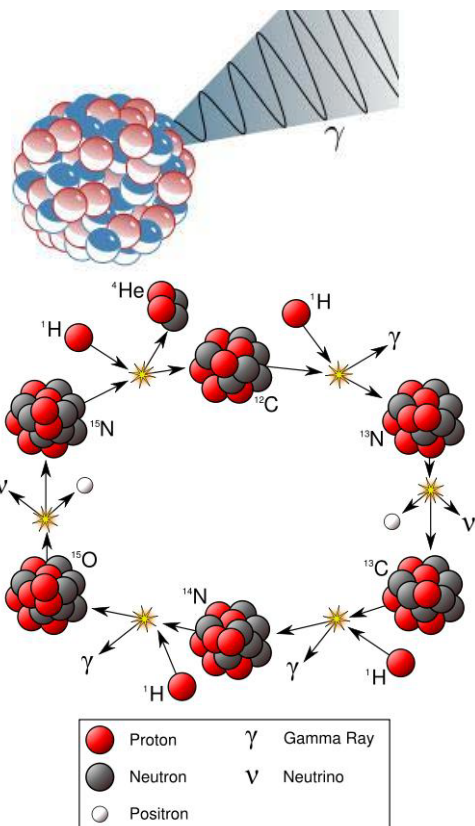
Difracção dos raios x



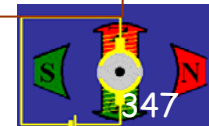


~1900: descoberta dos raios gama

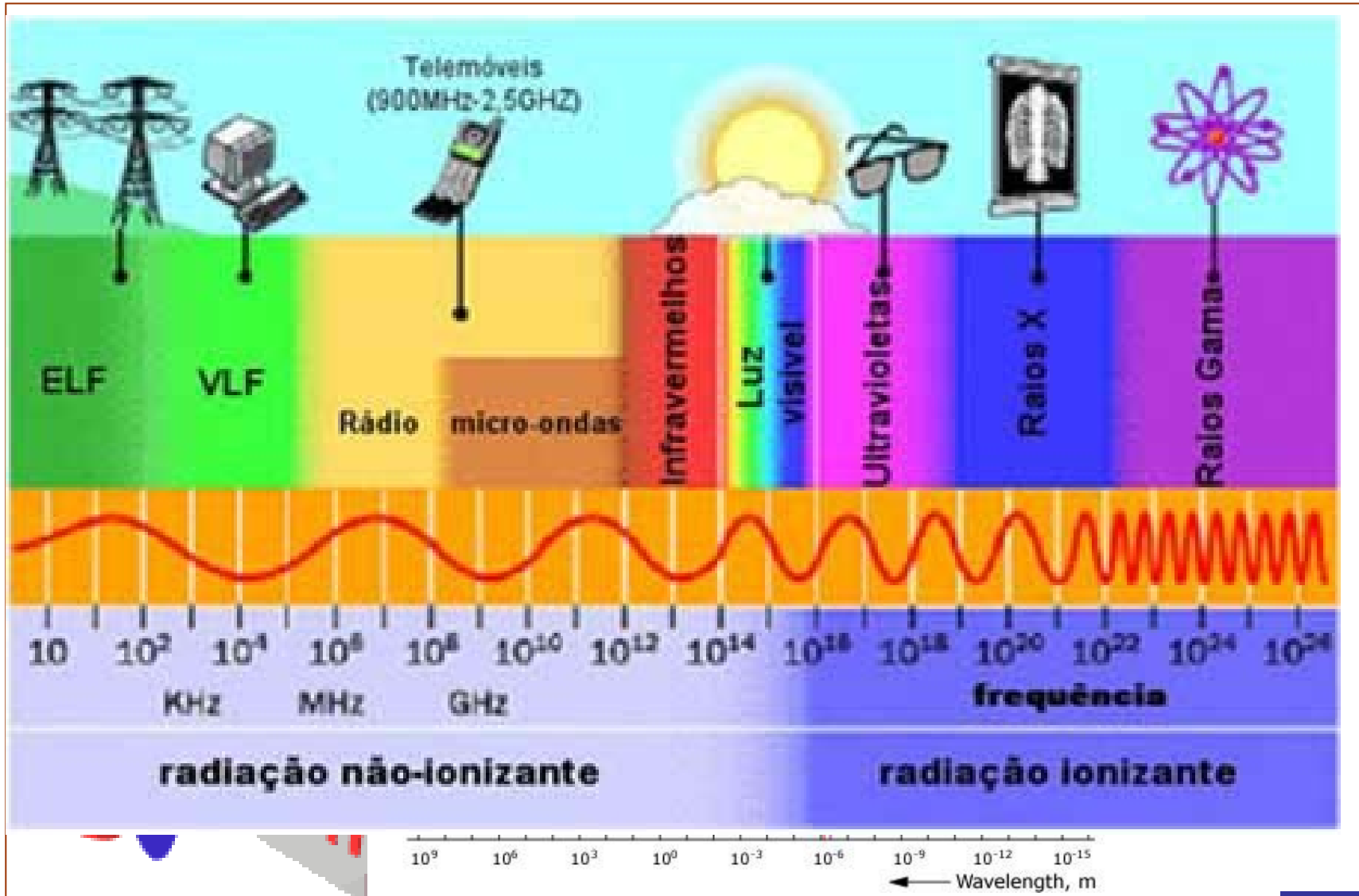
Raios gama: radiação electromagnética emitida por um núcleo atómico como resultado de uma transição quântica entre dois níveis de energia (símbolo γ), descobertas pelo físico francês **Paul Ulrich Villard** (1860 - 1934) quando estudava o urânio;



"O fim do mundo": <http://www.youtube.com/watch?v=7vOS95kMmok>



Espectro electromagnético





Campo óptico e o fóton

O campo eléctrico E é bastante mais eficaz do que o campo magnético a realizar trabalho sobre cargas eléctricas. Por essa razão o campo eléctrico de um campo electromagnético é frequentemente designado como **campo óptico ou campo luminoso**.

A taxa de variação no tempo do fluxo de energia radiante representa uma potência, ou fluxo radiante, expresso em watts. Quando se divide o fluxo radiante que incide ou se afasta de uma superfície pela área dessa superfície, obtém-se a **densidade de fluxo radiante** (W/m^2). No primeiro caso fala-se de **irradiância**, no segundo em **exitância** e, em qualquer dos casos, em densidade de fluxo. A irradiância é uma medida da concentração de potência. De facto, a irradiância é a principal grandeza observável e corresponde ao conceito de "quantidade" de luz que flui.

Existem detectores, como o fotomultiplicador, que permitem a contagem de **fótons** (quanta de energia do campo electromagnético). Cada quantum de energia do campo electromagnético de frequência f , tem **uma energia** $\varepsilon = hf$ (h é a constante de Planck, 6.625×10^{-34} J/s). Também possui **momento** dado por $p = hf/c$; vectorialmente $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$ ($\hbar = h/2\pi$).

O **número médio de fótons** de um feixe monocromático de frequência f e irradiância I , que atravessam uma área unitária normal ao feixe designa-se **densidade de fluxo de fótons** e é dado por I/hf .





Ondas Electromagnéticas

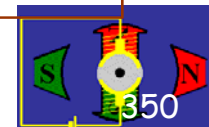
-

Produção de ondas electromagnéticas. Transporte de energia e momento

Onda: (fís.) perturbação, contínua ou transitória, que se propaga com transporte de energia através de um meio, quer em virtude das propriedades elásticas e de inércia do meio, quer em virtude das propriedades eléctricas ou magnéticas do espaço;

Antena [e]: s. f. condutor eléctrico destinado à emissão ou recepção de ondas electromagnéticas;

Modulação: alteração provocada, **propositadamente**, nas características de uma oscilação ou de uma onda (amplitude, frequência, etc.) de forma a introduzir informação numa onda sinusoidal (portadora); processo de adicionar «sinais» (**informação**) a uma onda de frequência muito superior (onda **portadora**) à frequência máxima dos sinais a transmitir.





Produção de ondas electromagnéticas

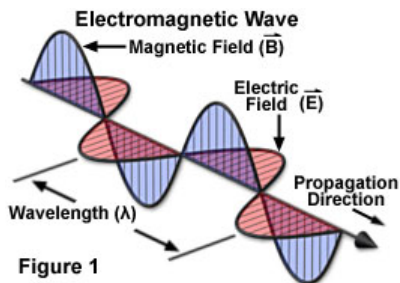
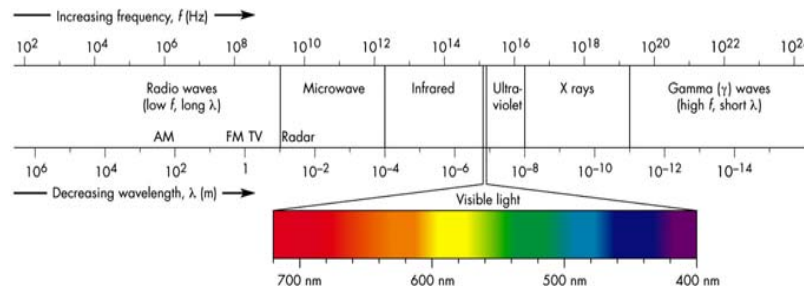
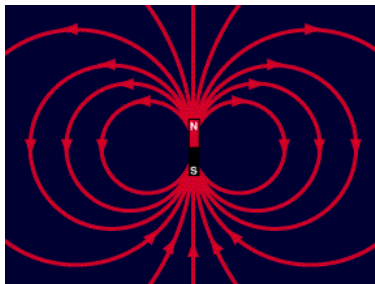


Figure 1



A radiação electromagnética (EM) é produzida sempre que ocorre uma alteração de fluxo de carga eléctrica (variação de corrente eléctrica), por carga livres aceleradas ou quando ocorrem transições atómicas ou moleculares para estados de menor energia.

Exemplo: uma variação na intensidade de corrente eléctrica num fio condutor gera uma onda electromagnética que se propaga em certas direcções -o princípio de funcionamento de uma antena dipolar. Em geral, uma antena radia eficientemente energia se a sua dimensão for da ordem de meio comprimento de onda da radiação.

No vazio ou no ar as OEM propagam-se a ~ 300000 km/s, independentemente das suas características (amplitude, frequência e fase). Num meio material a velocidade de propagação, em geral, depende da frequência (**fenómeno da dispersão** - ver cap. 10).





Propagação de ondas electromagnéticas



A intensidade de uma onda EM num dado ponto do espaço depende da **potência da fonte** e é **inversamente proporcional ao quadrado da distância** desta a esse ponto (propriedade útil em iluminação ou radiodifusão, embora na comunicação *ponto-a-ponto* não seja vantajosa, porque apenas uma fracção de energia atinja o receptor, sendo o resto «desperdiçado»). O uso de reflectores parabólicos, ou antenas que direccionam espacialmente a energia, aumenta o alcance da radiação emitida.

O alcance das OEM é limitado pela inevitável atenuação do sinal. Os fenómenos que limitam o alcance de um sinal EM são: a **absorção** e a **dispersão** (pela atmosfera ou por outros meios materiais), e obstáculos.

A **guiagem** da radiação usando cabos, guias de onda e fibra óptica reduz fortemente os seus efeitos.





Energia transportada pela OEM: vector de Poynting

Uma OEM transporta energia - esta é uma das suas características mais significativas. A luz produzida pela estrela mais próxima de nós, para além do Sol, demora a chegar a chegar à Terra cerca de 4 anos luz, mas transporta ainda energia suficiente para realizar trabalho sobre os electrões dos nossos olhos.

A energia radiante por unidade de volume de um campo EM ou **densidade de energia** u , é a soma da densidade de energia associada ao campo eléctrico (como a calculada para o campo entre as placas de um condensador) com a densidade energia associada ao campo magnético (como a energia de um anel de corrente - bobina):

$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2\mu} B^2 = \epsilon E^2 = \frac{1}{\mu} B^2$$

Vector de Poynting

O fluxo de energia electromagnética S por unidade de tempo (potência) através da unidade de área perpendicularmente à direcção de propagação é descrito pelo vector de Poynting:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B} = c^2 \epsilon \vec{E} \times \vec{B}, \quad |\vec{S}| = uc = \frac{1}{\mu} EB = \frac{1}{c\mu} E^2$$

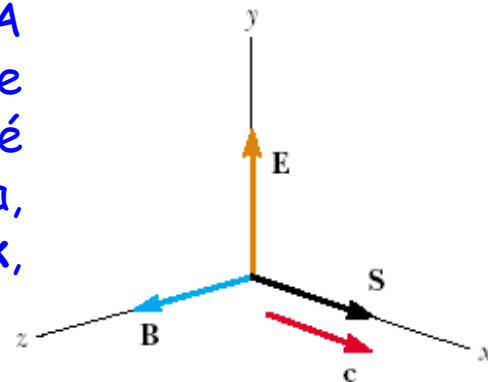




Energia transportada pela OEM: irradiância

Ter presente que o vector \mathbf{S} varia no tempo. A amplitude de \mathbf{S} representa potência por unidade de área que flui através de uma superfície cuja normal é paralela a \mathbf{S} (W/m^2). Para uma onda harmónica plana, polarizada linearmente, que se propaga na direcção \mathbf{k} ,

tem-se:
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B} = c^2 \varepsilon \vec{E} \times \vec{B}, \quad |\vec{S}| = uc = \frac{1}{\mu} EB$$



Para frequências óptica, \mathbf{S} é uma função que varia rapidamente no tempo, não sendo possível fazer a sua medida experimental. De facto, S varia duas vezes mais depressa que o campos. O que se pode medir é a energia captada durante um certo intervalo finito por um dado detector (por exemplo, um célula fotoelétrica, um filme fotográfico ou a retina). O valor médio no tempo da amplitude do vector de Poynting \mathbf{S} , constitui uma medida da **irradiância** I ou **intensidade**.*

$$\langle S \rangle = \langle |\vec{S}| \rangle = c^2 \varepsilon |\vec{E}_0 \times \vec{B}_0| \langle \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} c^2 \varepsilon |\vec{E}_0 \times \vec{B}_0| \rightarrow I = \langle S \rangle = \frac{1}{2} c^2 \varepsilon E_0^2$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{c}{\mu} \langle B^2 \rangle = c \varepsilon \langle E^2 \rangle$$

*Em Óptica usa-se o termo **irradiância**.

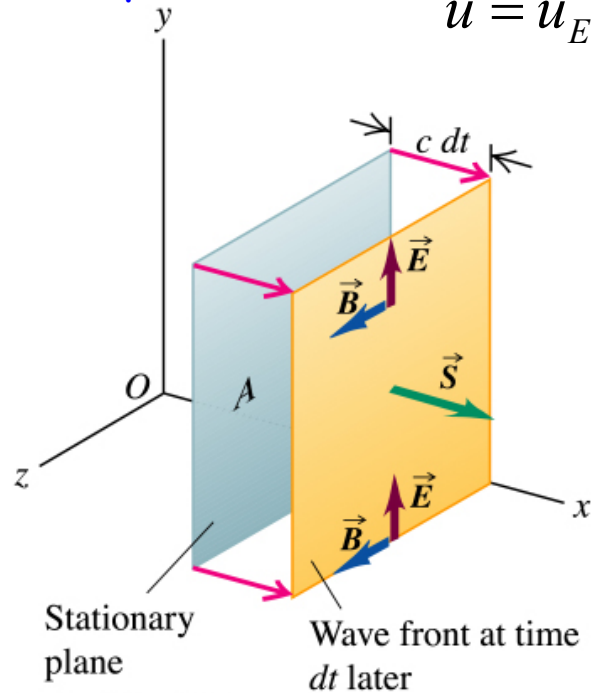




Potência emitida pelo Sol e constante Solar

A densidade de energia transportada por uma onda electromagnética é dada por:

$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2\mu} B^2 = \epsilon E^2 = \frac{1}{\mu} B^2$$



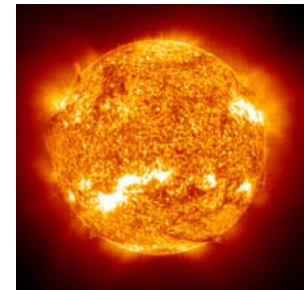
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Frente de onda dt segundos após ter atravessado um plano estacionário de área A . O volume entre o plano e a frente de onda contém a quantidade de energia electromagnética: $U_{V=Ac dt} = uAc dt$

Potência emitida pelo Sol (P_S) e a constante solar (I_S):

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

$$I_S = 1387 \text{ W}$$



Vídeo: experiência de William Herschel (XIX) - determinação a potência emitida pelo Sol; ver p.ex. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_luminosity,

"The power of the Sun": http://w3.ualg.pt/~jlongras/O_poder_do_Sol.wmv 2.





Momento transportado pela OEM: pressão de radiação

Em 1610 Johannes Kepler propôs um modelo para explicar a orientação peculiar da cauda de um cometa próximo do Sol. Segundo Kepler a pressão exercida pela luz solar seria responsável pela orientação da cauda em oposição ao Sol. (Atraente para a teoria corpuscular.) Em 1873, Maxwell concluiu teoricamente que as ondas também deveriam exercer pressão. Essa **pressão** deveria ser numericamente igual à energia por unidade de volume:

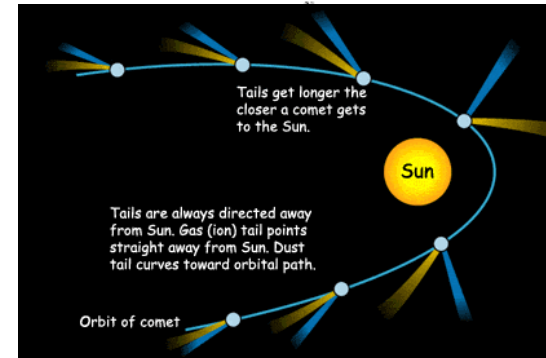
$$P = u = u_E + u_B = \frac{S}{c} \rightarrow \langle P \rangle = \frac{\langle S \rangle}{c} = \frac{I}{c}$$

Se o momento for p , a pressão exercida pelo feixe sobre superfícies absorvente e reflectoras é:

$$AP = \frac{\Delta p}{\Delta t}; \text{ se } p_V = \frac{\Delta p}{(c\Delta tA)}:$$

$$p_{V, \text{ com absorção}} = \frac{\langle S \rangle}{c^2} = \frac{U}{c} \quad \text{e} \quad p_{V, \text{ com reflexão}} = 2 \frac{\langle S \rangle}{c^2} = 2 \frac{U}{c}$$

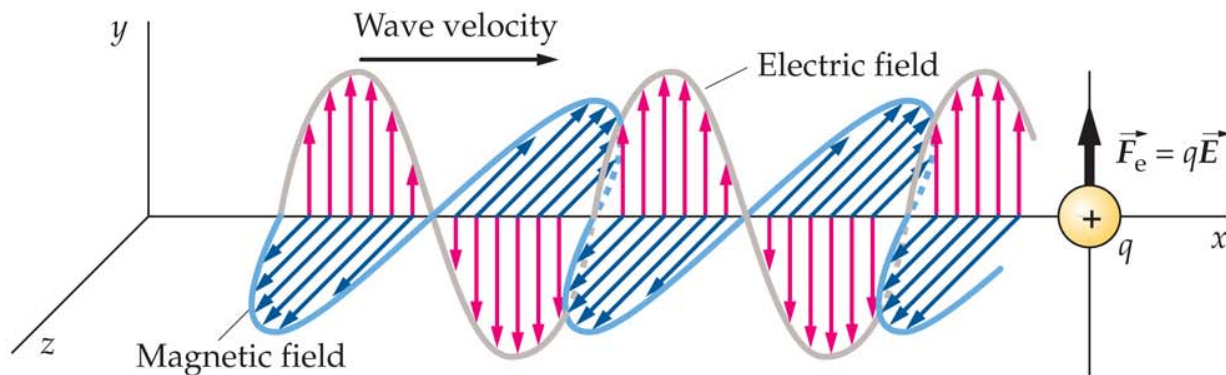
http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail



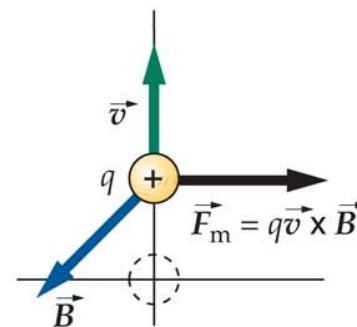


Pressão de radiação

Uma onda electromagnética incidente numa carga pontual em repouso: a força eléctrica acelera a carga para cima; quando a velocidade da carga é para cima, a força magnética acelera a carga na direcção do vector de onda da onda.



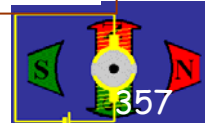
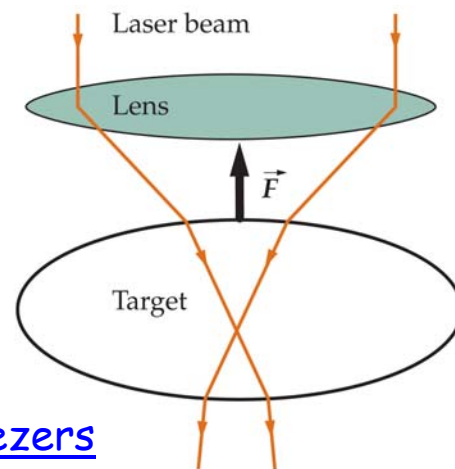
(a)



(b)

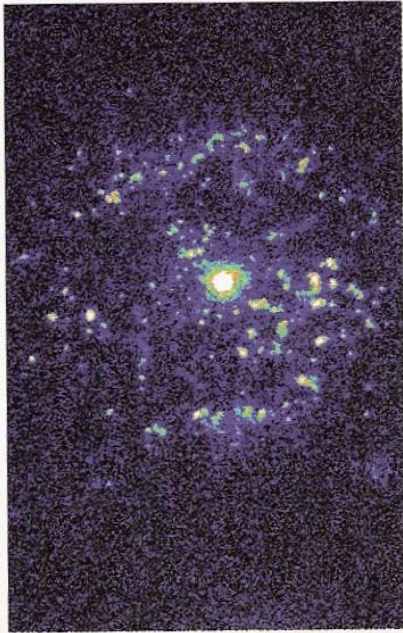
Pinças ópticas

As "pinças ópticas" fazem uso da quantidade de movimento (momento) transportada por ondas electromagnéticas para manipular objectos de dimensões microscópicas. Os dois "feixes/raios" são desviados ao passar pelo alvo transparente, como uma célula biológica, o que faz com que o alvo seja puxado para cima. A força é tipicamente da ordem de piconewtons. http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_tweezers





Pressão de radiação da luz do Sol



From time to time the unusual star at the center of this image undergoes a dramatic increase in brightness. When this happens, radiation pressure at the star's surface becomes so strong that part of its outer layers are ejected into space. Some of this ejected material appears as glowing blobs surrounding the star.

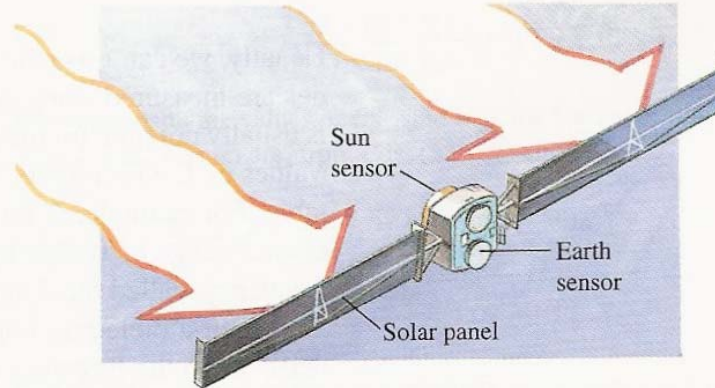
EXAMPLE 33-4

Power and pressure from sunlight An earth-orbiting satellite has solar-energy-collecting panels with a total area of 4.0 m^2 (Fig. 33-13). If the sun's radiation is perpendicular to the panels and is completely absorbed, find the average solar power absorbed and the average force associated with radiation pressure.

SOLUTION From the above discussion the intensity I (power per unit area) is $1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$. Although the light from the sun is not a simple sinusoidal wave, we can still use the relationship that the average power P is the intensity I times the area A :

$$P = IA = (1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2)(4.0 \text{ m}^2) = 5.6 \times 10^3 \text{ W} = 5.6 \text{ kW}.$$

This is a substantial amount of power, part of which can be used



33-13 Solar-energy-collecting panels on a satellite.

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





Radiómetro de Crookes



Demonstração

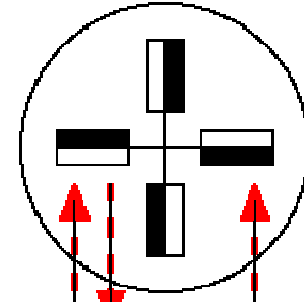
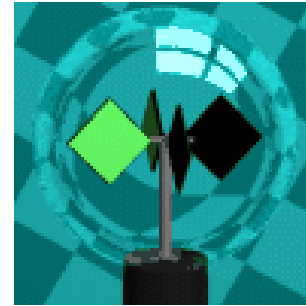
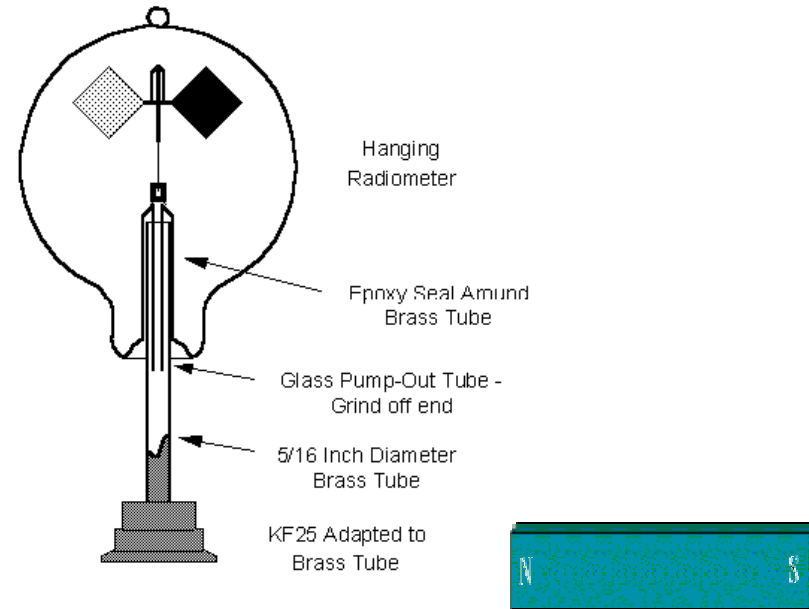


Figure 1 - Radiometer Adaptation



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





Ondas Electromagnéticas

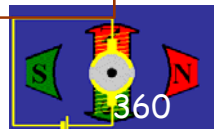
-

Antenas

Onda: (fís.) perturbação, contínua ou transitória, que se propaga com transporte de energia através de um meio, quer em virtude das propriedades elásticas e de inércia do meio, quer em virtude das propriedades eléctricas ou magnéticas do espaço;

Antena [e]: s. f. condutor eléctrico destinado à emissão ou recepção de ondas electromagnéticas;

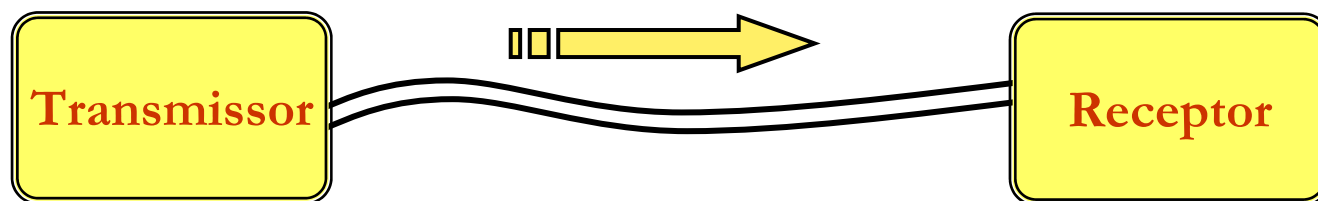
Modulação: alteração provocada, **propositadamente**, nas características de uma oscilação ou de uma onda (amplitude, frequência, etc.) de forma a introduzir informação numa onda sinusoidal (portadora); processo de adicionar «sinais» (**informação**) a uma onda de frequência muito superior (onda **portadora**) à frequência máxima dos sinais a transmitir.



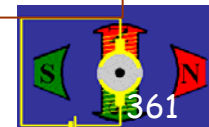
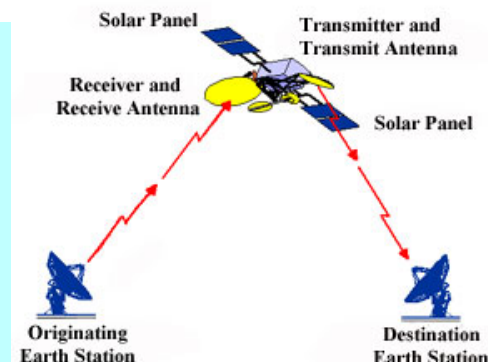
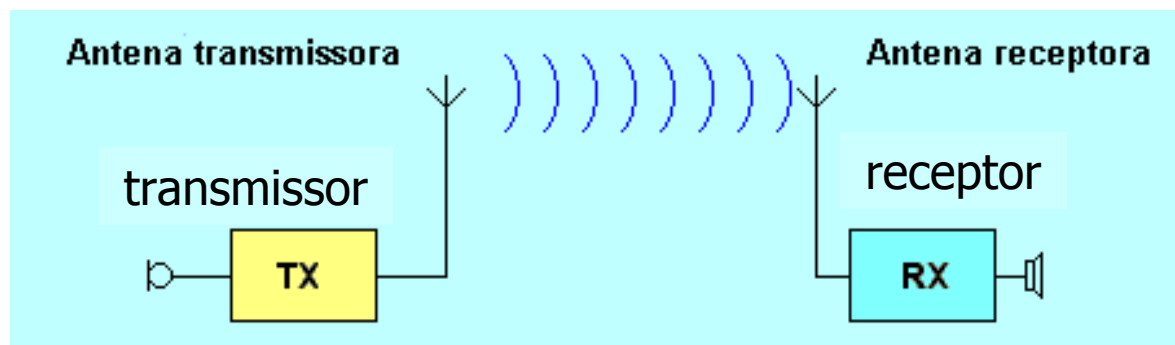


A propagação da radiação EM pode ser livre ou guiada

propagação guiada (fios, cabos, tubos, fibra óptica)



– propagação livre (na atmosfera ou via satélite)

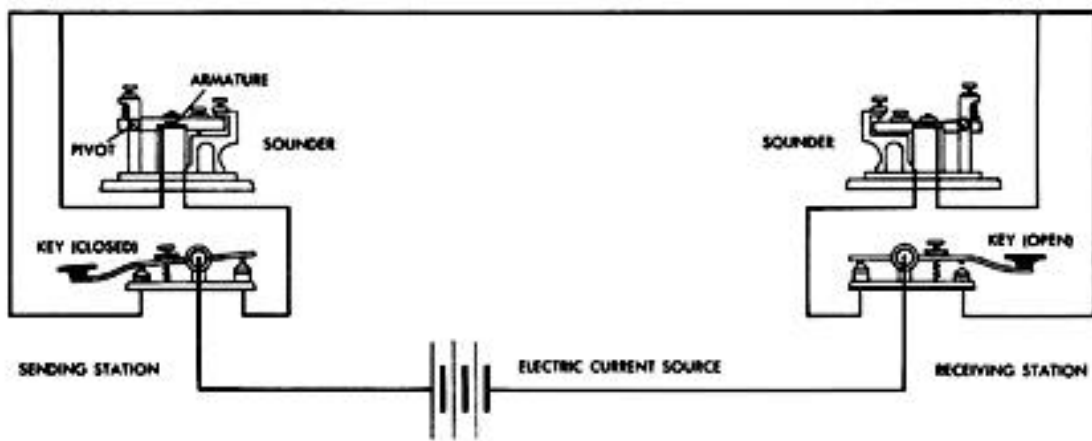




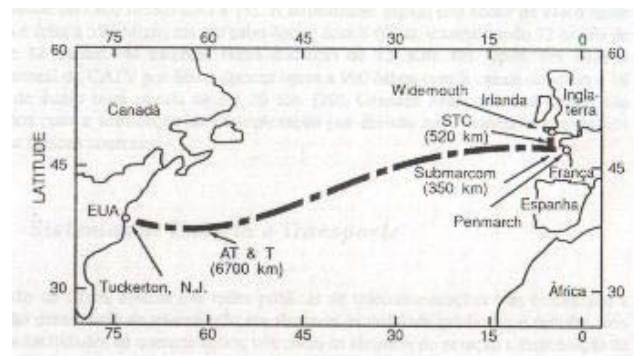
Telegrafia com fios (Samuel Morse)

- 1729: Stephan Gray descobriu que a electricidade pode ser transmitida
- 1746: Galvani inventou o electrómetro (de *electro-* + *-metro*)

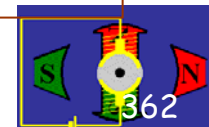
Telégrafo de fios, 1845



Cabos submarinos

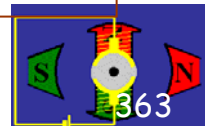
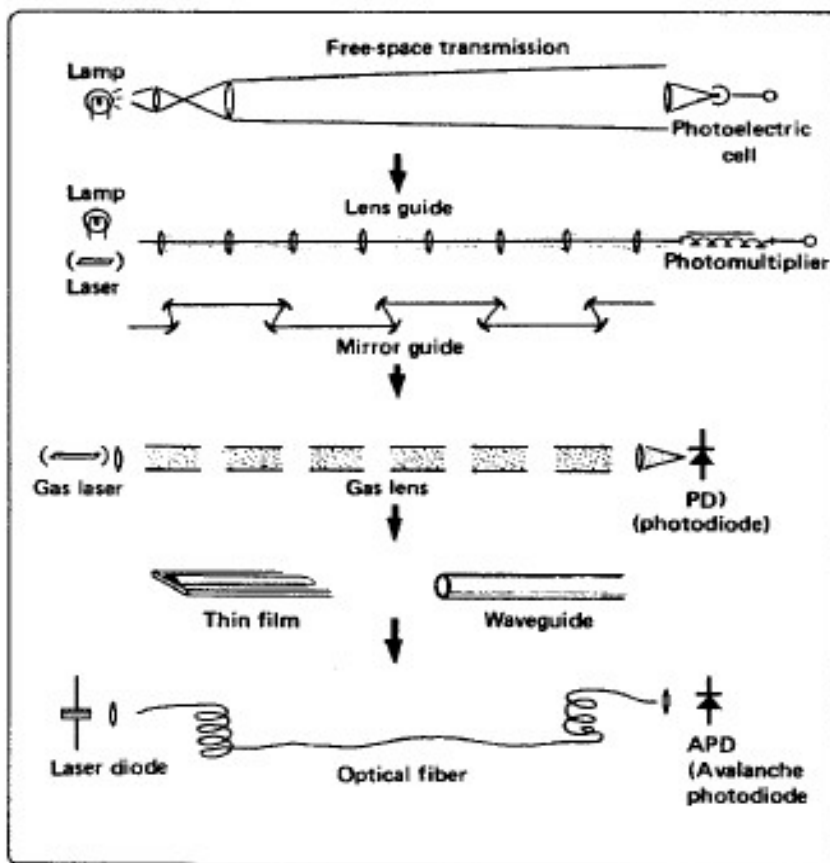
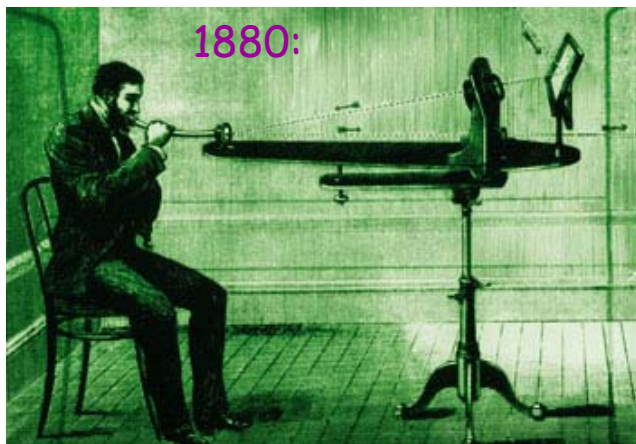


http://en.wikipedia.org/wiki/Submarine_communications_cable



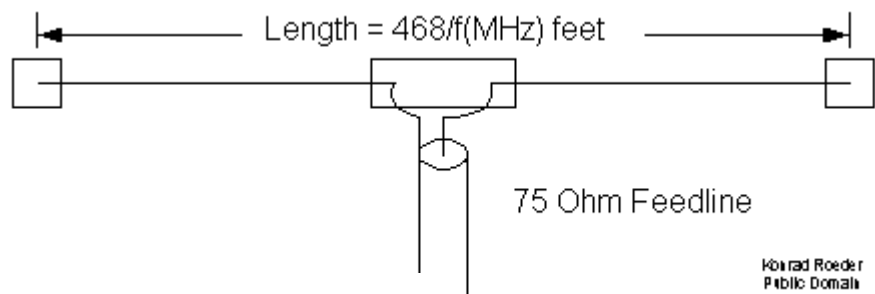


A propagação livre necessita de antenas

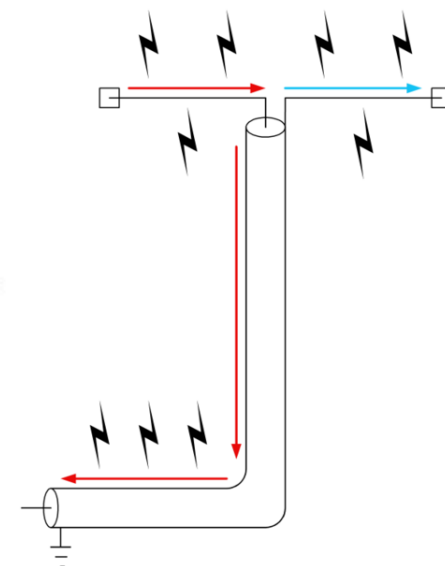
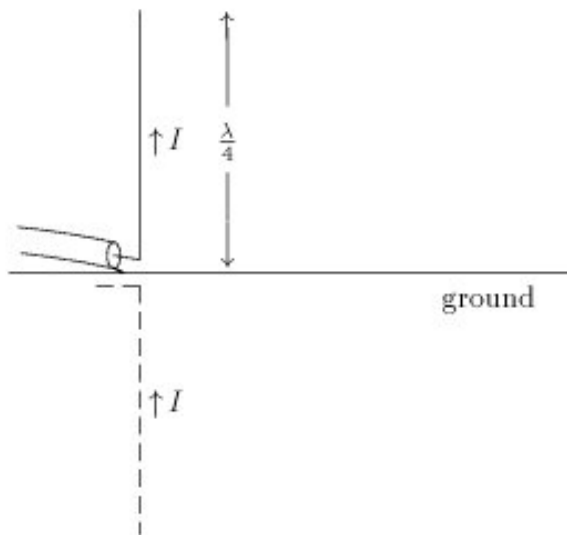
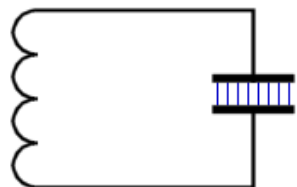




Antenas dipolares



Konrad Roeder
Public Domain

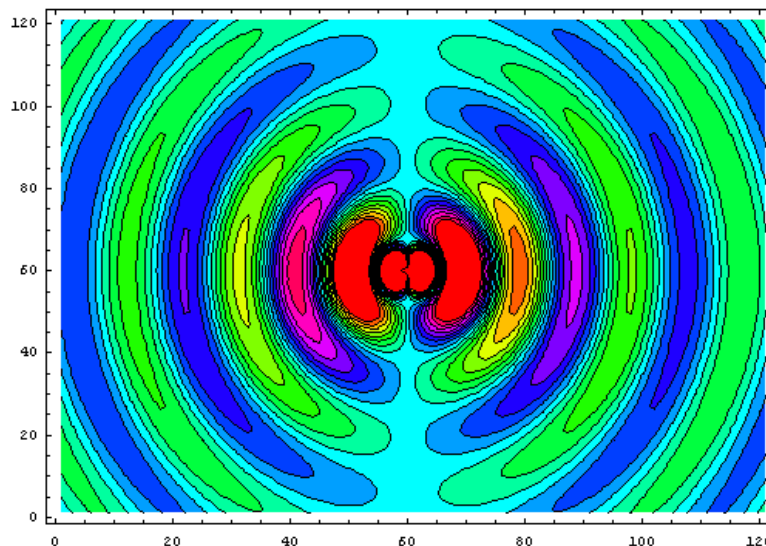
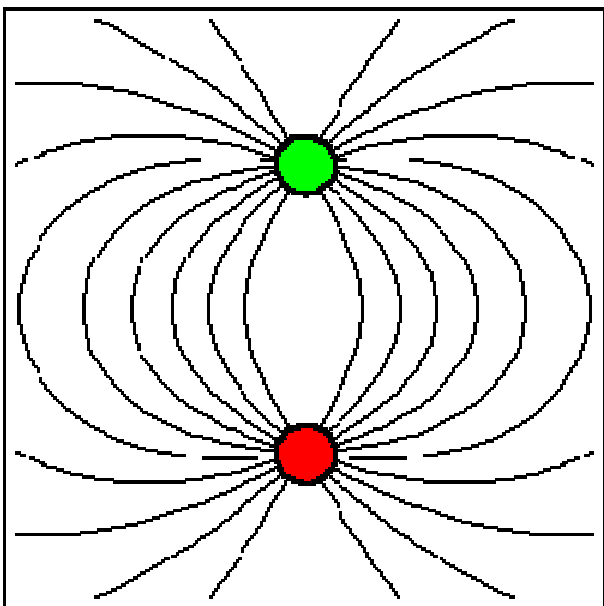
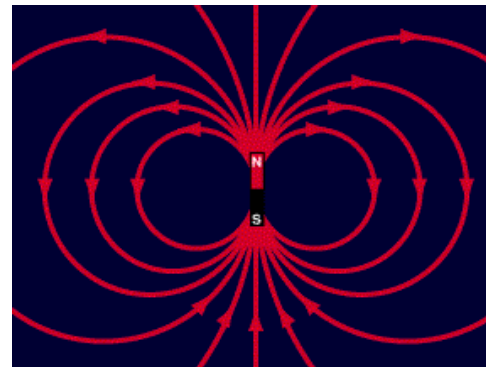
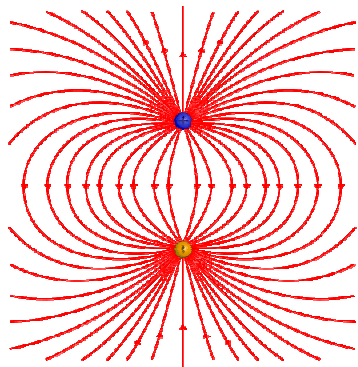
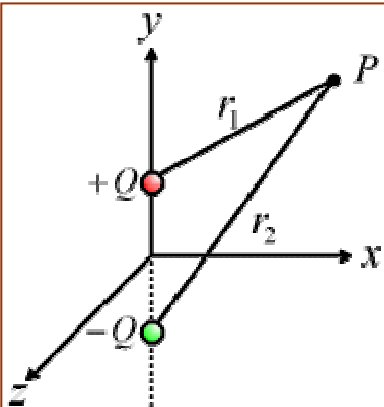


A Rádio Boa Nova ... http://www.radioboanova.com/a_radio.htm ... Montou o Centro Emissor na Catraia de S. Paio, por cima do depósito de armazenamento de Água, com emissor novo e 2 antenas dipolares, com emissão em estereofonia e já algum equipamento profissional.

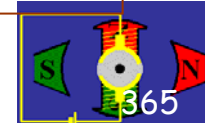




Rever dipolo eléctrico

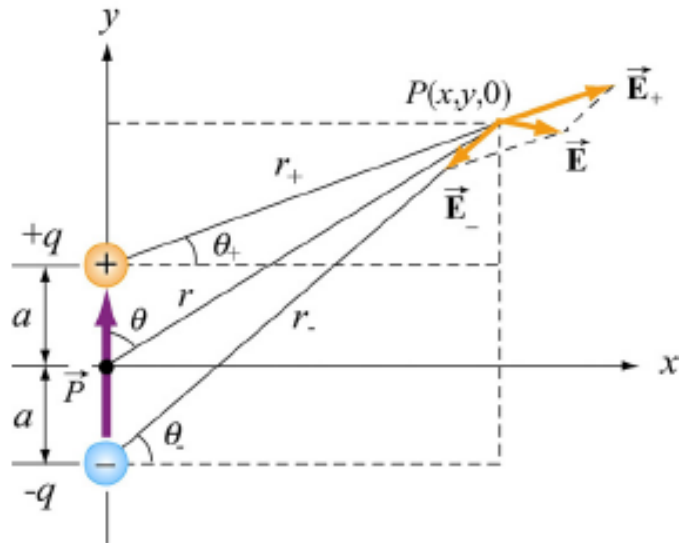


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/radio-waves.jar>





Campo E criado por um dipolo eléctrico



In the “point-dipole” limit where $r \gg a$

$$E_x = \frac{3p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sin\theta \cos\theta$$

$$E_y = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} (3\cos^2\theta - 1)$$

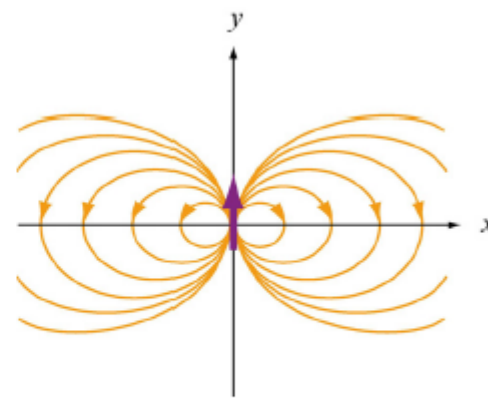
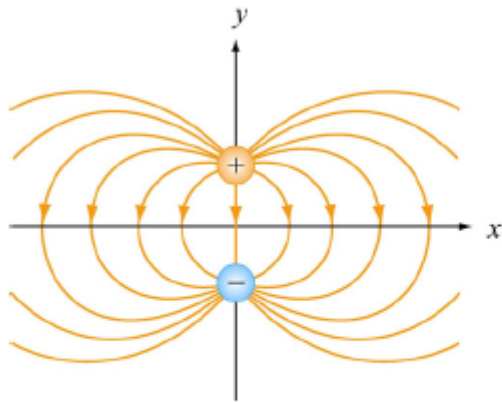


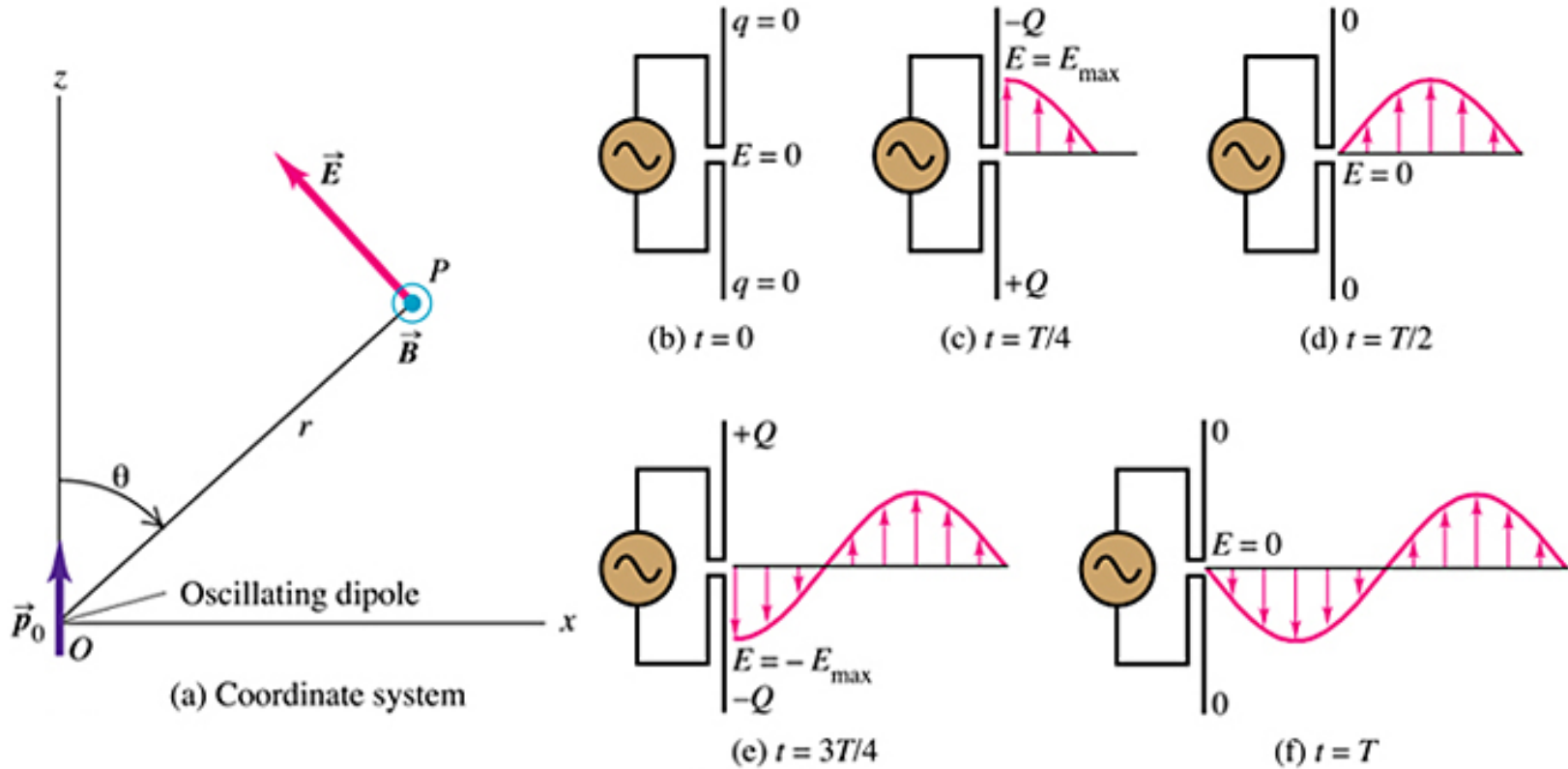
Figure 2.7.2 Electric field lines for (a) a finite dipole and (b) a point dipole.





Radiação de uma antena dipolar

Um ciclo de uma onda electromagnética produzida por uma antena de dipolo eléctrico oscilante. As setas vermelhas representam o campo eléctrico (o campo magnético não está representado).

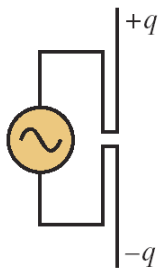


$$p(t) = p_0 \cos \omega t = qd \cos \omega t \rightarrow E(r, t) = \frac{p_0 k^2 \sin \theta \cos(kr - \omega t)}{4\pi\epsilon_0 r} \rightarrow I(r, \theta) = \frac{p_0^2 \omega^4 \sin^2 \theta}{32\pi^2 c^3 \epsilon_0 r^2}$$





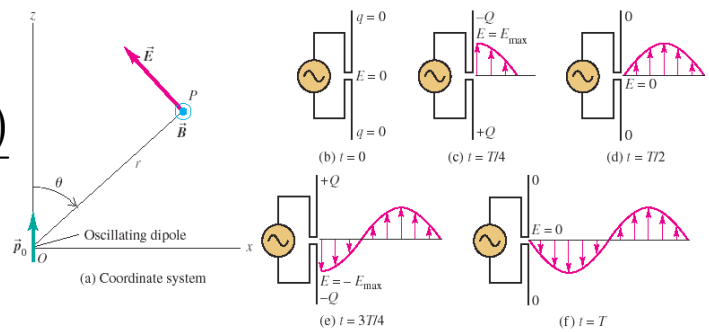
Radiação de uma antena dipolar (2)

ac source 

$$p(t) = p_0 \cos \omega t = qa \cos \omega t$$

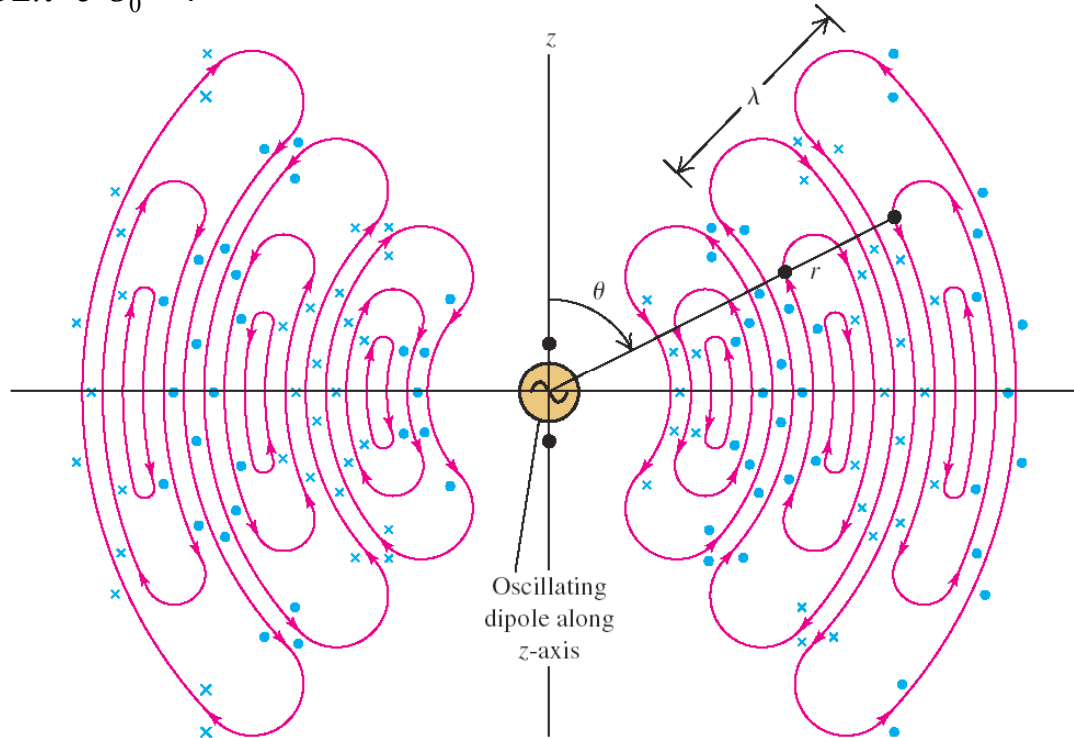
$$E(r, t) = \frac{p_0 k^2 \sin \theta \cos(kr - \omega t)}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$I(r, \theta) = \frac{p_0^2 \omega^4 \sin^2 \theta}{32\pi^2 c^3 \epsilon_0 r^2}$$



T11.1 An oscillating electric dipole antenna. Each terminal of an ac source is connected to a straight conductor; the two conductors together comprise the antenna. As the voltage across the source oscillates, the charges on the two conductors also oscillate. The charges are always equal in magnitude and opposite in sign.

T11.3 Representation of the electric field (red lines) and the magnetic field (blue dots and crosses) in a plane containing an oscillating electric dipole. During one period the loop of \vec{E} shown closest to the source moves out and expands to become the loop shown farthest from the source. You can use Eq. (32.28) and the right-hand rule to find the direction of the Poynting vector \vec{S} at each point within the pattern. No energy is radiated along the axis of the dipole.

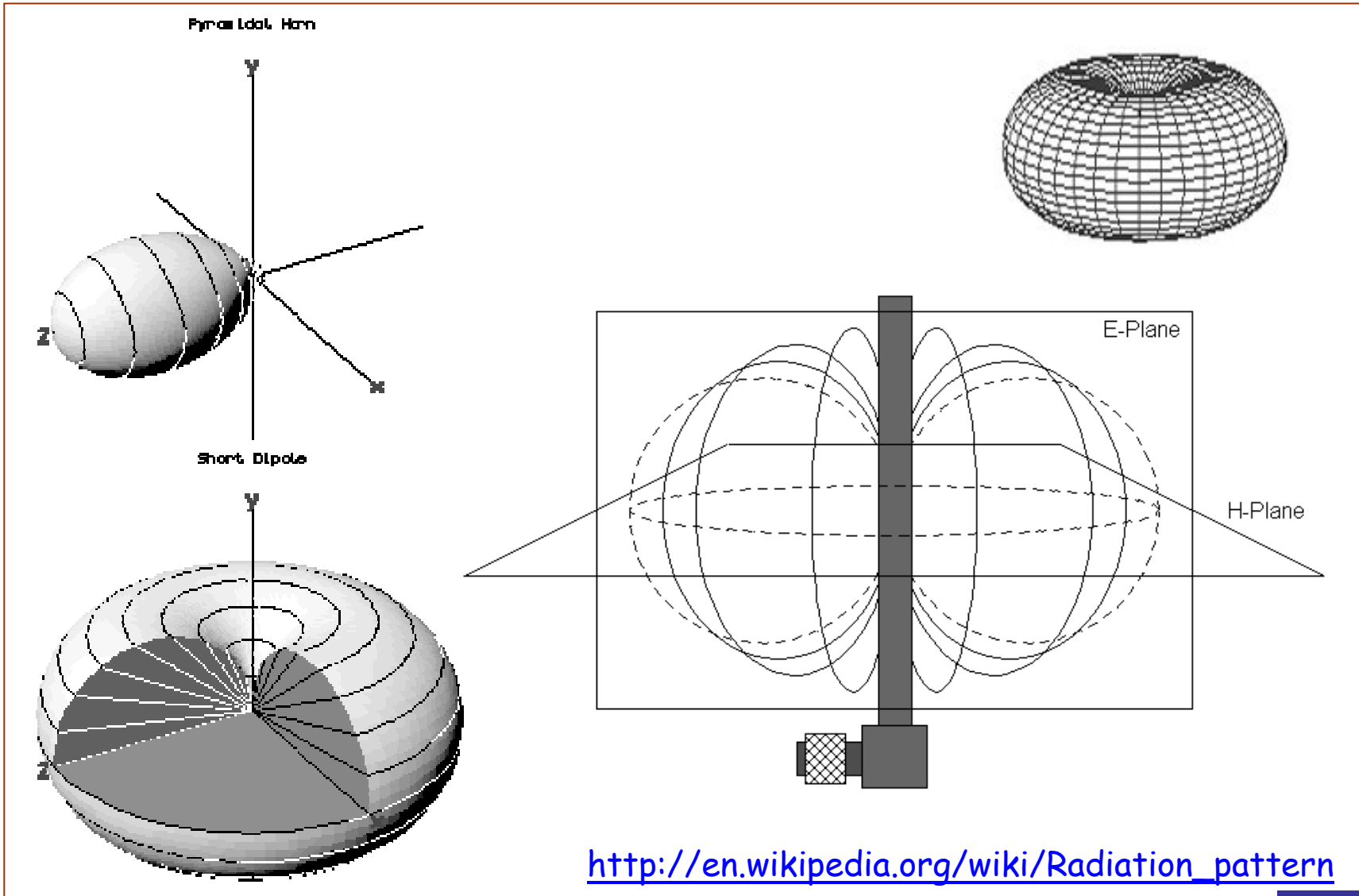


C 2004 Pearson Educational / Addison Wesley





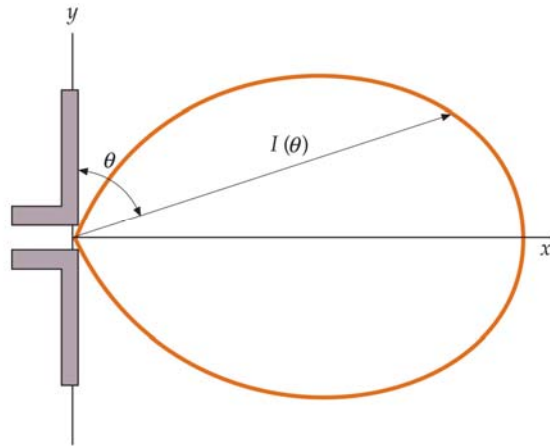
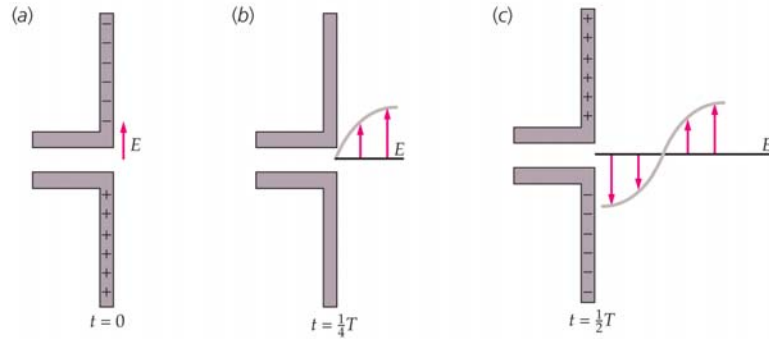
Padrão de radiação da antena dipolar



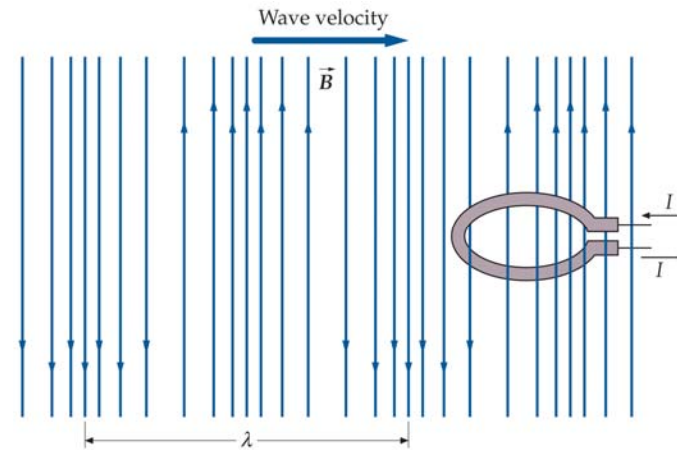
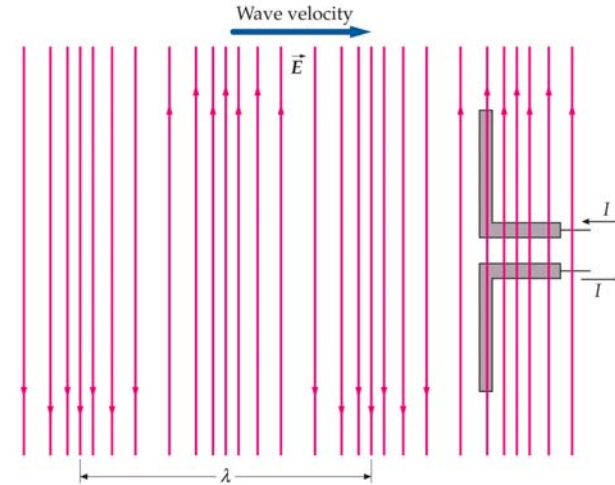


Antena dipolar em modo de recepção

Emissão



Recepção

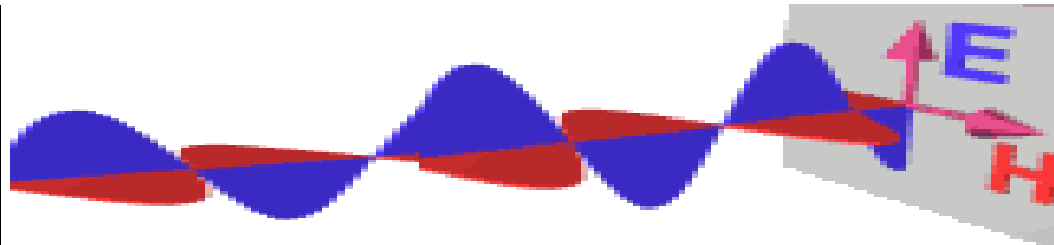
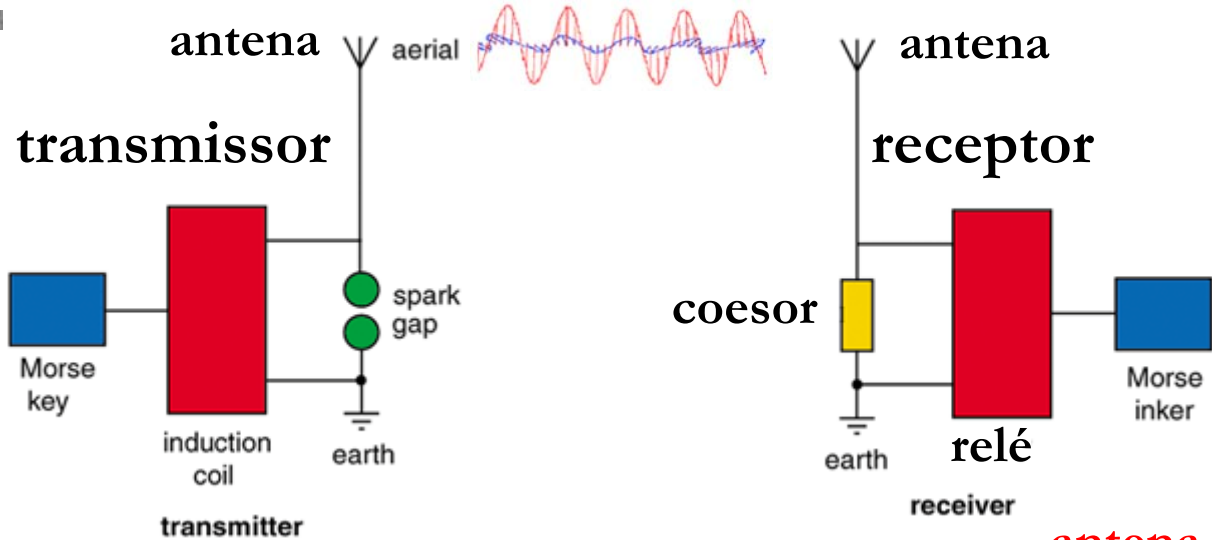
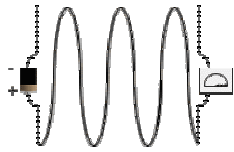


©2008 by W.H. Freeman and Company

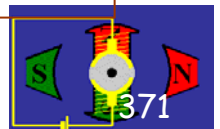




Sistema de comunicação sem fios (radiodifusão)



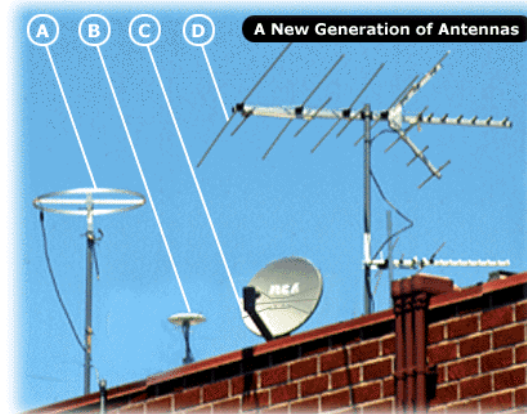
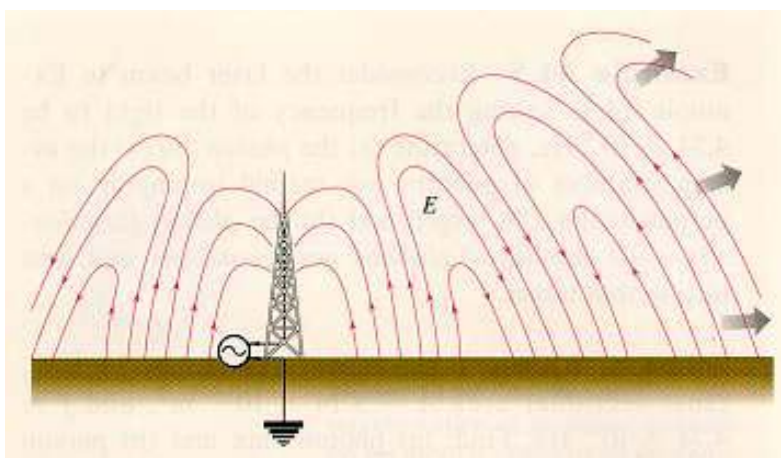
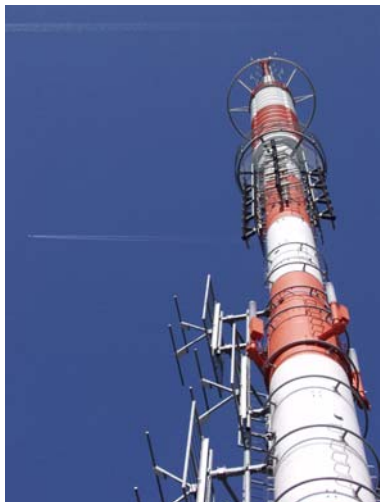
Coesor (fís.) dispositivo detector de radiações electromagnéticas cujo funcionamento se baseia na variação de condutibilidade eléctrica da limalha metálica quando submetida a essas radiações.





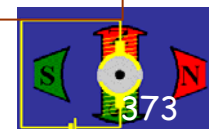
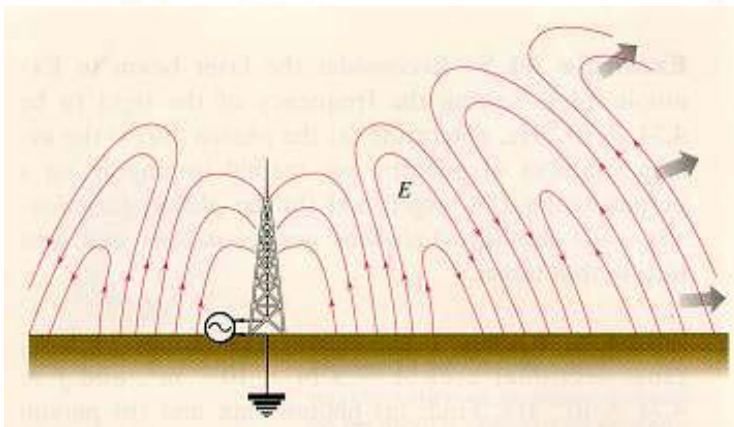
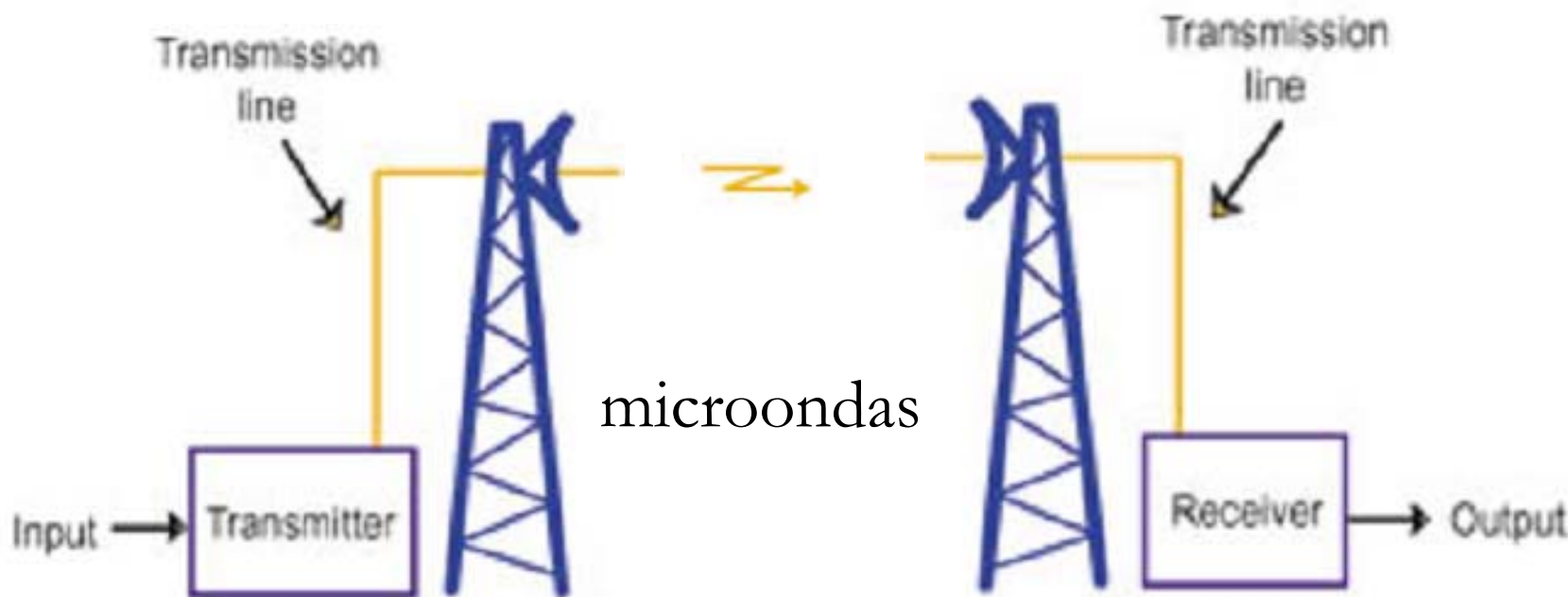
Antenas para radiodifusão (rádios AM e FM, e TVs)

Ondas rádio: MF (0.3 MHz - 3 MHz), VHF (30 MHz - 300 MHz), UHF (0.3 GHz - 1 GHz)





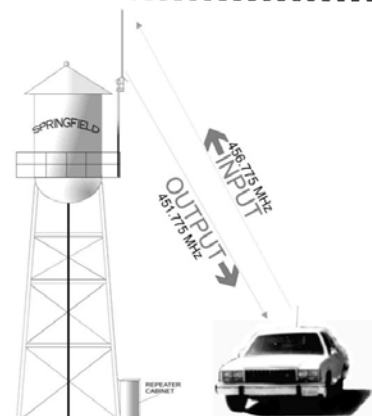
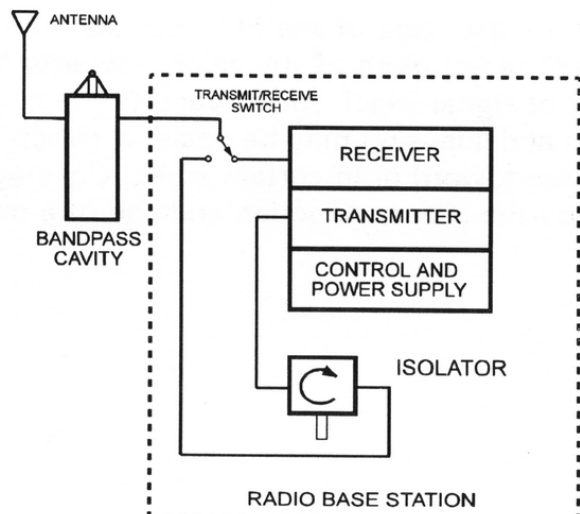
Antenas para comunicação na banda das microondas



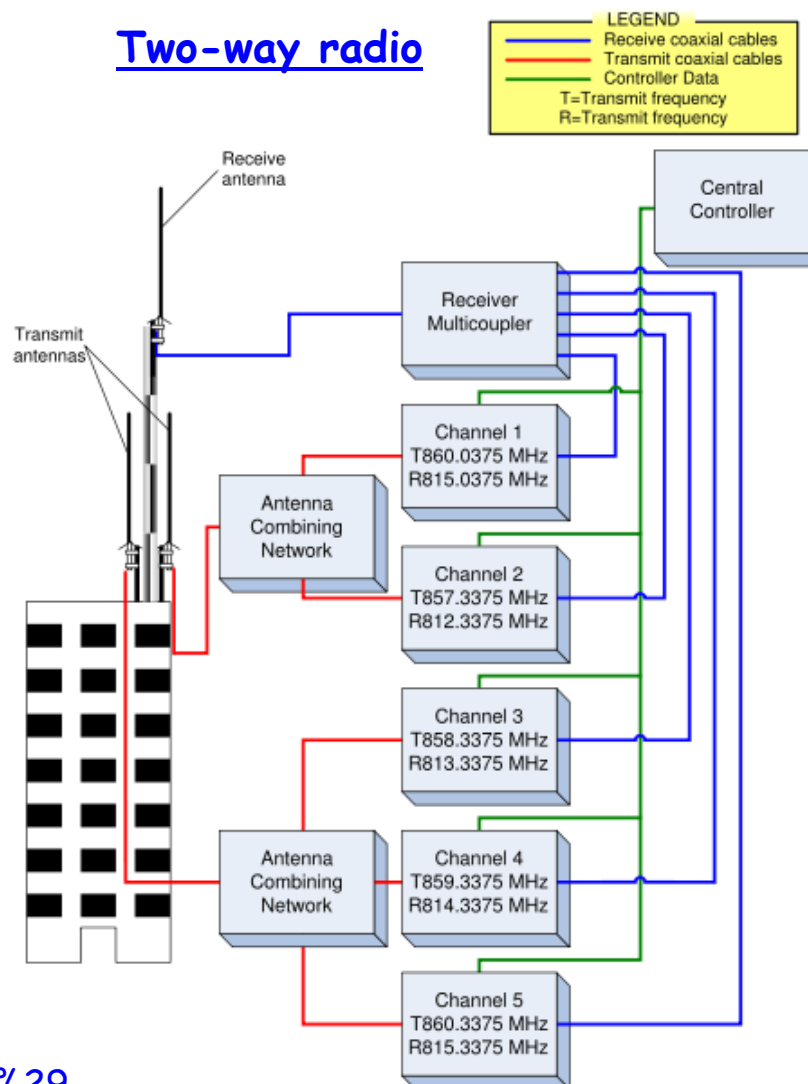


Sistemas de comunicação móveis

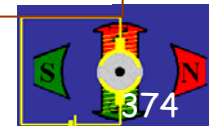
Antenna network for an emergency medical services base station.



Two-way radio

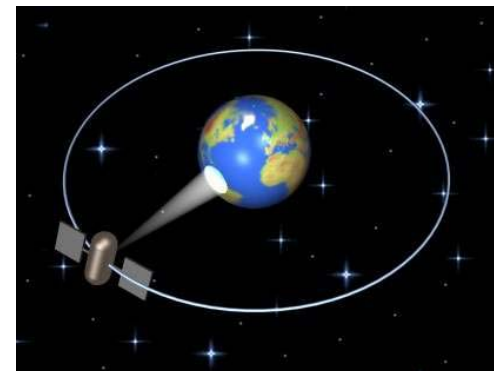
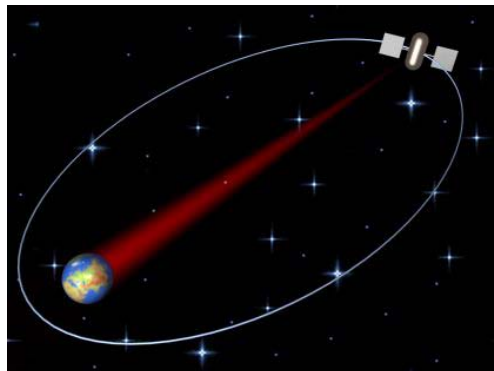
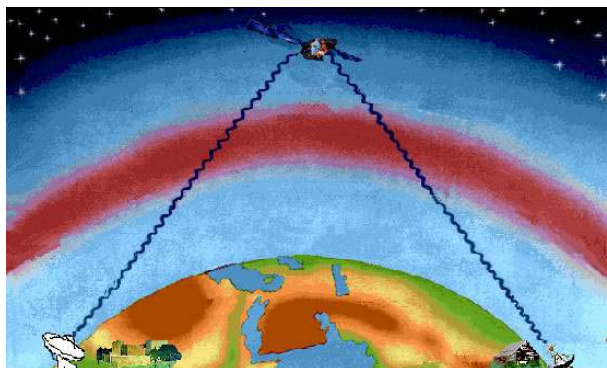


http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_radio

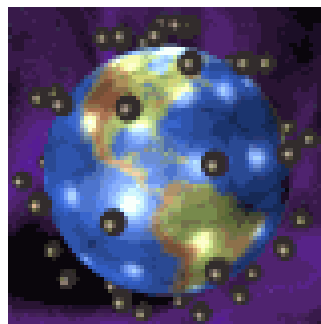
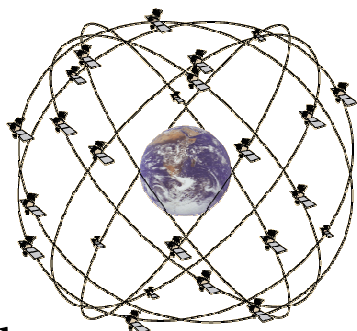




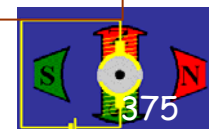
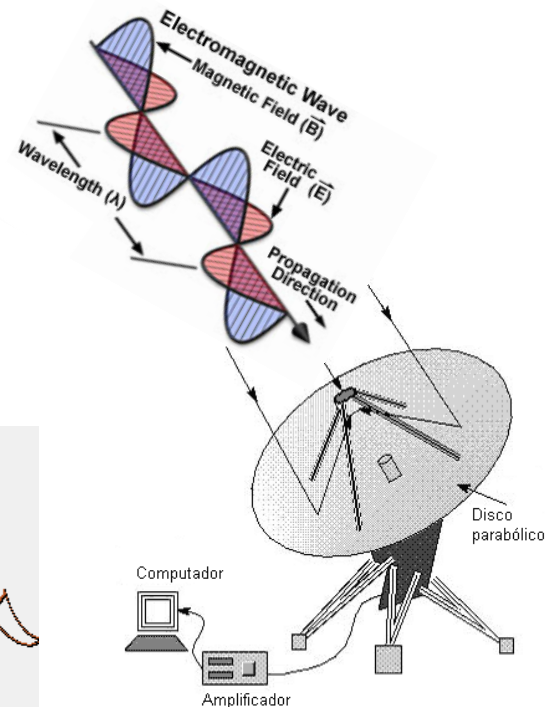
Comunicação por satélite



Sistema Galileu



microondas

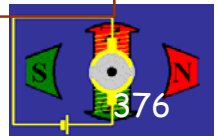




Ondas Electromagnéticas

Transmissão de informação usando sinais electromagnéticos - modulação

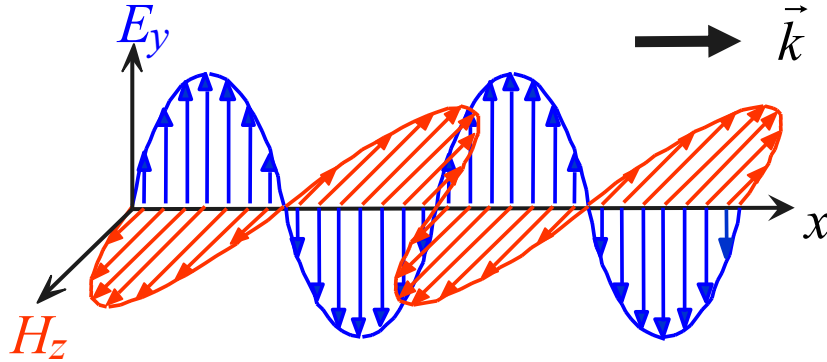
Modulação: alteração provocada, **propositadamente**, nas características de uma oscilação ou de uma onda (amplitude, frequência, etc.) de forma a introduzir informação numa onda sinusoidal (portadora); processo de adicionar «sinais» (**informação**) a uma onda de frequência muito superior (onda **portadora**) à frequência máxima dos sinais a transmitir.





Modulação de ondas electromagnéticas*

* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.



Uma onda EM monocromática não transporta informação. Para *adicionar à onda* informação é necessário modular a onda.

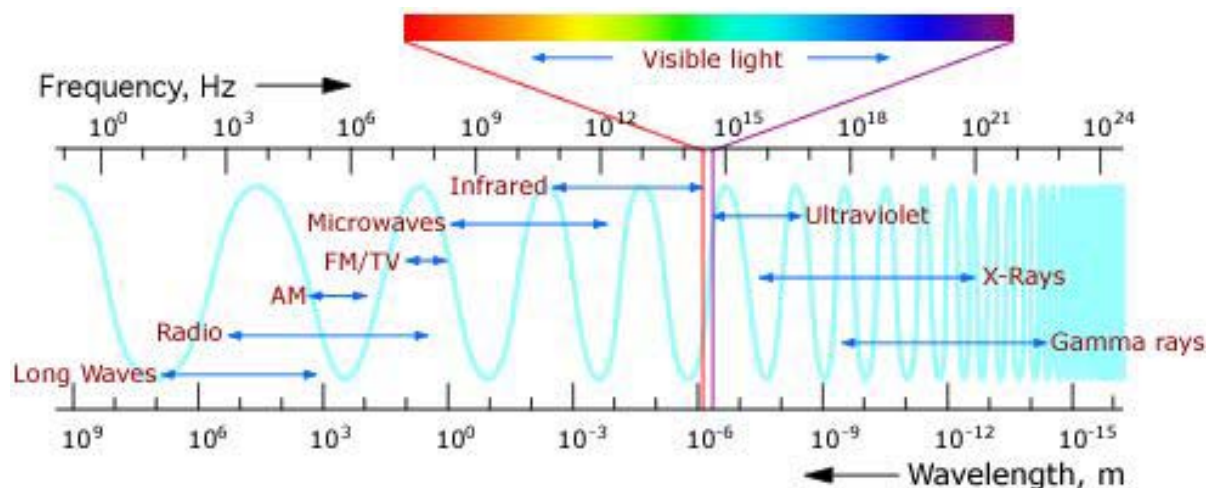
A **modulação** é a alteração provocada, **propositadamente**, nas características de uma oscilação ou de uma onda (amplitude, frequência, etc.) de forma a introduzir informação numa onda sinusoidal (portadora); processo de adicionar «sinais» (**informação**) a uma onda de frequência muito superior (onda **portadora**) à frequência máxima dos sinais a transmitir;

A modulação permite que sinais de elevado comprimento de onda sejam «transportados» por portadoras de muito menor comprimento de onda. Quanto maior for a frequência da portadora mais informação esta pode «carregar», razão porque a comunicação por fibra óptica «ganha terreno».





Bandas electromagnéticas usadas na comunicação*



Principais bandas usadas nas telecomunicações

- Radiofrequências (propagação livre e guiada)
- Microondas (propagação livre e guiada)
- Infravermelho (propagação guiada)
- Visível (propagação guiada)

Quanto maior for a frequência da portadora mais informação esta pode «carregar», razão porque a comunicação por microondas e luz infravermelha, através de fibra óptica, «ganha terreno».





Bandas de radiofrequência*

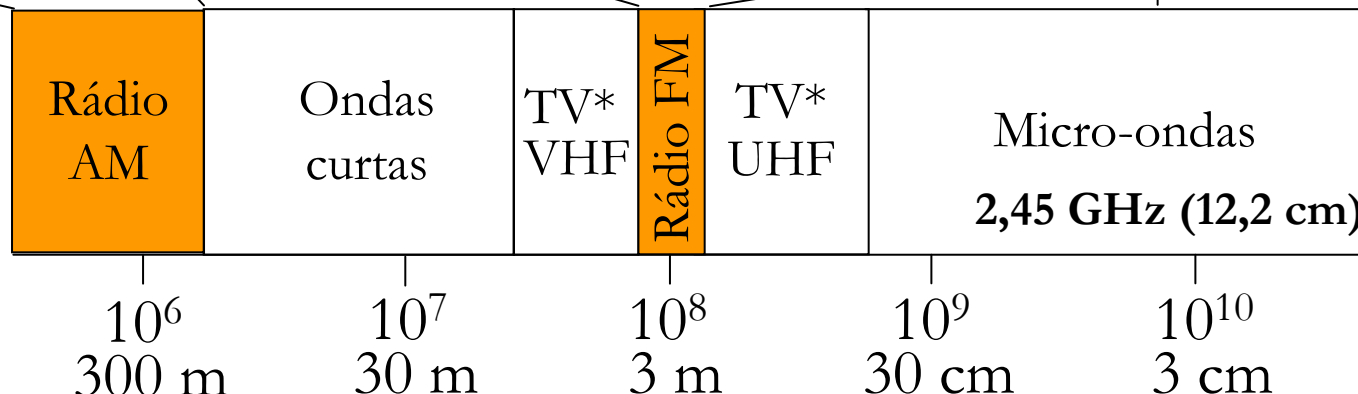
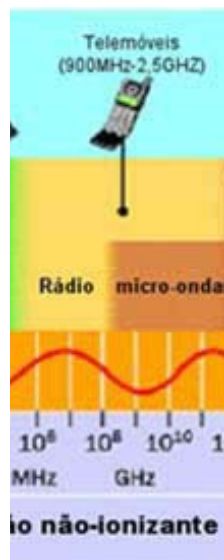
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.

Utilização da radiação EM com frequência entre 3 kHz e 300 GHz.

10 kHz largura de banda
(540 kHz - 1600 kHz)
106 estações possíveis

200 kHz largura de banda
(88,1 MHz - 108,1 MHz)
100 estações possíveis

Telemóvel
Satélite ...



2,45 GHz (12,2 cm)

Frequência (Hz)

Comprimento de onda (m)

1 GHz $\equiv \lambda = 30$ cm.

*6 MHz de largura de banda por canal de TV

Ver p.ex.

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Descobertas%20do%20Electromagnetismo%20e%20a%20Comunica%27%E3o-2.pdf>,





Bandas nas frequências ópticas*

❑ **Infravermelho:** radiação com frequência entre 300 GHz (1 mm) e 400 THz (0,750 μm).

➤ Aplicações: **comunicação** - janelas: 800 nm, 1300 nm (230 THz), 1550 nm (193 THz) - entretenimento (controle remoto e CD/DVD), visão noturna, vigilância;

❑ **Visível:** radiação com frequência entre 400 THz (750 nm) e 769 THz (390 nm).

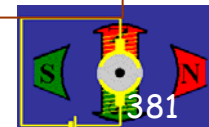
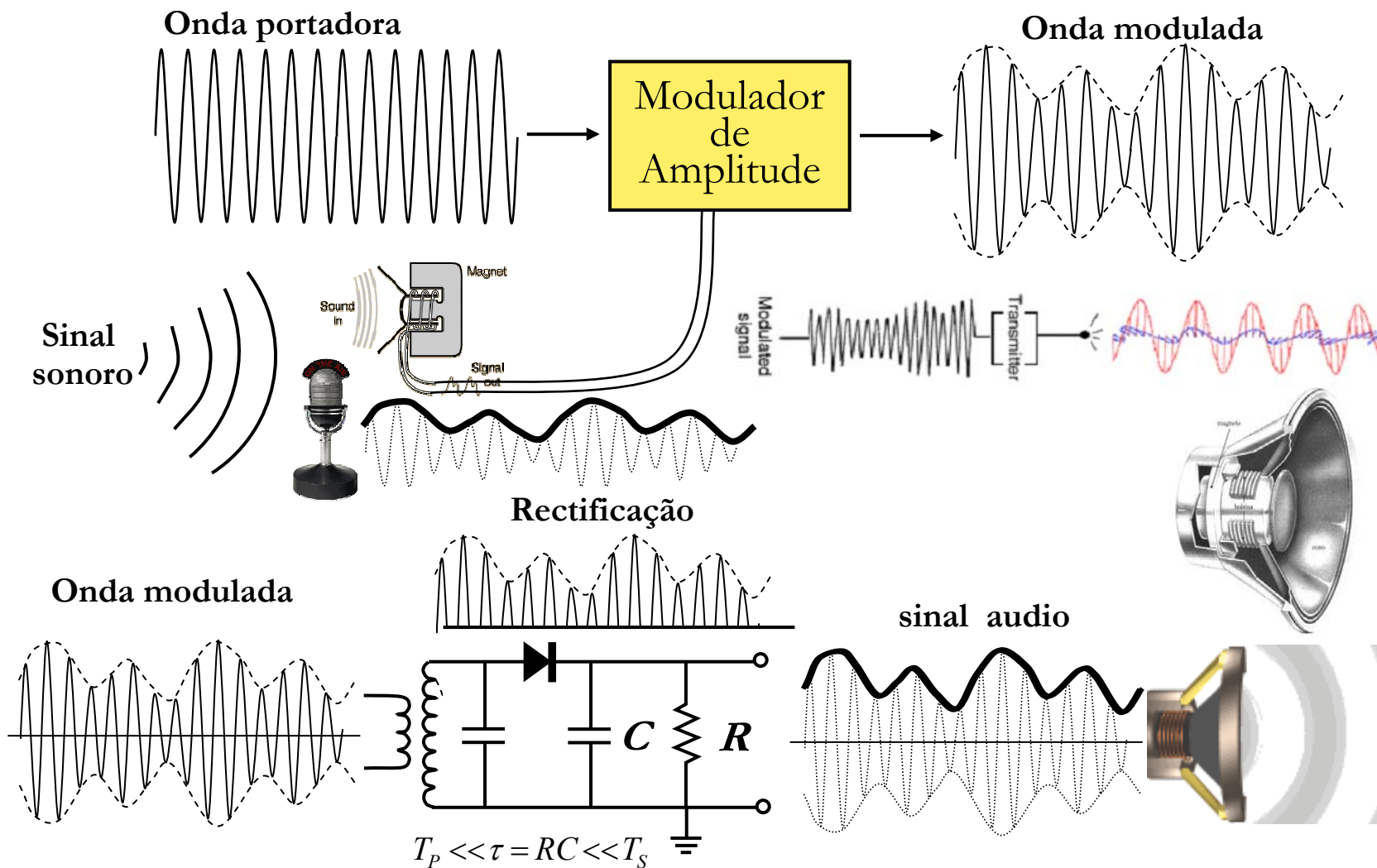
➤ Aplicações: visão, projecção, **comunicação**, vigilância, entretenimento;





Modulação de amplitude (AM)*

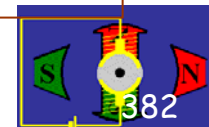
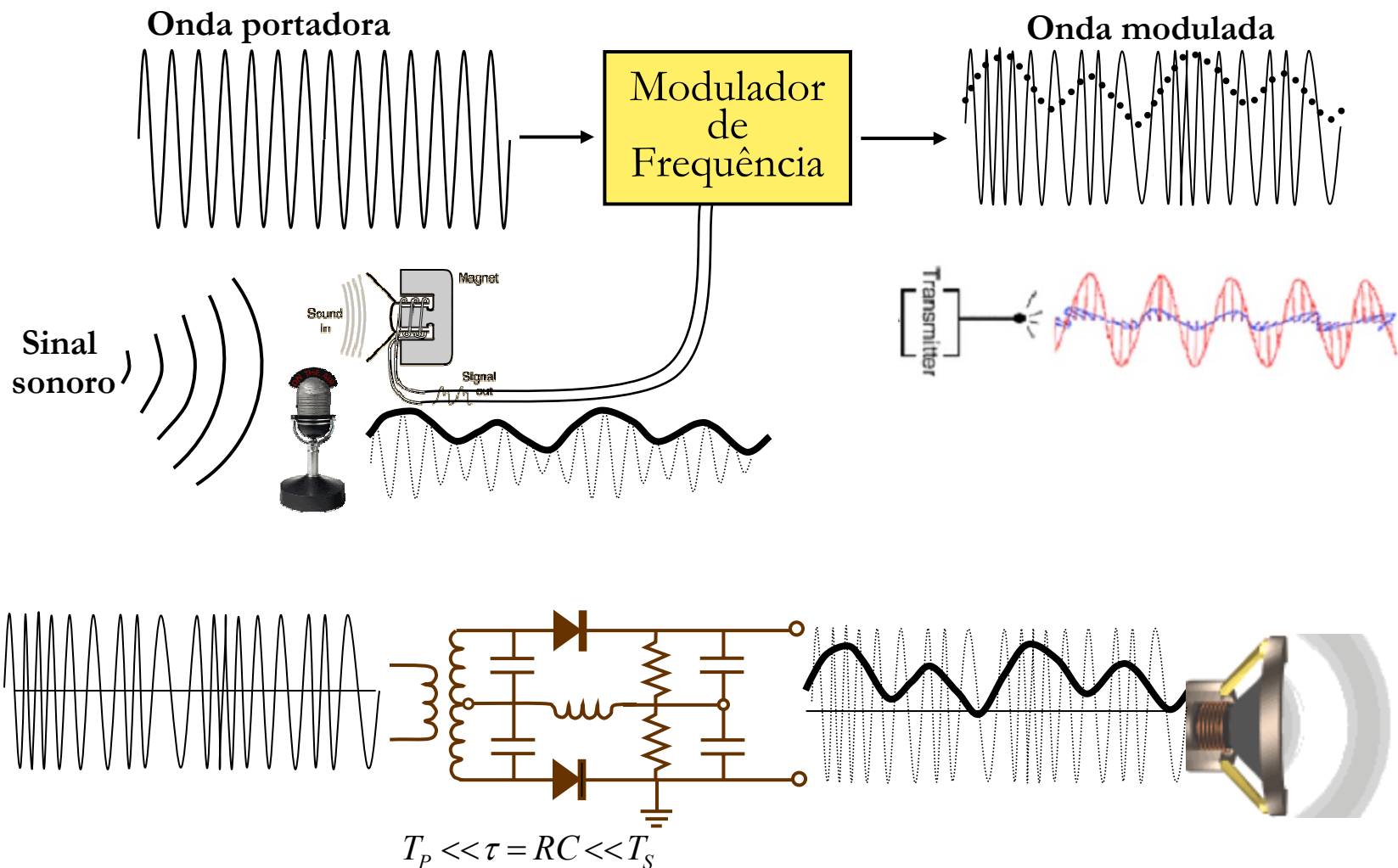
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.





Modulação de frequência (FM)*

* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.

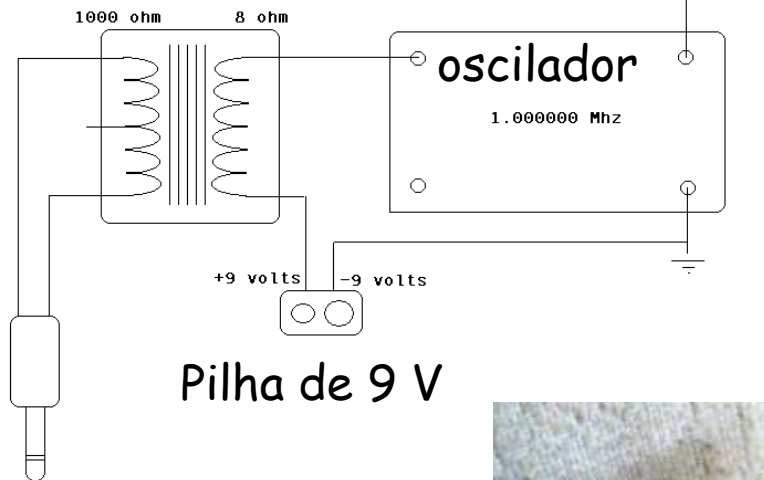




Emissor de rádio AM *pirata* ... *

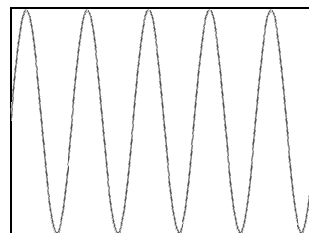
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.

Transformador de áudio (modulador)

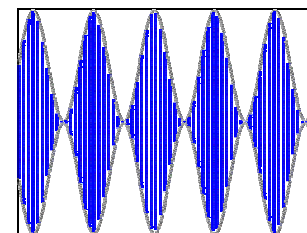


Onda emitida pela antena

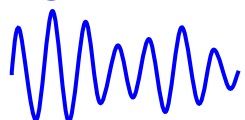
Sem sinal áudio



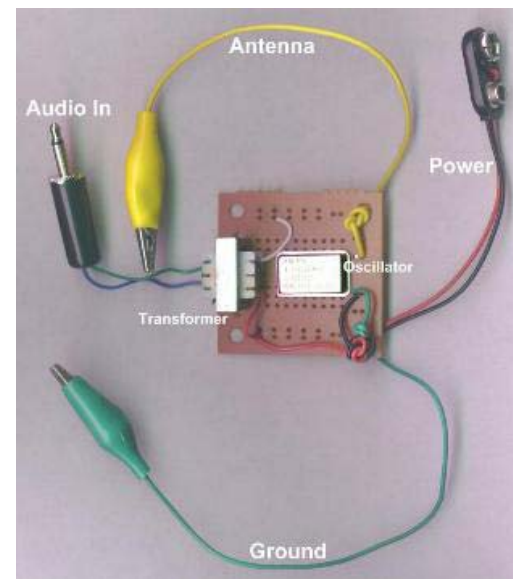
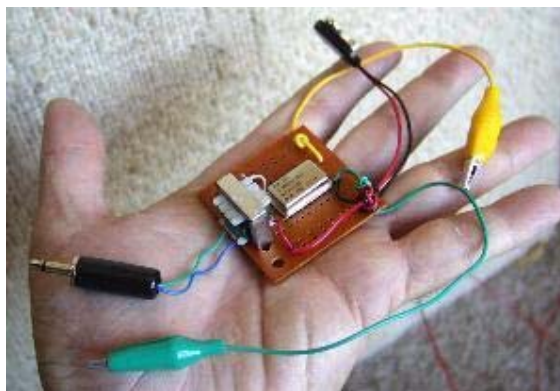
Com sinal áudio



Sinal áudio



Microfone MP3/MP4/CD



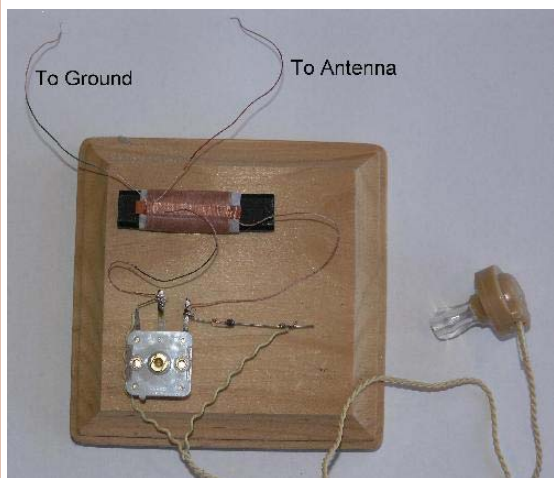
Ver: http://sci-toys.com/scitoys/scitoys/radio/am_transmitter.html



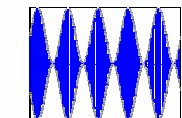


Um receptor de rádio simples ... *

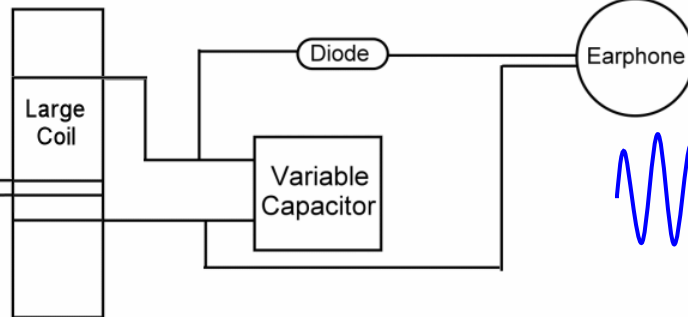
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.



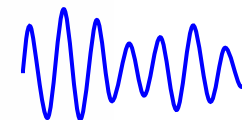
Sinal AM



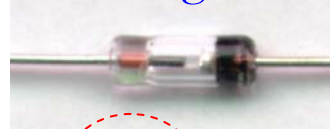
Small coil to antenna
Small coil to ground



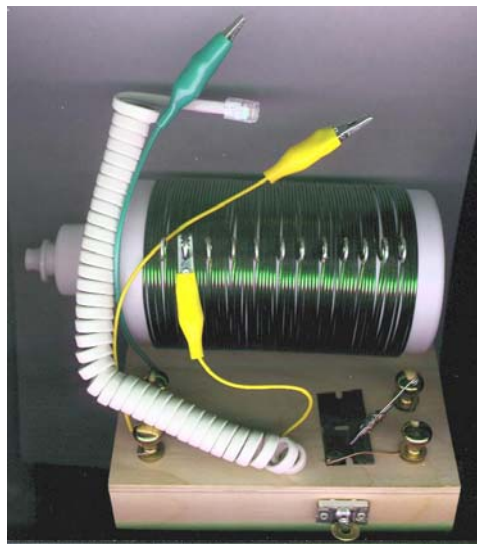
Sinal áudio



Díodo de germânio

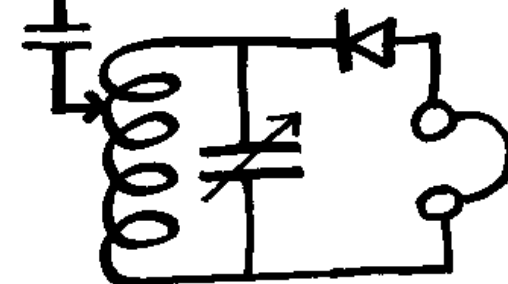


Díodos



antena

Díodo



auscultador

Ver: http://sci-toys.com/scitoys/scitoys/radio/am_transmitter.html





Natureza da luz

"O que é a Luz?"

«debate onda versus partícula»

"resumo histórico"

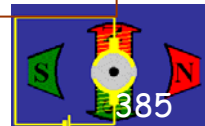
Luz: (fís.) designação que compreende não só as radiações visíveis mas também as radiações electromagnéticas invisíveis; fluxo radiante capaz de estimular a retina para produzir a sensação visual; clarão produzido por uma substância em ignição;

Onda: (fís.) perturbação, contínua ou transitória, que se propaga com transporte de energia através de um meio, quer em virtude das propriedades elásticas e de inércia do meio, quer em virtude das propriedades eléctricas ou magnéticas do espaço;

Corpúsculo: (fís.) designação genérica de uma partícula elementar (electrão, próton, etc.) ou de um complexo de partículas (átomo, ião, etc.);

Quantum: (fís.) palavra latina usada para designar a quantidade discreta de energia, de grandeza hu , onde u é a frequência da radiação e h uma constante universal, a constante de Planck;

A intuição de Maxwell

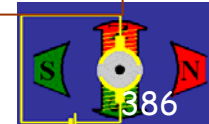




Primeiras teorias da luz

Até cerca do ano 1000 d.C., acreditava-se que os olhos emitiam luz e que essa luz, de algum modo, formava uma imagem. Esta noção do “fogo dentro dos olhos” comparava os olhos a lanternas. Na Grécia Antiga, vários filósofos, entre os quais Platão e Euclides, partilhavam deste entendimento, segundo o qual os olhos produziam uma espécie de raio visual. Segundo essa suposição, o raio devia atingir o objecto antes de este poder ser visto. Aristóteles foi um dos pensadores que contrariou esta ideia, comentando que se isto fosse verdade seríamos capazes de ver no escuro. Segundo ele, “a luz é a actividade daquilo que é transparente.”

Apenas por volta do ano 1020 o cientista árabe Al-Hazen, considerado o pai da Óptica (autor do Livro de Óptica), sugeriu, correctamente, que as coisas se passavam exactamente ao contrário - que eram os olhos que recebiam luz do exterior, em vez de a emitirem - defendendo que a dor que sentimos nos olhos quando observamos o Sol, por exemplo, é uma prova de que é a luz que entra e não o contrário. Cerca de cinco séculos mais tarde, Leonardo da Vinci apercebeu-se de que o olho é semelhante a uma câmara escura [1], invenção pioneira de Al-Hazen, que consiste em fazer passar a luz através de um orifício até ao interior de uma caixa, projectando uma imagem invertida do exterior sobre a parede oposta. [1] Caixa paralelepipedica, com um orifício numa face, usada em física experimental para provar a propagação rectilínea da luz; designação dos compartimentos onde se faz a revelação e fixação de chapas e provas fotográficas.





Primeiras teorias da luz (2)

No século XVII, esta ideia foi confirmada por Descartes, que estudou o globo ocular de um boi raspando a parte de trás do olho e espreitando através dele. Verificou que o olho captura uma imagem invertida do mundo, de pernas para o ar, e foi capaz de explicar como é que o olho forma as imagens na retina. Chegamos ao século XVIII, três das mais importantes características da luz já eram conhecidas:

- i) desloca-se em linha recta;
- ii) pode ser reflectida; e
- iii) pode ser desviada quando passa de um meio para outro.

No século XVII foram formuladas duas teorias diferentes da luz. Eram elas a teoria corpuscular, cujo mentor principal Newton e a teoria ondulatória, defendida por Huyghens. Newton e Huyghens eram, provavelmente, os dois cientistas mais famosos daquela época.

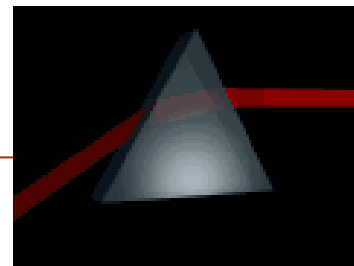
A obra de Newton, *A Óptica*, contém a descrição das suas experiências sobre a dispersão da luz e uma formulação da sua teoria corpuscular.

Segundo Christiaan Huyghens, *Tratado da luz*, a luz é uma onda. Na sua opinião a luz só poderia deslocar-se tão rapidamente sendo uma onda e não como partículas, sugerindo que as ondas de luz eram transportadas pelo "éter", uma substância invisível e sem massa, impalpável e em repouso absoluto, que existia no ar e no espaço.





Luz é um fluxo de partículas



A luz é um **fluxo de corpúsculos**. *Dixi Newton, 1675*

Decomposição espectral da luz visível (luz branca)

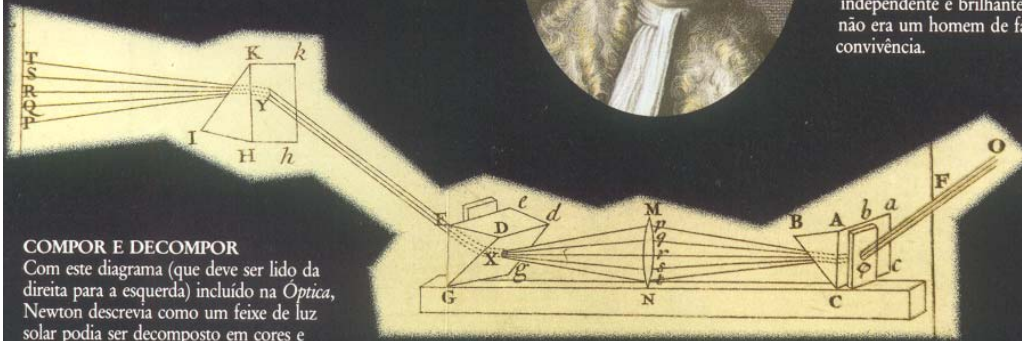


prisma, formando um espectro. O espectro é projectado num *écran* com uma pequena fenda. Por essa fenda passa a luz de uma só cor, que atravessa outro prisma que a desvia mas não a decompõe em cores. Com esta experiência Newton concluiu que as cores existentes na luz branca não são produzidas pelo prisma.

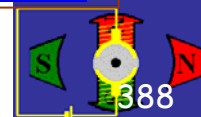


ISAAC NEWTON

O trabalho de Isaac Newton quase dois séculos. Publicou científicos escritos desde suas leis de movimento que investigava a luz. Em sua mais antiga associação científica, a Grã-Bretanha (fundada por Newton, um pensador independente e brilhante, não era um homem de fácil convivência.



http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz#Teoria_corpuscular_da_luz

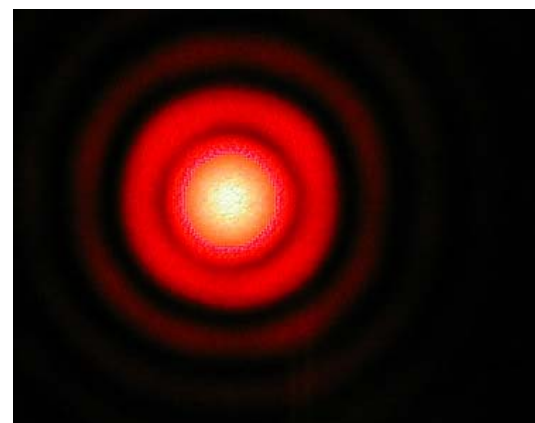
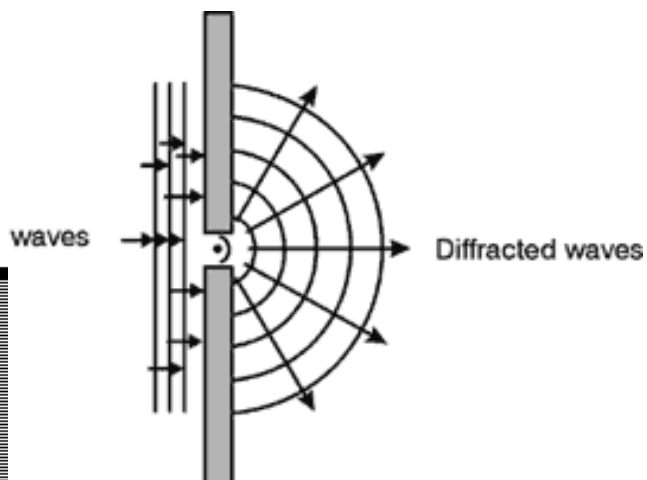
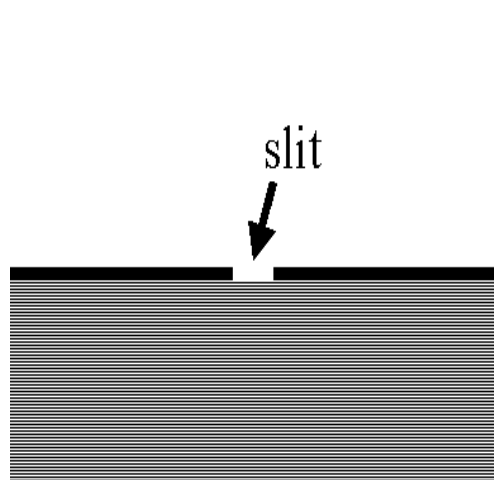
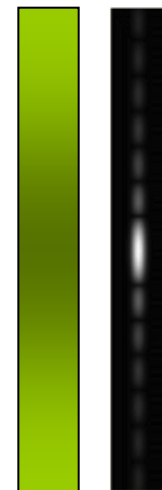
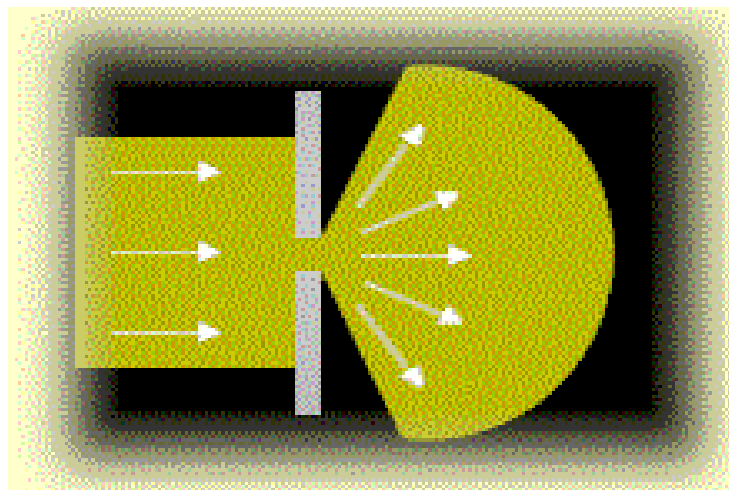
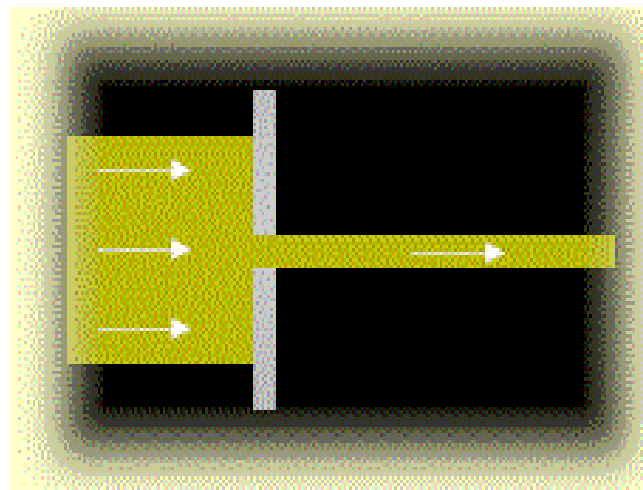




A luz é uma onda

Difracção (Francesco Grimaldi)

*Ver adiante, Cap. 14.





A velocidade da luz

Desde a antiguidade clássica, vários filósofos especularam sobre a velocidade da luz: Empédocles, Aristóteles e Heron de Alexandria na Grécia e os árabes Avicena e Alhazen. O indiano Sayana, no século XIV, na sua obra Rig Veda estimou que o valor da velocidade da luz seria 302 000 m/s.

Johannes Kepler, Francis Bacon e René Descartes, também estudaram o assunto.

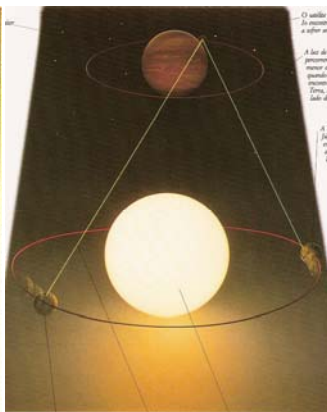
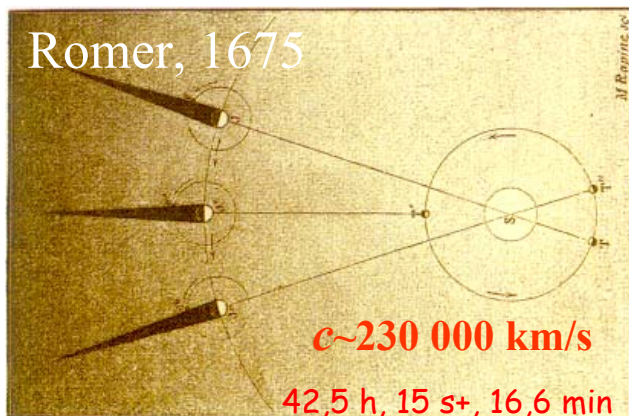
Em 1638, Galileu Galilei propôs uma experiência para determinar a velocidade da luz, realizada em Florença em 1667, embora sem sucesso.

A primeira técnica de medição que produziu um resultado aceite pela comunidade científica foi proposta em 1676 por Ole Romer. Enquanto observava Júpiter e seu satélite Io, ele notou que havia um atraso no início dos eclipses de Io. Propôs que esse atraso se devia à finitude da velocidade da luz. As suas estimativas produziram o valor de 220 000 km/s, muito superior à velocidade de qualquer fenómeno conhecido até então. Newton, no seu livro *Opticks*, propõem um valor quase igual ao de Romer.

No entanto, foram as observações de James Bradley em 1728 que permitiram concluir que a luz deveria ter uma velocidade finita. Bradley usou o fenómeno da aberração da luz das estrelas para estimar a velocidade da luz.



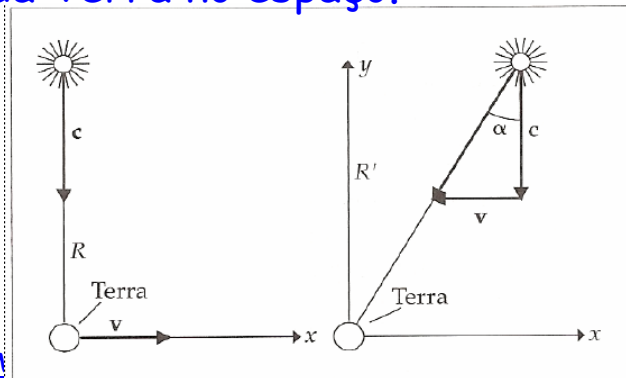
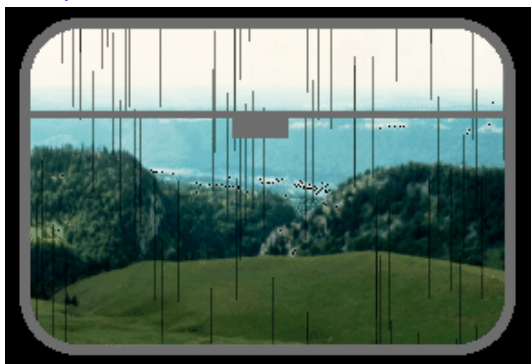
Determinação da velocidade da luz por Ole Romer e James Bradley



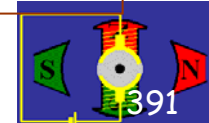
Romer verificou que o atraso no início dos eclipses ao fim de seis meses correspondia a cerca de 22 min. Admitindo que o atraso se devia à finitude da velocidade da luz, obteve o valor de cerca de 230 000 km/s.

Aberração da luz da estrelas

Em 1725, J. Bradley descobriu que as estrelas "fixas" apresentavam um movimento sistemático aparente, função da direcção do movimento e não dependente, como se tinha previsto, da posição da Terra no espaço.



Ver também: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Resumos-aulas-de-TR-IFQR.pdf>, páginas 11 e 12.





Renascimento da teoria ondulatória da luz

É perturbador ter duas teorias distintas, pois temos de admitir que a luz ou pode ser uma onda ou uma emissão corpuscular, mas não ambas as coisas simultaneamente. O objectivo de uma teoria é organizar e explicar acontecimentos, de forma a resultar um quadro simples a partir do qual possam ser deduzidos os fenómenos e as leis naturais.

Se tivesse sido possível, no tempo de Newton, explicar os fenómenos até então conhecidos tanto com uma teoria como com a outra, não haveria bases para uma escolha absoluta entre as duas; esta era, afinal, a situação naquele tempo. Deste modo, ambas as teorias poderiam ter sido consideradas como válidas nos séculos XVII e XVIII. Porém, no começo do século XIX a situação alterou-se radicalmente com os trabalhos de Young e Fresnel.

Em 1801, Thomas Young descreveu uma experiência que mudou o modo de compreender o fenómeno da luz. Young tinha estudado o olho e a voz humana e isso levou-o a pensar nas semelhanças entre a luz e o som. Nesta altura muitos estudiosos acreditavam que o som se deslocava em ondas.

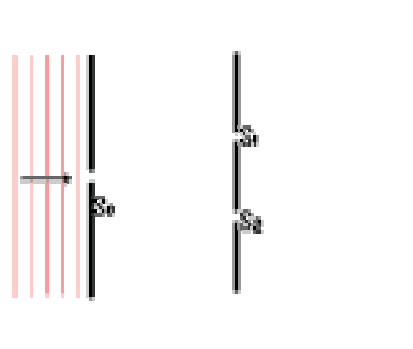
Para Young, o mesmo devia acontecer com a luz. Tal como Francesco Grimaldi, Young observou que os raios luminosos se espalhavam e difractavam quando passavam através de uma fenda estreita. Fez, então, passar a luz solar que deixava a fenda por outras duas fendas colocadas lado a lado e afastadas da primeira, projectando o resultado num ecrã. Verificou, então, que se as duas fendas fossem muito estreitas e próximas uma da outra, eram observadas faixas de cor, que designou por franjas de interferência.



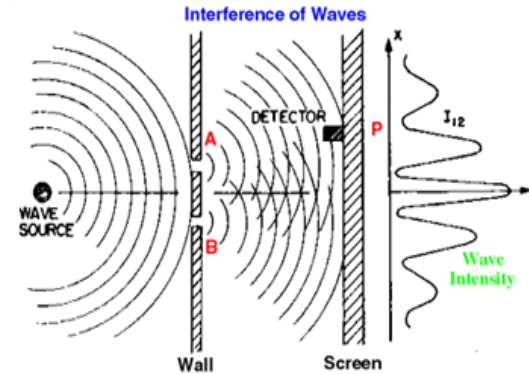


~1801: experiência de Young das fendas

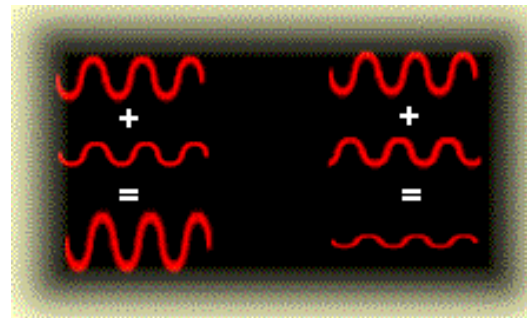
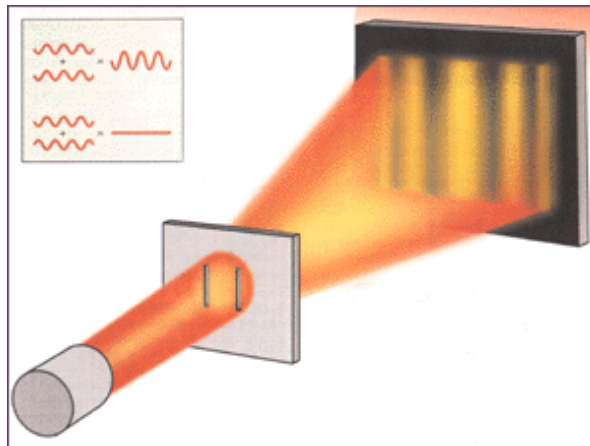
Interferência da Luz



A luz volta a «ser» uma onda!



Interferência construtiva e interferência destrutiva



Às vezes:

$$\text{luz} + \text{luz} = 4 \times \text{luz}$$

Outras vezes:

$$\text{luz} + \text{luz} = \text{escuro!!!}$$

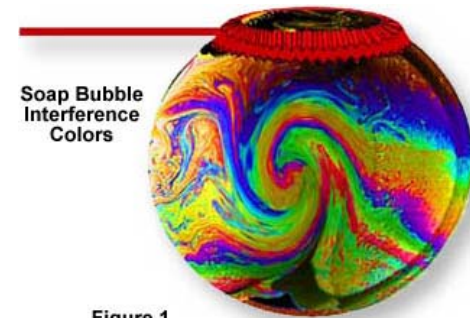
*Ver adiante, Cap. 13.





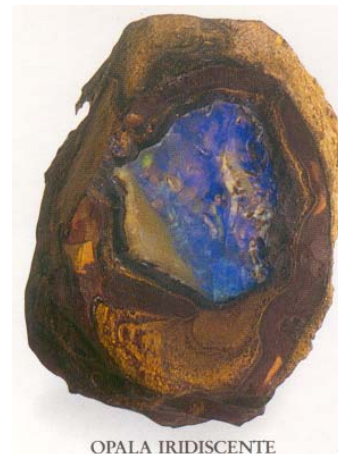
Exemplos de interferência da luz na Natureza

Young concluiu que as bandas coloridas observadas (franjas de interferência) só poderiam ser produzidas por ondas de diferentes comprimentos de onda. As experiências de interferência da luz fizeram ressuscitar a teoria ondulatória de Huygens, uma vez que não poderiam ser explicadas pela teoria corpuscular.



Soap Bubble Interference Colors

Figure 1



OPALA IRIDISCENTE



http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz#Teoria_corpuscular_da_luz





Luz como vibração transversal

Convém realçar que nesta fase a teoria ondulatória assumia que a luz era uma onda longitudinal, por analogia com as ondas acústicas no ar. Embora os efeitos do fenómeno da polarização da luz já fosse conhecido por Newton e Huygens, não era relacionado com a natureza da luz. Young, Malus, Fresnel e Arago fizeram várias experiências para determinar o efeito da polarização na interferência da luz, cujos resultados eram inexplicáveis pela teoria longitudinal da luz. O problema foi resolvido quando Young sugeriu que a luz como vibração no éter podia ser transversal, como uma onda numa corda. Com os trabalhos posteriores de Fresnel, a teoria da emissão corpuscular da luz tinha muito poucos defensores.

Embora a interferência seja um fenómeno de características ondulatórias, eram necessários mais argumentos para abandonar a teoria corpuscular. Assim, seria necessário descobrir um fenómeno que contrariasse as previsões da teoria corpuscular de forma evidente e clara. A teoria corpuscular, ao contrário da ondulatória, previa que a luz se deslocava mais rapidamente na água que no ar. Vários cientistas concentraram-se os seus esforços na determinação da velocidade da luz na água. A primeira medida da velocidade determinadas a partir de experiências realizadas na Terra foi feita em 1849 por Fizeau (ver página seguinte). Fizeau obteve um valor de 315 300 km/s. Entretanto Charles Eheatstone tinha projecto um dispositivos que permitia medir a duração de uma faísca eléctrica com um espelho em rotação.





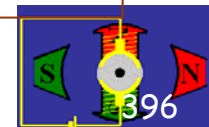
O "triunfo" da teoria ondulatória

Com o esquema proposto por Eheatstone Arago tentou medir a velocidade da luz em meio ópticos densos. Porém foi Foucault, em 1850, que verificou que a luz se *deslocava* mais rápido no ar que na água, o contrariava a teoria corpuscular de Newton, que previa que a luz se deslocaria mais rapidamente na água do que no ar. Este resultado representava um golpe muito duro poucos defensores da teoria corpuscular que ainda restava.

Por esta altura, Faraday descobriu que um campo magnético estático podia alterar a direcção de polarização da luz. Este resultado mostrava que havia uma relação entre a electricidade e o magnetismo e a luz. Este e outros resultados permitiram a Maxwell sintetizar os conhecimentos sobre Electricidade, Magnetismo e Óptica numa única teoria, a teoria Electromagnética ou Electromagnetismo, agregada no conjunto das 4 equações de Maxwell. Para Maxwell a luz é "uma perturbação electromagnética que, sob a forma de ondas", se propaga através do éter.

Assim, aparentemente a teoria ondulatória implicava a existência de um meios que tudo penetrava, o éter, que tinha de ser bastante ténue para não perturbar o movimento dos corpos celestes e devia suportar oscilações luminosas de muito alta frequência (milhares de terahertz) propagando a cerca de 300 000 km/s.

Éter [t3ê]: (fís.) meio hipotético que se supunha encher todo o espaço e no qual se transmitiriam as ondas electromagnéticas;





Velocidade da luz no ar, na água e no vidro

Fizeau's Method

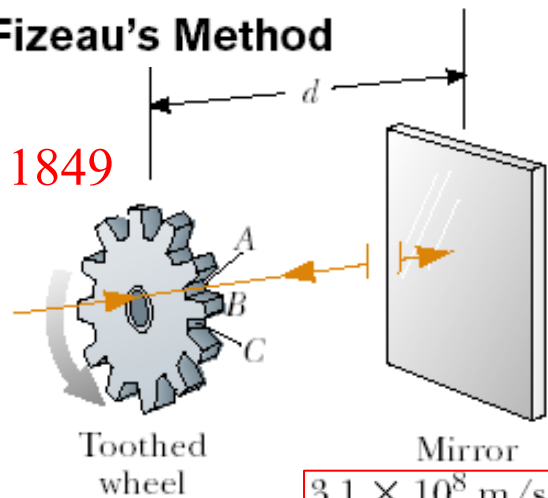


Figure 35.2 Fizeau's method for measuring the speed of light using a rotating toothed wheel. The light source is considered to be at the location of the wheel; thus, the distance d is known.

A velocidade da luz no vácuo é de 300 000 km/s; índice de refração do ar 1



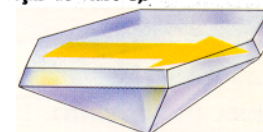
Índice de refração n (de um meio para determinada radiação): razão entre a velocidade da luz no vácuo (que é a mesma para todas as radiações) e a velocidade dessa radiação no meio considerado (e que é variável com a frequência f da radiação). Em meios não magnéticos ($\mu_r \approx 1$):

$$n(f) = c / v(f) = \sqrt{\epsilon_r(f) \mu_r(f)} \approx \sqrt{\epsilon_r(f)}$$

A velocidade da luz na água é de 225 000 km/s; índice de refração da água 1,3



A velocidade da luz no vidro é de 200 000 km/s; índice de refração do vidro 1,5



Ter em atenção que, em geral, a permitividade eléctrica de um meio material depende da frequência da radiação electromagnética, o que dá origem ao fenómeno da dispersão.

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





Os efeitos do éter

Uma ideia corrente na época prendia-se com o facto de éter implicar diferenças no comportamento da luz consoante a sua fonte fosse externa ou terrestre, p.ex., a velocidade vinda das estrelas da luz deveria variar consoante a Terra se aproximasse ou se afastasse da fonte. As experiências de Arago para detectar a influência do éter mostravam que não havia diferenças observáveis. A luz comporta-se sempre como se a Terra estivesse em repouso relativamente ao éter.

Para explicar este resultado, Fresnel sugeriu que quando a luz se propaga num meio transparente em movimento era arrastada parcialmente por esse meio. Várias experiências realizadas com colunas de água em movimento pareciam confirmar o arrastamento da luz pelo meio. Entretanto Maxwell sugeriu como medir a velocidade do sistema solar em relação ao éter.

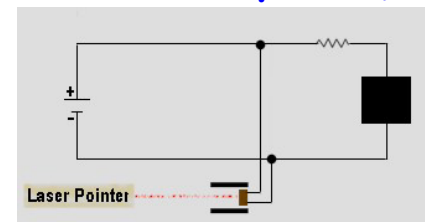
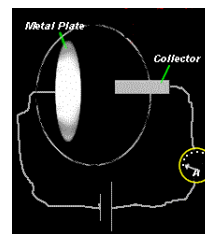
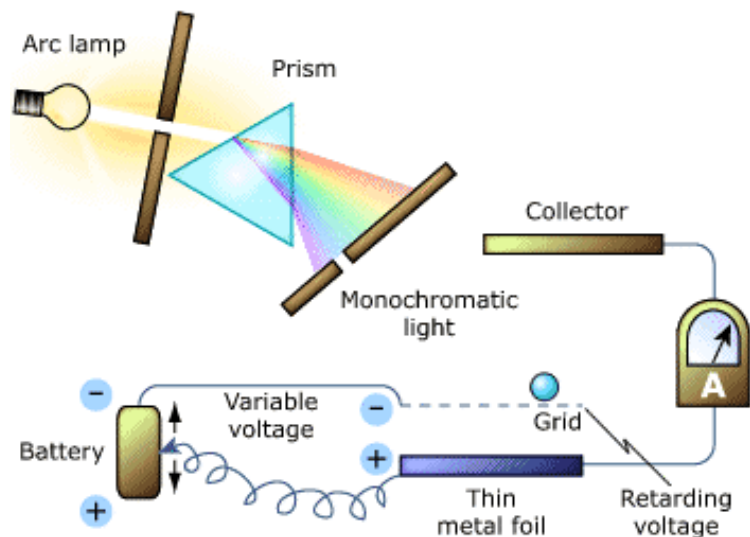
Albert Michelson iniciou pouco depois uma experiência para determinar os efeitos do movimento da Terra através do éter. Como a velocidade da luz no éter seria constante, e como a Terra se deveria deslocar relativamente ao éter cerca de 107 803 km/h (v), seria de esperar que a velocidade da luz em relação à Terra fosse afectada pelo movimento da Terra. Contudo, como comunicou em 1881, Michelson não detectou qualquer movimento da Terra relativamente ao éter. A experiência foi repetida mais tarde, com muito maior precisão, mas o resultado foi o mesmo: se a Terra se deslocar relativamente ao éter esse movimento é muito pequeno para ser detectado. Poincaré pôs em causa a existência do éter e afirmou que os movimentos são sempre relativos.





O efeito Fotoelétrico

Em 1905, **Einstein** apresentou a teoria da relatividade restrita, onde rejeita a hipótese da existência do éter, postulando que a luz se propaga no vácuo com uma velocidade definida c , independente do estado de movimento da fonte. A luz era uma onda que se auto-sustinha - o ênfase conceptual passava do éter para o campo. No mesmo ano, **Einstein** explica o **efeito Fotoelétrico** afirmando que, afinal, a luz se comporta umas vezes como onda e outras como um fluxo de partículas (fotões) - **dualidade onda-partícula**. (O efeito fotoelétrico foi descoberto por **Hertz** em 1886: libertação de electrões da superfície de um sólido por acção de radiação luminosa de comprimento de onda adequado.)



Ver p. ex.: <http://w3.ualg.pt/~jlongras/Apanhado-Acetatos-das-aulas-de-IFQ-de-IFQR.pdf>, páginas 4 e 12 (<http://w3.ualg.pt/~jlongras/pub-pedag-ifqr.html>).





Teorias corpuscular e ondulatória da luz

Primeiras ideias dos gregos

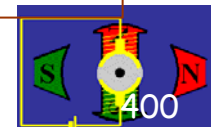
No século I a.C. Lucrecio, dando continuidade às ideias dos primeiros atomistas (Demócrito e Leucipo, séculos IV e III a.C.), escreveu que a luz solar e o seu calor eram compostos de pequenas partículas.

Teoria corpuscular da luz http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz#Teoria_corpuscular_da_luz

O filósofo natural inglês Isaac Newton (1643-1727) foi o principal defensor da teoria corpuscular, que foi amplamente desenvolvida no século XVIII pelos seguidores de Newton. No início do século XIX, com a proposta da teoria ondulatória de Thomas Young e de Augustin Fresnel, a teoria corpuscular foi, aos poucos, sendo abandonada. É importante esclarecer que a teoria corpuscular desenvolvida entre os séculos XVII e XIX não corresponde à concepção da dualidade onda-partícula da luz actualmente aceite.

Teoria ondulatória da luz

No século XVII, Huygens, entre outros, propôs a ideia de que a luz é um *fenómeno ondulatório*. Em 1665, Francesco Maria Grimaldi observou os efeitos de difracção, actualmente conhecidos como característica ondulatória da luz. Contudo, o significado das suas observações não foi compreendido naquela época. As experiências de Thomas Young e Augustin Fresnel sobre interferência e difracção nos inícios do século XIX, demonstraram a existência de fenómenos ópticos que a teoria corpuscular da luz é incapaz de explicar. Os resultados das experiências são facilmente explicáveis admitindo que a luz corresponde um movimento ondulatório. As experiências de Young permitiram medir o comprimento de onda da luz. Fresnel mostrou que a propagação rectilínea, tal como os efeitos observados por Grimaldi e outros, podiam ser explicados se se assumir que a luz se comporta como ondas de pequeno comprimento de onda.



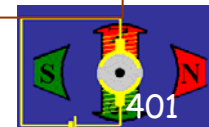


Carácter dual da luz

O físico francês Jean Bernard Léon Foucault, no século XIX, descobriu que a luz se *deslocava* mais rápido no ar do que na água. O efeito contrariava a teoria corpuscular de Newton, que previa que a luz deveria ter uma velocidade maior na água do que no ar. James Clerk Maxwell, ainda no século XIX, mostrou que a velocidade de propagação de uma onda electromagnética no espaço era semelhante à velocidade de propagação da luz, aproximadamente 300.000 km/s. Segundo Maxwell a luz é uma "modalidade de energia radiante" que se "propaga" através de ondas electromagnéticas.

Teoria da dualidade onda partícula

No final do século XIX, a teoria de que a natureza da luz era apenas uma onda electromagnética, começou a ser questionada. Esta teoria era incapaz de explicar devidamente a emissão fotoelétrica (efeito fotoelétrico - a emissão de electrões por um condutor quando nele incide luz de certo comprimento de onda). Foi Albert Einstein que propôs a explicação para o efeito fotoelétrico. Usando a ideia do quantum de energia de Max Planck, Einstein concluiu que quando um feixe de luz interage com o metal comporta-se como um feixe de pequenos pacotes de energia (os fotões). Esta explicação foi corroborada pela descoberta do efeito de Compton: num processo de colisão de um fotão com um electrão ambas as entidades se comportam como corpos materiais. Porém, na propagação a luz apenas demonstra as suas características ondulatórias. Assim, de acordo com a teoria da dualidade onda-partícula, a luz exibe propriedades de onda no processo de propagação e de partícula quando interage com outros corpúsculos. As três grandezas físicas básicas da luz (radiação electromagnética) são: intensidade (brilho), frequência (cor), e polarização (ou ângulo de vibração).





Campo óptico e o fóton

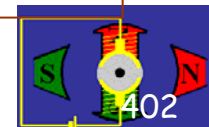
O campo eléctrico E é bastante mais eficaz do que o campo magnético a realizar trabalho sobre cargas eléctricas. Por essa razão o campo eléctrico de um campo electromagnético é frequentemente designado como **campo óptico** ou **campo luminoso**.

A taxa de variação no tempo do fluxo de energia radiante representa uma potência, ou fluxo radiante, expresso em watts. Quando se divide o fluxo radiante que incide ou se afasta de uma superfície pela área dessa superfície, obtém-se a **densidade de fluxo radiante** (W/m^2). No primeiro caso fala-se de **irradiância**, no segundo em **exitância** e, em qualquer dos casos, em densidade de fluxo.

A irradiância é uma medida da concentração de potência. De facto, a **irradiância é a principal grandeza observável e corresponde ao conceito de "quantidade" de luz que flui**. Existem detectores, como o fotomultiplicador, que permitem a contagem de **fótons** (quanta de energia do campo electromagnético).

Cada quantum de energia do campo electromagnético de frequência f , tem uma energia $\varepsilon=hf$ (h é a constante de Planck, 6.625×10^{-34} J/s), e também possui momento dado por $p=hf/c$; vectorialmente $\mathbf{p}=\hbar\mathbf{k}$ ($\hbar=h/2\pi$).

O número médio de fótons de um feixe monocromático de frequência f e irradiância I , que atravessam uma área unitária normal ao feixe designa-se **densidade de fluxo de fótons** e é dado por I/hf .





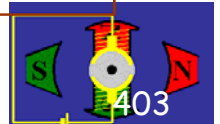
Natureza da luz

-

A percepção da cor

Cor [o]: impressão que a luz difundida ou transmitida pelos corpos produz no órgão da visão;

<http://videos.howstuffworks.com/nasa/5329-why-arent-there-green-or-purple-stars-video.htm> (ver adiante: radiação do corpo negro, pág. 410-411)

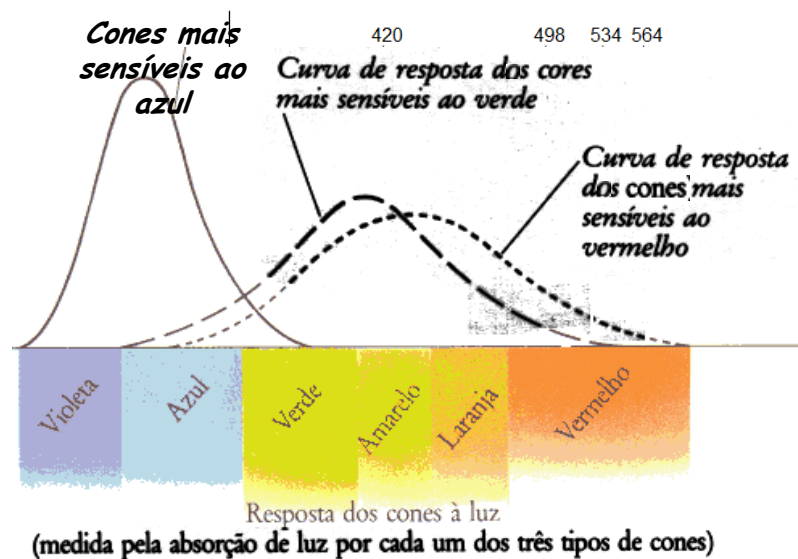
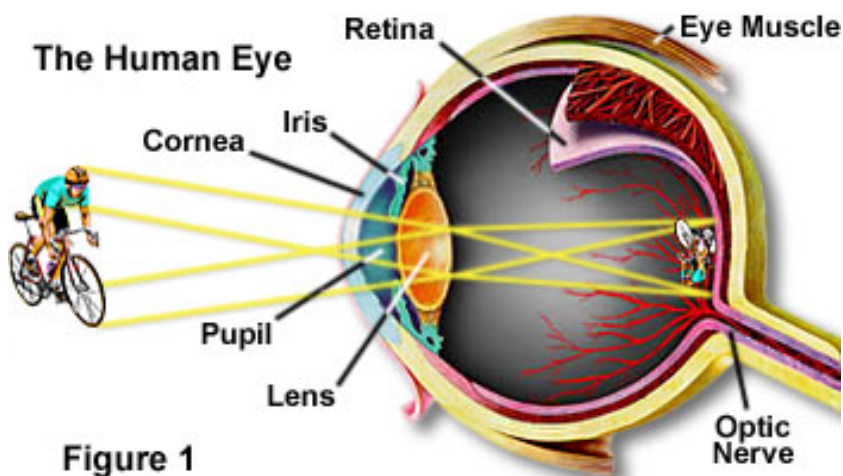




Luz visível e o olho humano

O **olho** é um **órgão** dos **animais** 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**.

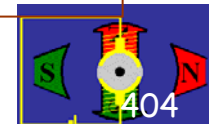
O **cristalino**, uma lente natural, focaliza a imagem. Nos seres **humanos** e nos outros **hominídeos** a **retina** é constituída por dois tipos de células **foto-receptoras**, os **bastonetes**, que nos dão a percepção de claro e escuro, e os **cones**, que nos dão a percepção das **cores**.



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

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

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





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.

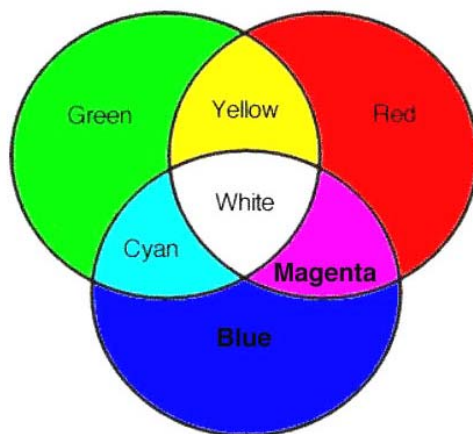
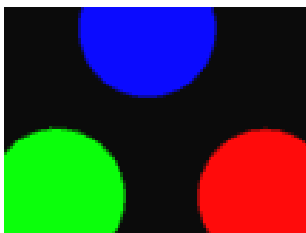
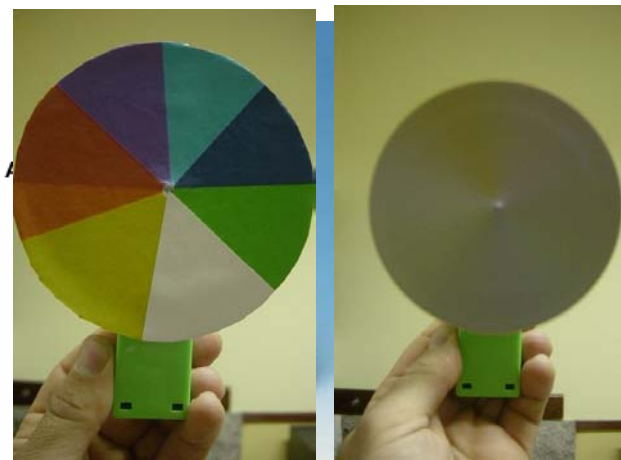


Figure 3. Additive colour mixtures of blue, green and red to produce cyan, magenta, yellow and white.

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



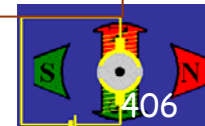
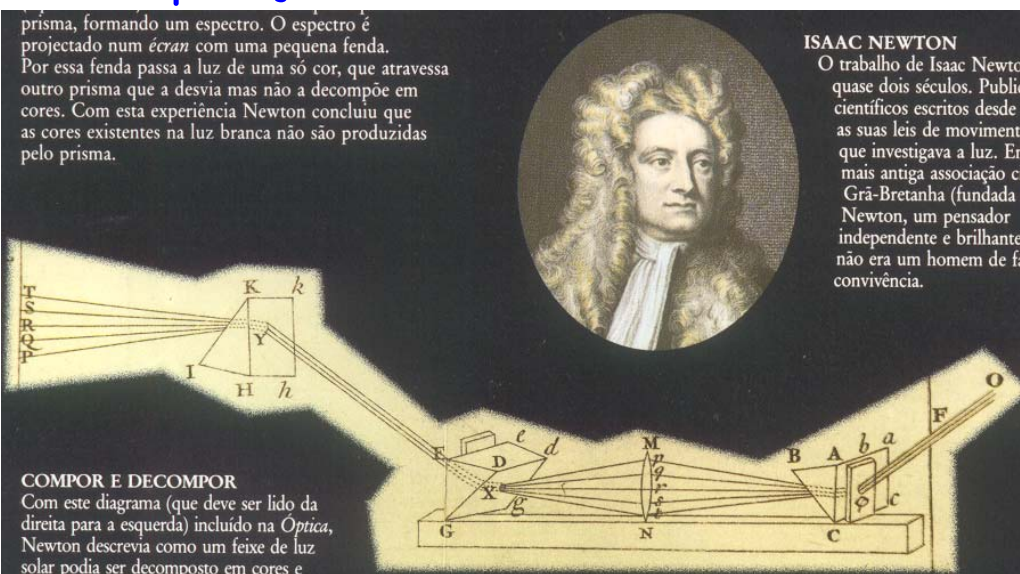


Espectro da luz branca (luz do Sol)

Decomposição da luz branca



Recomposição da luz branca



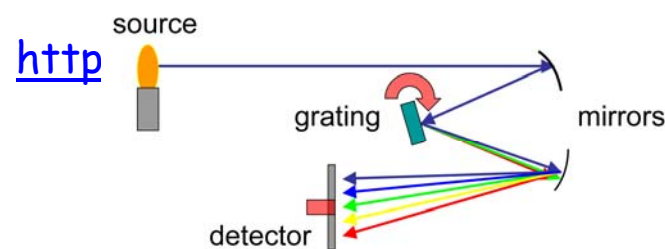
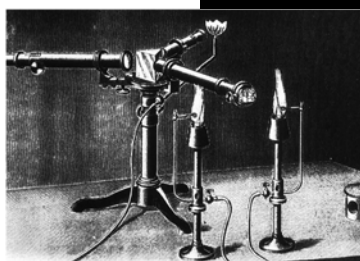
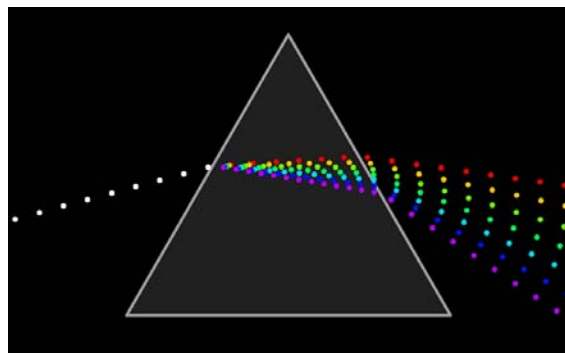
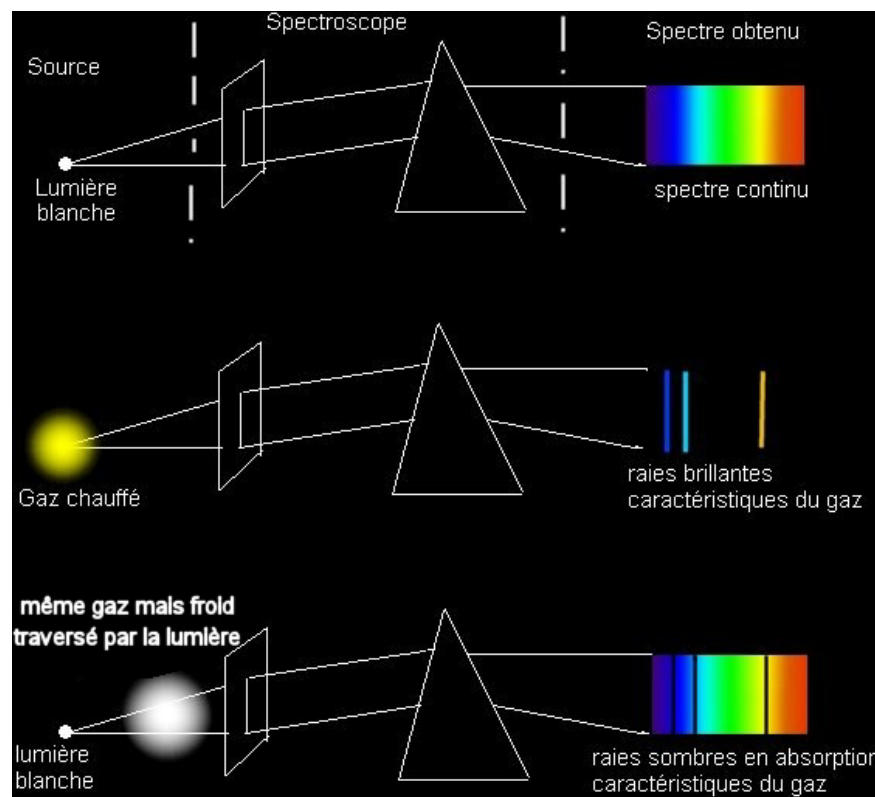


Espectroscopia

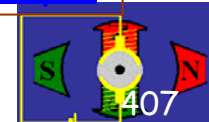
Espectroscopia: estudo das radiações luminosas por meio dos espectros (do lat. spectru-, «espectro»+gr. skope, n, «olhar»+ -ia)

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»)



<http://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia>



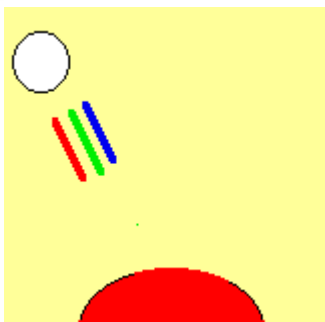
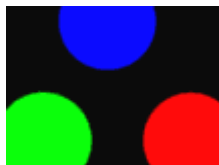
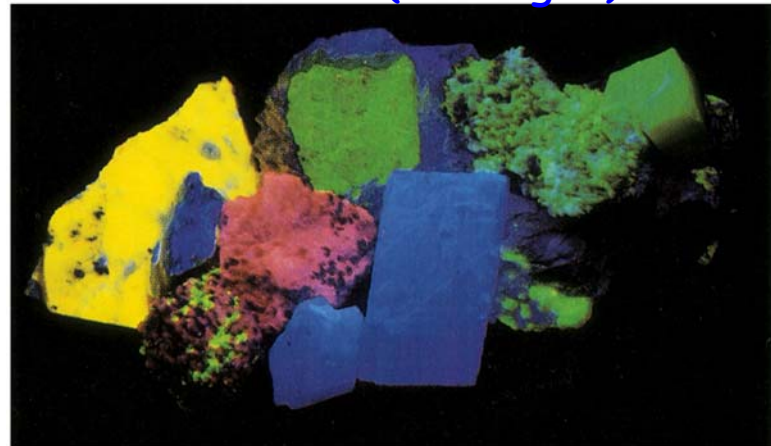


A cor de um corpo depende das condições de iluminação

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.





Natureza da luz

•

Emissão e absorção de luz

Fotão: «quantum» de radiação cuja energia é igual ao produto da frequência da radiação pela constante de Planck. (Do gr. phōs, photós, «luz» + -ão)

Quantum: s. m. (fís.) palavra latina usada para designar a quantidade discreta de energia, de grandeza hu , onde u é a frequência da radiação e h uma constante universal, a constante de Planck; **~ de acção:** o m. q. constante de Planck. (Do lat. quantu-, «quão grande»)

Espectro de emissão: (fís.) espectro da luz produzida por uma fonte luminosa.

Bandas de absorção ou linhas de absorção: bandas (ou linhas) escuras presentes num espectro contínuo pela absorção parcial de radiações por um meio material;

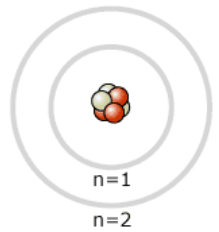
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_light_sources

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

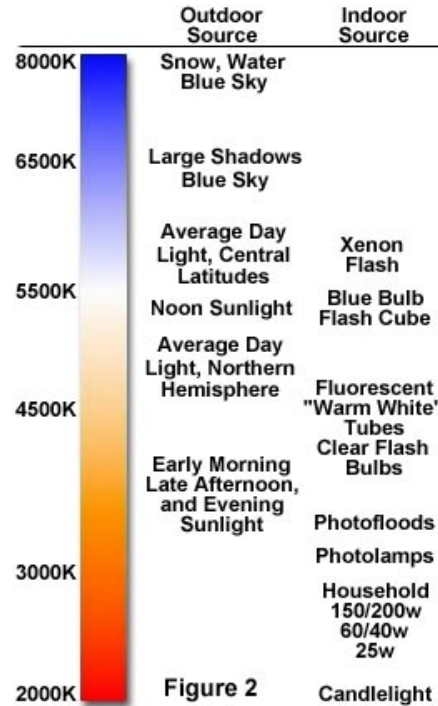
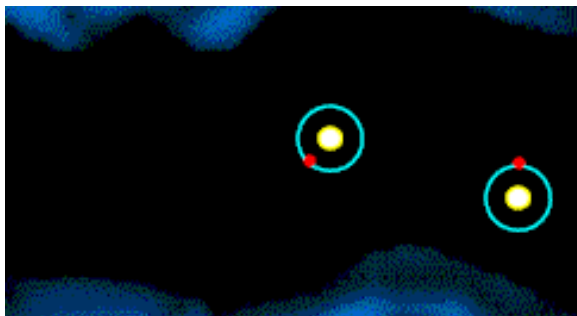
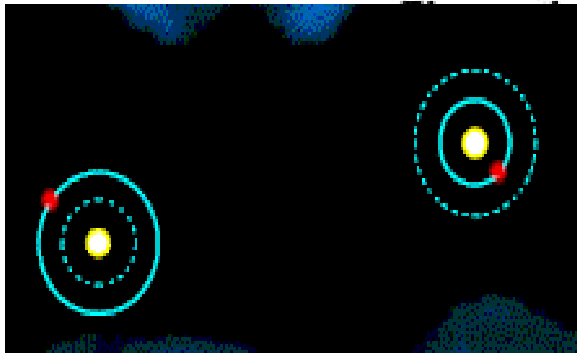
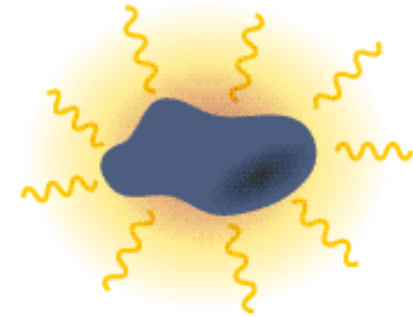




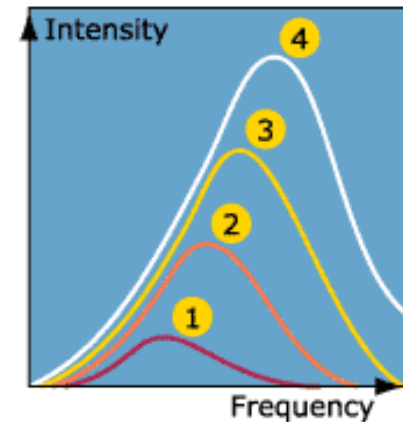
Emissão de luz pelos sólidos



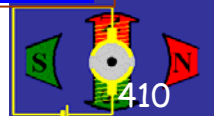
Color Temperature of a Black-Body Radiator



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

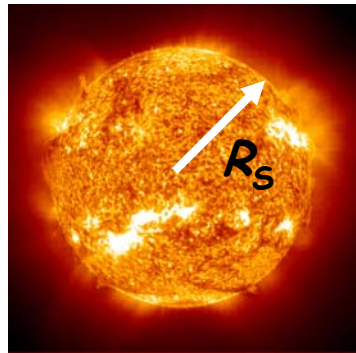


<http://videos.howstuffworks.com/nasa/5329-why-arent-there-green-or-purple-stars-video.htm>





Espectro de emissão do Sol



Potência emitida pelo Sol (P_S):

$$P_S = \sigma T_S^4 (4\pi R_S^2)$$

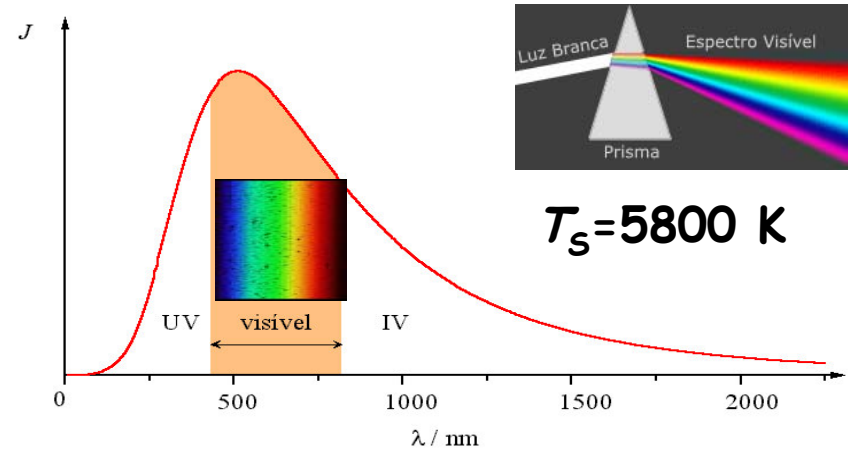
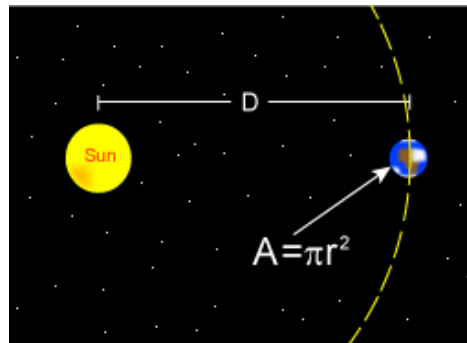
$$P_S = 3.839 \times 10^{26} \text{ W}$$

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

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

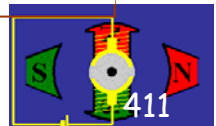
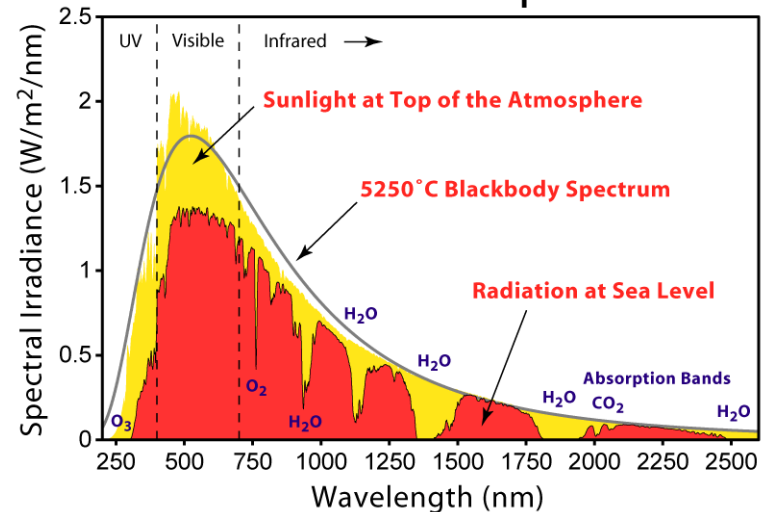
Constante solar: quantidade de energia que atinge o limite superior da atmosfera por unidade de área, perpendicularmente aos raios solares, por unidade de tempo, cujo valor médio é: $1,4 \text{ kW}/\text{m}^2$.

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



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

Solar Radiation Spectrum

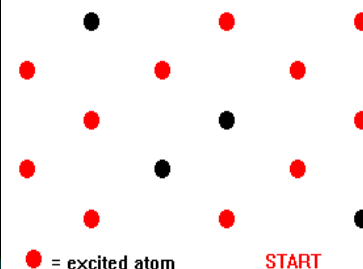
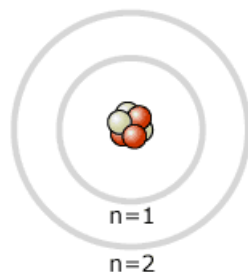




Emissão e absorção de luz pelos átomos

Uma característica fundamental dos átomos é que eles emitem e absorvem luz em frequências bem definidas, o que é uma consequência de apenas poderem existir em determinados estados quânticos, em que cada estado tem uma energia bem definida (característica). Um átomo emite luz ao passar de um desses estados E_i para outro de menor energia E_f . A frequência f da luz emitida é dada pela **condição de ressonância** (ver FeQ 10^a ano):

$$hf = E_i - E_f,$$



E_i , E_f : energias dos estados inicial e final.

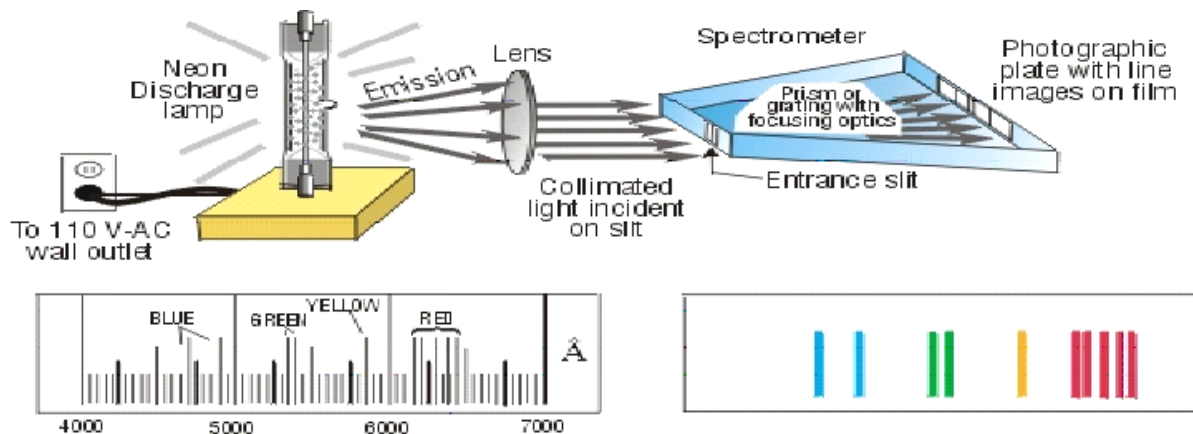
Assim, se quisermos que uma fonte emita radiação de uma dada frequência f só temos de procurar um meio em que dois níveis atômicos satisfaçam a condição $hf = E_i - E_f$, e fornecer energia ao meio para permitir a emissão da energia hf . Ter presente que os átomos também podem emitir/absorver energia por processos não radiativos, isto é, sem emissão de luz. Em geral, a luz emitida por um grande número de átomos não é polarizada.





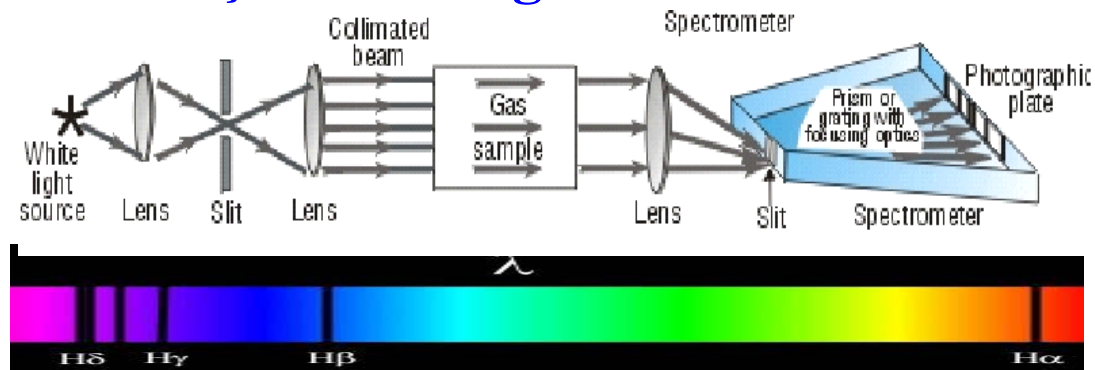
Espectros de absorção e de emissão de um gás

Espectro de emissão de um gás rarefeito



Espectroscopia: do lat. *spectru-*, «espectro» + gr. *skope*, «olhar» + *-ia*.

Espectro de absorção de um gás rarefeito

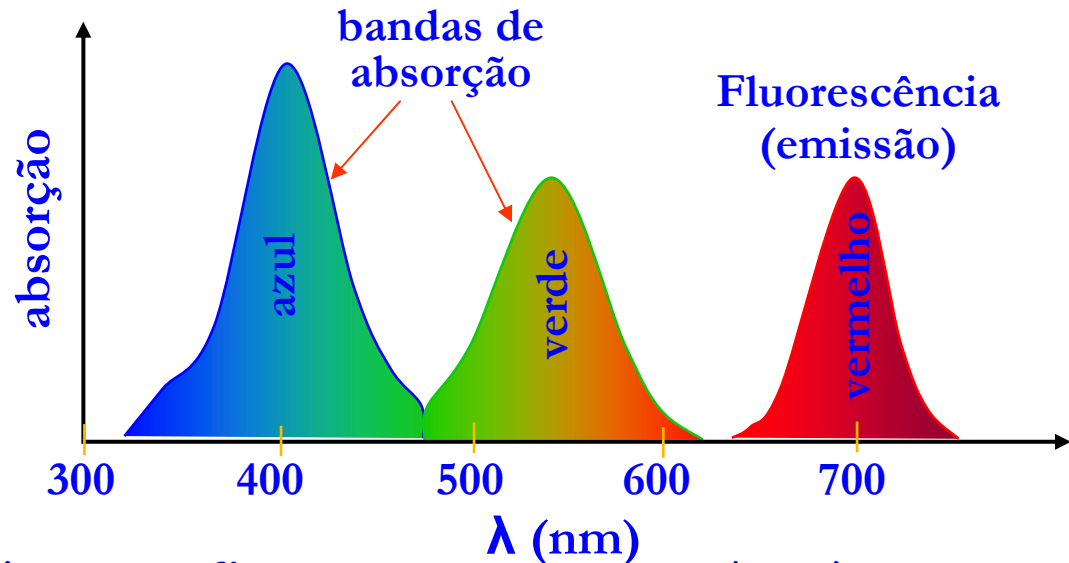




Espectros de absorção e de emissão do rubi

Os espectros de absorção e emissão dos sólidos como, p.ex., o rubi são contínuos, porque contém um grande número de átomos por centímetro cúbico que emitem de forma incoerente.

O rubi é uma gema, uma variedade de corindo (mineral constituído pelo sesquióxido de alumínio, muito duro, utilizado como pedra preciosa e como abrasivo), transparente, de um vermelho vivo porque contém uma pequena percentagem de Cr_2O_3 . (bandas devidas à presença de iões Cr^{3+} no rubi)

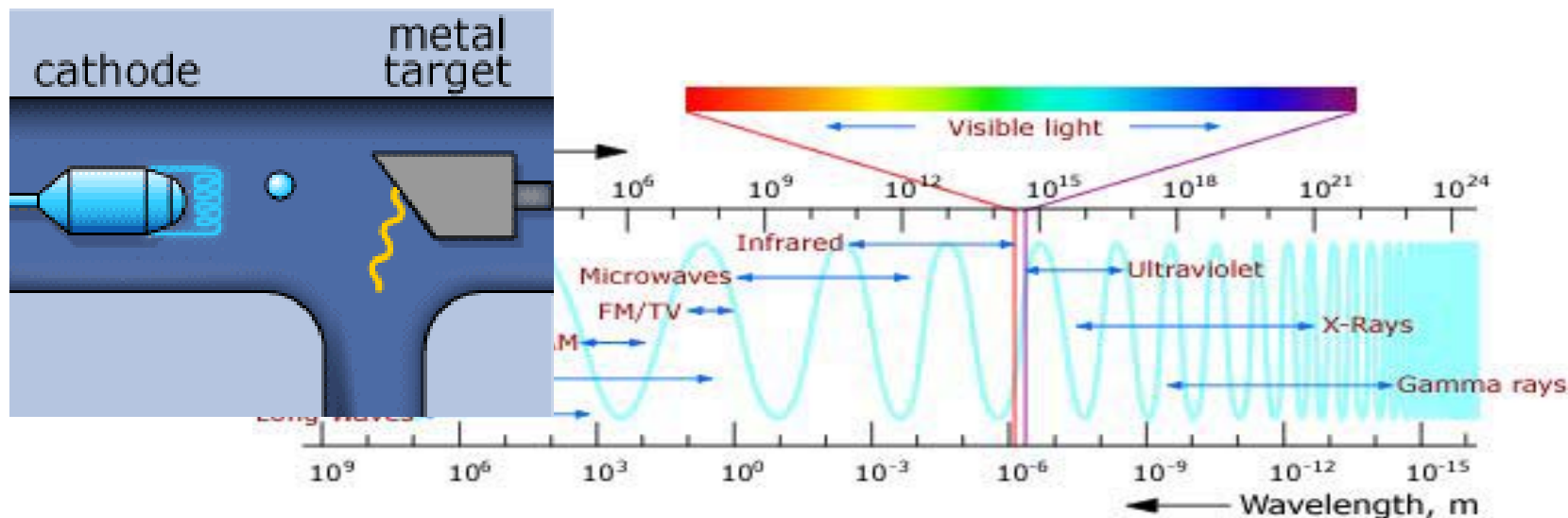
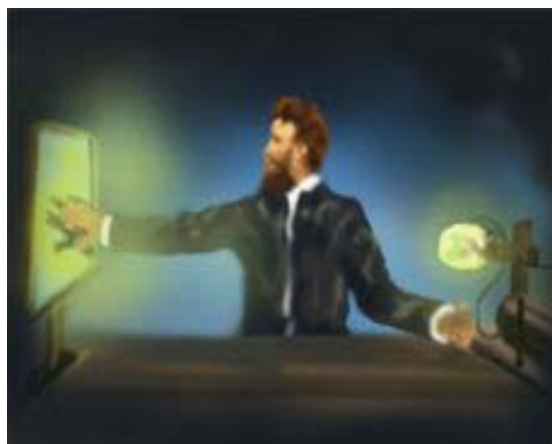


As **bandas de absorção/emissão fluorescente** correspondem às gamas de frequências disponíveis associadas às transições radiativas permitidas.





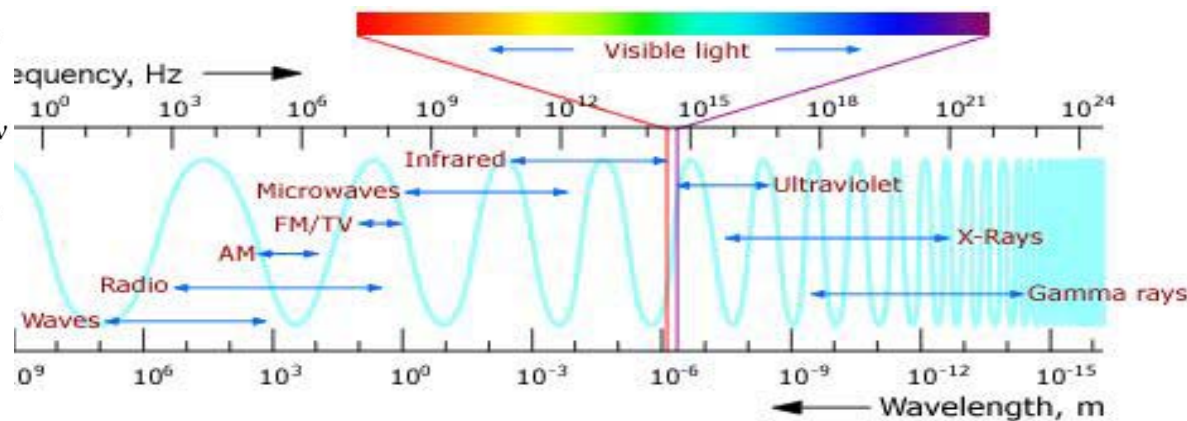
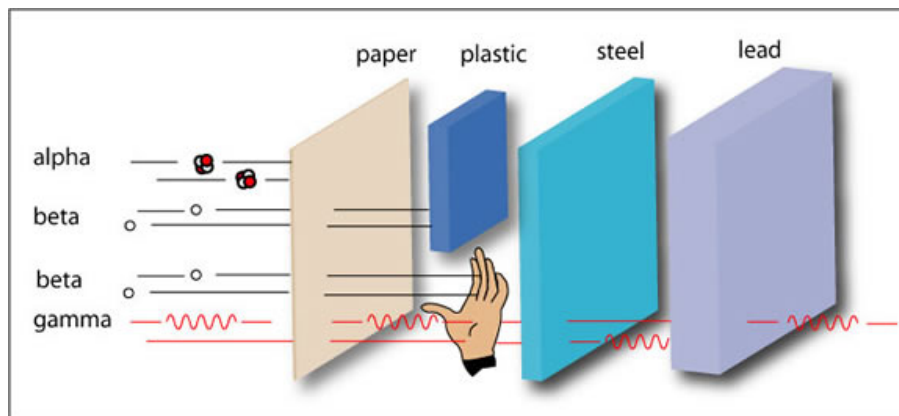
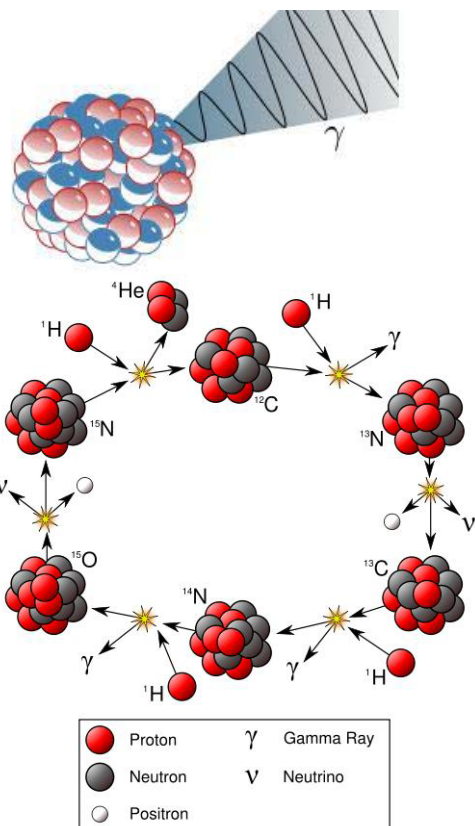
Produção de raios X



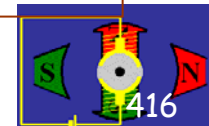


~1900: descoberta dos raios gama

Raios gama: radiação electromagnética emitida por um núcleo atómico como resultado de uma transição quântica entre dois níveis de energia (símbolo γ), descobertas pelo físico francês **Paul Ulrich Villard** (1860 - 1934) quando estudava o urânio;



"O fim do mundo": <http://www.youtube.com/watch?v=7vOS95kMmok>





Natureza da luz e leis da óptica geométrica

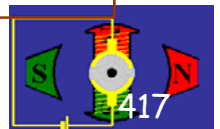
-

Luz laser

Laser [%leizE]: s. m. (fís.) dispositivo gerador de um feixe de radiações visíveis ou de frequências vizinhas, **coerente**, **monocromático** e de *elevadíssima intensidade*. (Pal. formada pelas iniciais da expressão inglesa light amplification by stimulated emission of radiation, «amplificação de luz por meio de emissão estimulada de radiação»)

Monocromático: adj. que apresenta uma só cor; monocromo; (fís.) diz-se do feixe de ondas da mesma frequência. (Do gr. monokhrómatos, «de uma só cor» + -ico)

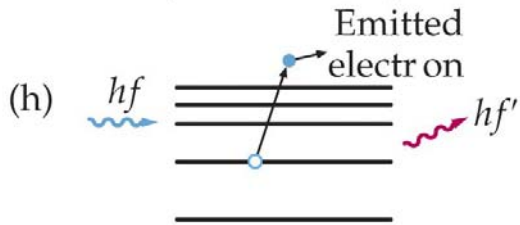
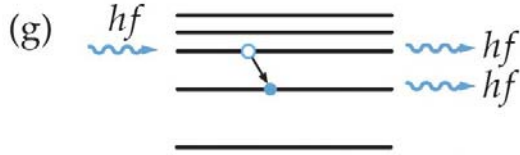
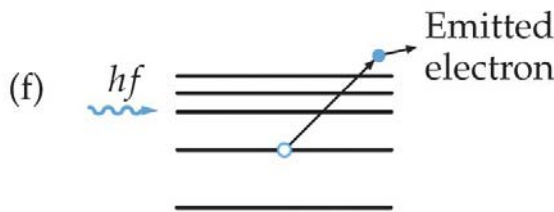
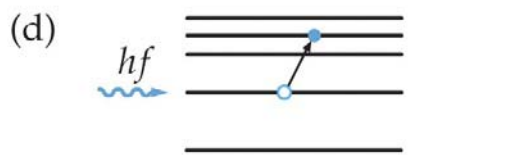
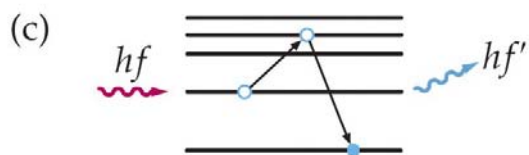
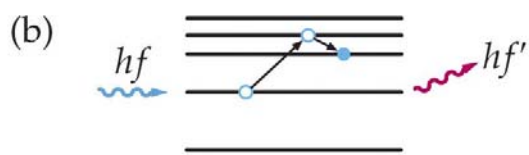
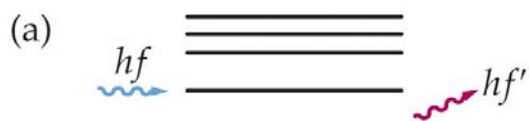
<http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>





Absorção, espalhamento, emissão espontânea e emissão estimulada

Interacções fóton-átomo e fóton-molécula.



a) Espalhamento elástico

b) Espalhamento Stokes-Raman

c) Espalhamento anti-stokes-Raman

d) Absorção

e) Emissão espontânea

f) Efeito fotoelétrico

g) Emissão estimulada

h) Espalhamento Compton.

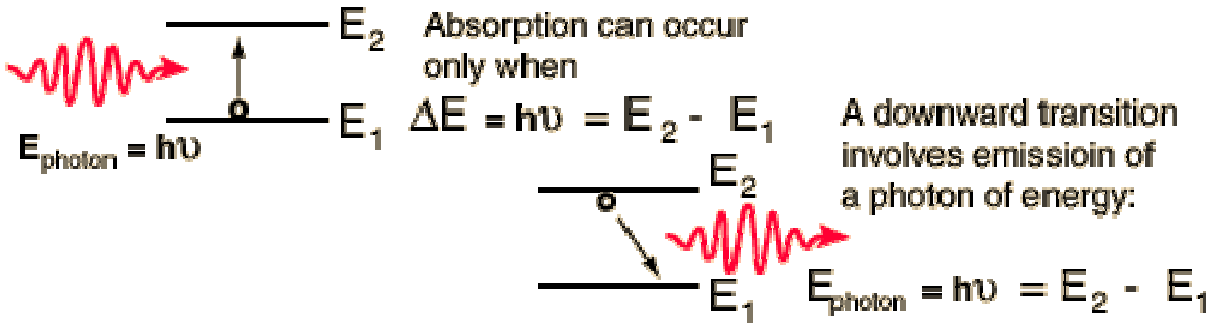
Em geral, a luz emitida é não polarizada. Para obter emissão de luz polarizada é necessário seleccionar o estado de polarização que se deseja de forma "externa".



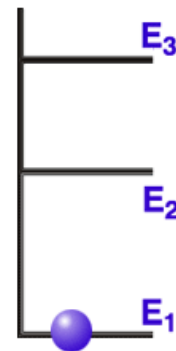
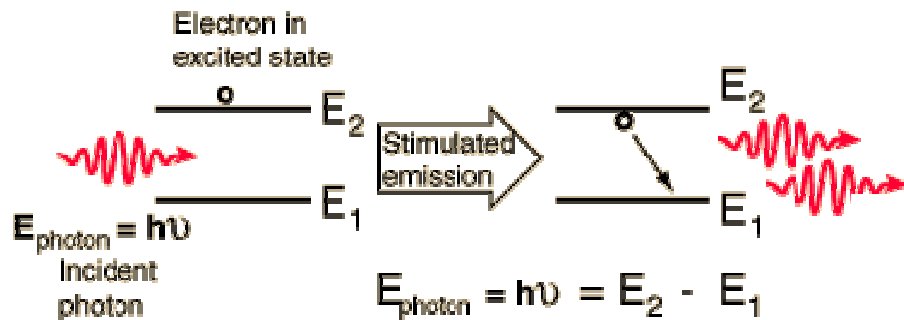


Absorção, emissão espontânea e emissão estimulada

Absorção (estimulada) e emissão espontânea



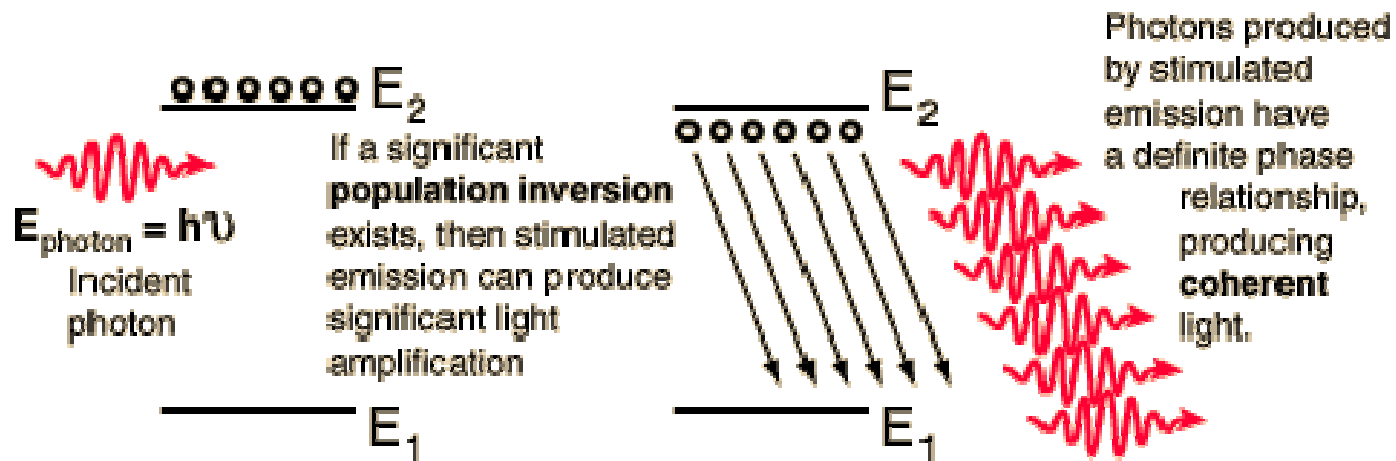
Emissão estimulada





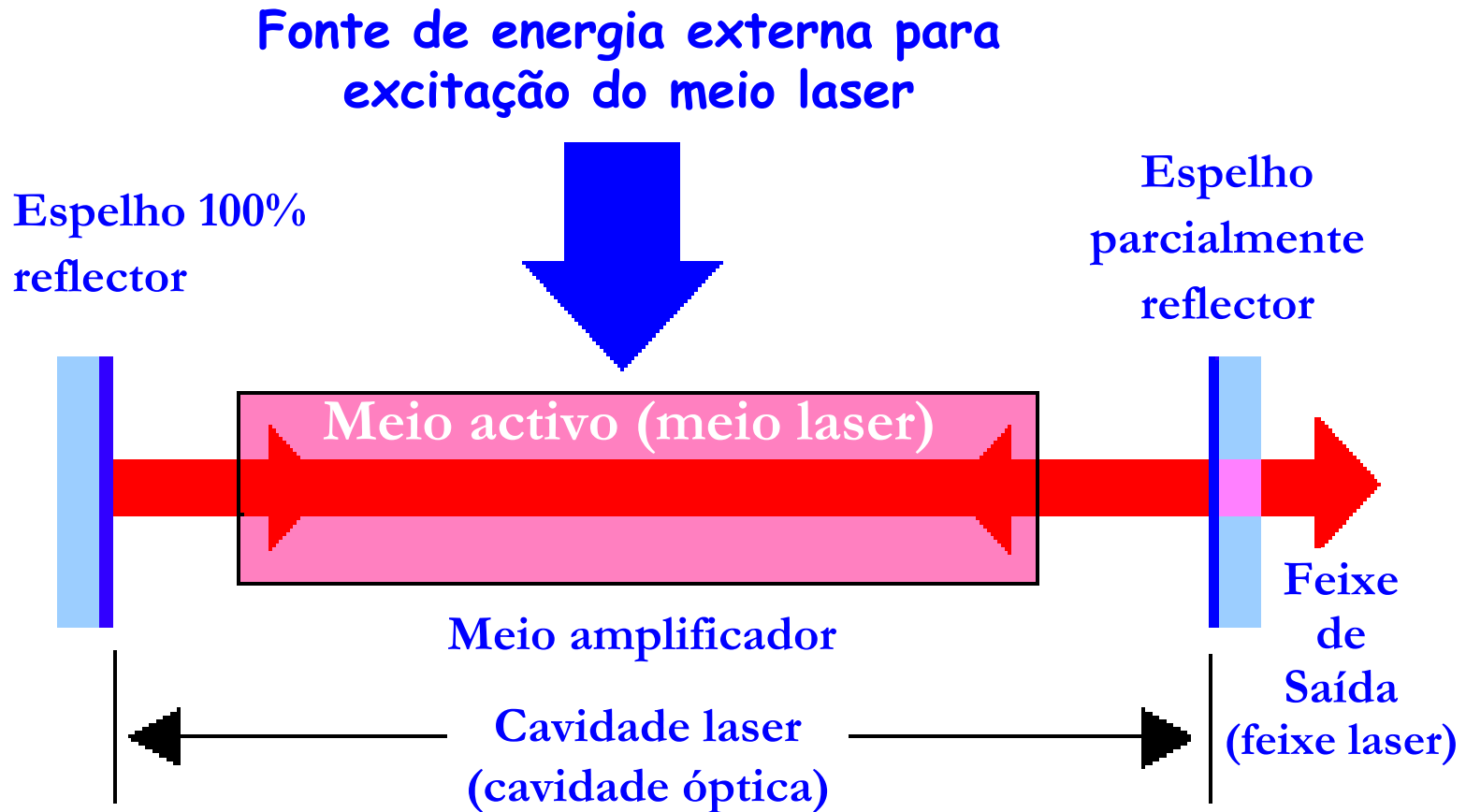
Inversão da população e amplificação de radiação

Por vezes quando a radiação interage com os átomos, verifica-se que a emissão estimulada é superior à absorção, provocando a amplificação da radiação incidente isto é aumentando a densidade de fotões $\rho(\nu)$ - amplificação por emissão estimulada de radiação. A inversão de população pode ser obtida por bombeamento óptico, aplicando uma descarga eléctrica sobre certos meios materiais. É este efeito que permite fabricar fontes de "luz laser".



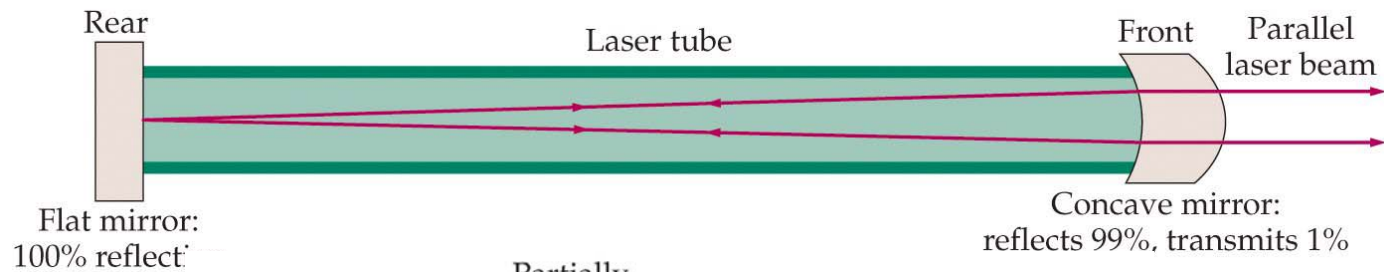


Constituintes de um laser



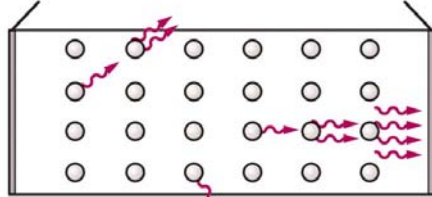


Geração da radiação laser

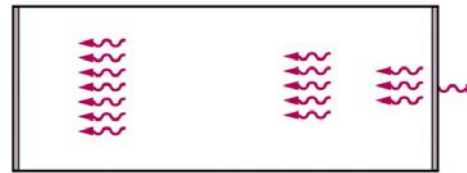


Silvered end

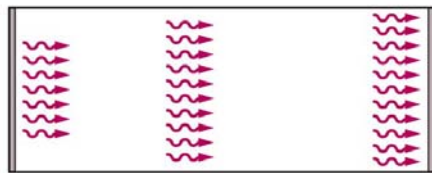
Partially silvered end



(a)



(b)



(d)

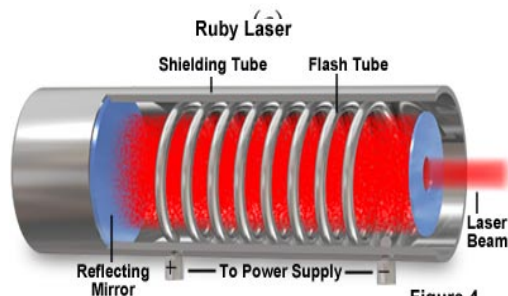
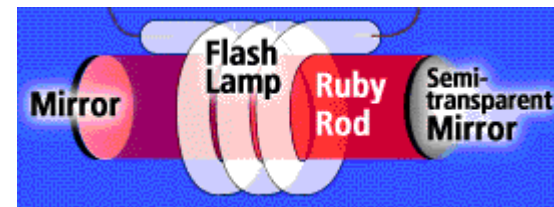


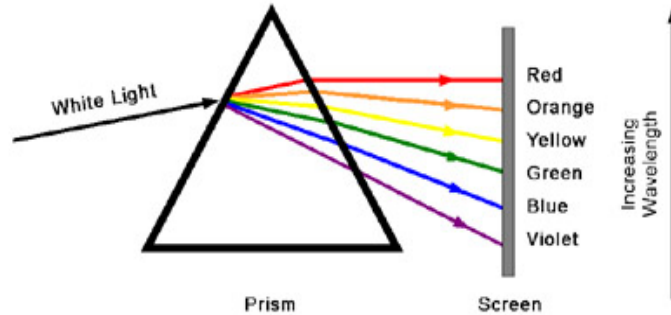
Figure 4



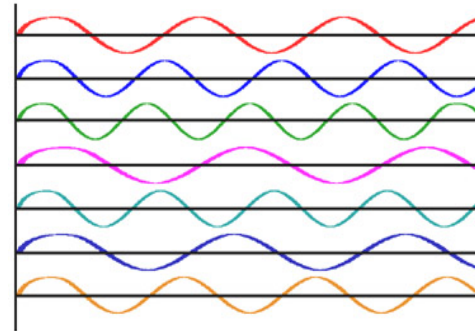


Diferenças entre a luz comum e a luz laser

- Luz "comum"
Policromática



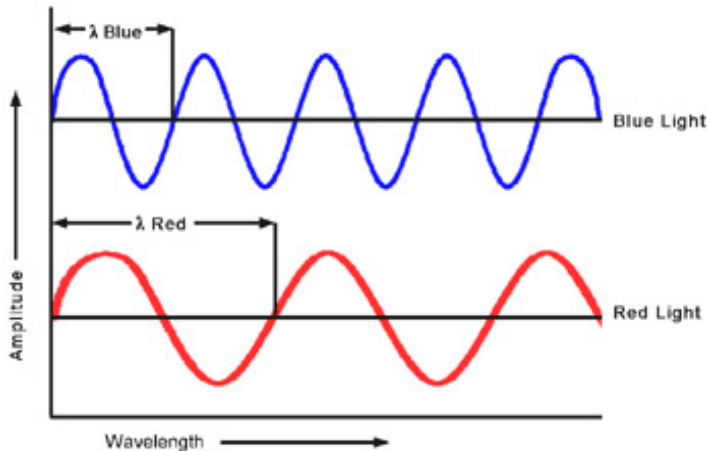
Incoerente



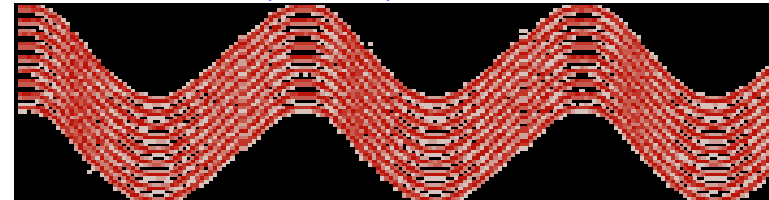
Muito divergente



- Luz laser
Quasi-monocromática (☺)

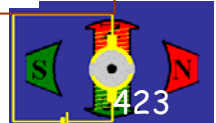
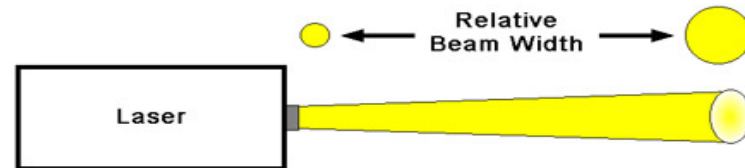


Coerente (☺ ☺)



Pouco divergente (☺)

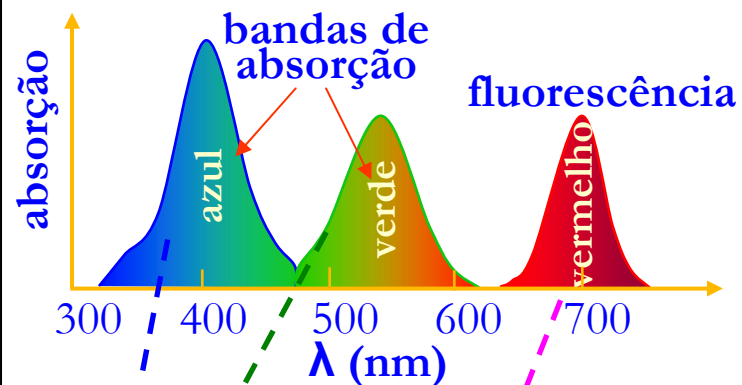
Highly Directional Beam
(Narrow Cone of Divergence)



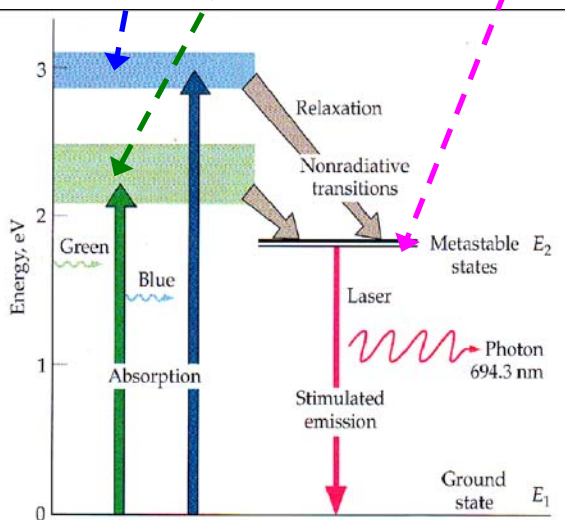
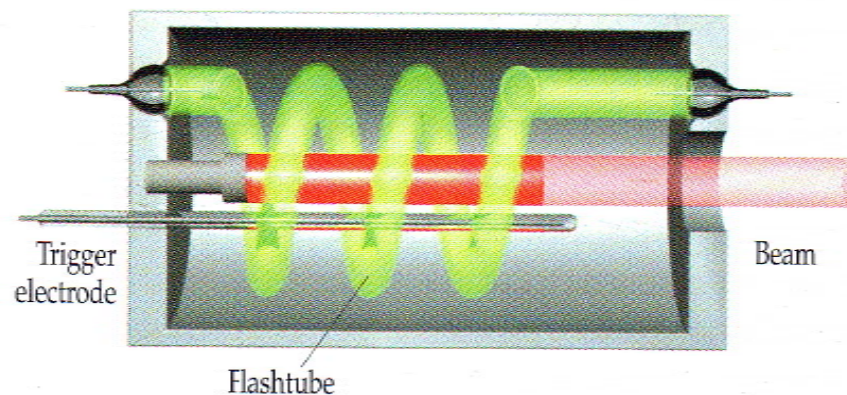


Laser de rubi pulsado

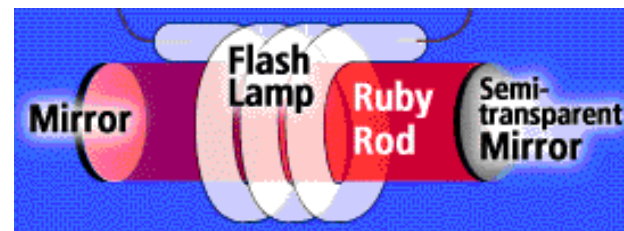
(bandas devidas à presença de Cr^{3+})



Primeiro sistema laser,
Theodore Maiman, 1960



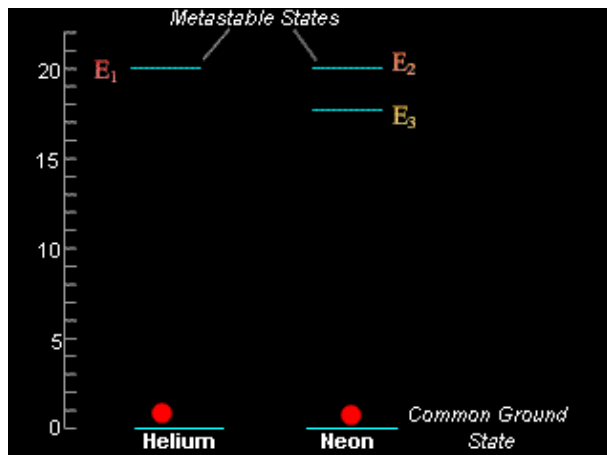
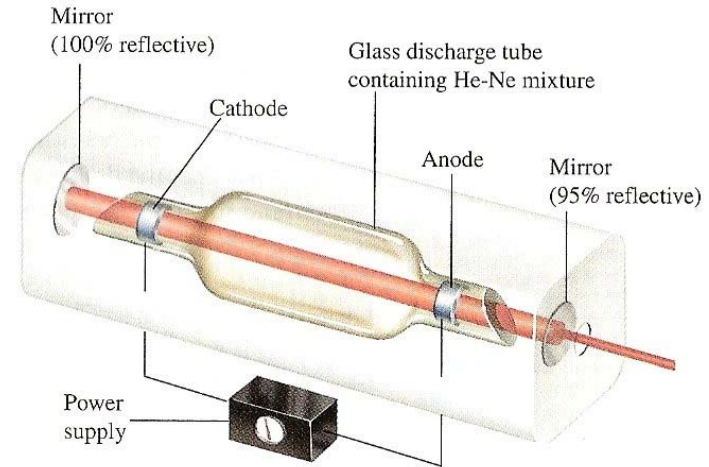
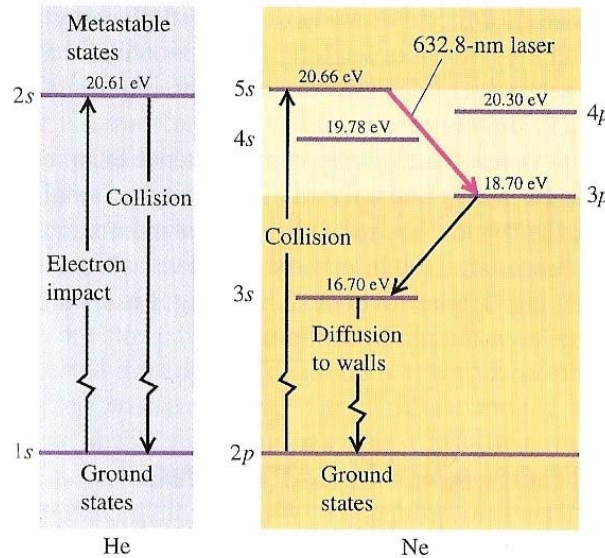
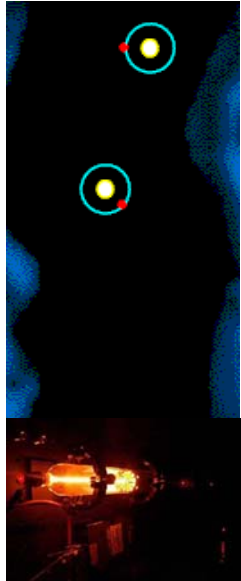
O laser de rubi é um sistema a três níveis, que requer muita energia de bombeamento para se obter a inversão entre o nível E_2 e o nível E_1 (estado fundamental), porque o estado final da emissão laser é o estado fundamental.



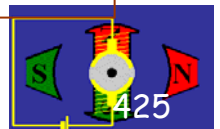


Laser de hélio-néon: laser de gás contínuo

Inventores: Ali Javan, W. R. Bennett Jr. E D. R. Herriott, 1961.

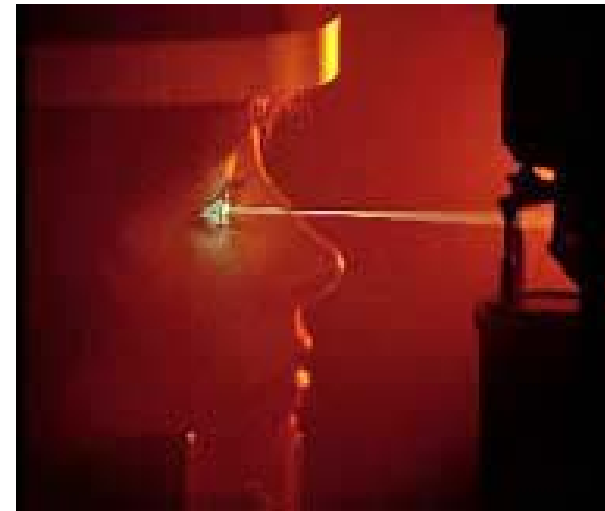
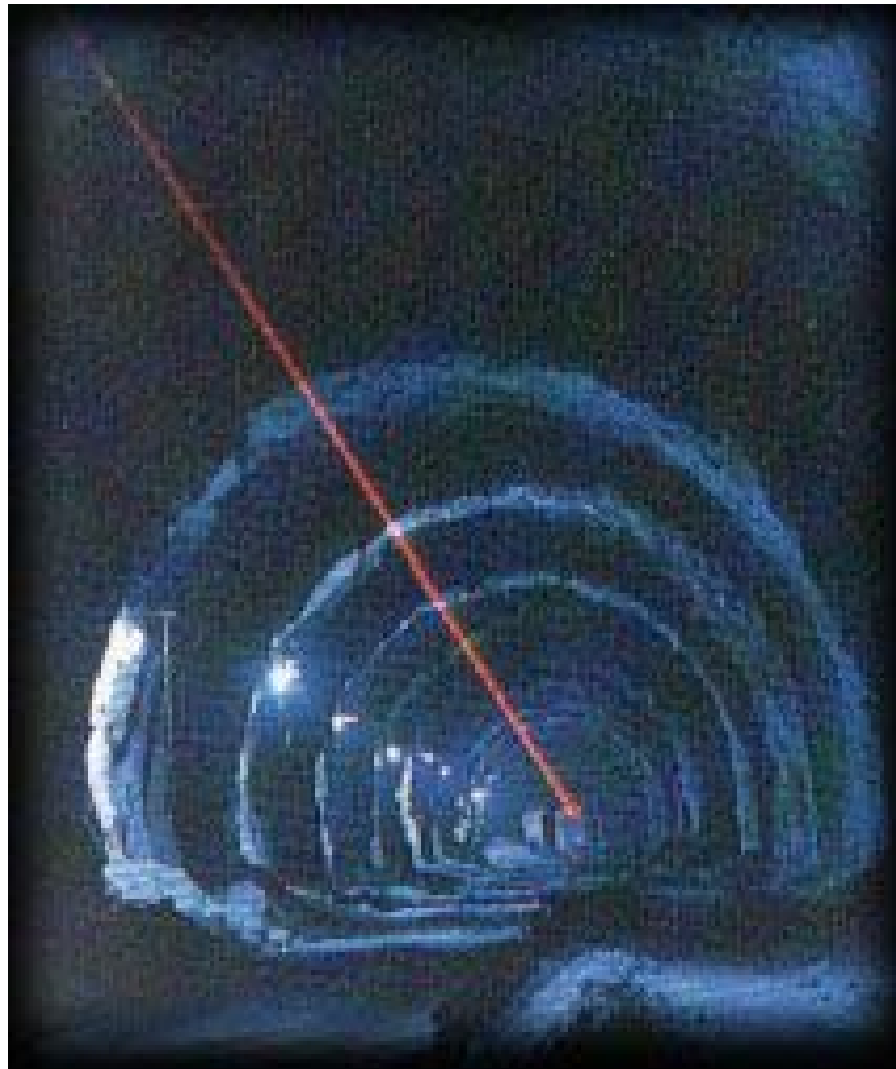


O laser de hélio-néon pode emitir em vários comprimentos de onda (3391 nm, 1523 nm, 1152 nm, 1118 nm, 632,8 nm, 594,5 nm, 543 nm), sendo o mais comum 632,8 nm. A eficiência dos lasers de hélio-néon comerciais é inferior a 0,1%.





Exemplos de aplicações: metrologia e medicina



Cirurgia com Lasik, uma das técnicas de utilização do laser Eximer

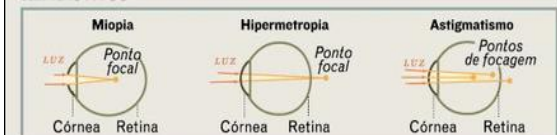


1 Primeiro o cirurgião corta e destaca uma aba à superfície, denominada lenticulo

2 Este é levantado e é aplicado o laser para destruir algumas células e tecidos corneanos. O objectivo é alterar a forma da córnea para corrigir os erros refractivos

3 Uma vez realizado este processo de fotoablação, volta a colocar o lenticulo no lugar, o qual funcionará como uma espécie de "penso" nos dias seguintes à operação

TIPOS DE ERROS REFRACTIVOS



FONTE: "Laservue Eye Center, Califórnia"

ANA SERRA

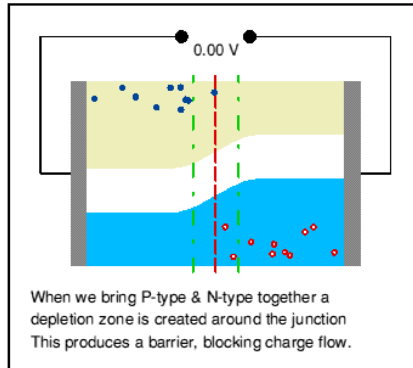


Electromagnetismo e Óptica, José Figueiredo, DF, UALG
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EO.htm>)

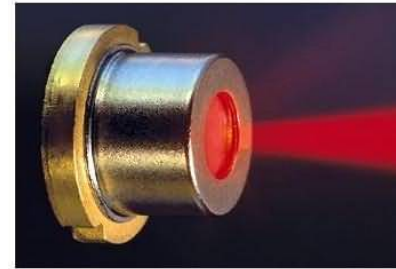
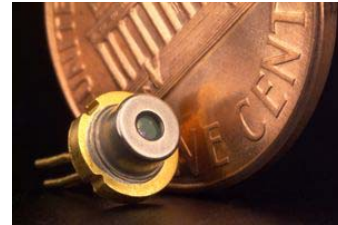




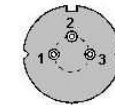
Laser de diodo (LD)



© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



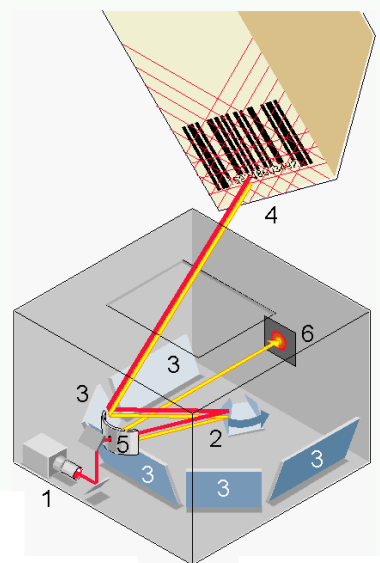
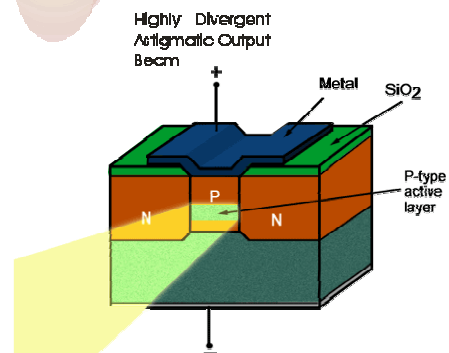
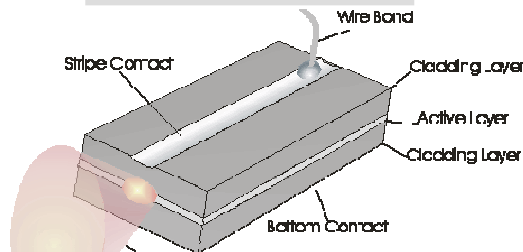
LASER DIODE HEAD



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

From Computer Desktop Encyclopedia © 1999 The Computer Language Co. Inc.

From Computer Desktop Encyclopedia © 1999 The Computer Language Co. Inc.



Projected laser beam

Reflection

Bar code

Electrical signal

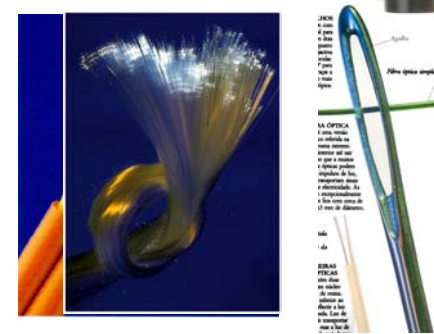
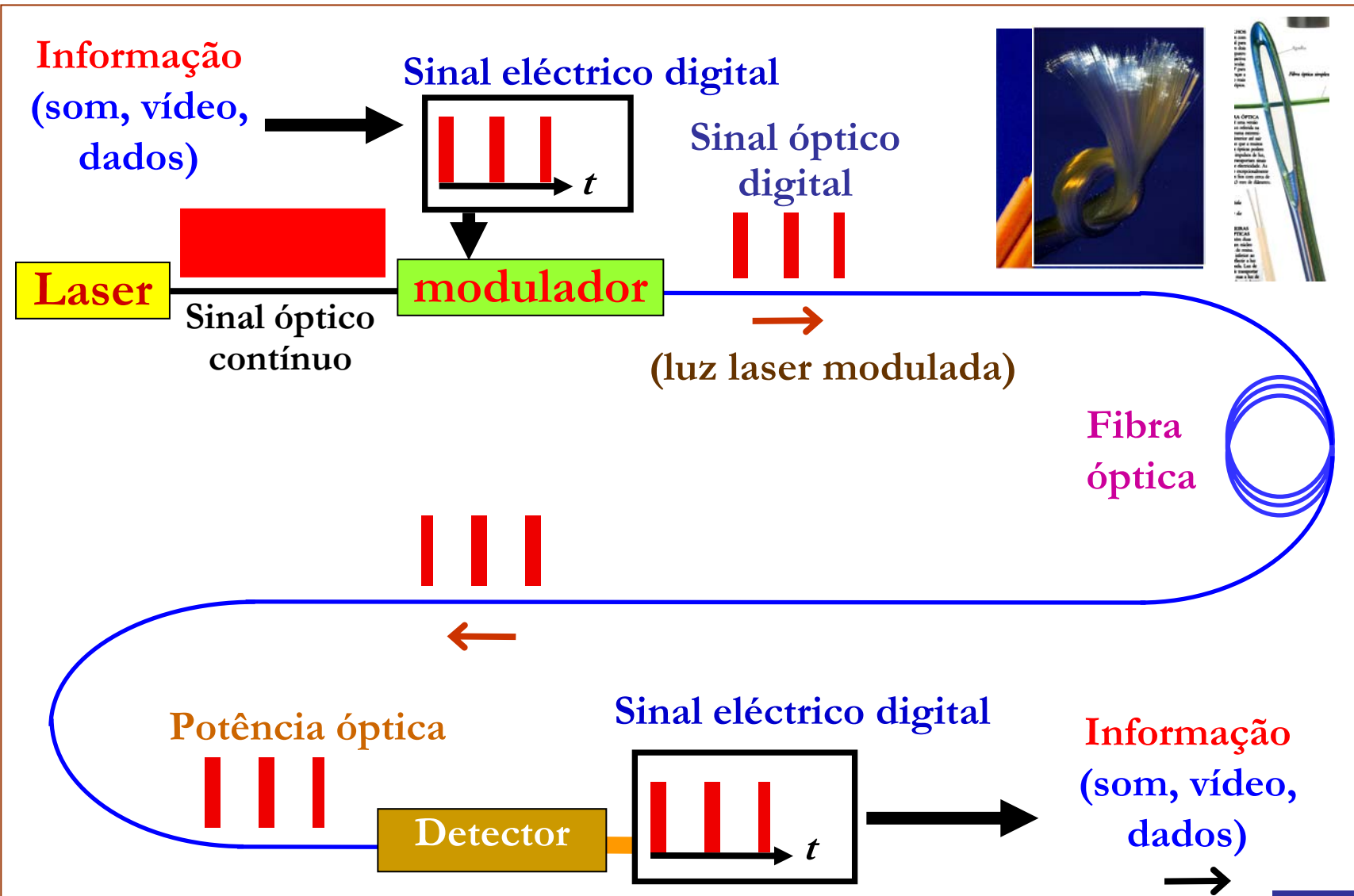
Digital code

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



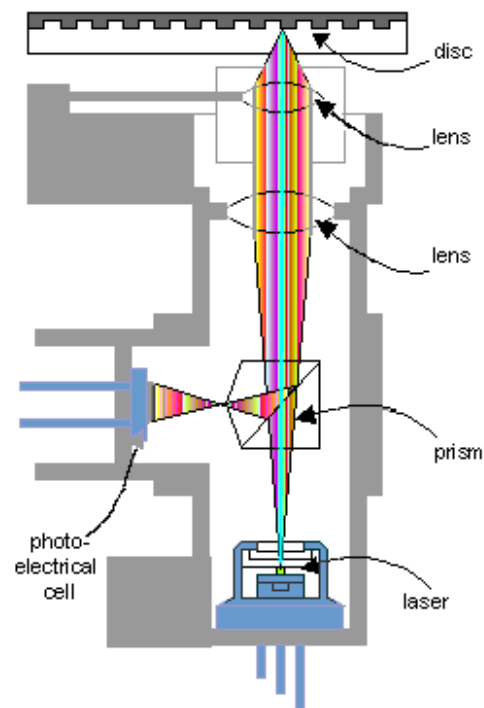
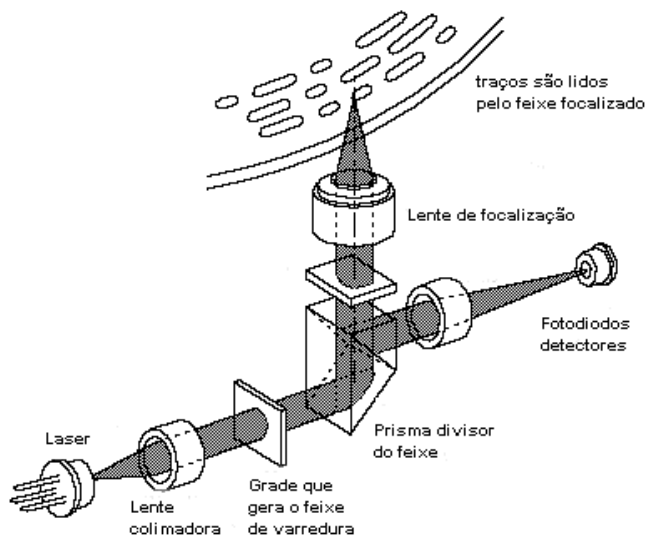
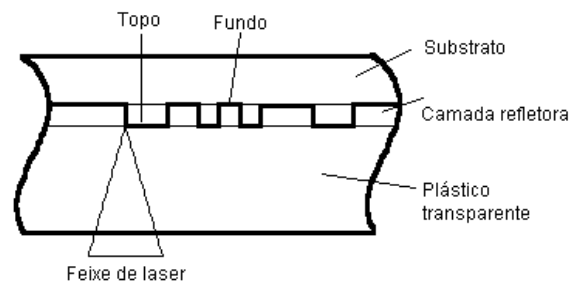
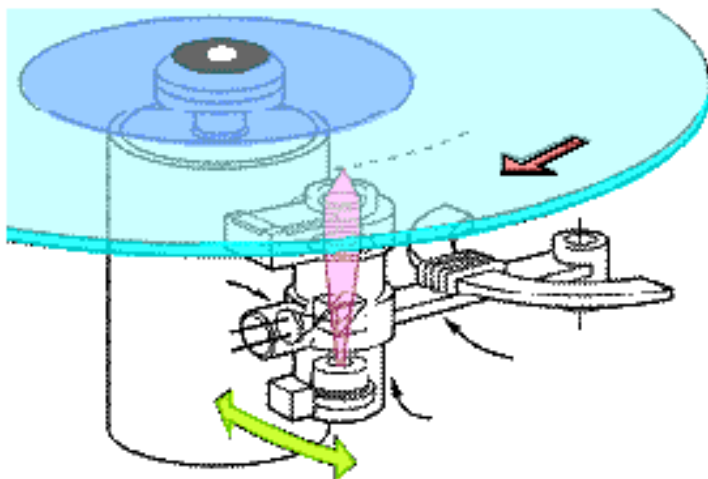


Aplicação dos lasers de diodo nas comunicações





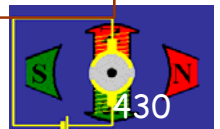
Leitores de CD e DVD





A propagação da luz

Luz: fluxo radiante capaz de estimular a retina para produzir a sensação visual; (fís.) designação que compreende não só as radiações visíveis mas também as radiações electromagnéticas invisíveis;



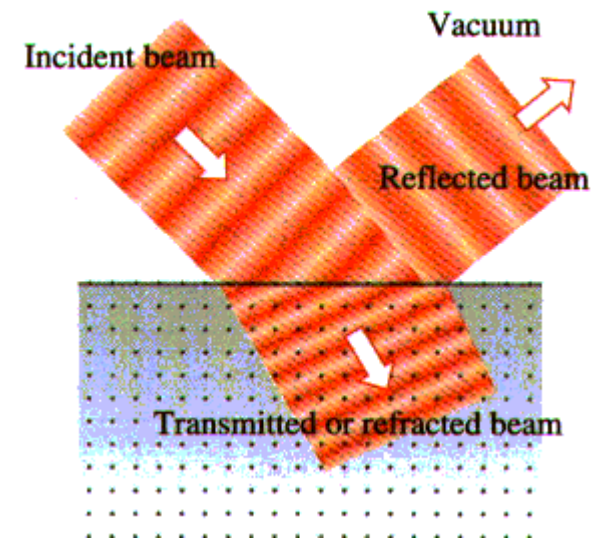
Dioptro

No que se segue, a luz é encarada no contexto do electromagnetismo clássico: uma onda electromagnética que se propaga com uma velocidade que depende das propriedades eléctricas e magnéticas do meio que atravessa.

É possível, em princípio, seguir a evolução de uma onda luminosa num meio, a partir das equações de Maxwell e condições fronteira adequadas. Embora, na grande maioria das situações práticas tal não seja possível, muitos dos princípios básicos da óptica são previsíveis com base na natureza ondulatória da luz, sem todavia dependerem da natureza exacta das ondas luminosas. Este facto é responsável pela longevidade do princípio Huygens.

Considere-se uma onda incidente num **dioptro** [superfície (plana ou curva) de separação entre dois meios de diferente refrangibilidade; espéculo (do gr. dióptron, «espelho»)].

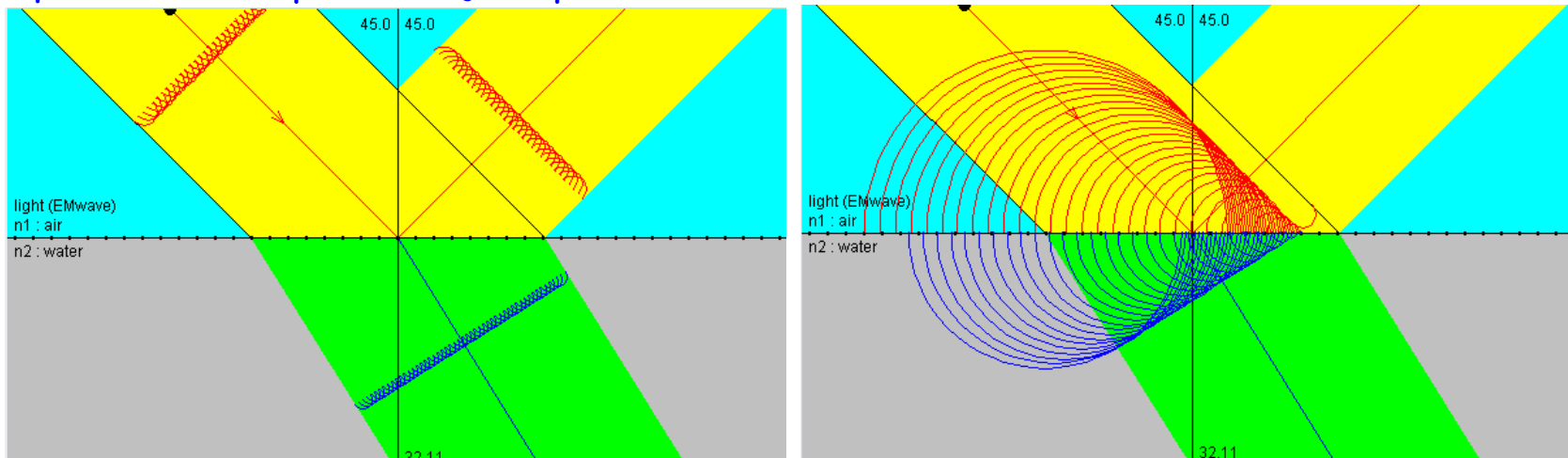
A experiência revela que parte do fluxo incidente é reflectido, dando origem à onda reflectida, e que o restante é transmitido através do dioptro, para o segundo meio, sob a forma de uma onda refractada.





Princípio de Huygens

Nas figuras abaixo as linhas rectas representam as frentes de onda das ondas incidente, reflectida e refractada. Uma frente de onda é uma superfície sobre a qual a fase da perturbação óptica é constante.



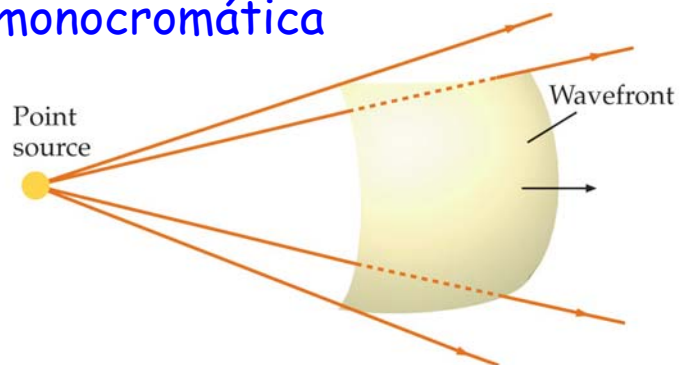
O **princípio Huygens** é um método de análise aplicado a problemas da propagação de ondas: cada ponto de uma frente de onda progressiva comporta-se como o centro de novas perturbações e uma fonte de novas ondas. A onda progressiva como um todo pode ser vista como a soma de todas as ondas secundárias vindas dos pontos do meio imediatamente vizinhos aos pontos da nova frente de onda. Esta interpretação da propagação de ondas permite explicar uma série de fenómenos ondulatórios como por exemplo a difracção.





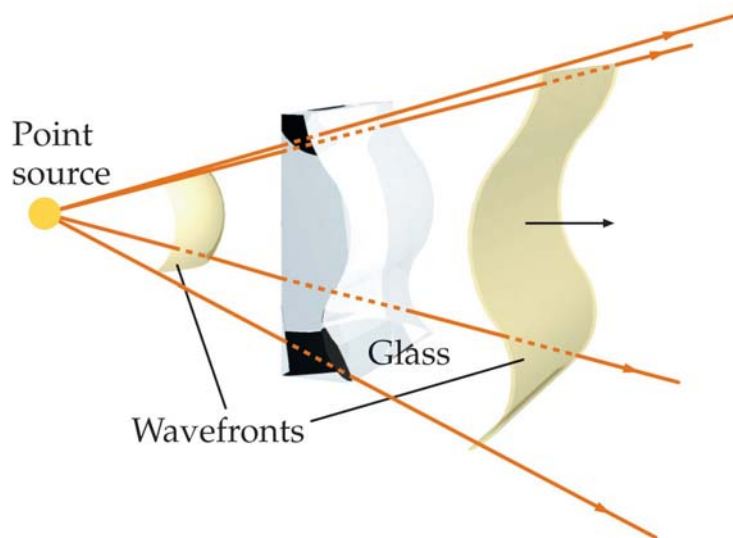
Propagação de frentes de onda

Porção de uma frente de onda produzida por uma fonte pontual monocromática



Se no instante t o raio da frente de onda for r , após o intervalo de tempo Δt , o raio da frente de onda será $(r + v\Delta t)$, onde v representa a velocidade de fase da onda.

Se esta mesma frente de onda atravessar uma lâmina de vidro não uniforme, qual será o efeito na frente de onda?



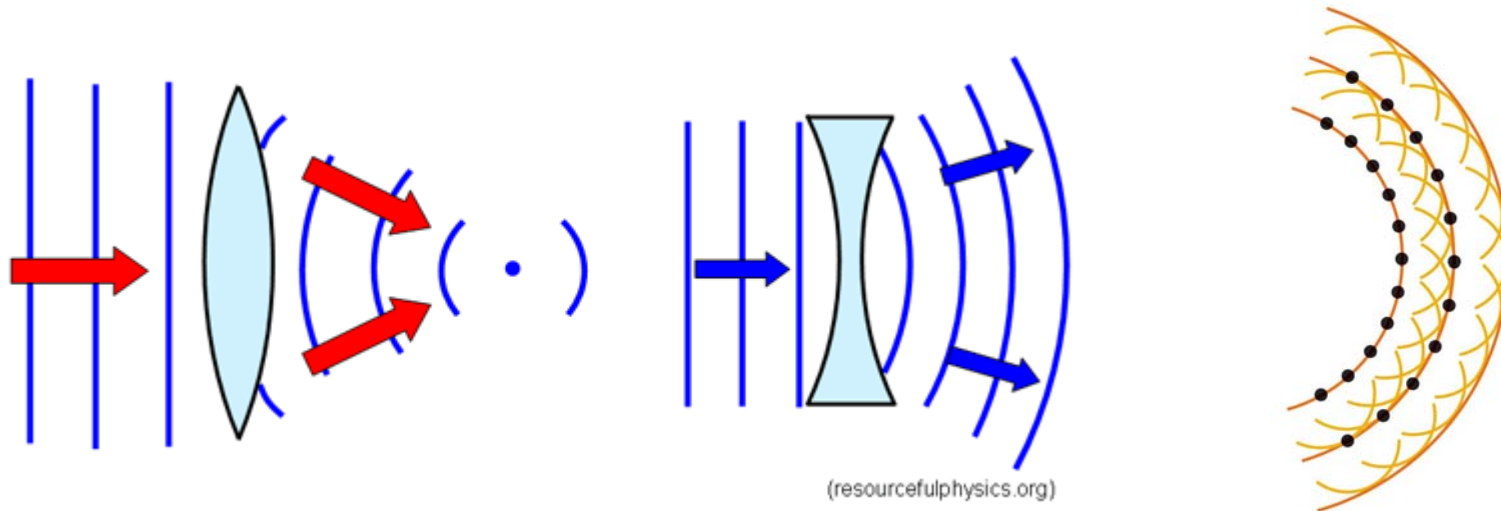
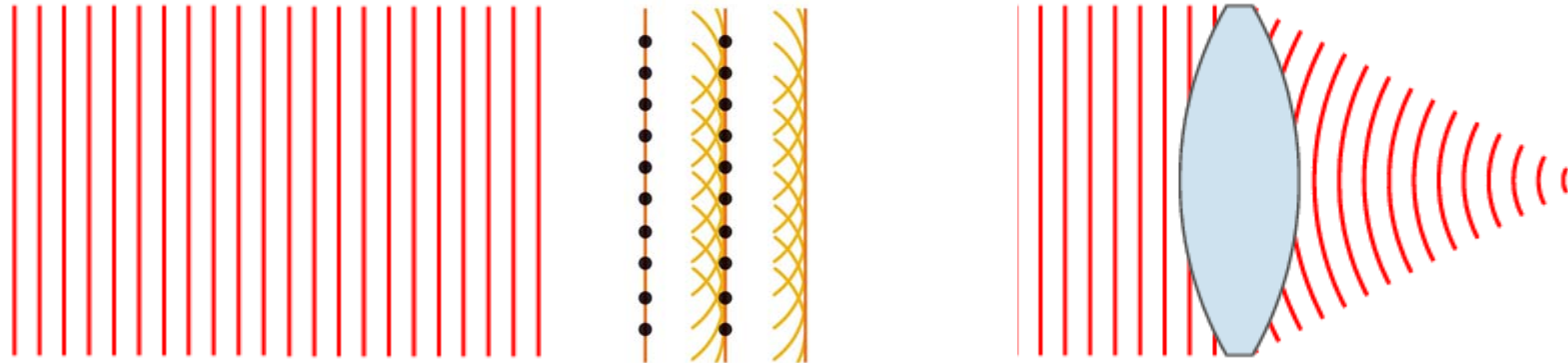
Em 1690, Huygens propõe o que viria a ser conhecido como **princípio de Huygens**: cada ponto de uma frente de onda primária constitui uma fonte para ondas esféricas secundárias, e a posição da frente de onda primária num instante posterior é determinada pela envolvente de todas estas ondas secundárias, que se propagam com velocidade e frequência igual à da onda primária.



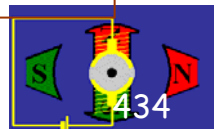


Princípio de Huygens

Em meios homogêneos, as ondas secundárias podem ser construídas com raio finito. Em meios não homogêneos o raio deve ser infinitesimal.



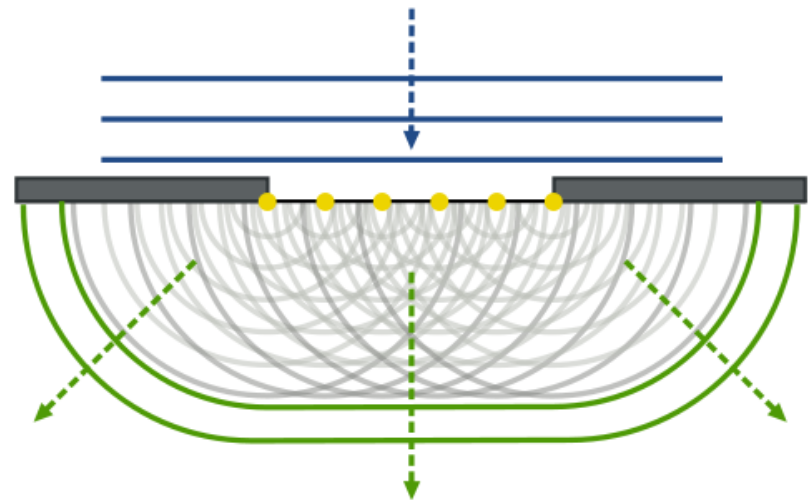
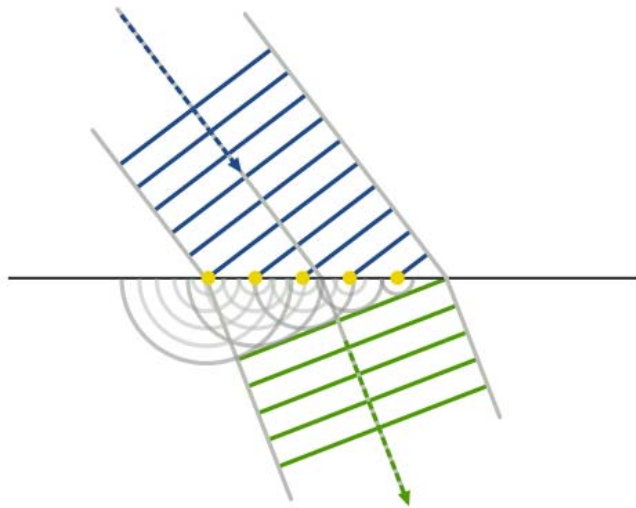
(resourcefulphysics.org)





Princípio de Huygens-Fresnel

O princípio de Huygens teve que ser reformulado, pois se se usarem ondas esféricas como ondas secundárias ter-se-ia uma onda de retorno propagando-se na direcção oposta, o que não se observa experimentalmente. Esta dificuldade foi resolvida por Fresnel e por Kirchhoff, e será ignorada sempre que se utilizar a construção de Huygens, representando apenas ondas secundárias com superfícies hemisféricas (ver página anterior): a onda progressiva como um todo pode ser vista como a soma de todas as ondas secundárias vindas dos pontos do meio imediatamente vizinhos aos pontos da nova frente de onda.



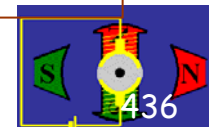


Princípio de Fermat

Tanto quanto se sabe, foi Hero de Alexandria quem pela primeira vez estabeleceu o princípio variacional. Na sua formulação da lei da reflexão da luz, Hero de Alexandria referiu que a luz, ao propagar-se entre dois pontos através de uma superfície reflectora, escolhe o caminho mais curto possível. Facilmente se mostre que o caminho mais curto corresponde à situação em que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_variational_principles_in_physics

Em 1657, Fermat propôs o princípio do tempo mínimo, que se aplica tanto à reflexão como à refração. Este princípio estabelece que o caminho percorrido pela luz entre dois pontos é tal que o tempo de percurso entre dois pontos distintos é menor tempo possível. Definindo-se o caminho óptico como o produto da extensão do trajecto efectivamente percorrido pela luz num dado meio pelo índice de refração desse meio, o princípio de Fermat pode ser enunciado na forma: entre dois pontos distintos, a luz segue a trajectória para qual o percurso óptico é mínimo. (Esta definição não é totalmente rigorosa, mas por agora é suficiente.)

É por esta razão que a trajectória dos raios solares através da atmosfera não homogénea da Terra é curva. Este facto permite continuar a ver o Sol mesmo depois deste ter descido abaixo do horizonte.





Leis da óptica geométrica

•
Óptica: parte da física que se ocupa da luz e dos fenómenos da visão;

Óptica Física: parte da óptica que toma em consideração a natureza ondulatória da luz (ondas electromagnéticas transversais);

Óptica Geométrica: parte da óptica que estuda os fenómenos que se podem explicar sem considerar qualquer hipótese sobre a natureza da luz; a Óptica Geométrica ocupa-se do estudo da propagação da luz com base em alguns postulados simples e sem grandes preocupações com sua natureza, se ondulatória ou particular.



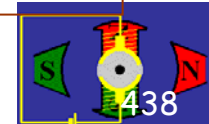


Ondas, frentes de onda e raios

Uma frente de onda corresponde ao lugar geométrico de todos os pontos adjacentes com a mesma fase num fenómeno ondulatório. Isto é, em qualquer instante, todos os pontos da frente de onda estão no mesmo grau de desenvolvimento do ciclo de vibração. Num diagrama esquemático representando uma onda, apenas são representadas partes de algumas frentes de onda com diferenças de fase 2π entre si (isto é, separadas de um comprimento de onda).

Para descrever a direcção de propagação de uma onda é conveniente representar as ondas por raios em vez das frentes de onda. Do ponto de vista ondulatório, um raio é uma linha imaginária perpendicular à frente de onda; na perspectiva corpuscular, um raio representa a trajectória da partícula.

O conceito de raio de luz foi introduzido por Alhazen. Em meios homogéneos e isotrópicos, os raios luminosos são linhas rectas normais à frente de onda. Na transição entre dois meios homogéneos e isotrópicos, a direcção dos raios pode mudar, descrevendo, contudo, sempre linhas rectas em cada um dos meios. Em meios homogéneos são paralelos ao vector de onda k . Nos meios não-homogéneos os raios são linhas curvas.





Teorema de Malus e Dupin

Quando um raio incide perpendicularmente numa superfície diz-se que ocorre uma **congruência normal**. Os raios que emanam de uma fonte pontual, por exemplo, são todos perpendiculares a uma superfície esférica centrada na fonte - por isso diz-se que formam uma congruência normal.

O teorema de Malus e Dupin é uma alternativa ao princípio de Huygens, e permite seguir a propagação da luz através de vários meios isotrópicos: uma congruência normal permanece normal após um número arbitrário de reflexões e refrações. Do ponto de vista da teoria ondulatória este enunciado equivale a afirmar que os raios se mantêm sempre perpendiculares às frentes de onda em todos os processos de propagação em meios isotrópicos. Este teorema também pode ser utilizado para deduzir as leis da reflexão e da refração.

Conhecidas as leis da refração e reflexão, é útil traçar-se os raios através de sistema ópticos, utilizando as leis da reflexão e da refração e construir posteriormente as frentes de onda.





Óptica geométrica

Óptica: parte da física que se ocupa da luz e dos fenómenos da visão;

Óptica Física: parte da óptica que toma em consideração a natureza ondulatória da luz (ondas electromagnéticas transversais);

Óptica Geométrica: parte da óptica que estuda os fenómenos que se podem explicar sem considerar qualquer hipótese sobre a natureza da luz;

A Óptica Geométrica ocupa-se do estudo da propagação da luz com base em alguns postulados simples e sem grandes preocupações com sua natureza, se ondulatória ou particular. Os princípios em que se baseia a Óptica Geométrica são três:

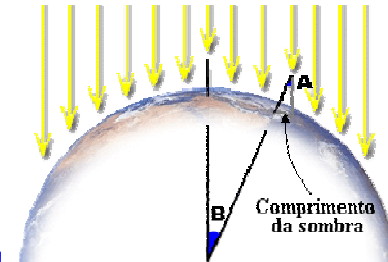
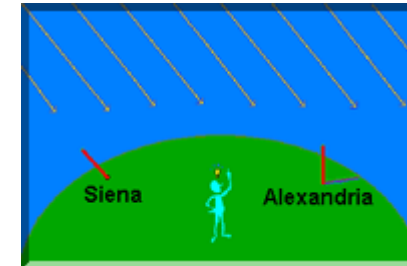
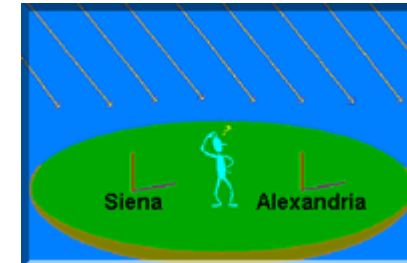
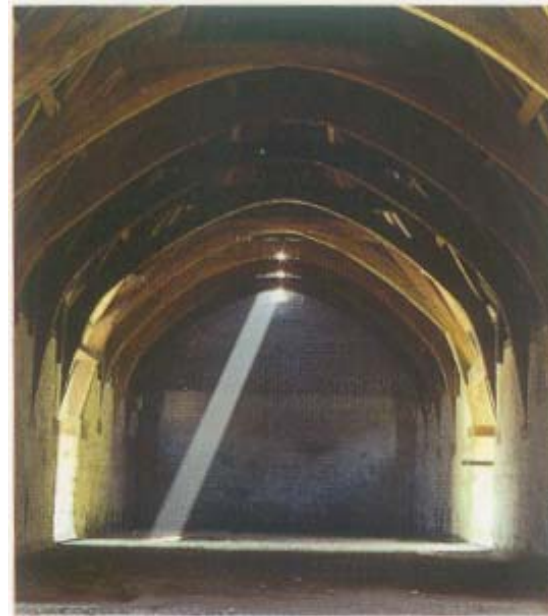
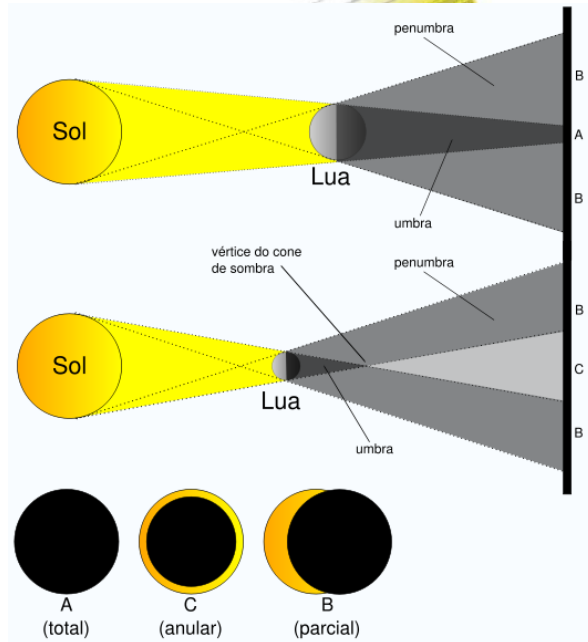
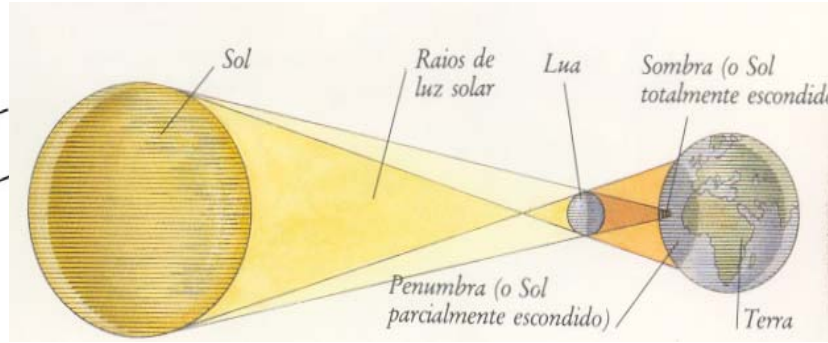
- **Propagação rectilínea da luz:** num meio homogéneo e transparente a luz propaga-se em linha recta. Cada uma dessas "rectas" é designada raio de luz.
- **Independência dos raios de luz:** quando dois raios de luz se cruzam, um não interfere na trajectória do outro, comportando-se como se o outro não existisse.
- **Reversibilidade dos raios de luz:** se revertermos o sentido de propagação de um raio de luz ele percorre a mesma trajectória, mas em sentido contrário.

O domínio de validade da óptica geométrica é o de a escala em estudo ser muito maior do que o comprimento de onda da luz considerada e as fases das diversas fontes luminosas não terem qualquer correlação entre si. Assim, e p.ex., é legítimo utilizar a óptica geométrica para descrever a refracção, mas não a difracção.





Propagação rectilínea da luz



<http://www.rio.rj.gov.br/planetario/eratostenes/erasemana/historia.html>

Electromagnetismo e Óptica, José Figueiredo, DF, UALG
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EO.htm>)





Reflexão e refração da luz

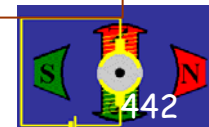
Reflexão da luz: (fís.) fenómeno que se verifica quando a luz incide na superfície de separação de dois meios diferentes e é reenviada para o meio donde provinha. (Do lat. reflexióne-, «id.»)

Ângulo de Reflexão: (fís.) ângulo formado pela direcção do movimento ou do fenómeno reflectido com a normal (perpendicular) à superfície de incidência;

Refração: (fís.) mudança de marcha (com ou sem desvio angular) que sofre a propagação das ondas electromagnéticas (a luz, por ex.), quando passam de um meio para outro em que a velocidade de propagação é diferente; índice de n (de um meio para determinada radiação):

Índice de refração: (fís.) razão entre a velocidade da luz no vazio (que é a mesma para todas as radiações) e a velocidade dessa radiação no meio considerado (e que é variável com a frequência da radiação). (Do lat. refractióne-, «id.»)

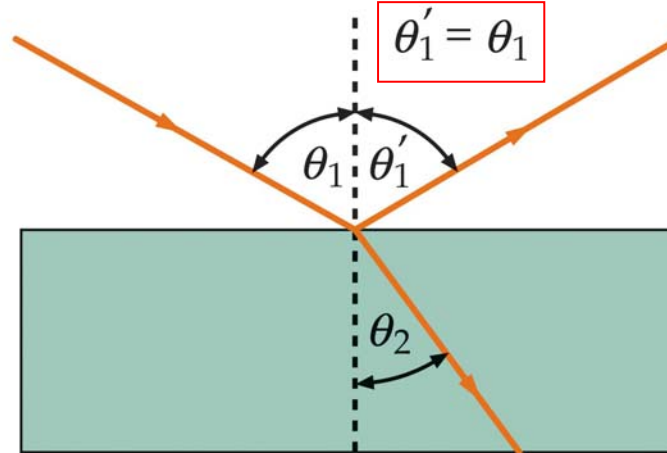
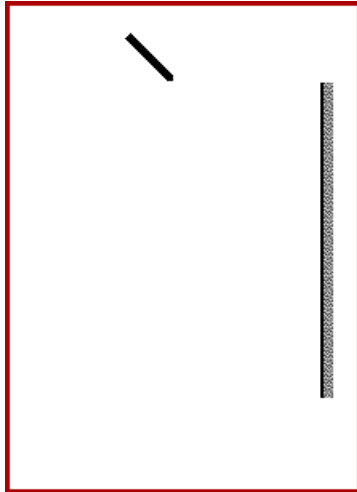
Plano de incidência: plano definido pelo raio incidente e pela normal à superfície de separação dos dois meios (dioptra)





Lei da reflexão

O raio incidente e a normal à superfície de separação dos dois meios (dióptro) definem o plano de incidência

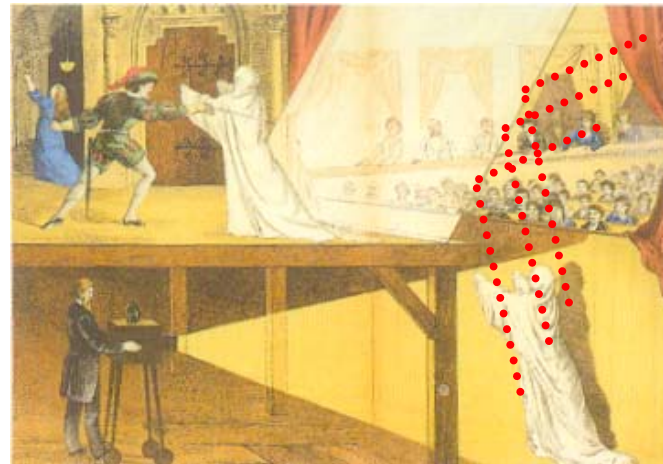
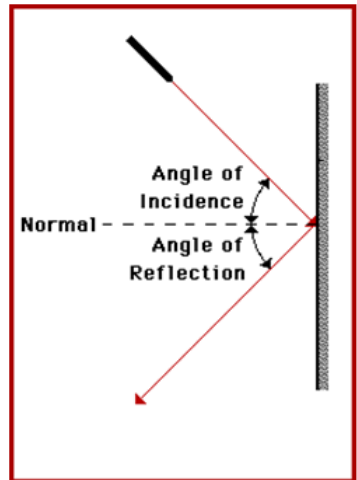


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Reflection.swf>



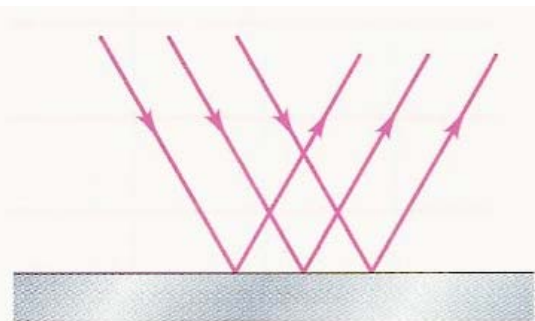
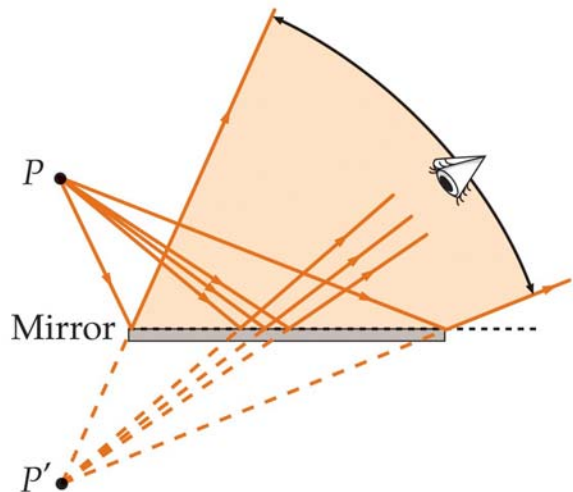
ESPELHO DE ÁGUA

A superfície de água quieta constitui um espelho natural. Conta uma lenda grega que um jovem chamado Narciso apaixonou-se pela sua própria imagem reflectida num lago. Ao tentar tocar-lhe caiu à água e afogou-se.

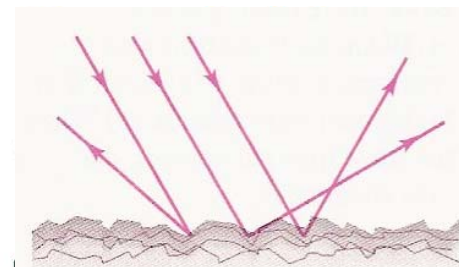




Reflexão especular e difusa

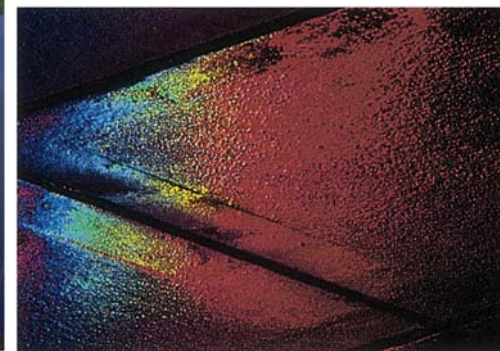


(a)



(b)

34-4 (a) Specular reflection.
(b) Diffuse reflection.



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Reflection.swf>

Especular [p3]: adj. 2 gén. relativo a espelho ou a certos minerais que têm lâminas que reflectem a luz como um espelho;

Difuso: (fís.) diz-se da luz reflectida irregularmente em diferentes direcções.



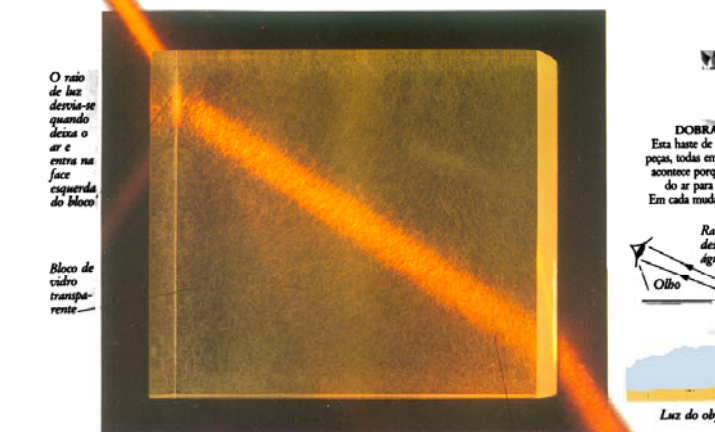


Lei da refração

$$n_i = \frac{c}{v_i} : \text{índice de refração do meio } i$$

experiências para investigar quanto a luz era desviada. Inventou uma lei para explicar a refração mas nem mesmo os seus próprios resultados estavam de acordo com a essa lei.

lei da refração. Apicou-a a diversos casos, mas não foi reconhecido. Al-Hazen (pág. 12) investigou a refração, mas não pôde concluir até onde a refração da luz iria. O problema foi resolvido em 1621 por Willebrord Snell e a sua lei ficou conhecida por «lei de Snell».

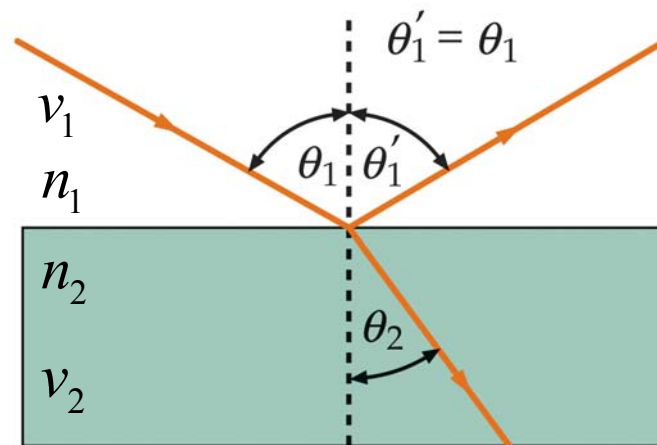


A LEI DE REFRAÇÃO DE SNELL
Nesta experiência um feixe de luz desvia-se quando entra e sai de um bloco de vidro transparente. Quando o feixe atinge o bloco, aproxima-se mais da horizontal. Quando deixa o bloco volta a desviar-se mas na direcção oposta. A medida do desvio é muito precisa. Se o feixe entra ou sai do bloco perpendicularmente não sofre refração. Se entrar ou sair segundo um ângulo haverá refração, que será tanto maior quanto maior for o afastamento da vertical. Em 1621 o matemático holandês, também astrónomo, Willebrord Snell determinou que existia uma relação característica entre o ângulo de incidência do feixe (ângulo antes do desvio) e o seu ângulo de refração (ângulo depois do desvio). A sua lei mostra que cada substância tem um poder de refração próprio, o seu índice de refração. Quanto mais uma substância desvia a luz tanto maior o seu índice de refração.



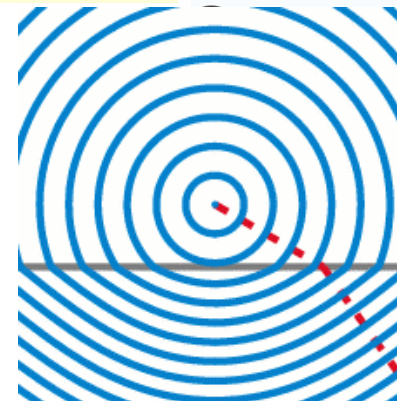
A luz no interior do bloco desvia-se em linha recta

WILLEBRORD SNELL
Willebrord Snell (1580-1626) descobriu uma das mais importantes leis respeitantes à luz. Foi também pioneiro da triangulação, método para medir distâncias usando os ângulos entre diferentes pontos.



Lei de Snell-Descartes

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

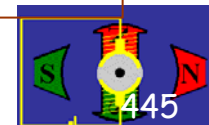


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Refraction.swf>

[http://www.ndt-](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm)

[ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm)

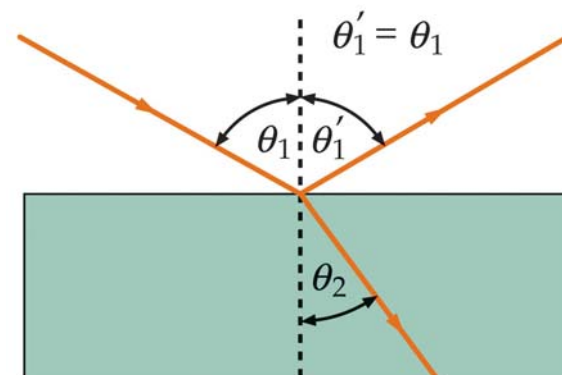
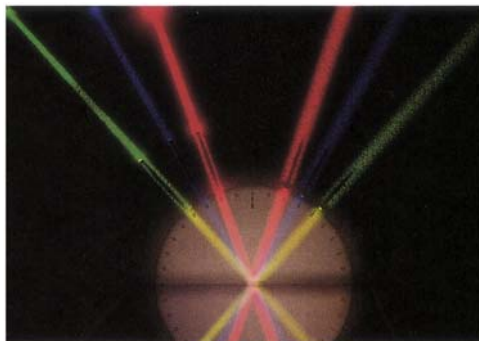
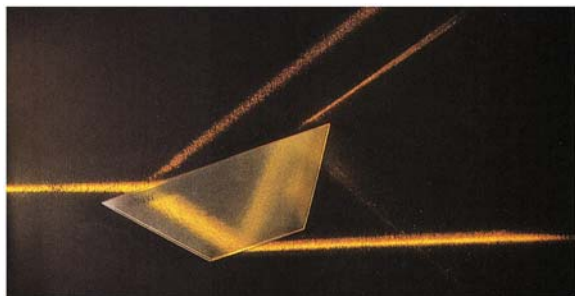
<http://www.lon-capa.org/~mmp/kap25/Snell/app.htm>





Reflexão e refração

O raio incidente e a normal à superfície de separação dos dois meios (diopetro) definem o plano de incidência



Princípios básicos da reflexão e da refração:

1. Os raios incidente, reflectido e refractado pertencem todos ao plano de incidência, isto é, os vectores das ondas incidente, reflectida e transmitida são coplanares.
2. O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência, $\Theta_r = \Theta_i$.
3. O produto do índice de refração do meio refractante pelo seno do ângulo de refração é igual ao produto do índice de refração do meio incidente pelo seno do ângulo de incidência.

Lei de Snell-Descartes

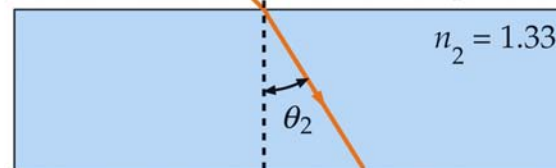
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\theta_1 = 45^\circ$$

$$n = \frac{c}{v}$$

$$n_1 = 1$$

$$n_2 = 1.33$$



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$





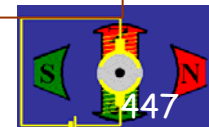
Aproximação electromagnética*

As leis da reflexão e da refração podem ser deduzidas a partir de três contextos diferentes: o princípio de Huygens, o teorema de Malus e Dupin e o princípio de Fermat.

A **teoria electromagnética da luz** é uma aproximação mais geral e completa, mas também mais complexa. Ao contrário das aproximações anteriores lida com as densidades de fluxo radiante incidente, reflectido e transmitido. A técnica de análise a utilizar depende do problema em questão e do rigor que se pretende. Deve-se usar sempre a técnica mais simples que permita obter os resultados com o rigor desejado.

De seguida resumem-se as conclusões e os resultados principais da teoria electromagnética não previstos pelas outras técnicas, resumidas nas **equações de Fresnel**. A mais significativa para o presente estudo e que **convém reter** corresponde ao seguinte facto: **na reflexão, a fase da componente do campo eléctrico normal ao plano de incidência varia de π radianos em relação à componente incidente quando o índice de refração do meio de incidência é inferior ao do meio de transmissão.**

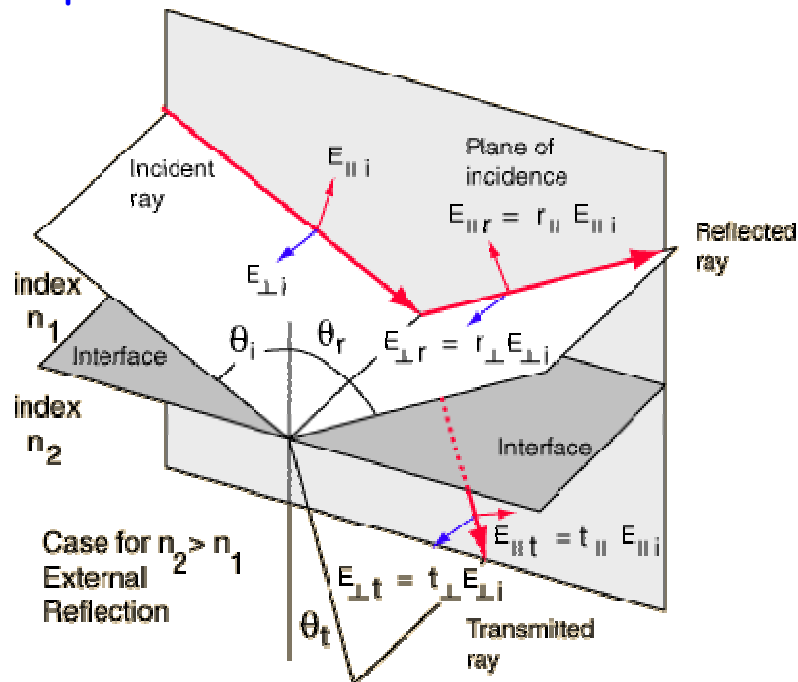
*Ver, por exemplo, Óptica, Eugene Hecht, Fundação Caloste Gulbenkian, secção 4.3, Aproximação electromagnética.





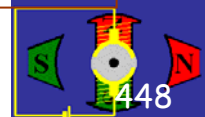
Equações de Fresnel*

Considere-se uma onda plana monocromática incidente numa superfície plana de separação entre dois meios isótopos. Cada um dos campo eléctrico e magnético, E e B , pode decompor-se em duas componentes ortogonais entre si: uma paralela ao plano de incidência e outra perpendicular.



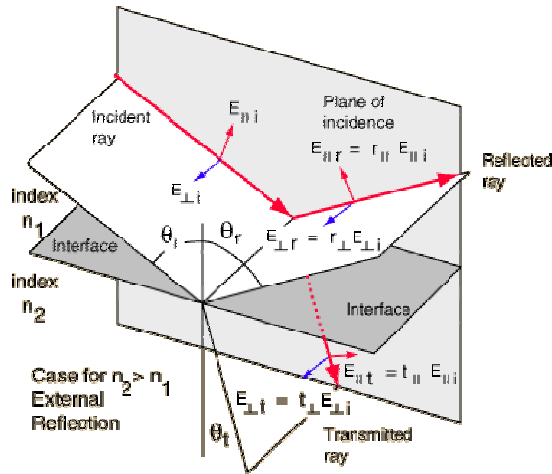
As equações de Maxwell impõem certos constringimentos a que os campos devem obedecer (**condições fronteira**): uma dessas restrições é que a componente do campo eléctrico E tangente à superfície seja contínua (o mesmo se passa para o campo H). Isto é, a componente tangencial de E imediatamente acima da superfície deve ser igual à componente de E imediatamente abaixo da superfície.

*Ver, por exemplo, *Óptica*, Eugene Hecht, Fundação Caloste Gulbenkian, secção 4.3, Aproximação electromagnética.
http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations





Equações de Fresnel* (2)



A partir das relações existentes entre as fases das componentes do campo electromagnético é possível as interdependências entre as componentes do campo electromagnético reflectida e transmitida e as componentes incidente, conhecidas como equações de Fresnel para meios lineares, homogéneos e isotópicos.

Na reflexão, a fase da componente do campo eléctrico normal ao plano de incidência varia de pi radianos em relação à componente incidente quando o índice de refração do meio de incidência é inferior ao do meio de transmissão. Quando o índice de refração do meio incidente é superior ao do meio de transmissão não há alteração de fase entre estas componentes. Ter presente que $R_{||} = (r_{||})^2 = 0$ quando $\Theta_i + \Theta_t = 90^\circ$ ($\Theta_p = \Theta_i$).

$$r_{\perp} = \left[\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right]_{\perp} = \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_t \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)}$$

$$t_{\perp} = \left[\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right]_{\perp} = \frac{2n_1 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)}$$

$$r_{||} = \left[\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right]_{||} = \frac{n_t \cos(\theta_i) - n_1 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)}$$

$$t_{||} = \left[\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right]_{||} = \frac{2n_1 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)}$$





Reflectância e transmitância*

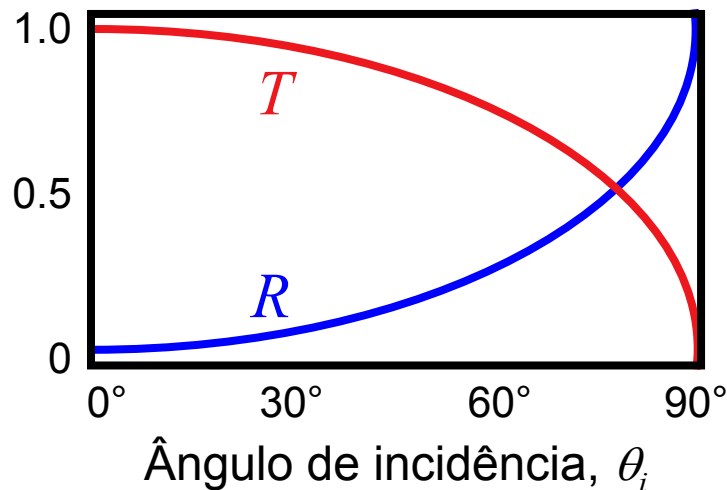
Define-se **reflectância** R como a razão entre as potências reflectida e a potência incidente; da mesma forma a **transmitância** T corresponde à razão entre os fluxos transmitido e incidente.

$$R \equiv \frac{I_r \cos(\theta_r)}{I_i \cos(\theta_i)} \quad \text{e} \quad T \equiv \frac{I_t \cos(\theta_t)}{I_i \cos(\theta_i)} : \quad R_{\perp,\parallel} = (r_{\perp,\parallel})^2 \quad \text{e} \quad T_{\perp,\parallel} = \frac{n_t \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_i)} (t_{\perp,\parallel})^2$$

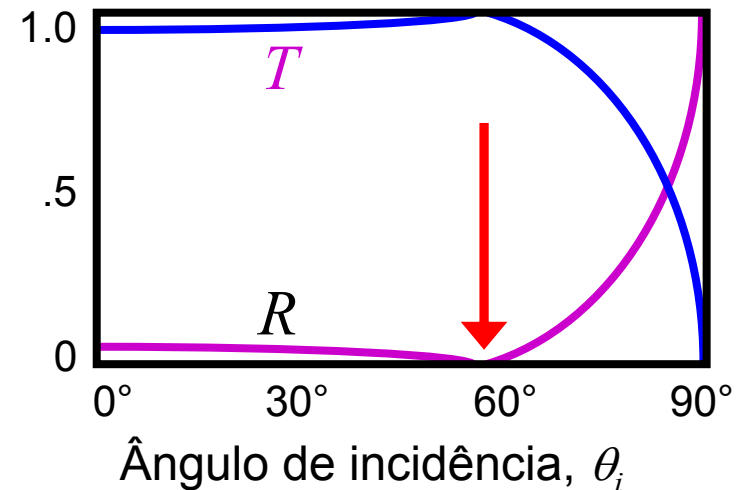
Note que $R + T = 1$

Reflectância R e transmitância T para o caso de uma interface ar-vidro

Polarização perpendicular



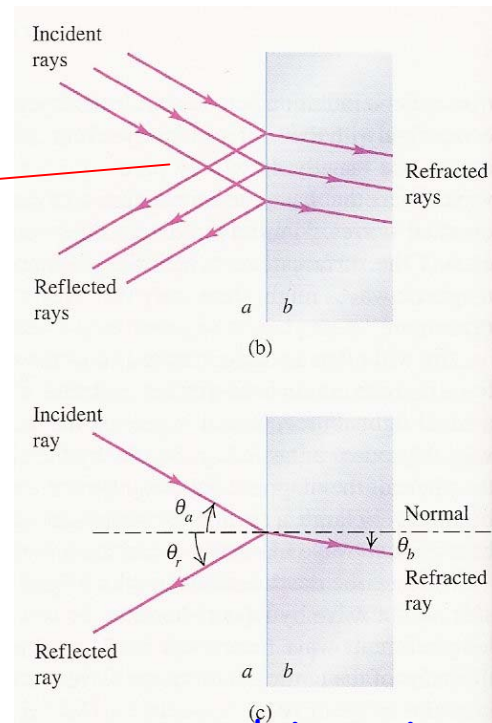
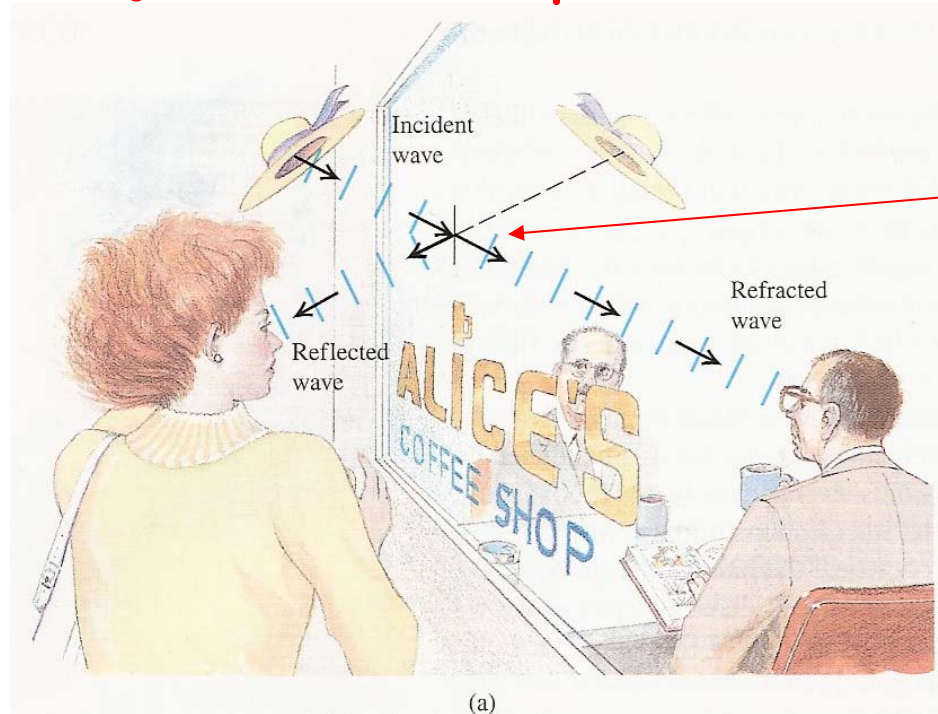
Polarização paralela





Reflectância e transmitância: interface ar-vidro

Relações de Fresnel para incidência normal

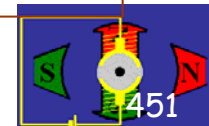


Quando a incidência é próxima da normal à fronteira entre os dois meios a reflectância $R=(r)^2$ e a transmitância $T=(t)^2$:

Transição ar-vidro:

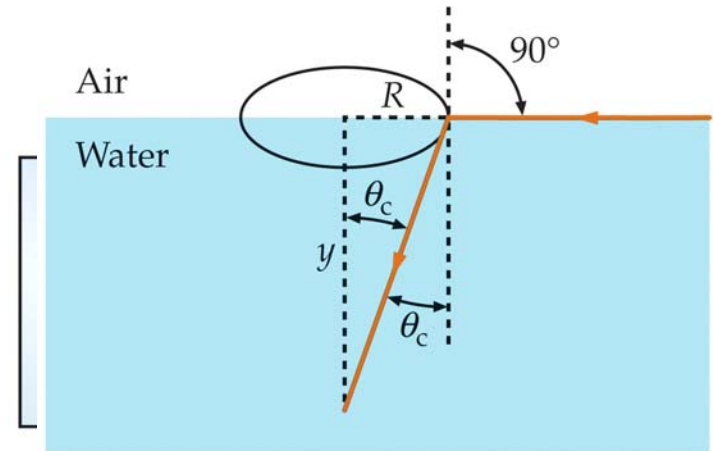
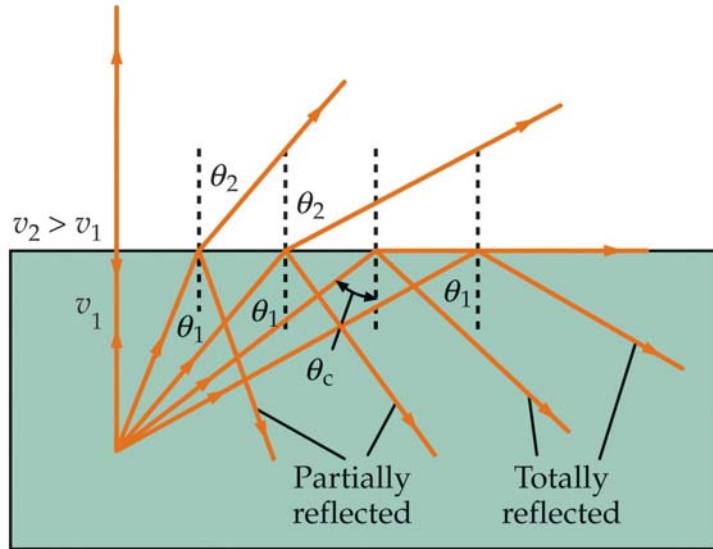
$$R(\theta_i = 0) \approx 4\%, T(\theta_i = 0) \approx 96\%$$

$$R(\theta_i = 0) \approx \left(\frac{n_a - n_b}{n_a + n_b} \right)^2, T(\theta_i = 0) \approx \frac{4n_a n_b}{(n_a + n_b)^2}$$





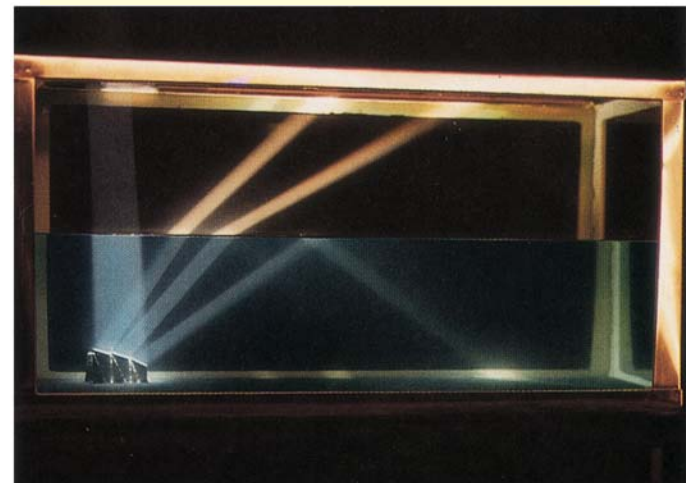
Reflexão interna total (RIT)



$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}$$

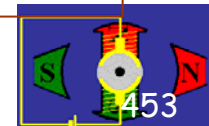
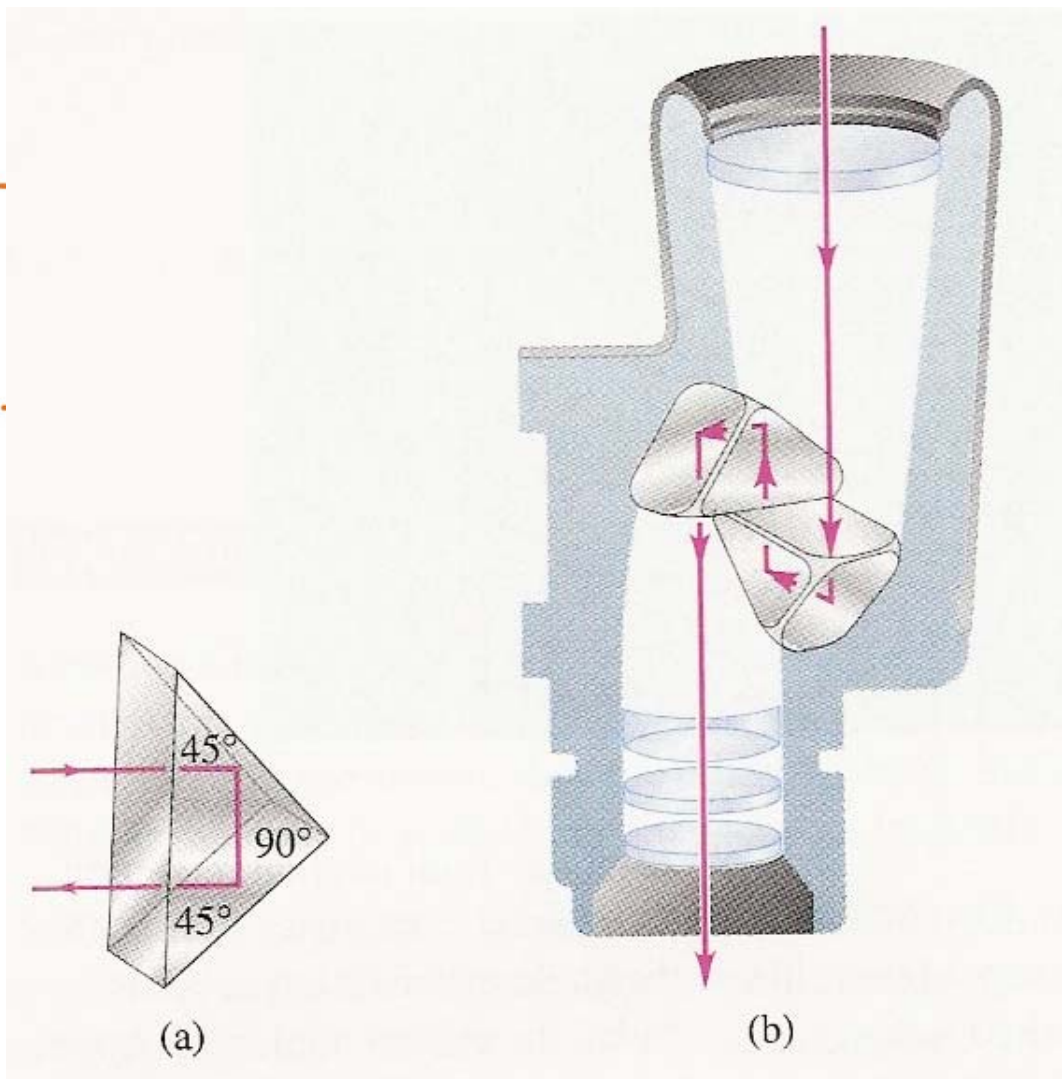
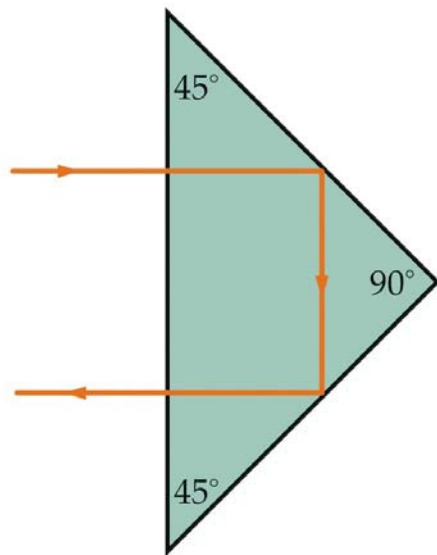
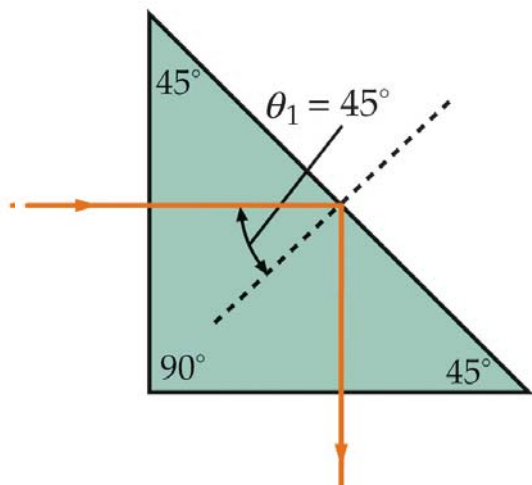


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Refraction.swf>





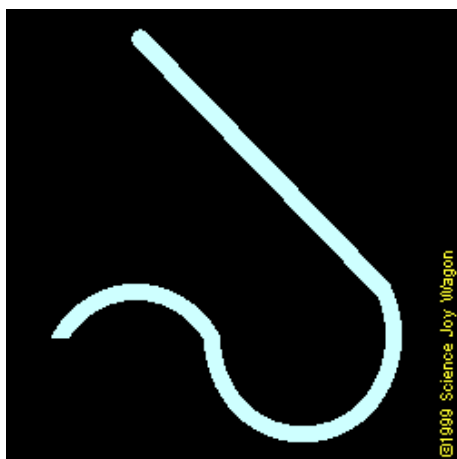
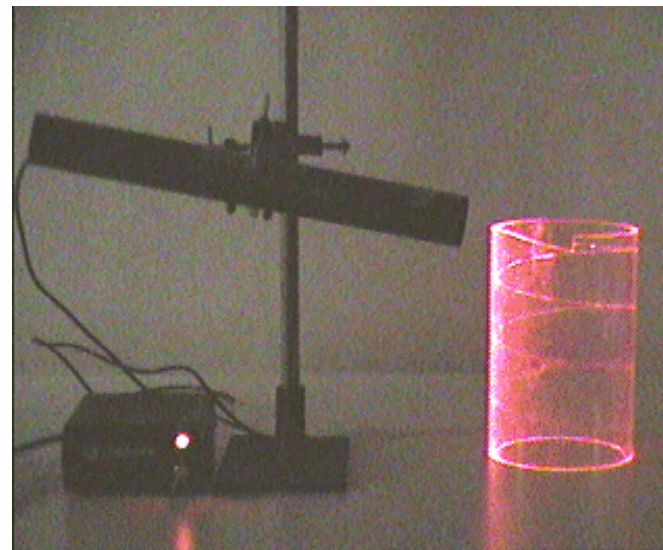
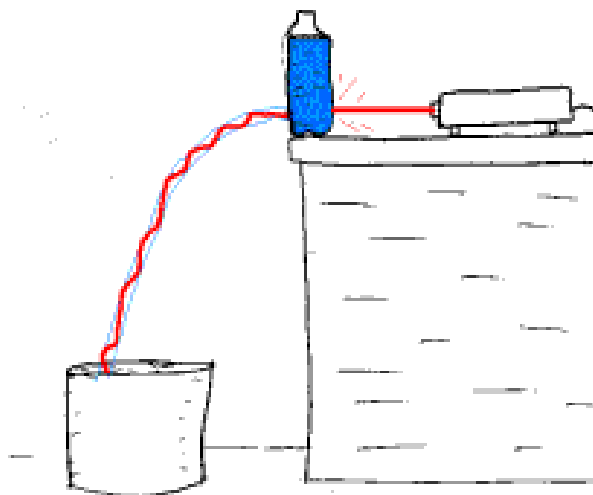
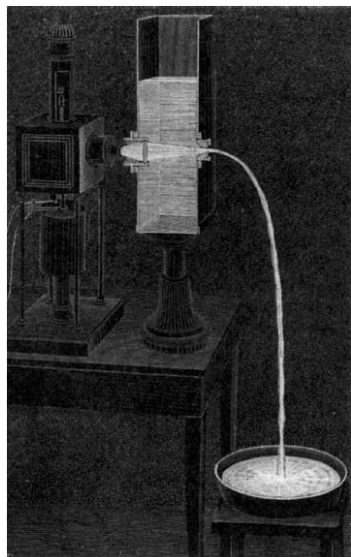
Aplicações da reflexão interna total



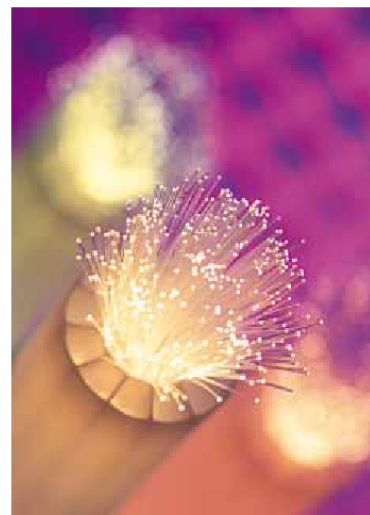


Experiências de Colladen Tyndall: guiagem da luz

1841 (Colladen) e 1870 (Tyndall) «guiam» a luz



©1999 Science Joy Wagon

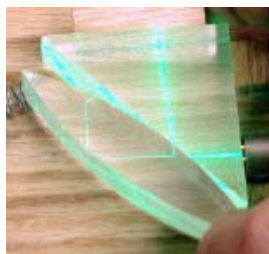
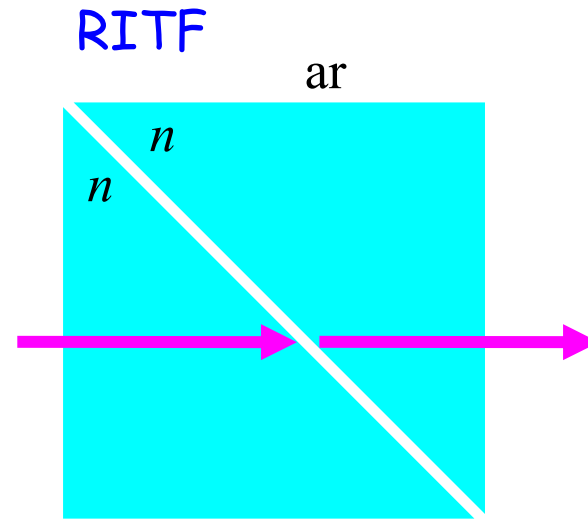
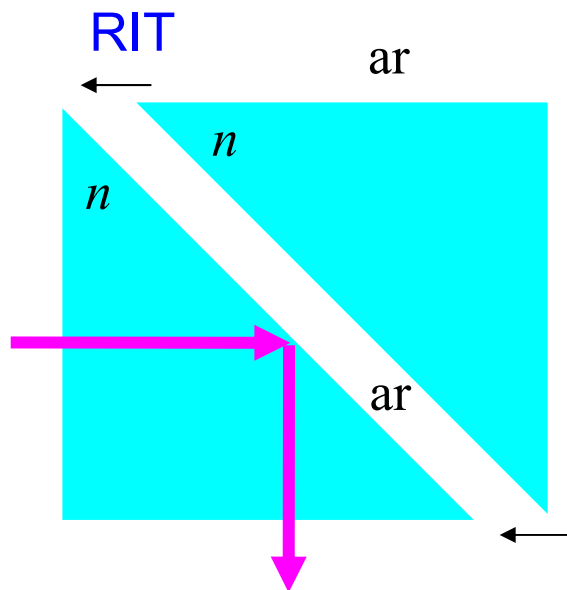
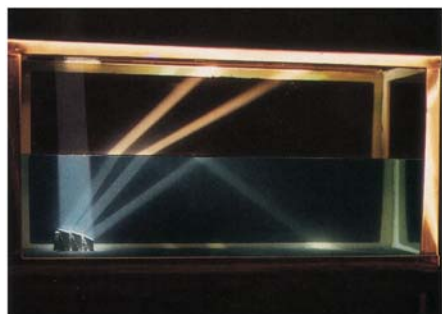


Hank Morgan/Photo Researchers, Inc.

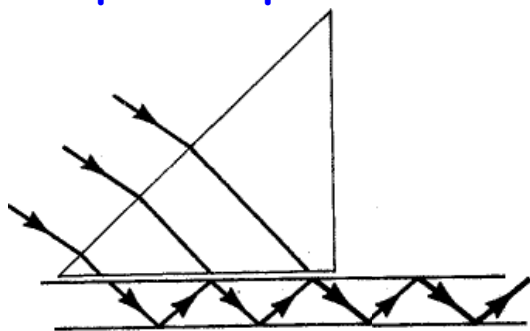




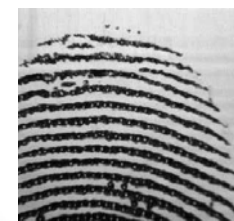
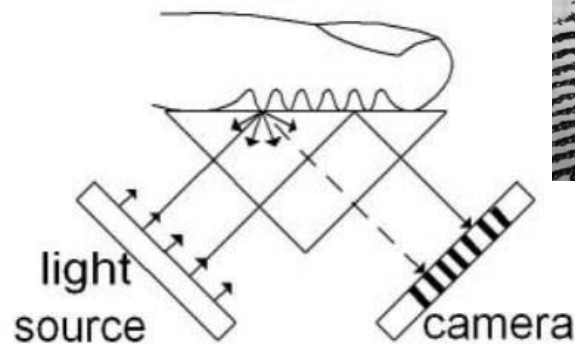
Reflexão interna total frustrada (RITF)



Aplicações Acoplador óptico



Sensor fingertip





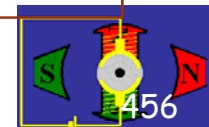
Natureza da luz e leis da óptica geométrica

-

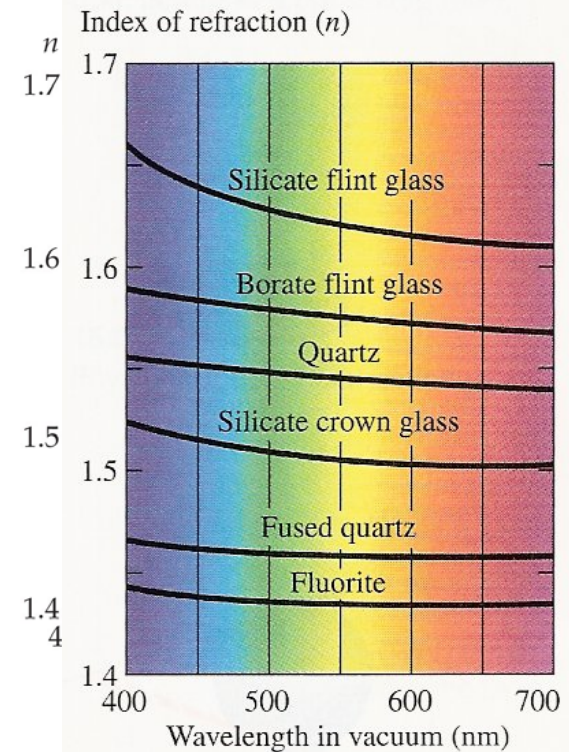
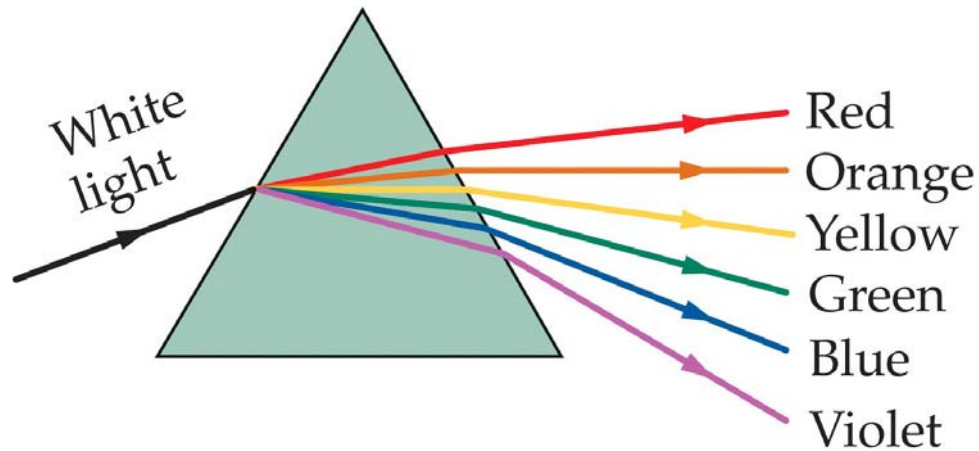
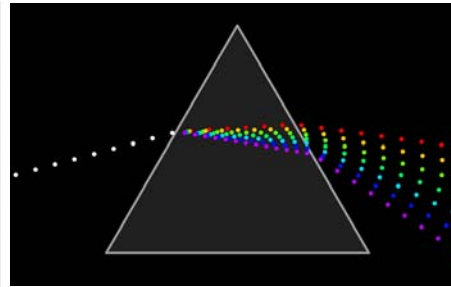
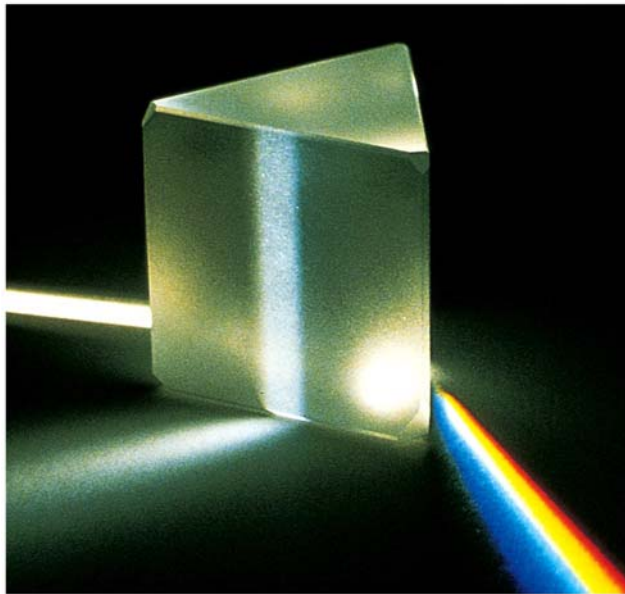
Dispersão da luz

Dispersão: (fís.) 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;

Dispersão média: diferença entre os índices de refração para as radiações F (azul) e C (vermelha) do hidrogénio. (Do lat. dispersiōne-, «id.»)



Dispersão da luz



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 $\lambda = \lambda_0/n$.

Arco-íris

Arco-íris: fenómeno atmosférico que se observa, às vezes, no lado oposto ao Sol, quando chove, e que consiste na formação de um grupo de arcos concêntricos onde se escalonam as cores do espectro solar, devido a fenómenos de refração, reflexão e dispersão dos raios solares nas gotas de água da atmosfera. (De arco + -íris)



No arco-íris primário a luz branca é reflectida uma só vez no interior uma gotícula de chuva. As cores dispersam-se quando entra e quando saem da gota. A luz vermelha provém das gotículas situadas num ângulo de 42° com a linha do horizonte e a luz violeta das que estão a 40° . Todas as restantes cores provêm de gotas compreendidas entre estes dois ângulos. Um arco-íris secundário forma-se pelo lado de fora de um primário. A luz é reflectida duas vezes por cada gota de água e emerge a maiores ângulos a partir do solo. A luz vermelha vem de gotas de ângulos de 50° com o horizonte; a luz violeta é proveniente das gotas a 54° .



Arco-íris: refração, reflexão e dispersão da luz

White

White

40° 42°

Violet

Red

Violet

Red

This drop looks red

V R

This drop looks violet

V R

A luz do arco-íris é polarizada linearmente ("o campo eléctrico é tangente ao arco em cada ponto")

Construção de Descartes de raios paralelos de luz entendo numa gota de água esférica. De todos os raios, o raio 7 é o que emerge segundo o maior ângulo, $\sim 42^\circ$.

12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

1

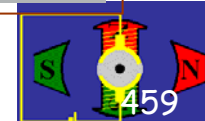
2

3

4

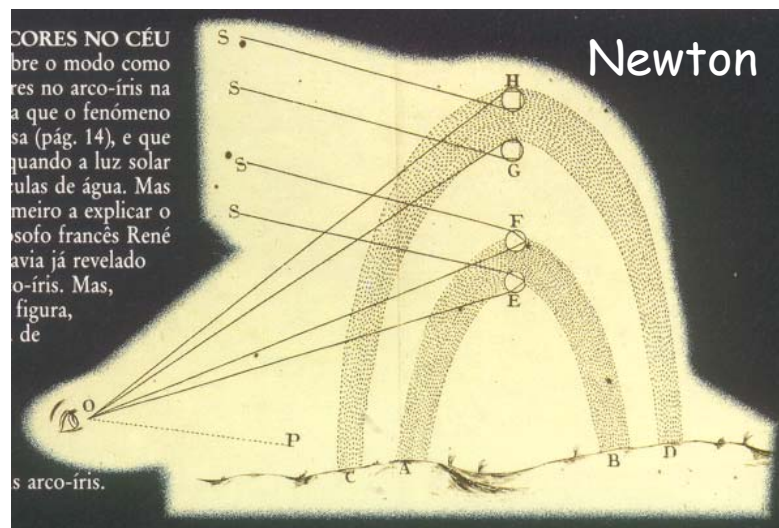
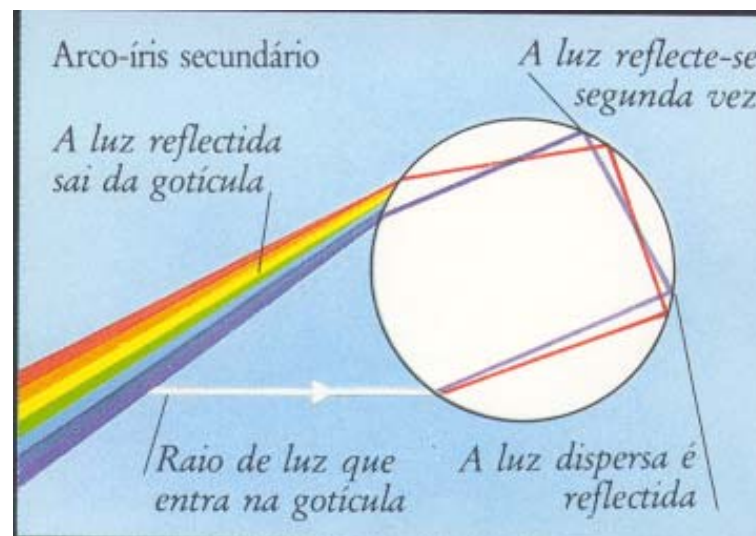
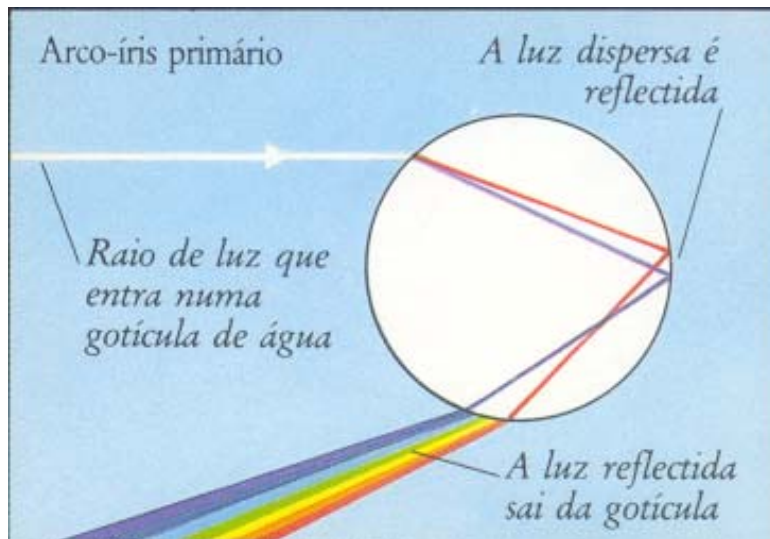
5 12 11 10 9 8 7 6 10 7

A luz do arco-íris é polarizada linearmente



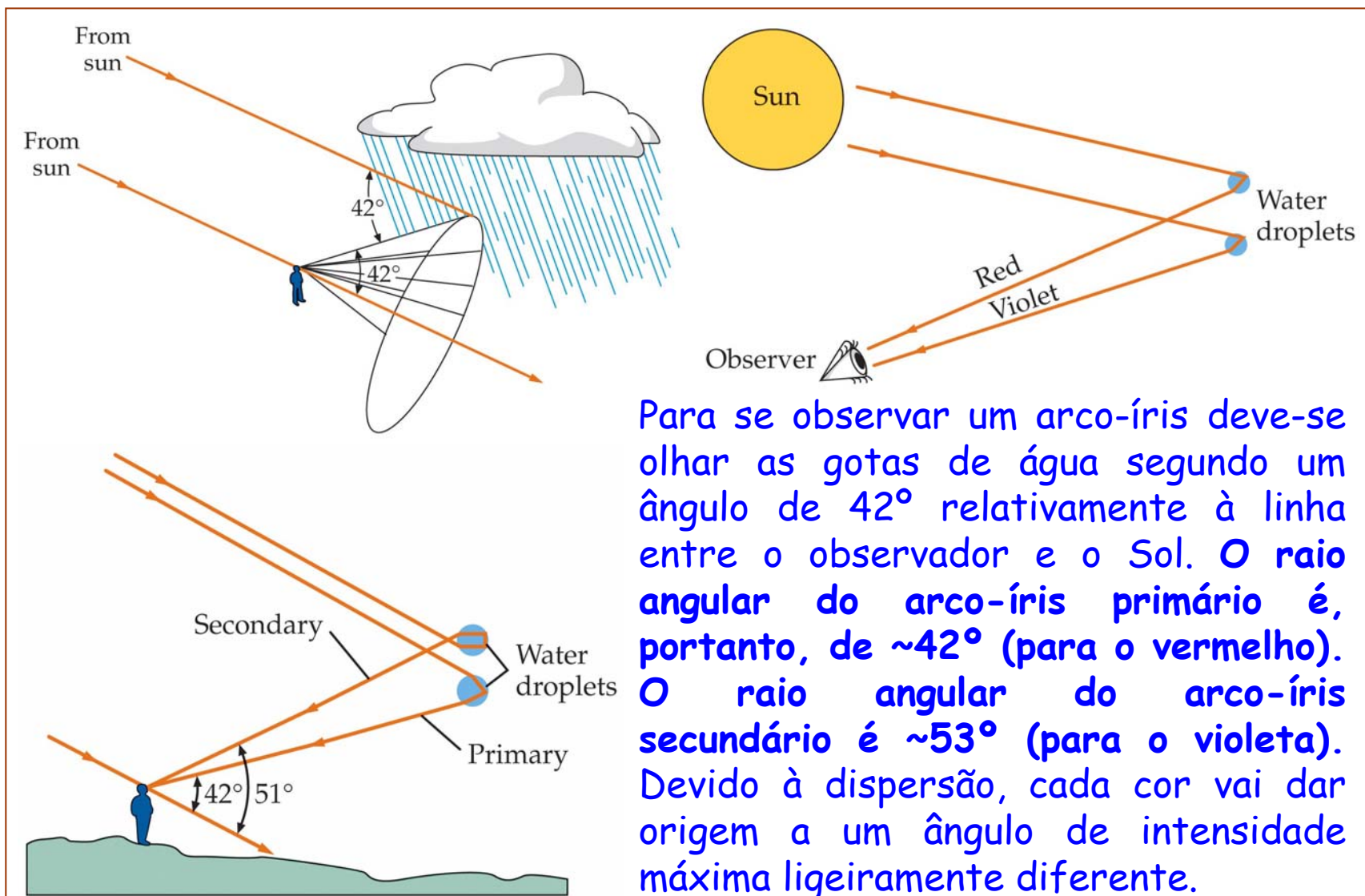


Arco-íris primário e secundário

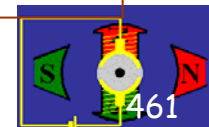




Arco-íris primário e secundário



Para se observar um arco-íris deve-se olhar as gotas de água segundo um ângulo de 42° relativamente à linha entre o observador e o Sol. O raio angular do arco-íris primário é, portanto, de $\sim 42^\circ$ (para o vermelho). O raio angular do arco-íris secundário é $\sim 53^\circ$ (para o violeta). Devido à dispersão, cada cor vai dar origem a um ângulo de intensidade máxima ligeiramente diferente.





Raio angular do arco-íris

Pode-se calcular o raio angular dos arco-íris a partir das leis da reflexão e da refração:

$$\sin \theta_2 = n_{\text{ar}} \sin \theta_1 / n_{\text{água}}$$

$$\phi_d + 2\beta = \pi$$

A partir do triângulo AOB tem-se: $2\theta_2 + \alpha = \pi$

De forma similar, a partir do triângulo AOP tem-se: $\theta_1 + \beta + \alpha = \pi$

Eliminando α e resolvendo em ordem a β , tem-se $\beta = \pi - \theta_1 - \alpha = \pi - \theta_1 - (\pi - 2\theta_2) = 2\theta_2 - \theta_1$

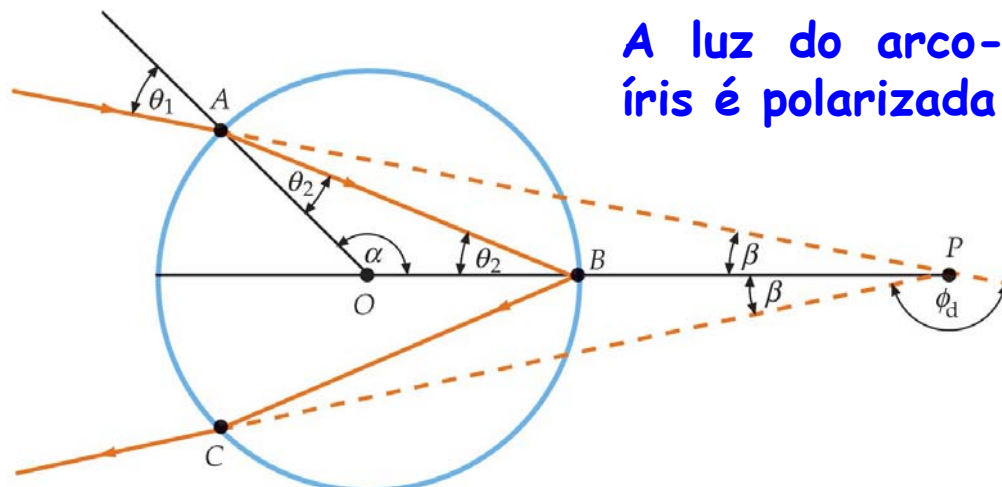
O ângulo de desvio ϕ_d , em termos do ângulo de incidência θ_1 é:

$$\phi_d = \pi - 2\beta = \pi - 4\theta_2 + 2\theta_1$$

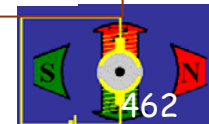
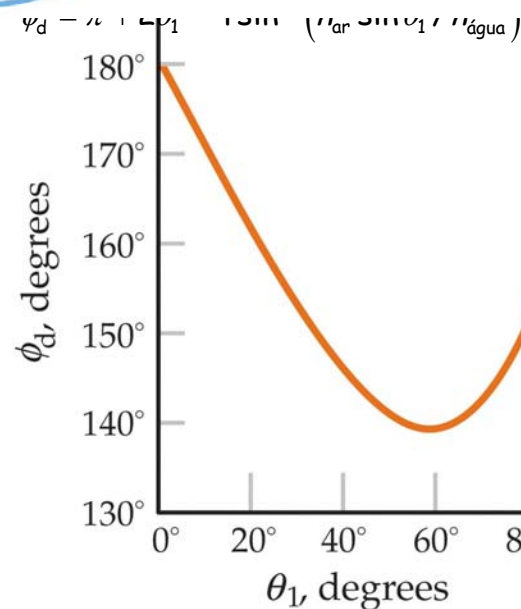
$$\phi_d = \pi + 2\theta_1 - 4 \sin^{-1} (n_{\text{ar}} \sin \theta_1 / n_{\text{água}})$$

O raio angular da intensidade máxima é:

$$2\beta_{\text{max}} \approx \pi - \phi_{d,\text{min}} = 180^\circ - 138^\circ = 42^\circ$$

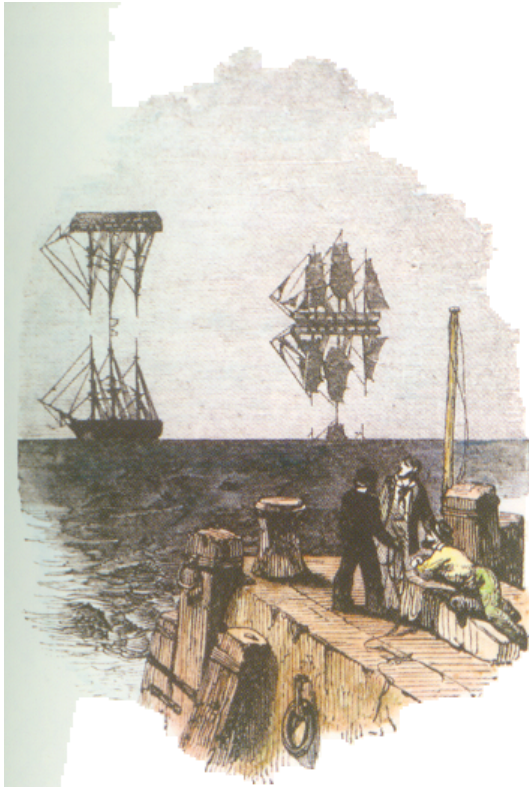


A luz do arco-íris é polarizada



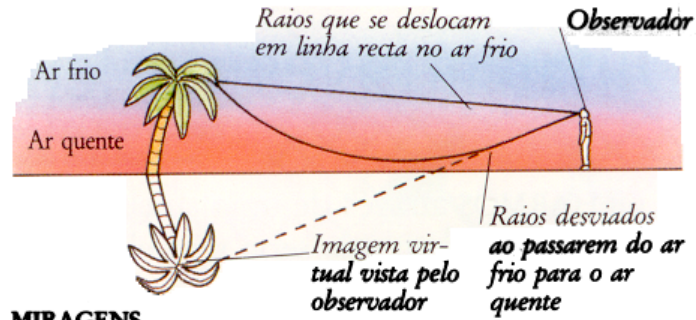


Miragens e aparições



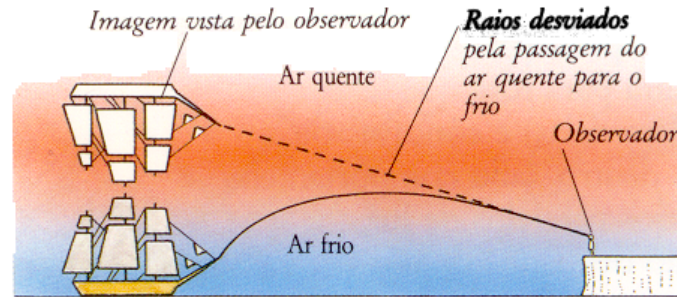
REFRACÇÃO NO AR

Por vezes os raios de luz podem desviar-se sem passarem de uma para outra substância. Esse fenómeno acontece vulgarmente no ar quando a luz viaja através de camadas de ar que estão a diferentes temperaturas. O ar frio é mais denso e pesado do que o ar quente e desse modo as camadas de ar de diferentes temperaturas comportam-se como se fossem substâncias diferentes. Os resultados podem ser espectaculares, como esta gravura antiga mostra.



MIRAGENS

Quando uma camada de ar quente perto do solo fica retida por uma camada superior de ar mais frio ocorre a chamada «miragem». A luz desvia-se, aproximando-se da linha horizontal de visão e depois sobe devido à reflexão interna total (pág. 54). A miragem é uma imagem virtual invertida (pág. 12).



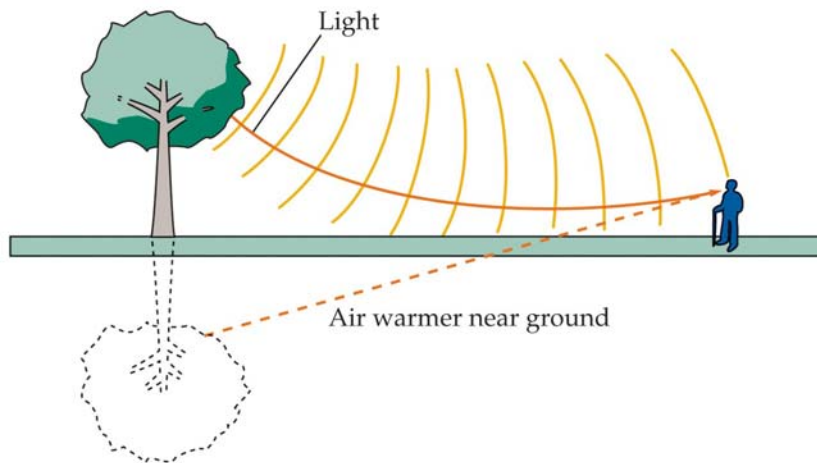
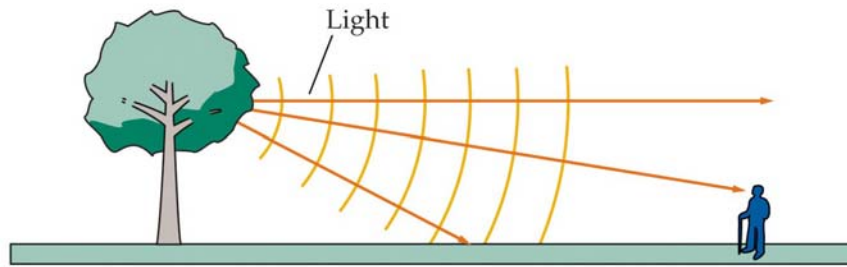
APARIÇÃO

Nesta forma de miragem (miragem superior), o ar quente está sobre o ar frio. Os raios de luz ao viajarem do ar frio para o ar quente são desviados, aproximando-se da linha horizontal de visão e eventualmente reflectidos para baixo. Daí resulta o objecto aparecer indistintamente acima da sua posição real.

A luz da vela é focada ao atravessar a esfera



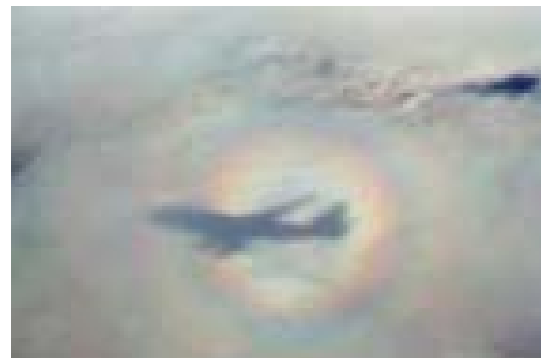
Miragens



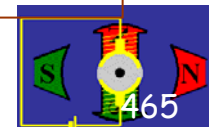


Outros fenómenos ópticos na atmosfera

Os efeitos ópticos da dispersão e da difracção são os causadores de muitos fenómenos ópticos especulares. Além das *Moscas Voadoras* produzidas pela difracção da luz em fiapos ou fragmentos de pó diante de nosso olho, existem outros fenómenos, como os *Halos* e as *Glórias*, que são também produto da difracção da luz, desta vez por gotículas de água e cristais de gelo. Os fiapos, a água e os cristais fazem com que as ondas de luz formem um padrão de difracção.



<http://www.atoptics.co.uk/>

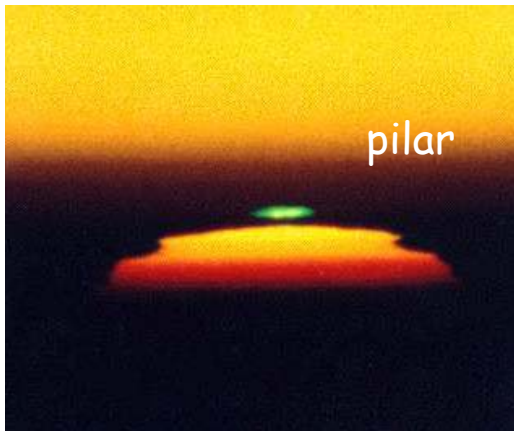




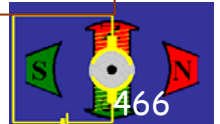
Outros fenómenos ópticos na atmosfera (2)



http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Atmospheric_optical_phenomena



<http://www.atoptics.co.uk/halo/pilpic0.htm>

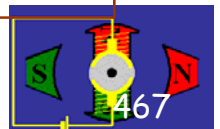




-

Sistemas ópticos de comunicação baseados em fibras ópticas e lasers

(não faz parte do programa)

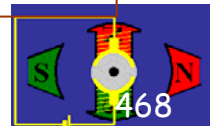
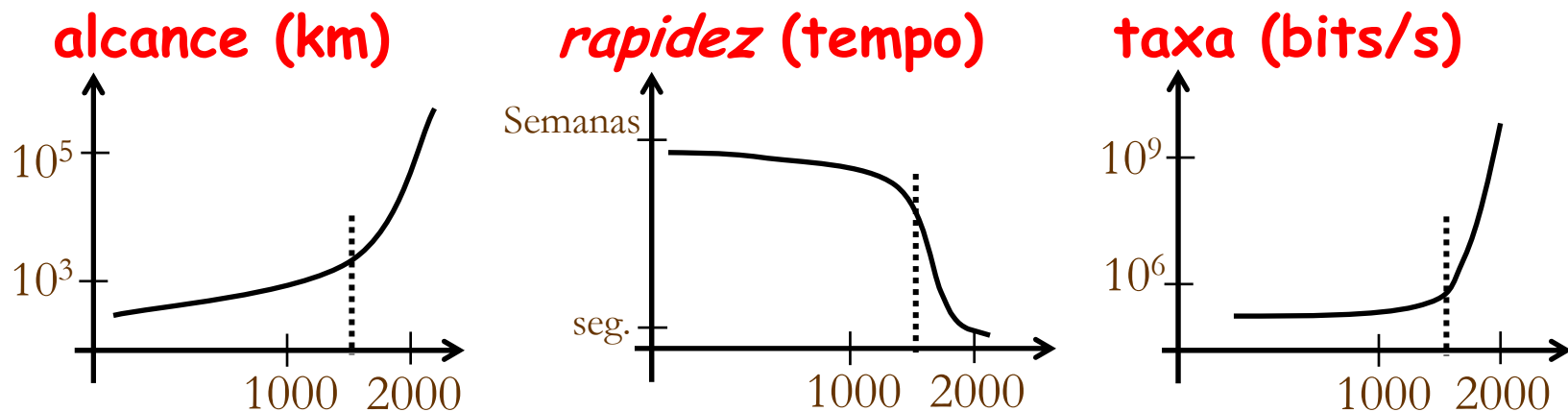




Parâmetros que caracterizam um sistema de comunicação

Até às descobertas do electromagnetismo, no século XIX, os sistemas de comunicação eram 'pouco eficientes', mesmo após a invenção da imprensa, em 1440, que 'disponibilizou' grandes quantidades de informação.

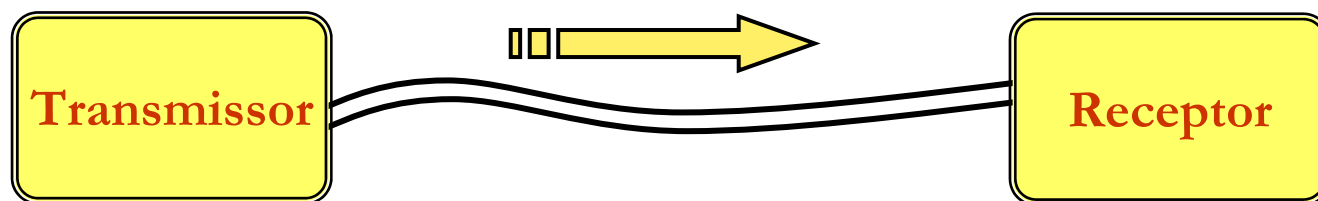
A telegrafia e o telefone eléctricos permitiram avanços significativos, intensificando as relações entre países e povos ... um 'passo' importante para globalização, mas só com o advento das comunicações sem fios (radiodifusão, satélite, etc.) e dos modernos sistema de comunicação baseados em sinais ópticos as comunicações se tornaram realmente globais, com a internet e www.



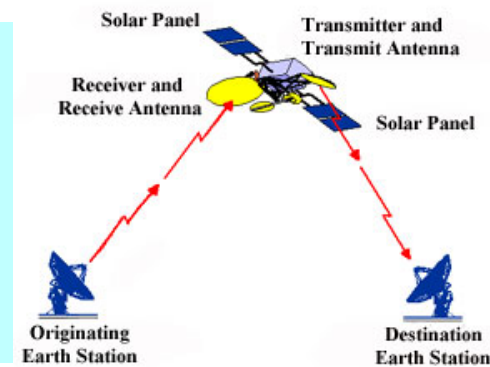
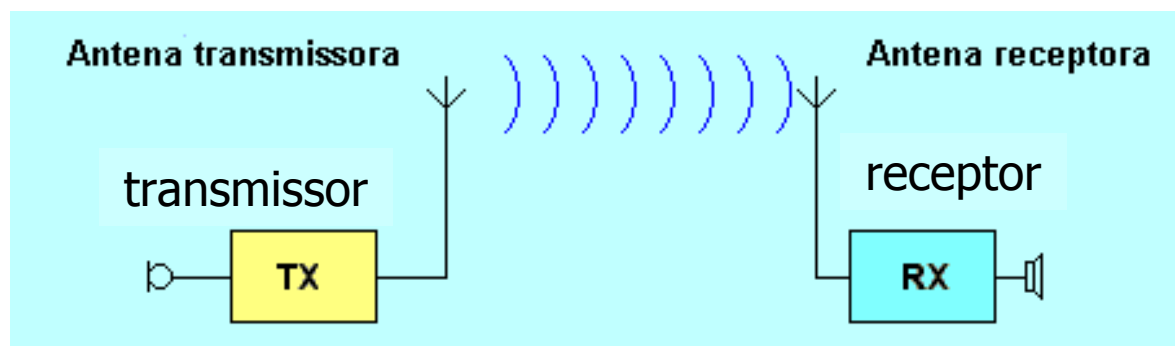


Propagação guiada e propagação livre

propagação guiada (fios, cabos, tubos, fibra óptica)

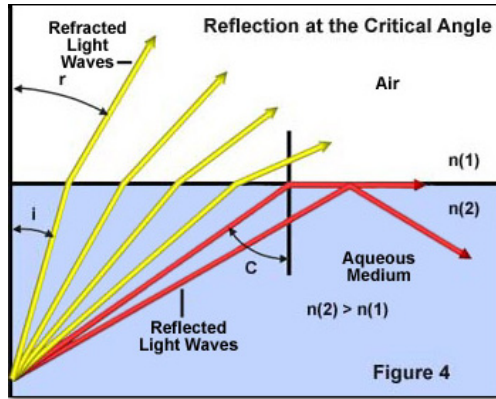


propagação livre (na atmosfera ou via satélite)

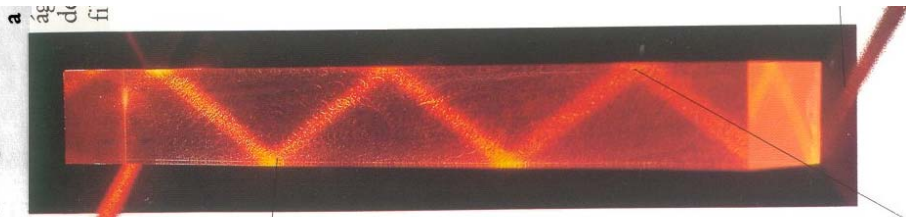




Reflexão interna total e fibras ópticas



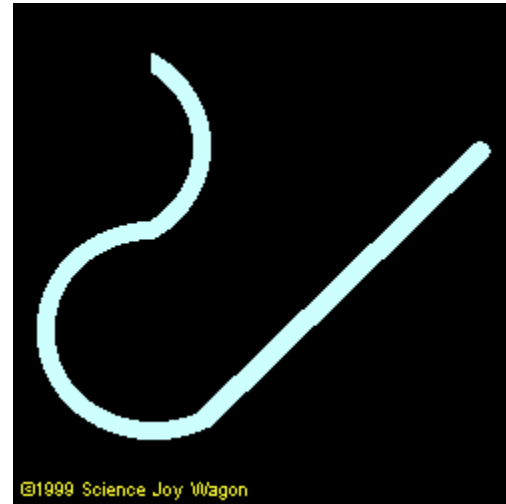
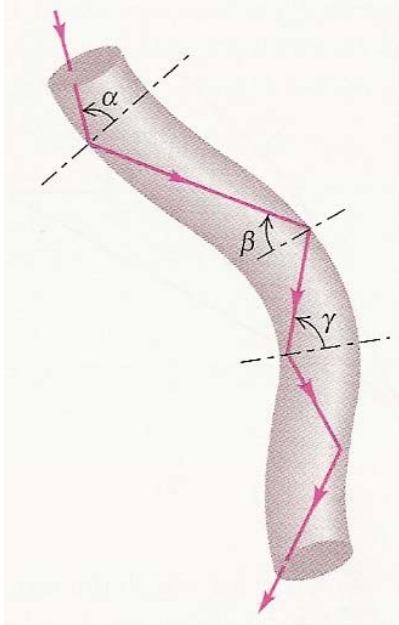
Se o mergulhador continuar a atingir a superfície de cada vez maior. Quando água, atinge-se o «ângulo



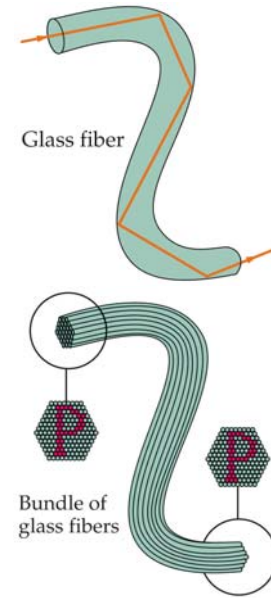
Ratio de luz
O prisma foca a luz
Os raios luminosos são refletidos internamente e incidem nos lados da barra segundo um ângulo pequeno

APANHAR A LUZ
Nesta figura vemos um raio luminoso ser refletido por uma barra de plástico transparente. A reflexão é «total» porque nenhuma ou pouca luz escapa da barra em cada reflexão. É «interna» porque todas as reflexões ocorrem no interior da barra. Esta espécie de reflexão só acontece em determinadas circunstâncias. A luz deve deslocar-se no interior de um meio com elevado índice de refração (pág. 14), tal como a água, o vidro ou o plástico. Esse meio deve estar rodeado por outro de índice de refração inferior, tal como o ar. A luz deve incidir na linha de separação dos dois meios, segundo um ângulo pequeno.

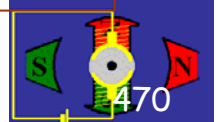
Nenhuma luz escapa quando o feixe luminoso é refletido



©1999 Science Joy Wagon



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

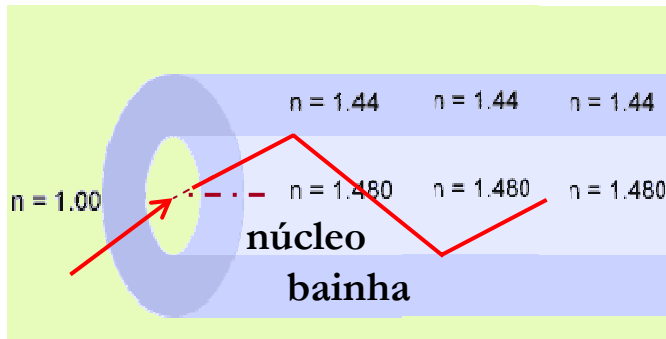
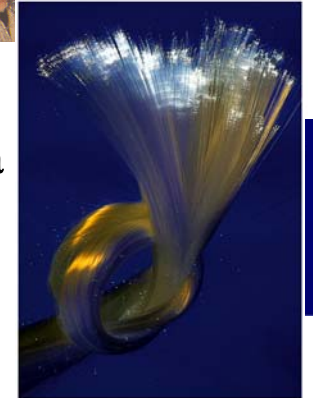
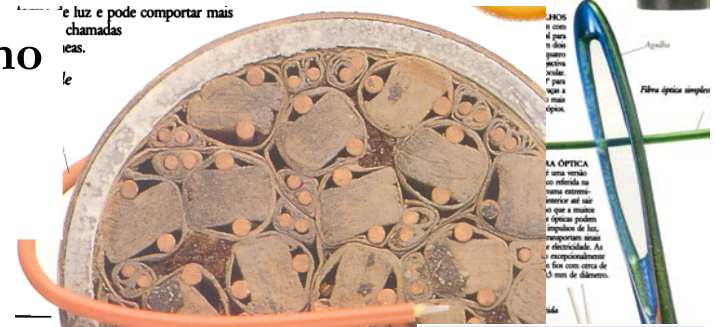
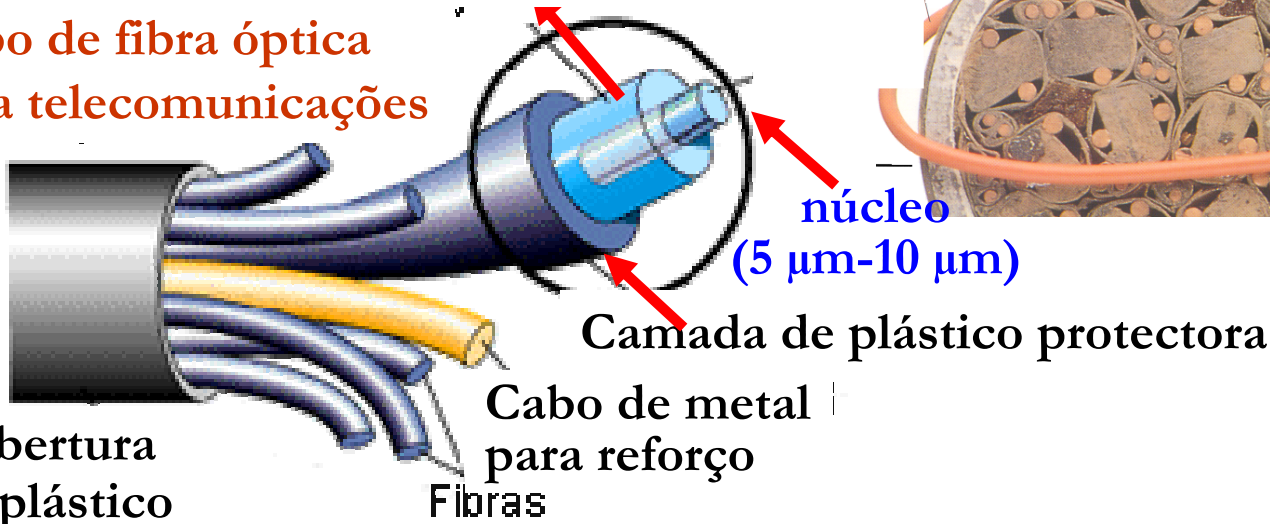




Fibra óptica monomodo

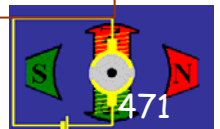
Camada que reflecte a luz que viaja no núcleo (bainha, ~125 μm)

Cabo de fibra óptica para telecomunicações



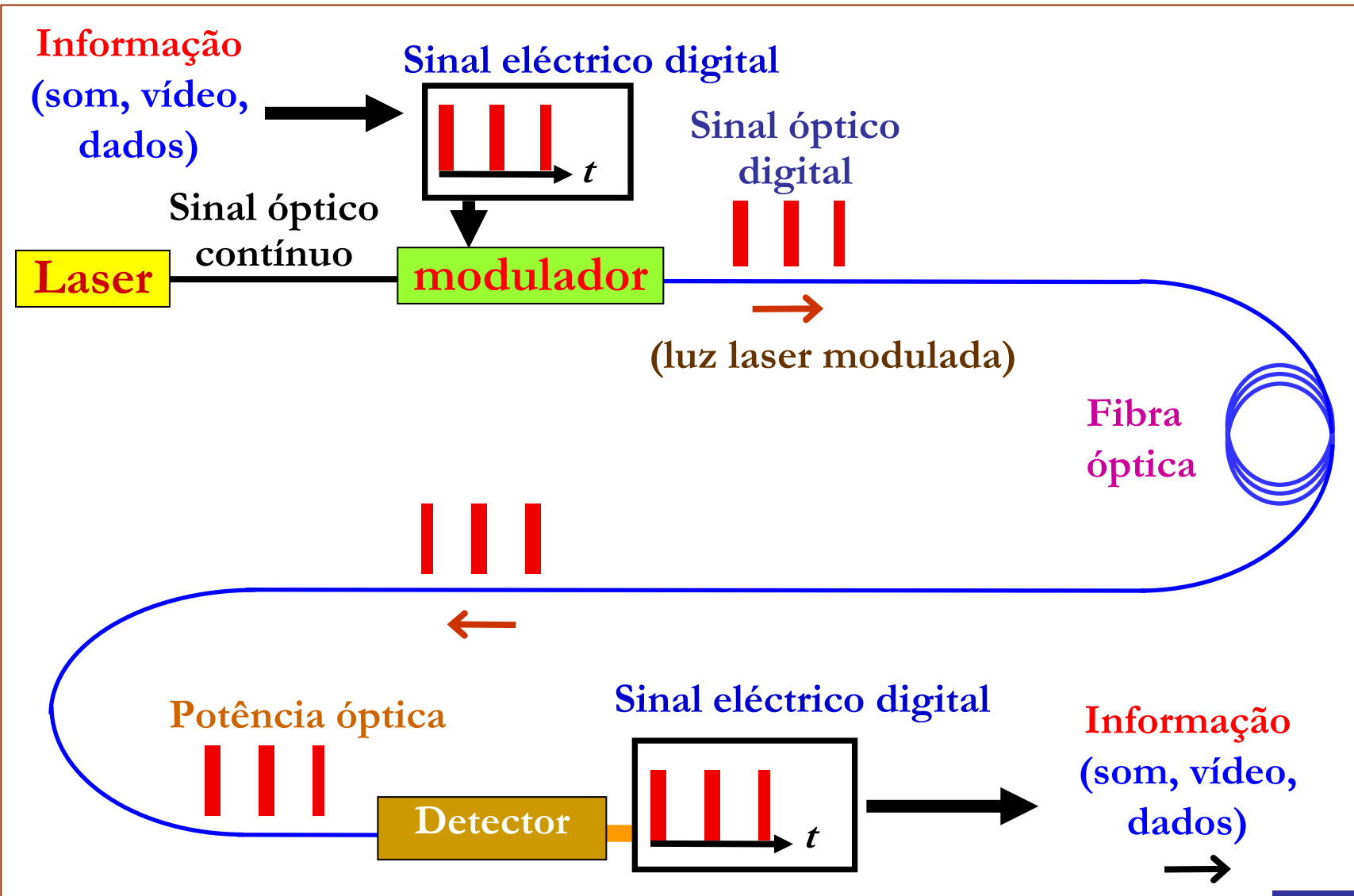
O índice de refração do núcleo é ligeiramente superior ao da bainha. As fibras podem ser monomodo ou multimodo. Uma fibra é multimodo quando o diâmetro efectivo do núcleo é superior ao comprimento de onda.

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



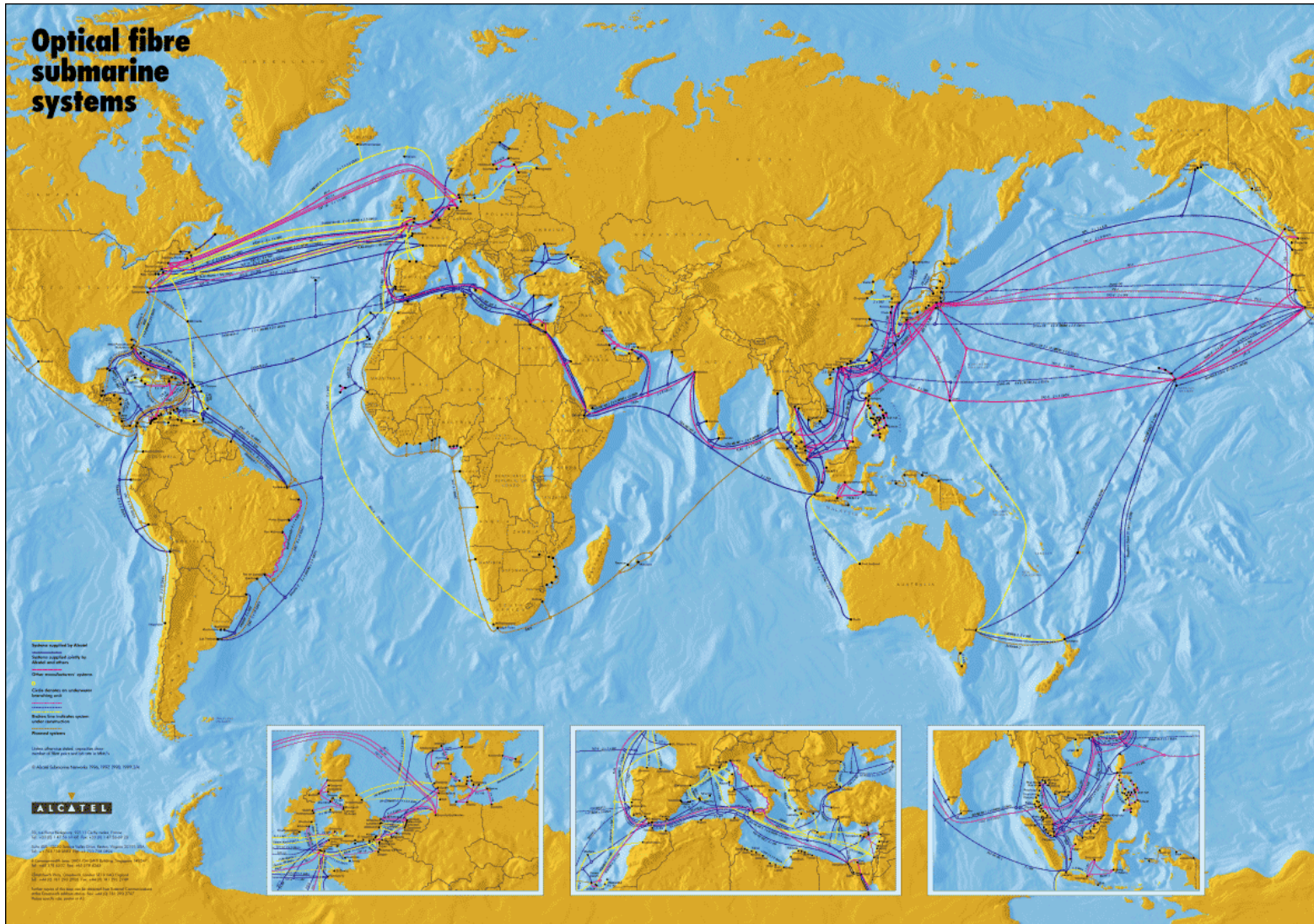


Sistema de comunicação por fibra óptica

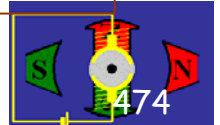
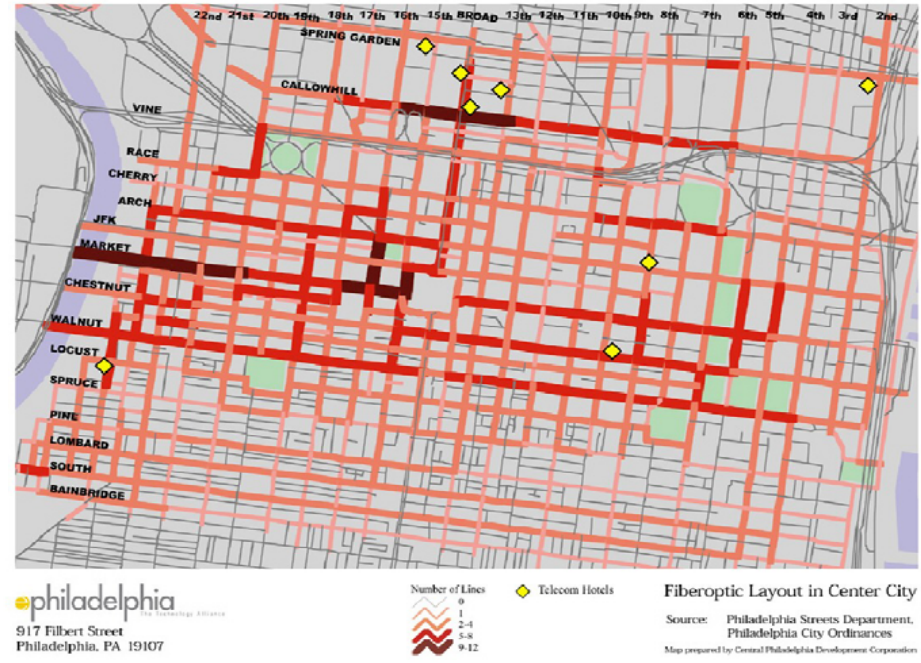
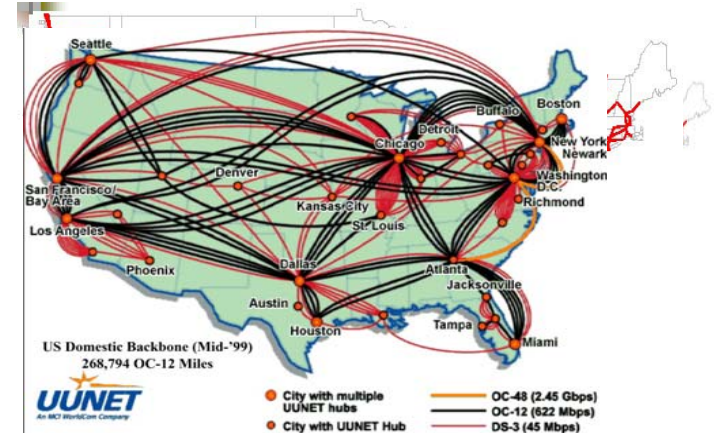
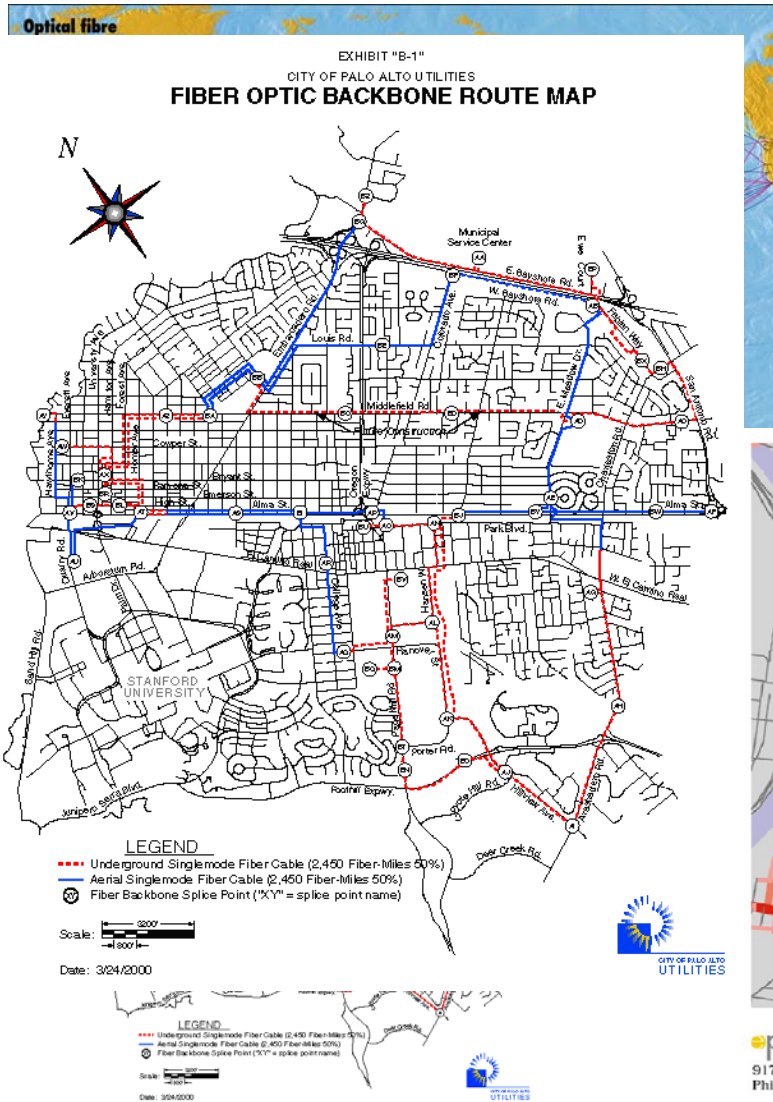




Redes de fibra óptica no mundo

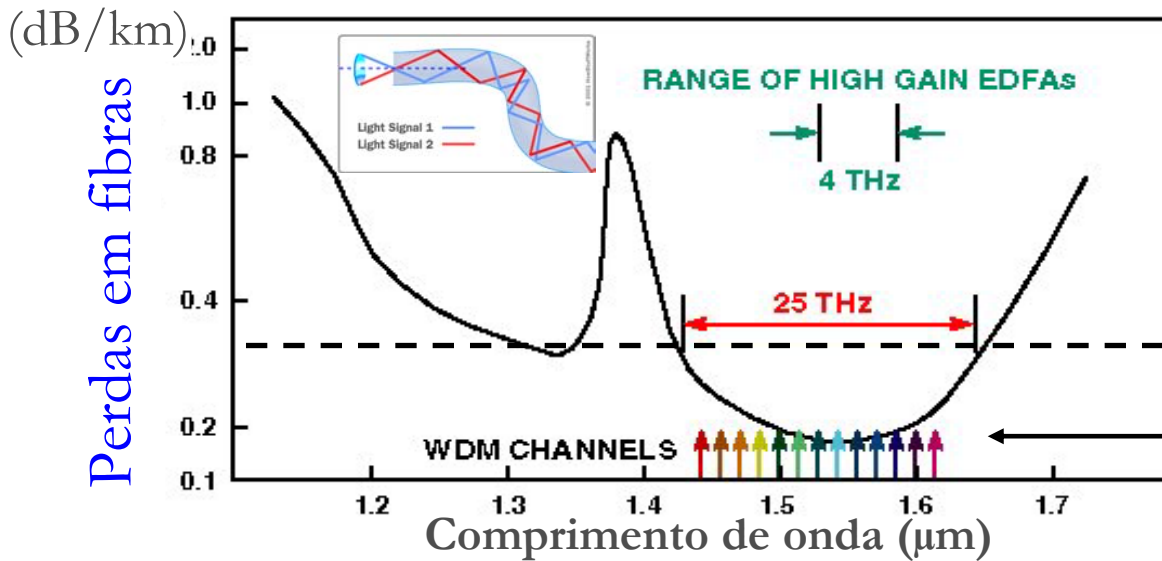


Redes de fibra óptica nos EUA





Vantagens das redes de fibra óptica



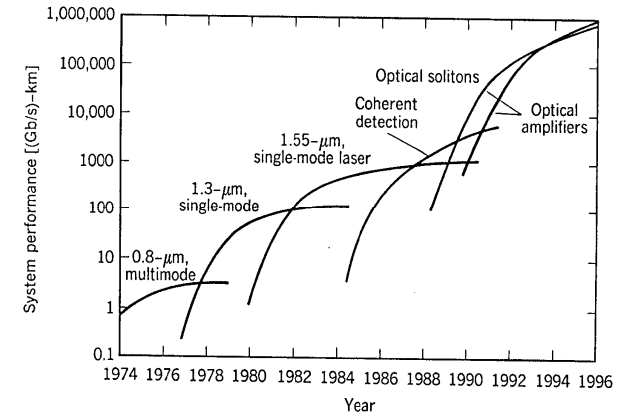
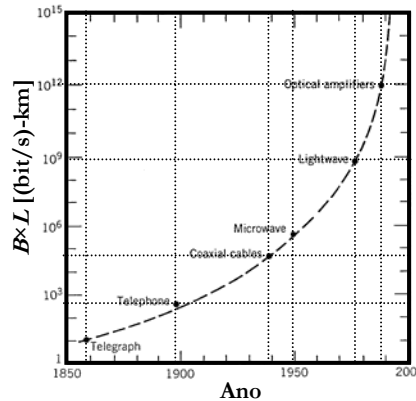
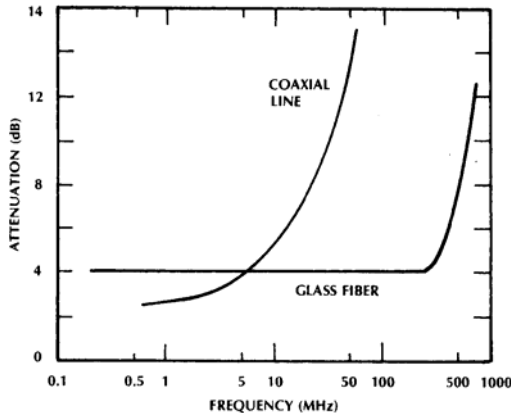
Perdas em fibras

1 THz = 10^3 GHz

25 THz / 50 GHz

(500 canais)

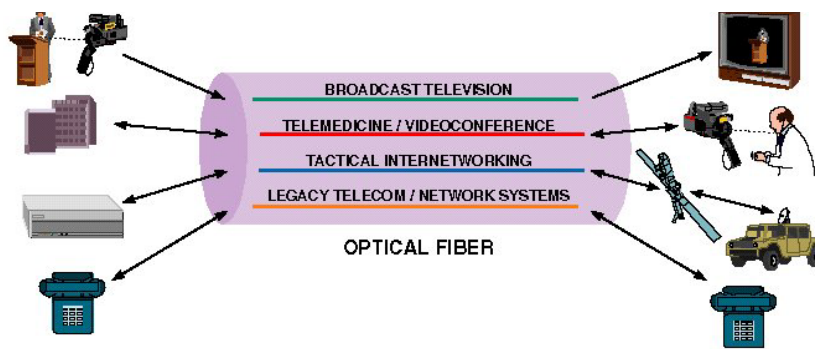
(13 canais representados)



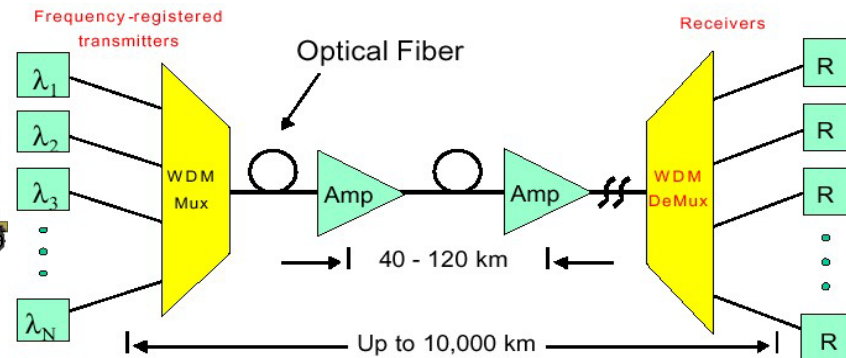
Bel é a unidade logarítmica usada em engenharia de telecomunicações, para comparar duas potências (modernamente usa-se mais o decibel, dB) (De A. G. Bell, antr., 1847-1922).



Multiplexagem de comprimento de onda



http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division_multiplexing



$\Delta\lambda = 25 - 100 \text{ GHz}$
(0.4 or 0.8 nm @ 1500 nm)

For use in EECS 290Q Only



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.



Óptica Geométrica

-

Formação de imagens

Imagem: conjunto de pontos (reais ou virtuais) onde vão convergir, depois de terem atravessado um sistema óptico, os raios luminosos saídos de diversos pontos de um corpo;

conversor de ~: (fís.) instrumento que transforma numa imagem visível uma imagem no infravermelho ou outra qualquer invisível;

~ **real:** (ópt.) imagem projectável, formada directamente pelos raios reflectidos num espelho ou refractados numa lente;

~ **retiniana:** (ópt.) imagem que se forma na retina por causa da convergência do cristalino;

~ **virtual:** (ópt.) a que não é projectável e é formada pelo prolongamento dos raios reflectidos num espelho ou refractados numa lente. (Do lat. imagîne-, «id.»)





Óptica geométrica: formação de imagens

Óptica: parte da física que se ocupa da luz e dos fenómenos da visão;

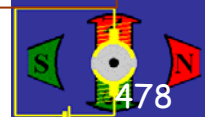
Óptica física: parte da óptica que toma em consideração a natureza ondulatória da luz (ondas electromagnéticas transversais);

Óptica geométrica: parte da óptica que estuda os fenómenos que se podem explicar sem considerar qualquer hipótese sobre a natureza da luz;

Banco de óptica: (fís.) instrumento usado em laboratórios para estudo de lentes, espelhos e comparação de intensidades luminosas.

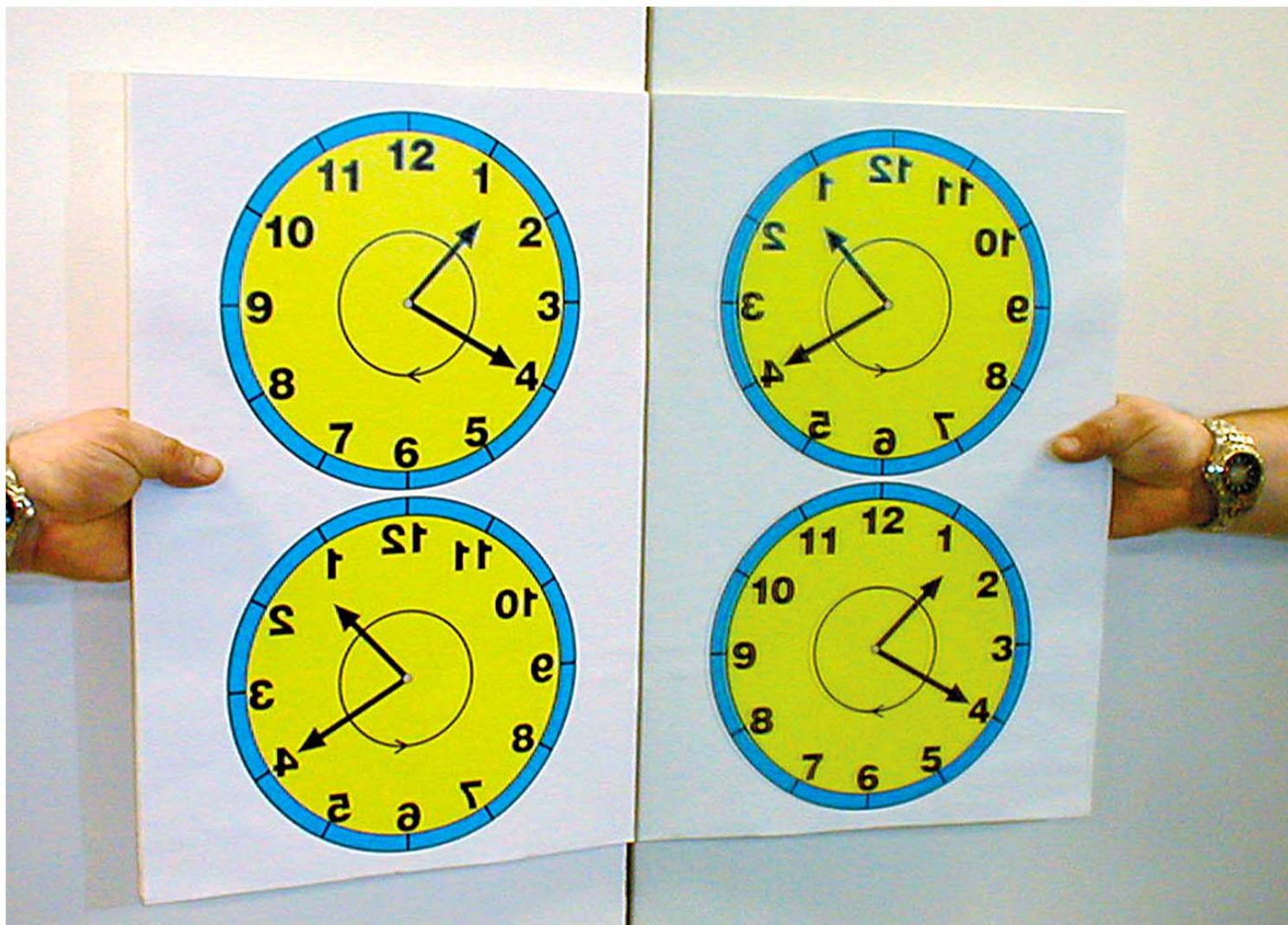
Espelho [e]: superfície altamente polida para produzir reflexão regular dos raios luminosos e das imagens dos objectos; lâmina de vidro ou cristal, prateada, geralmente na parte posterior, utilizada como reflector da luz ou para observação de imagens; (Do lat. specûlu-, «id.»)

Lente: (fís.) meio transparente limitado por duas faces curvas ou por uma plana e outra curva, destinado à modificação da direcção dos feixes luminosos por refacção, com eventual formação de imagens; ~ **acromática:** lente que dá imagens sem irisação, quando se emprega luz branca; ~ **anamórfica:** lente fotográfica com uma das faces cilíndrica, para produzir imagens deformadas; ~ **bicôncava:** lente divergente limitada por duas superfícies esféricas côncavas; ~ **biconvexa:** lente convergente limitada por duas superfícies esféricas convexas; ~ **de contacto:** lente correctora de anomalia visual que se adapta à córnea por simples aderência; ~ **electrónica:** dispositivo eléctrico ou magnético concebido para focalizar um feixe de electrões, muito usado em microscopia electrónica. (Do lat. lente-, «lentilha»)





Reflexão num espelho





Espelhos planos

Espelho [e]: s. m. superfície altamente polida para produzir reflexão regular dos raios luminosos e das imagens dos objectos; lâmina de vidro ou cristal, prateada, geralmente na parte posterior, utilizada como reflector da luz ou para observação de imagens; (Do lat. specûlu-, «id.»)

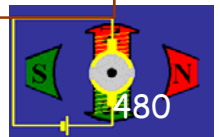
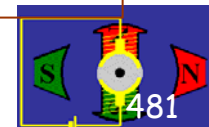
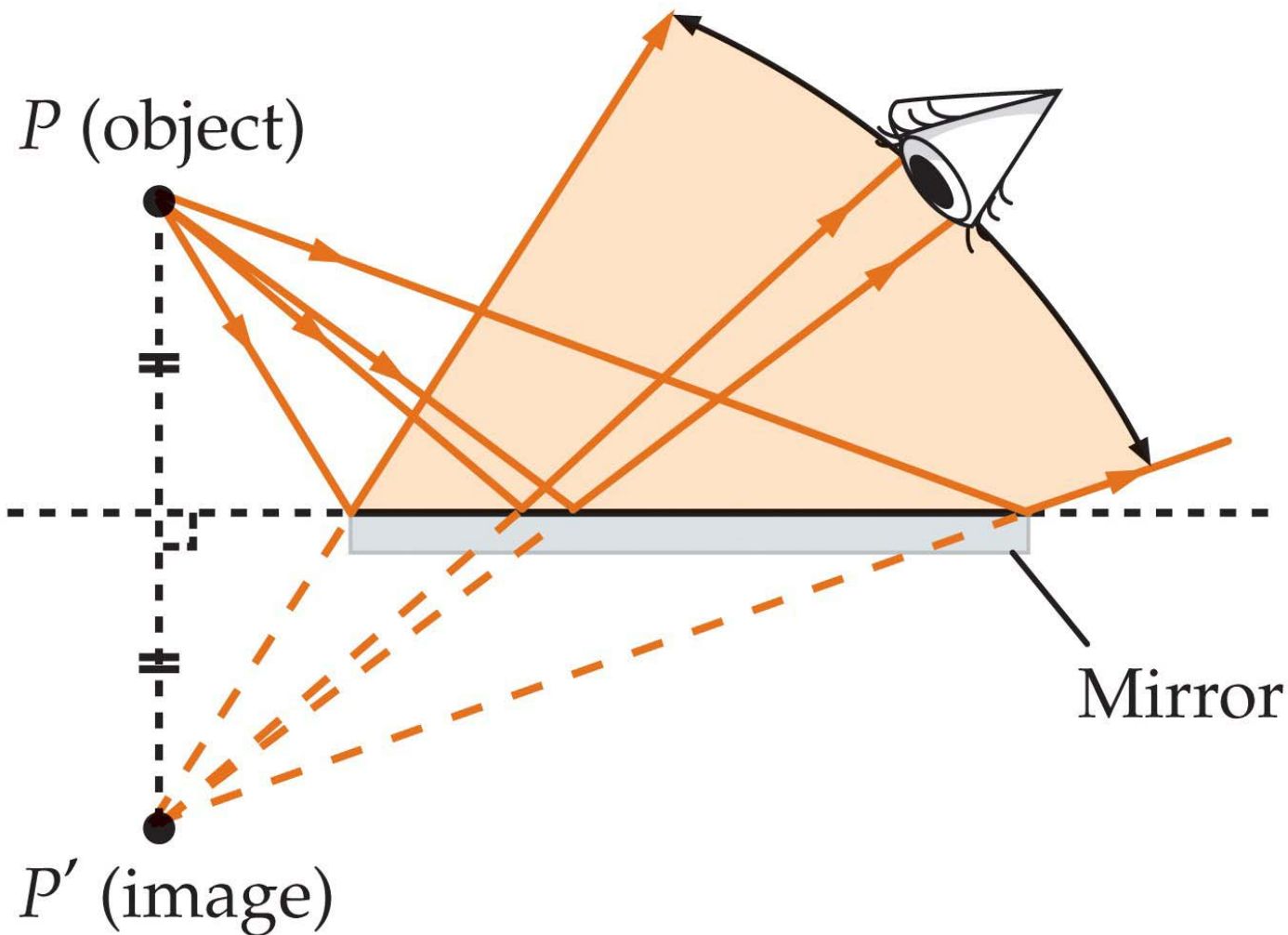




Imagem formada por um espelho plano





Inversão da profundidade num espelho plano

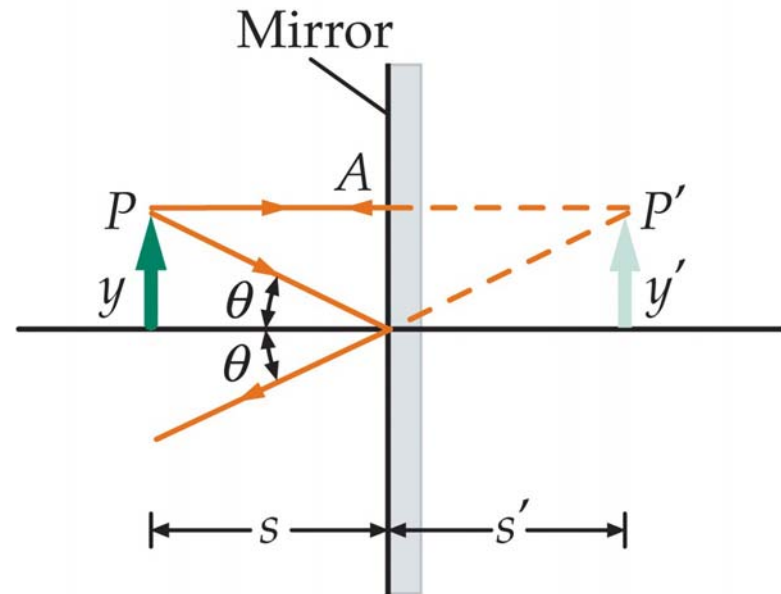
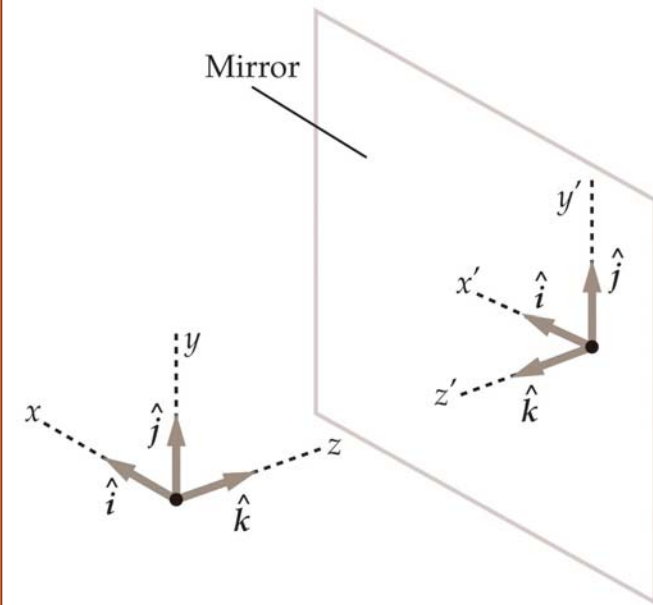
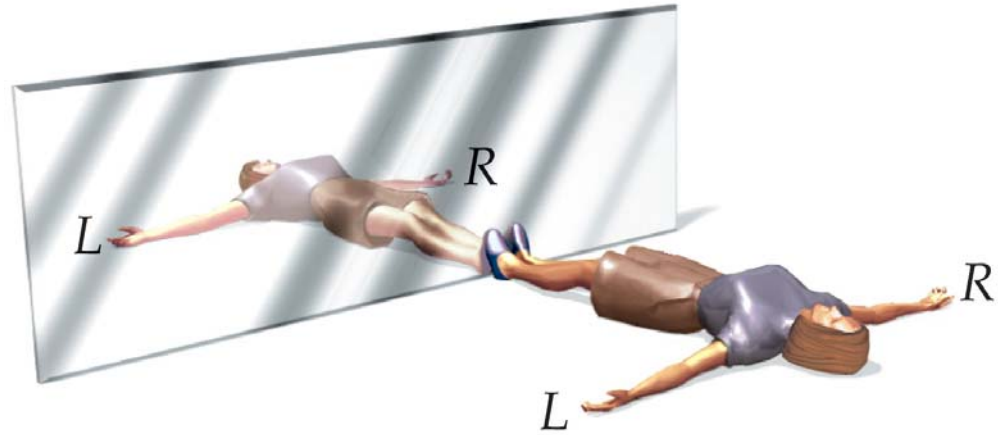




Diagrama de raios num espelho plano

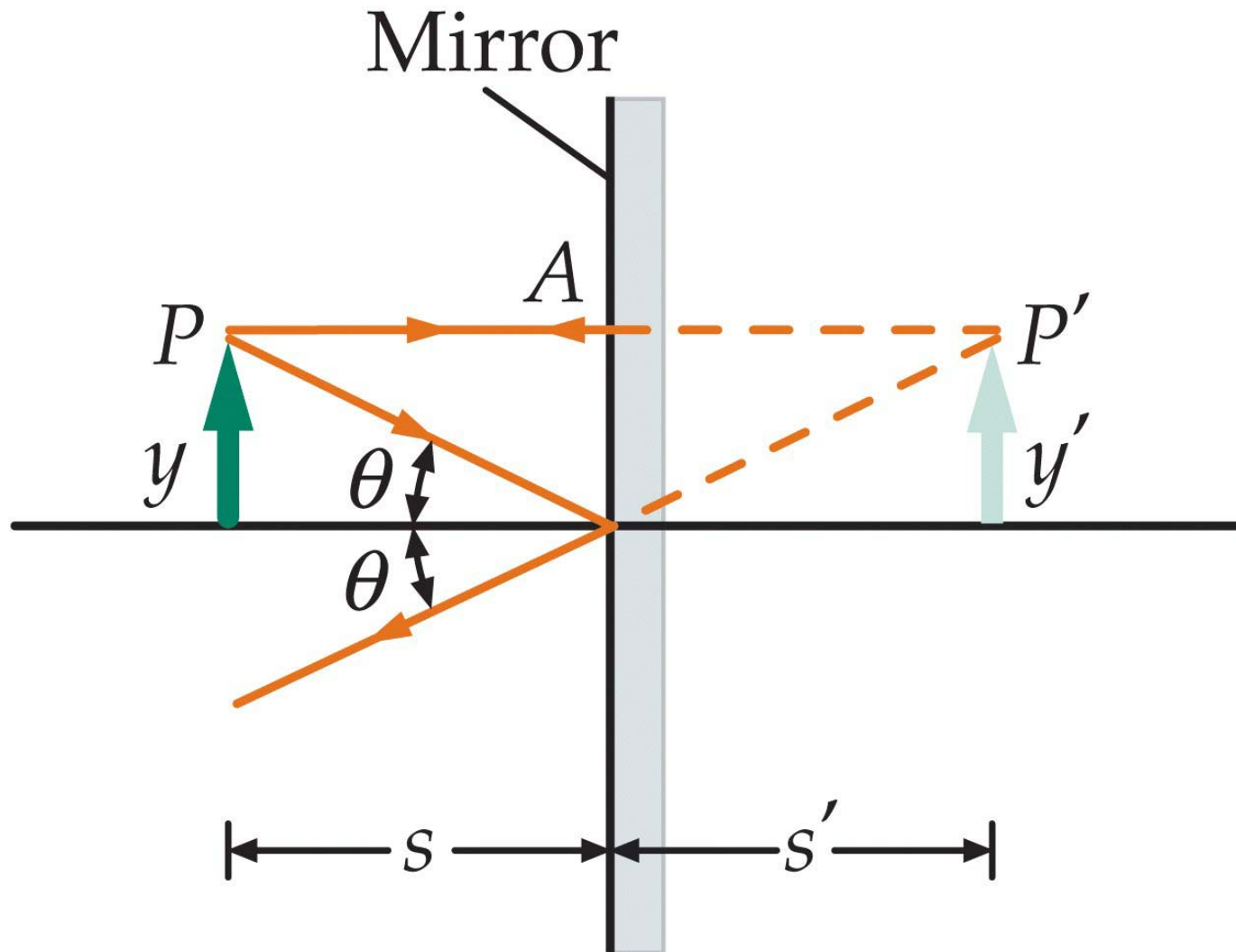




Imagem formada por dois espelhos planos

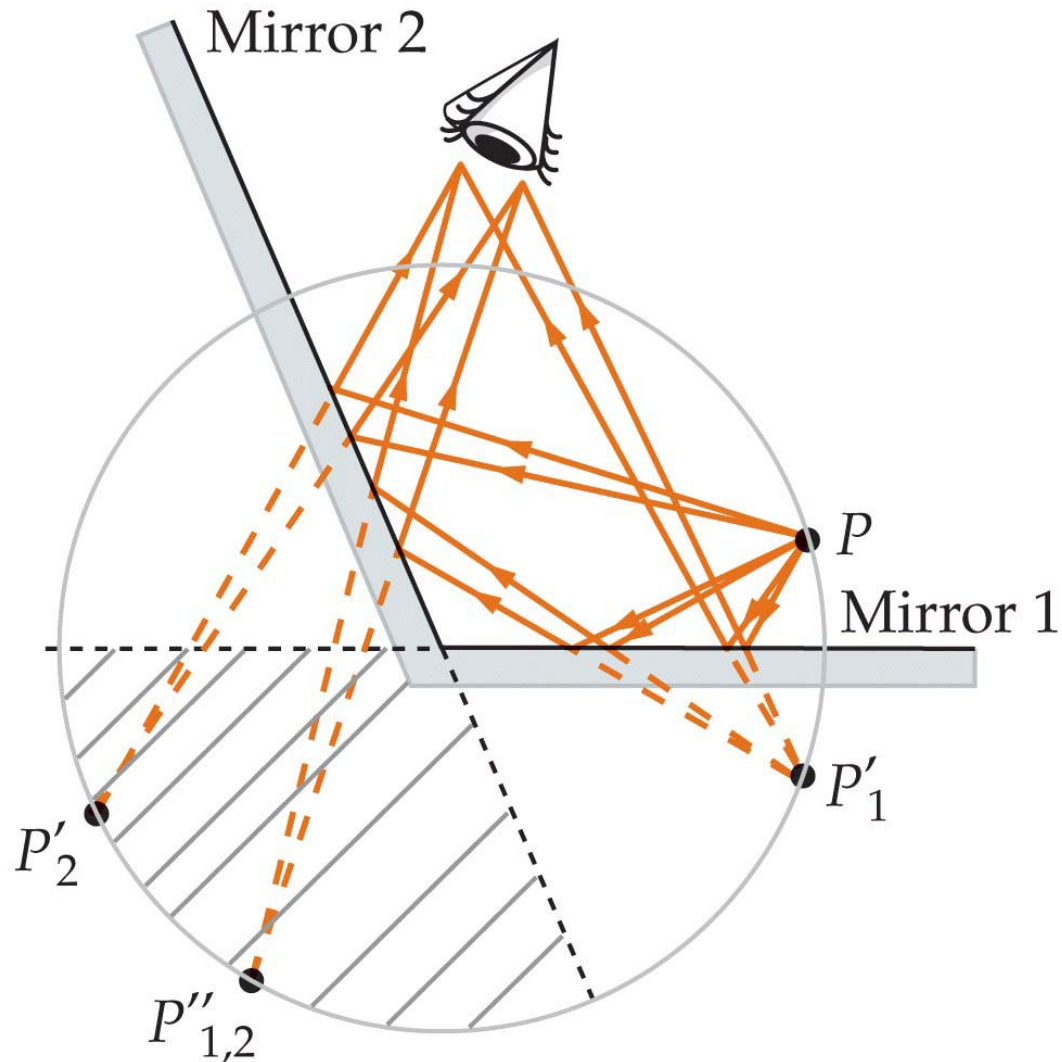
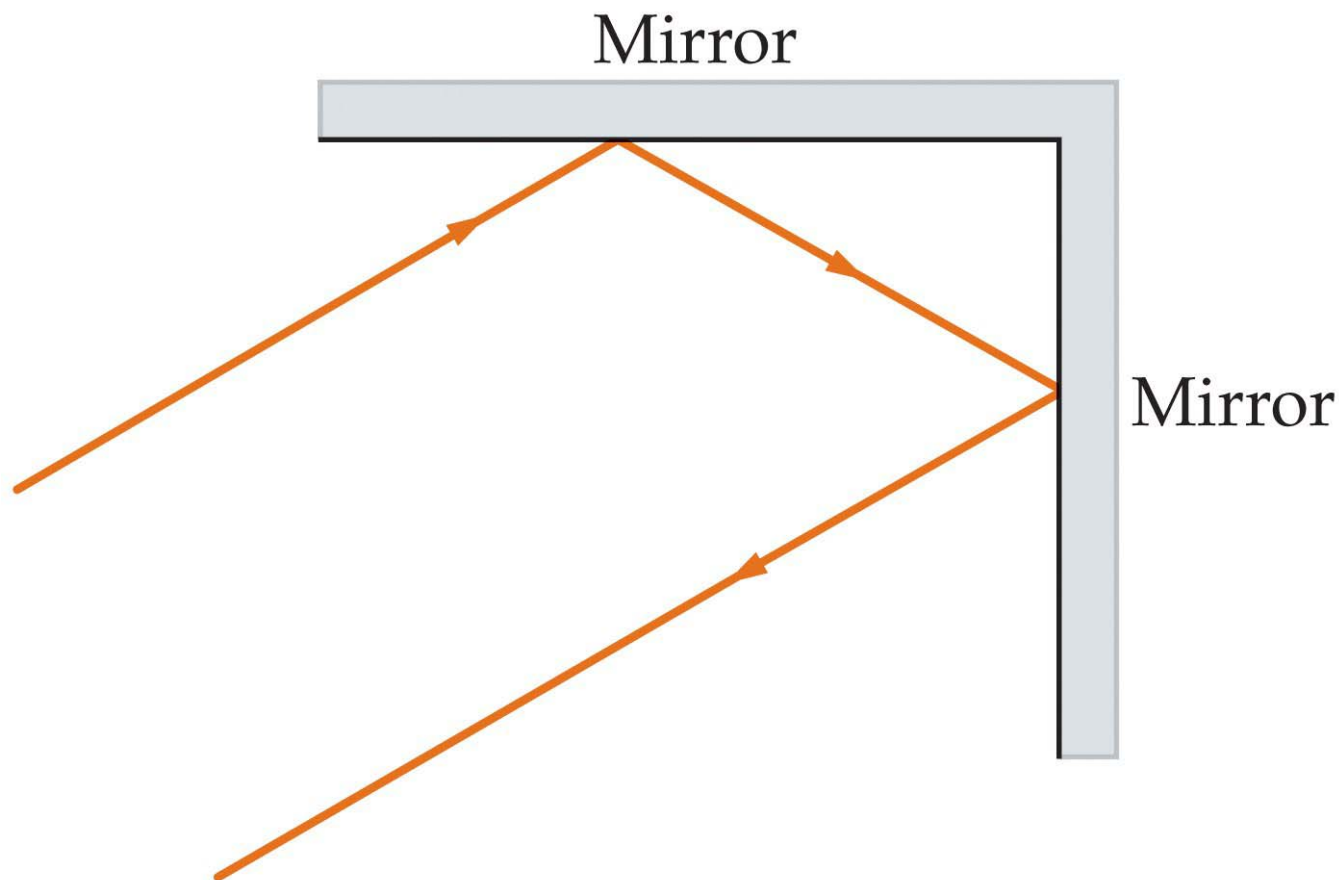




Imagem formada por dois espelhos planos



As missões Apolo 11 em 1969 deixaram um grupo de reflectores chamados canto reflector cúbico (três espelhos colocados perpendicularmente entre si, como os lados de um canto interno de uma caixa).





Espelhos esféricos

Paraxial [ks]: adj. 2 gén. (fís.) diz-se do raio próximo do eixo principal de um sistema óptico e cuja inclinação sobre o eixo é pequena, de modo que se possa substituir o seno do ângulo de inclinação pelo próprio ângulo de inclinação. (De para- + axial)

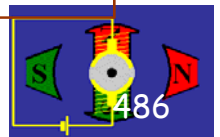
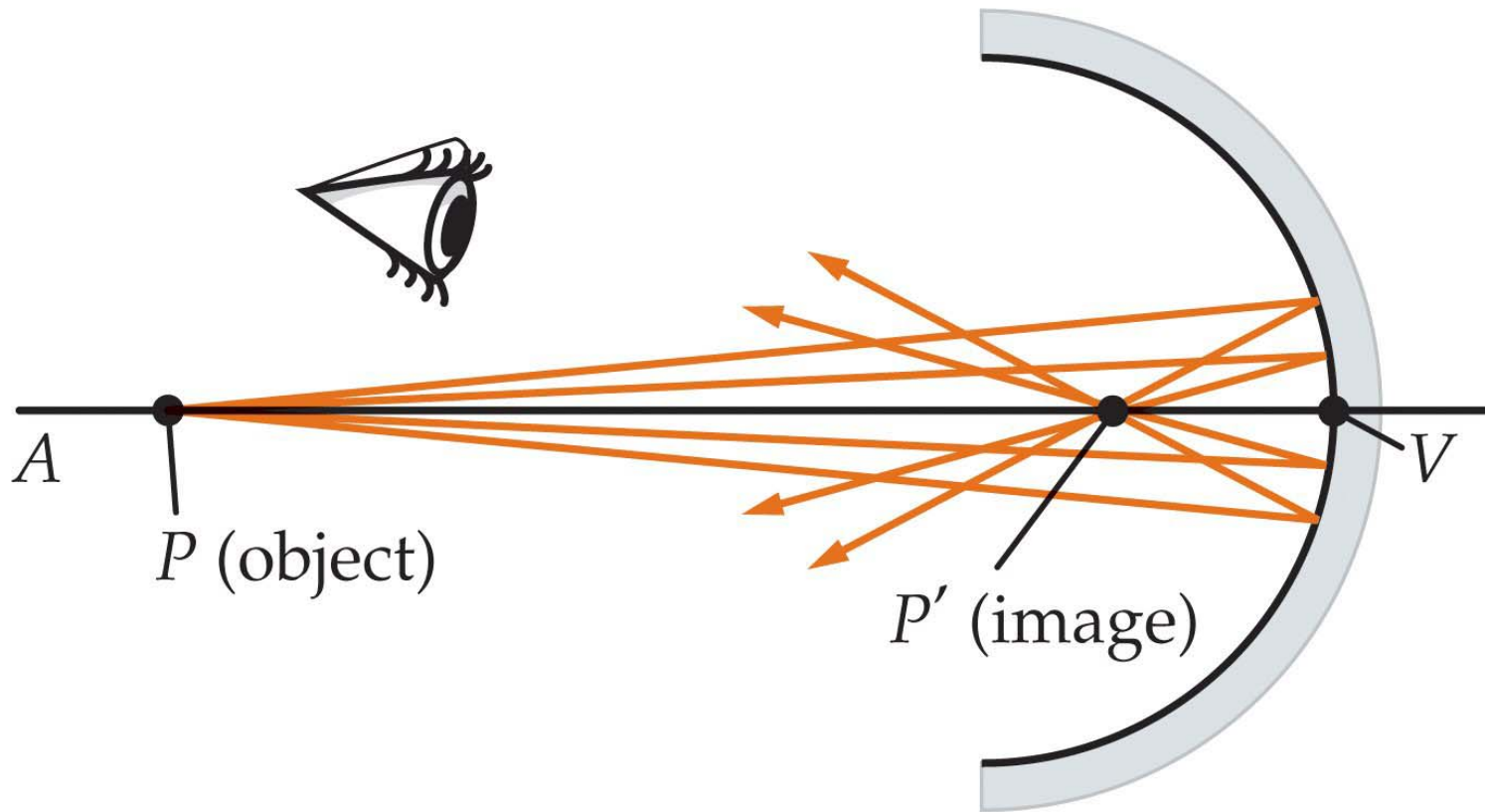




Imagem formada por espelhos esférico côncavo

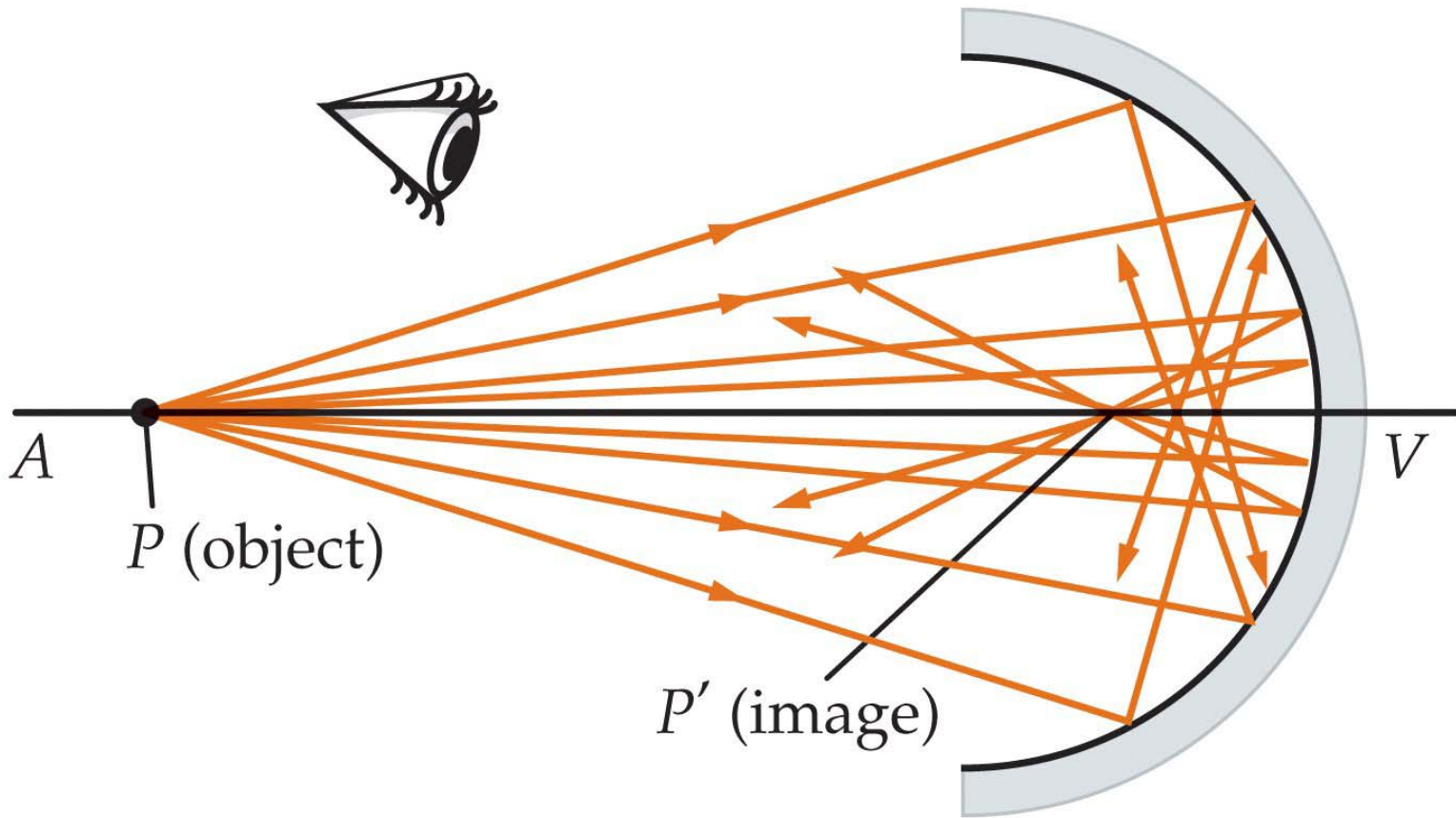


A imagem do objecto P é nítida se os raios atingirem o espelho próximo do eixo e se os raios forem quase paralelos ao eixo.





Imagem formada por espelhos esférico côncavo (2)

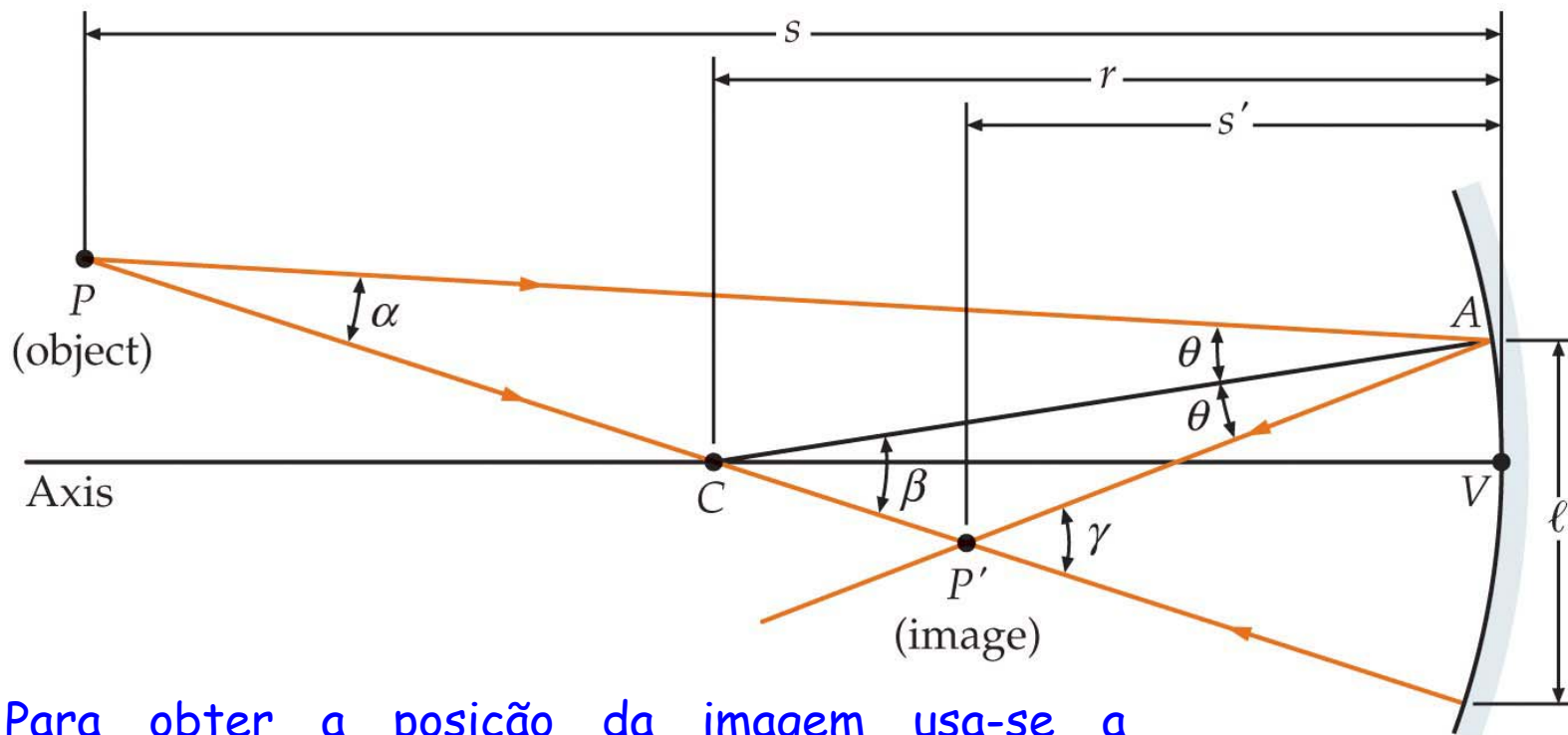


Os raios não-paraxiais não são reflectidos no ponto imagem P' formado pelos raios paraxiais. Os raios não-paraxiais ofuscam a imagem, tornando-a menos nítida: **aberração esférica**.





Posição da imagem relativamente ao espelho



Para obter a posição da imagem usa-se a aproximação de pequenos ângulos: $\alpha \sim l/s$; $\beta \sim l/r$;

$\gamma \sim l/s'$

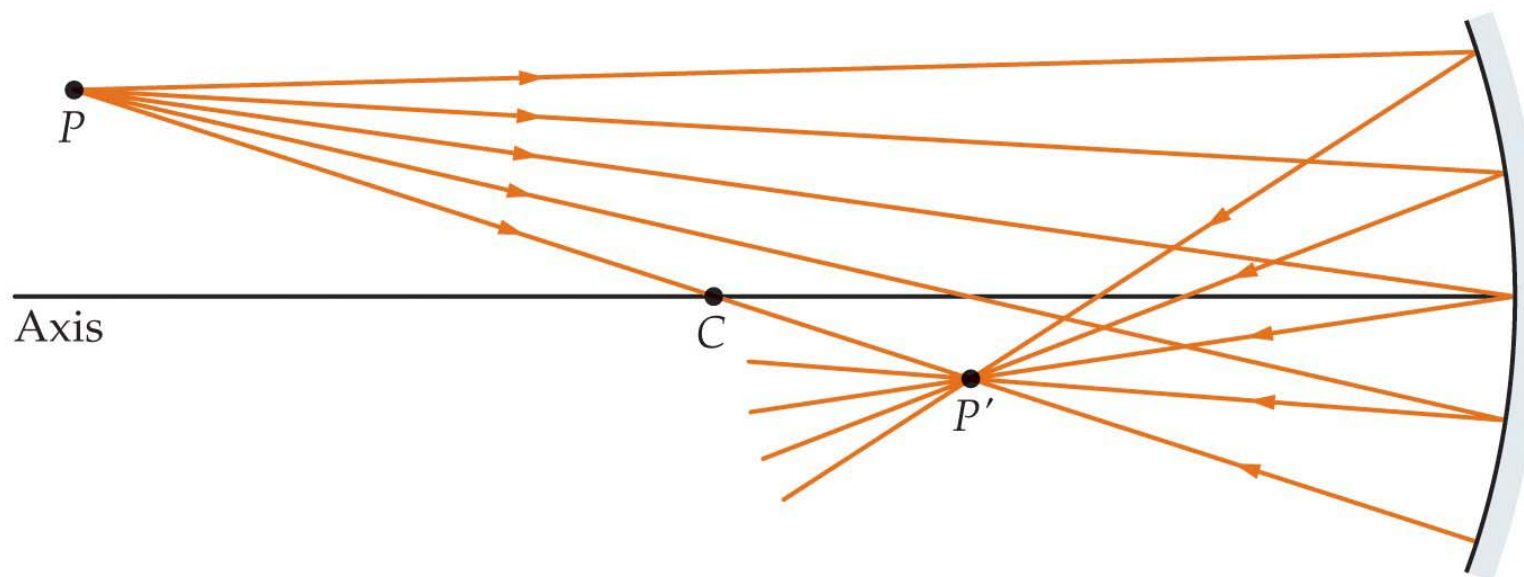
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}$$

Todos os raios paraxiais partindo do ponto P passam através do ponto imagem P' , após se reflectirem no espelho.

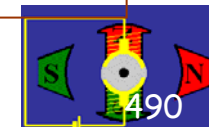




Posição da imagem relativamente ao espelho (2)

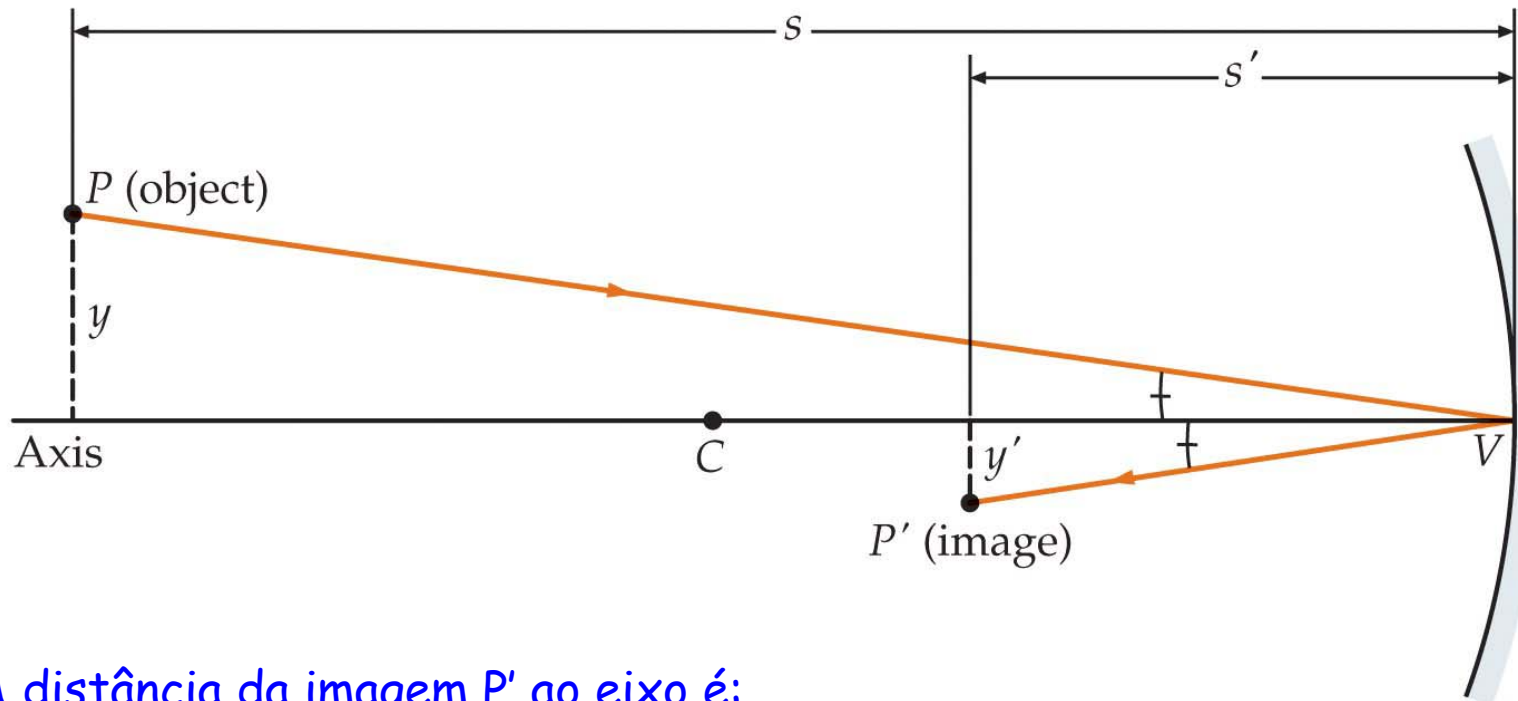


Todos os raios paraxiais partindo do ponto P passam através do ponto imagem P' , após se reflectirem no espelho.





Posição da imagem relativamente ao eixo



A distância da imagem P' ao eixo é:

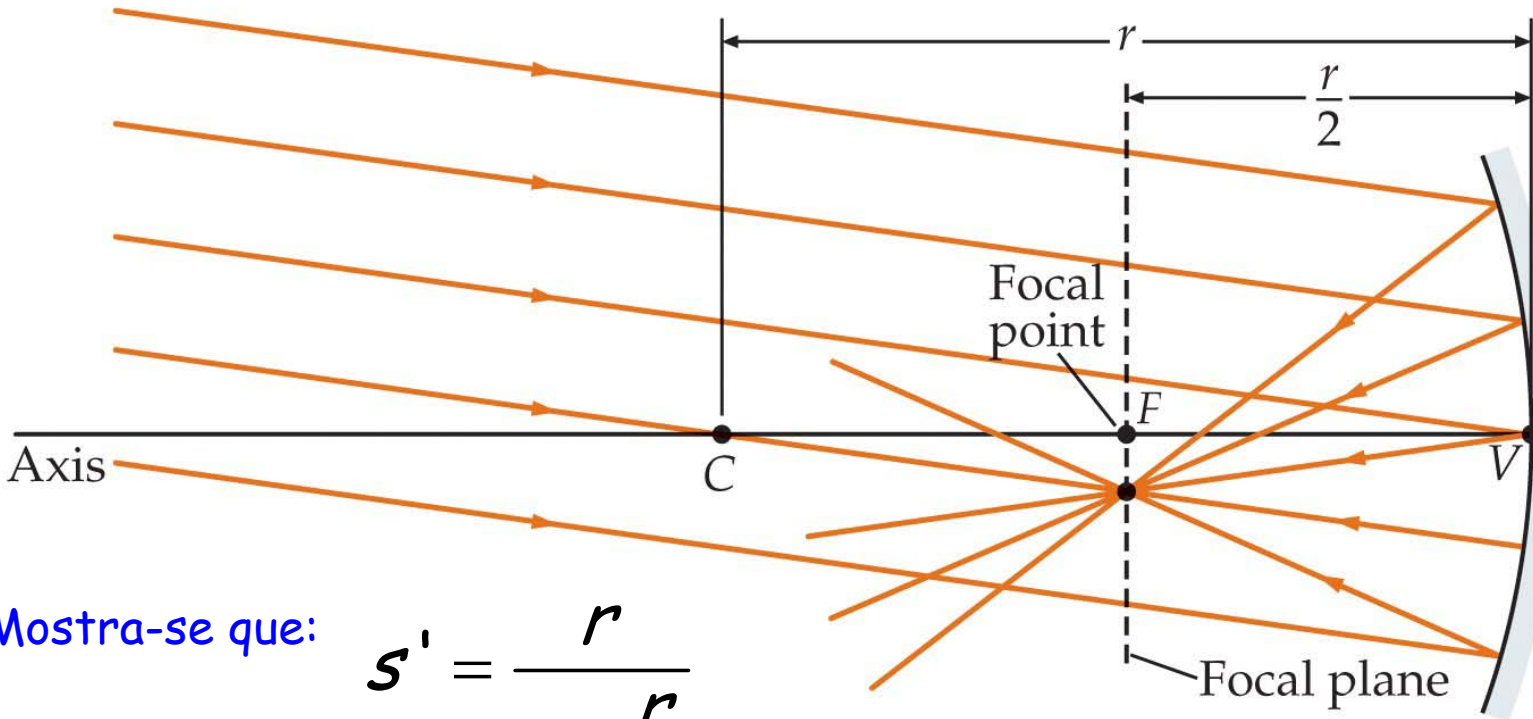
$$\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} = -\frac{r/2}{s - r/2}$$

O sinal negativo tem em consideração facto de P e P' estarem em lados opostos relativamente ao eixo.





Distância focal f do espelho



Mostra-se que:

$$s' = \frac{r}{2 - \frac{r}{s}}$$

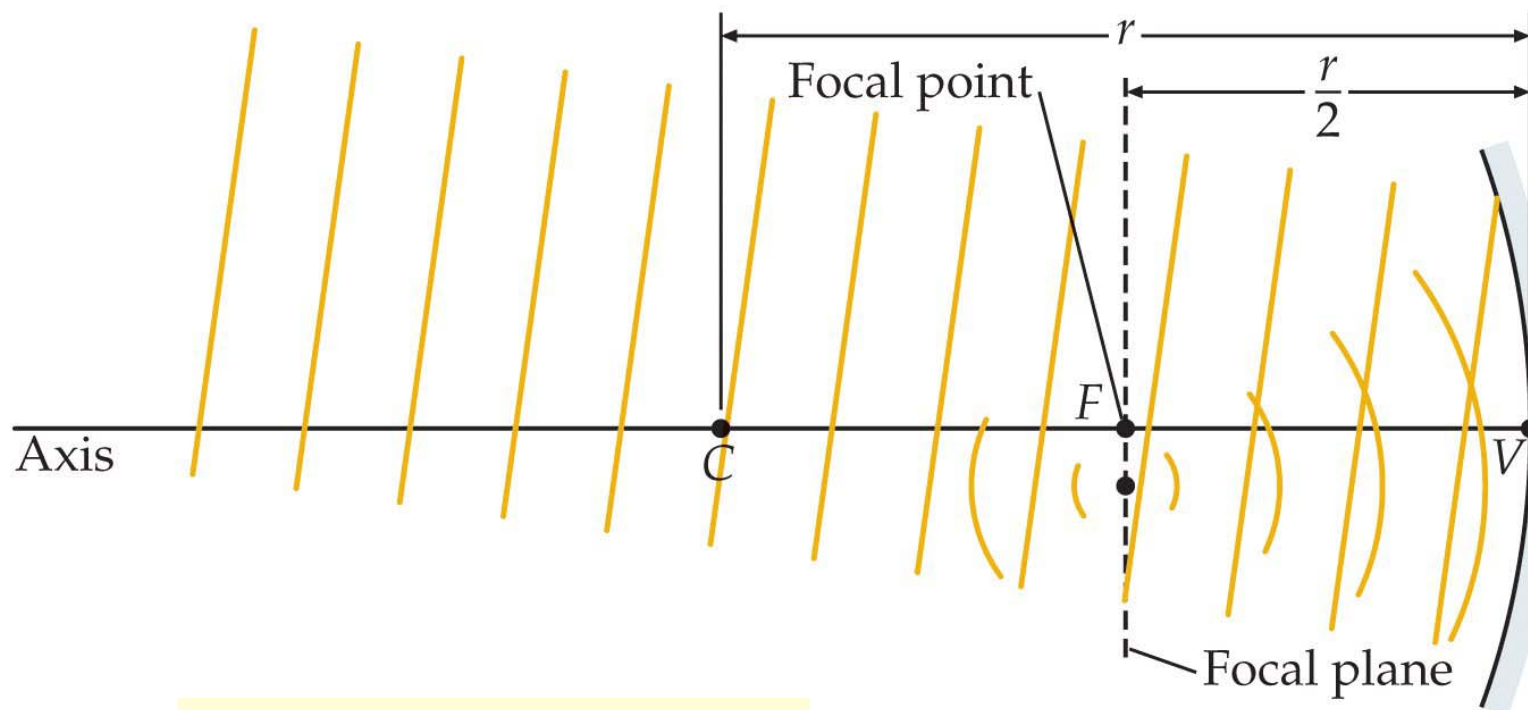
Quando $s \rightarrow \infty$: $s' \rightarrow \frac{1}{2} r \equiv f$

$$f = \frac{1}{2} r$$





Equação dos espelhos

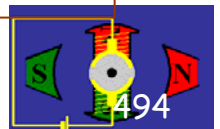
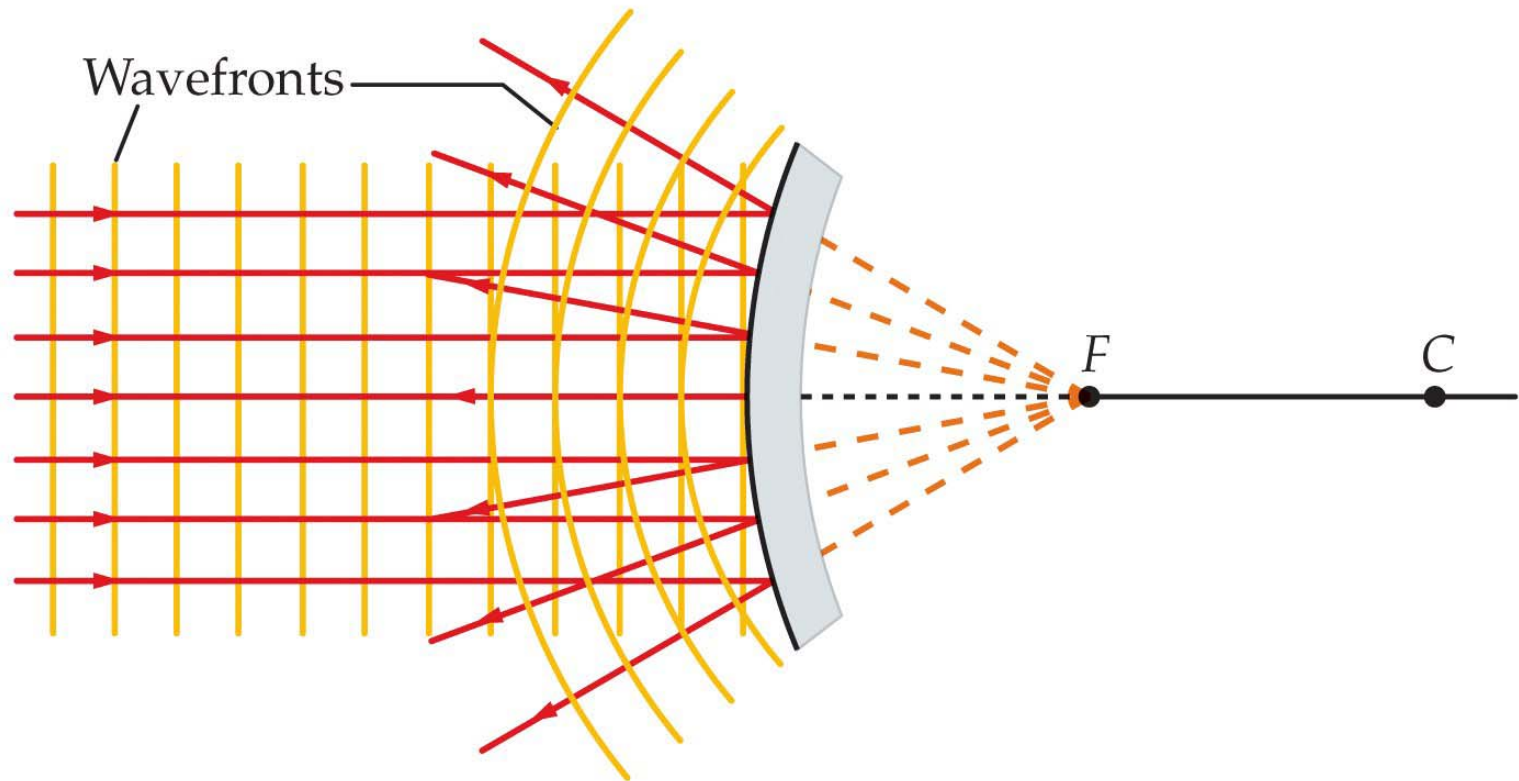


$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$



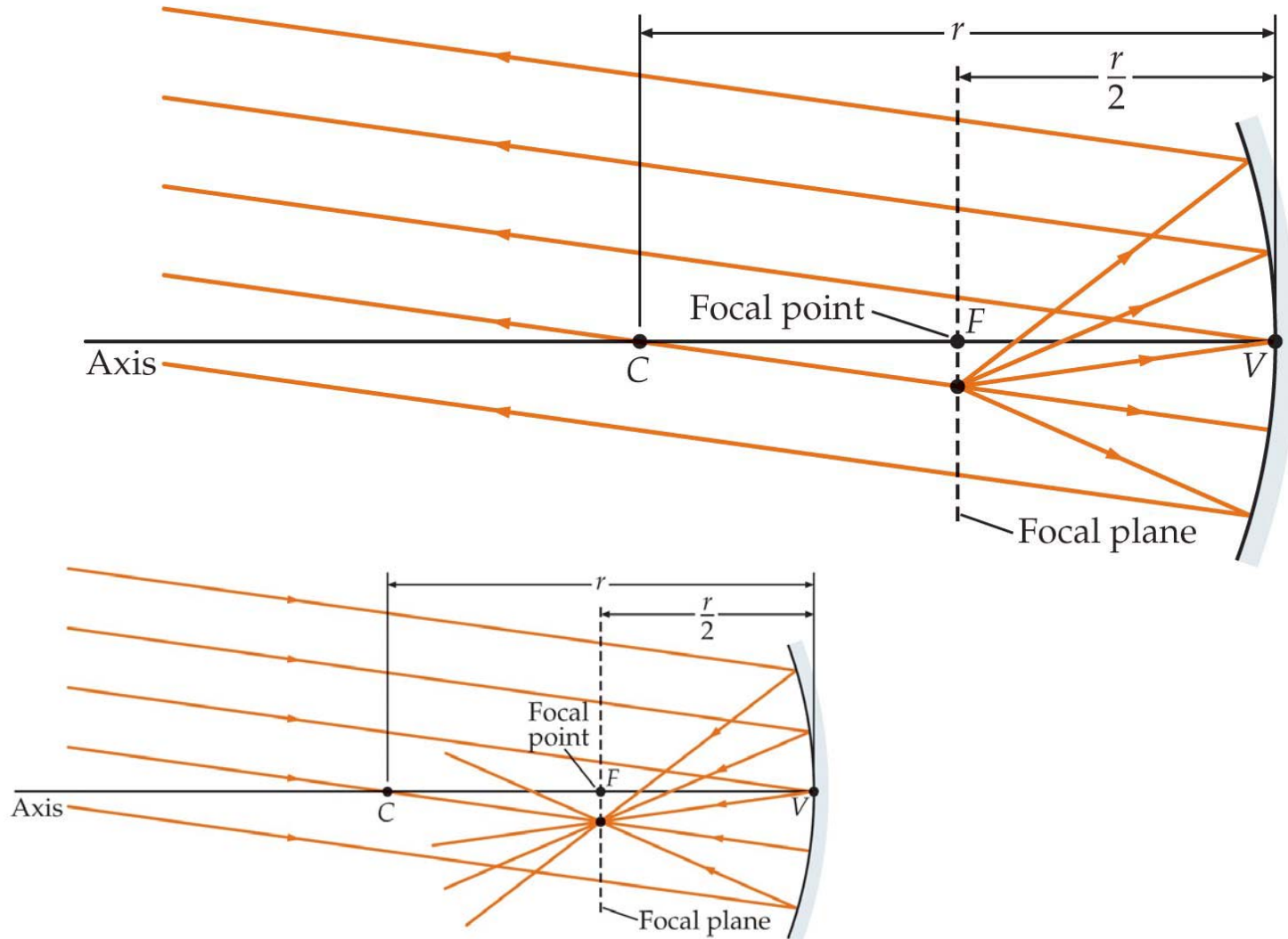


Reflexão de ondas planas num espelho convexo



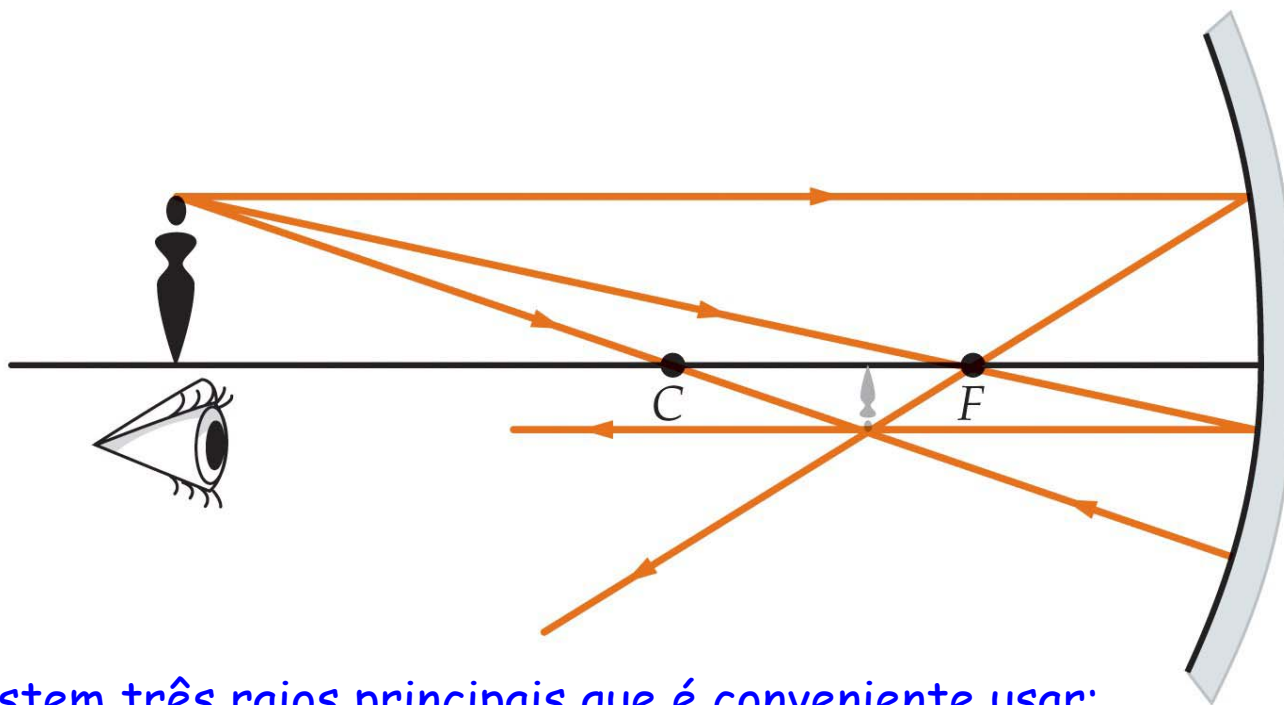


Reversibilidade dos raios



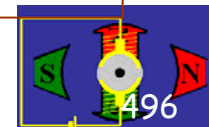


Diagramas de raios para espelhos

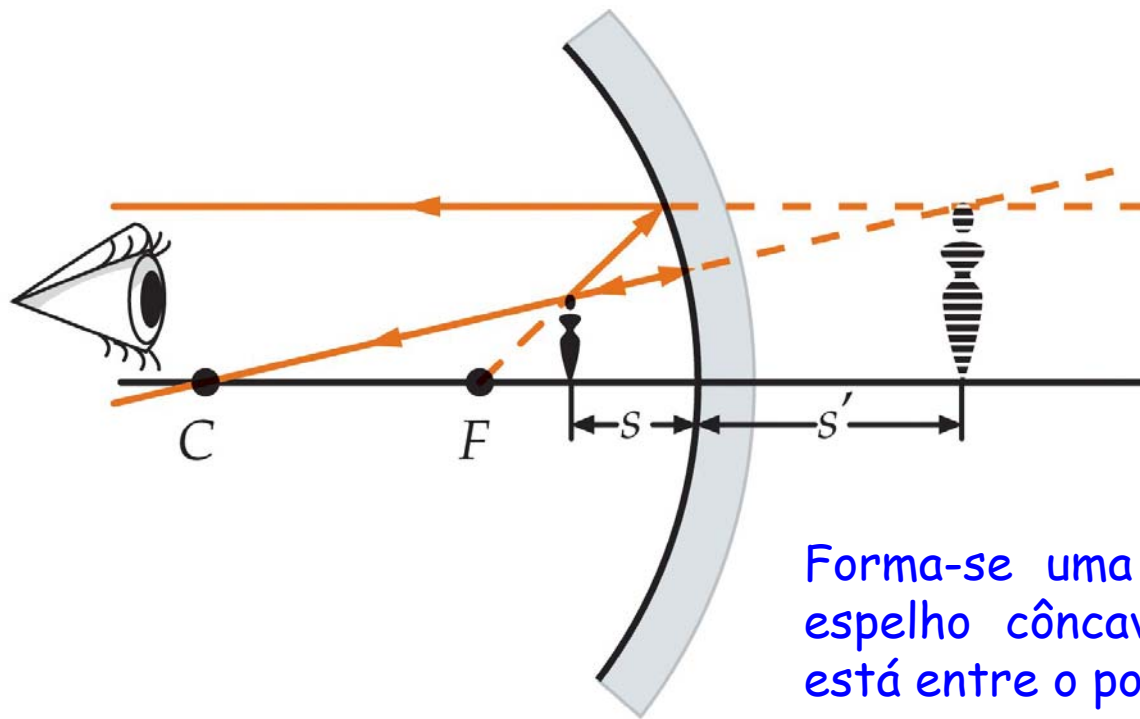


Existem três raios principais que é conveniente usar:

1. O raio paralelo, desenhado paralelamente ao eixo. Este raio depois de reflectido passa pelo foco.
2. O raio focal: passa pelo foco e é reflectido paralelamente ao eixo.
3. O raio radial, passa pelo centro de curvatura, atingindo o espelho perpendicularmente à sua superfície, sendo reflectido na mesma direcção.



Convenção de sinais para a reflexão

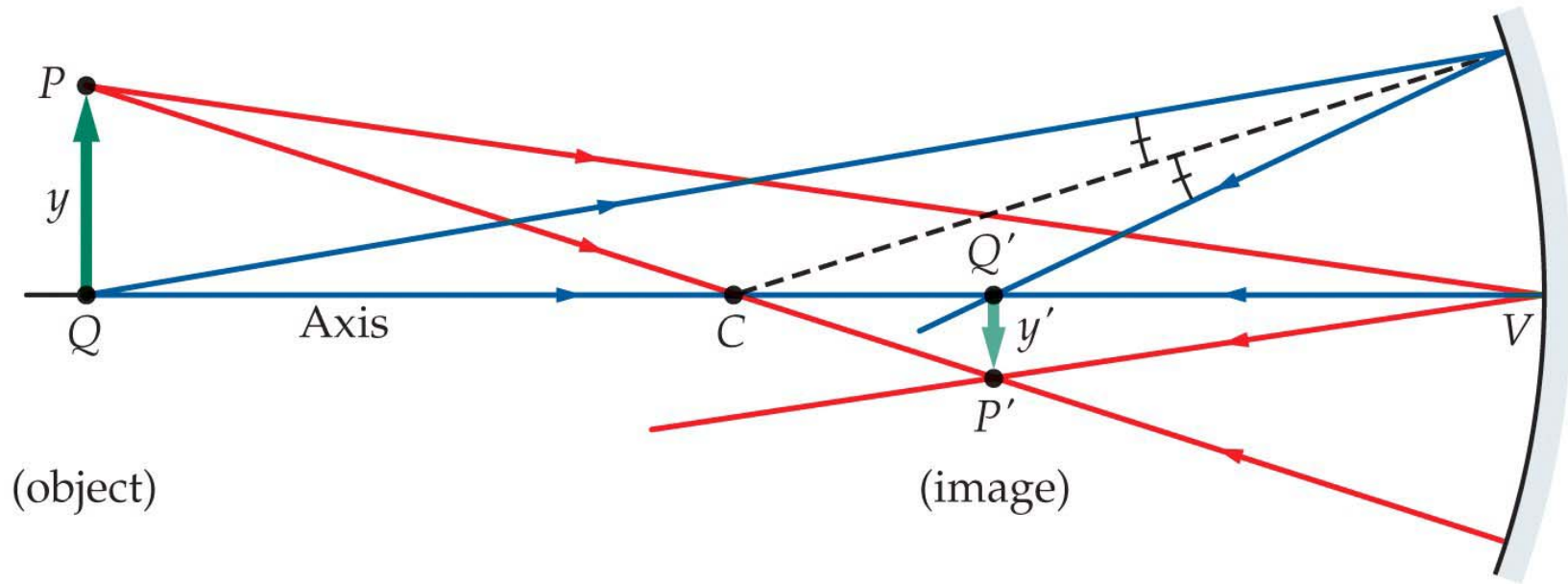


Forma-se uma imagem virtual num espelho côncavo quando o objecto está entre o ponto focal e o espelho.

1. s é positiva se o objecto está no lado do espelho da luz incidente.
2. s' é positiva se a imagem está no lado do espelho da luz reflectida.
3. r (e f) é positivo se o espelho é côncavo de tal modo que o centro de curvatura está no lado do espelho da luz reflectida.



Ampliação lateral



(object)

(image)

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

m : ampliação lateral. O sinal negativo significa que a imagem é invertida.



Espelhos convexos

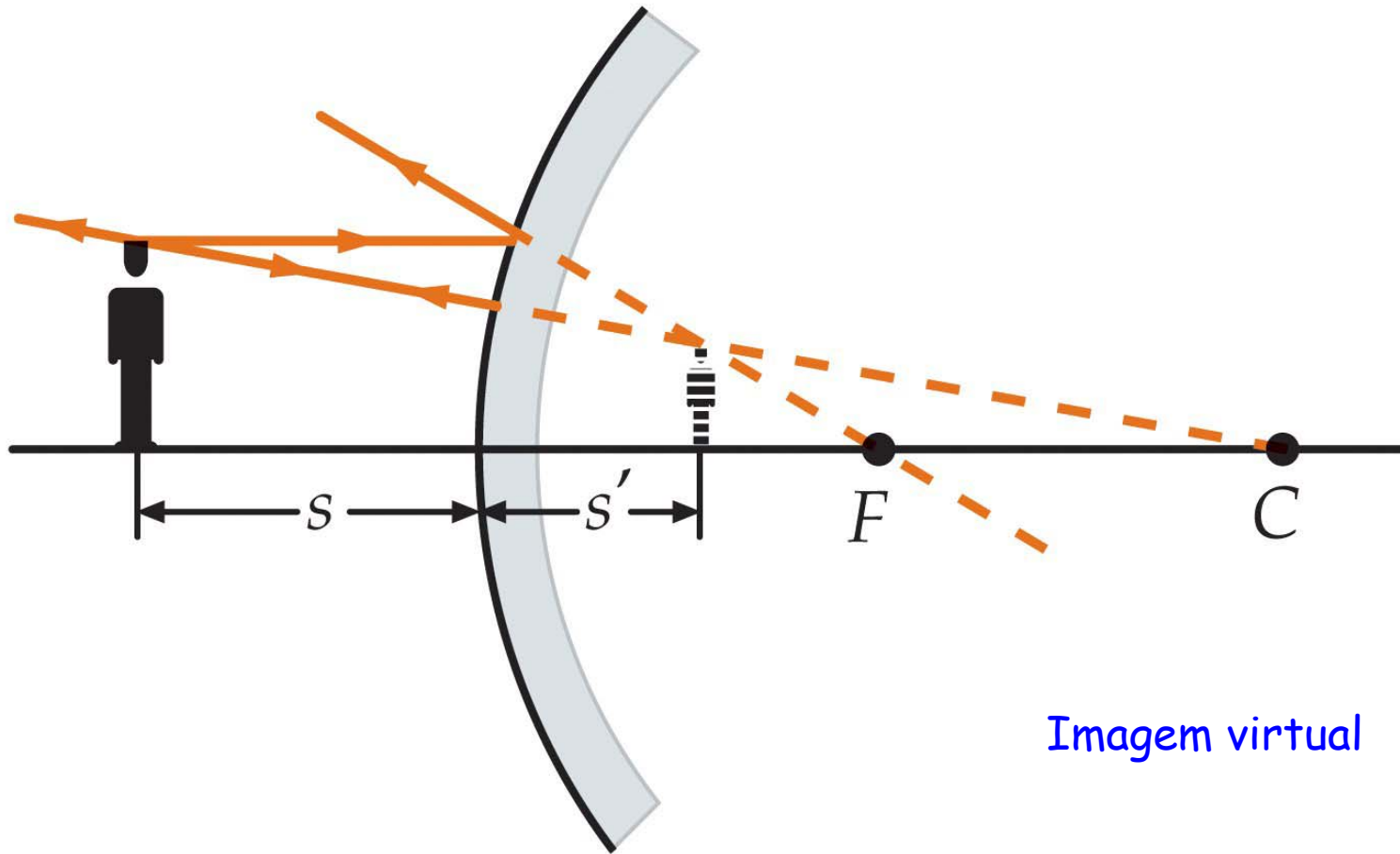
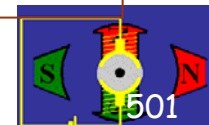


Imagem virtual

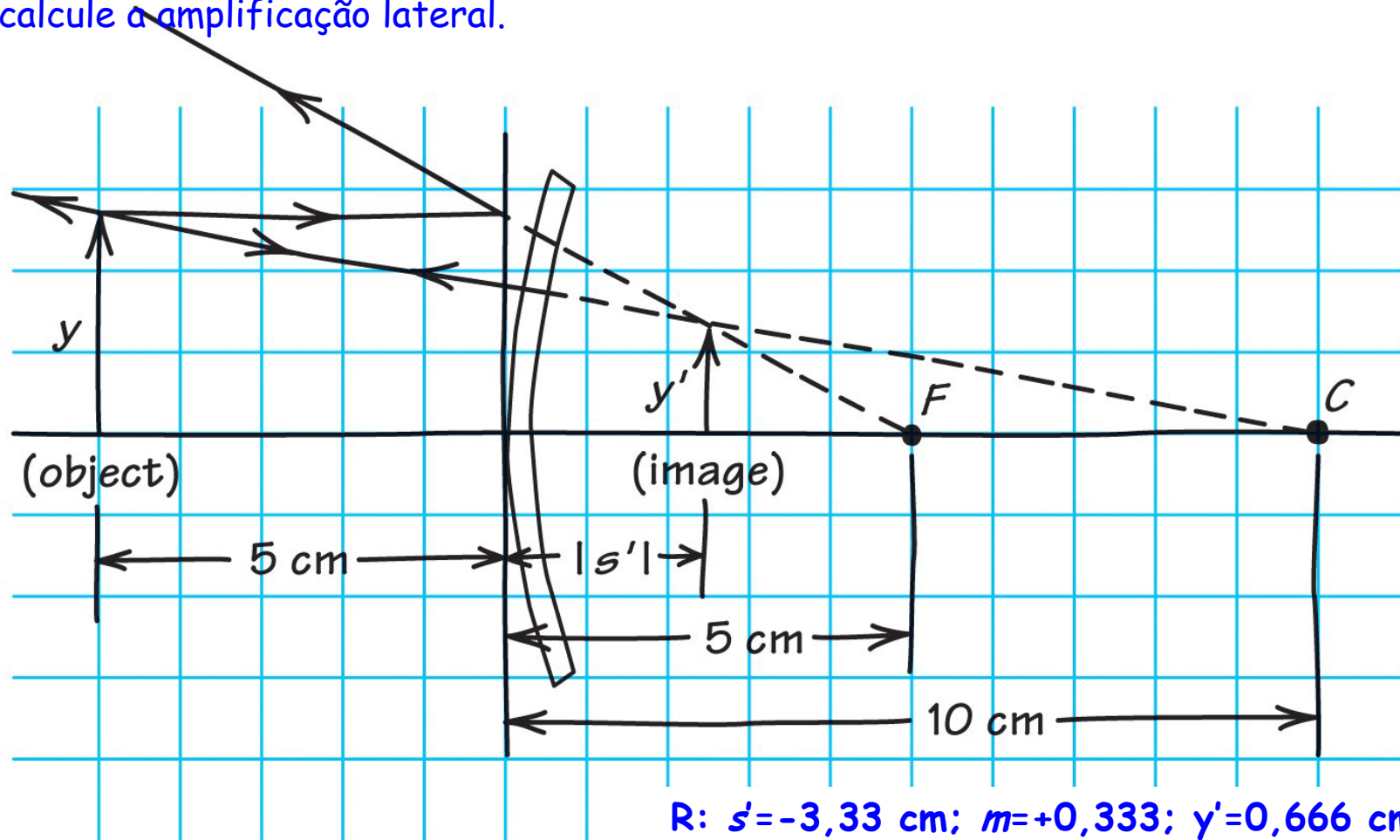


Espelhos convexos (2)



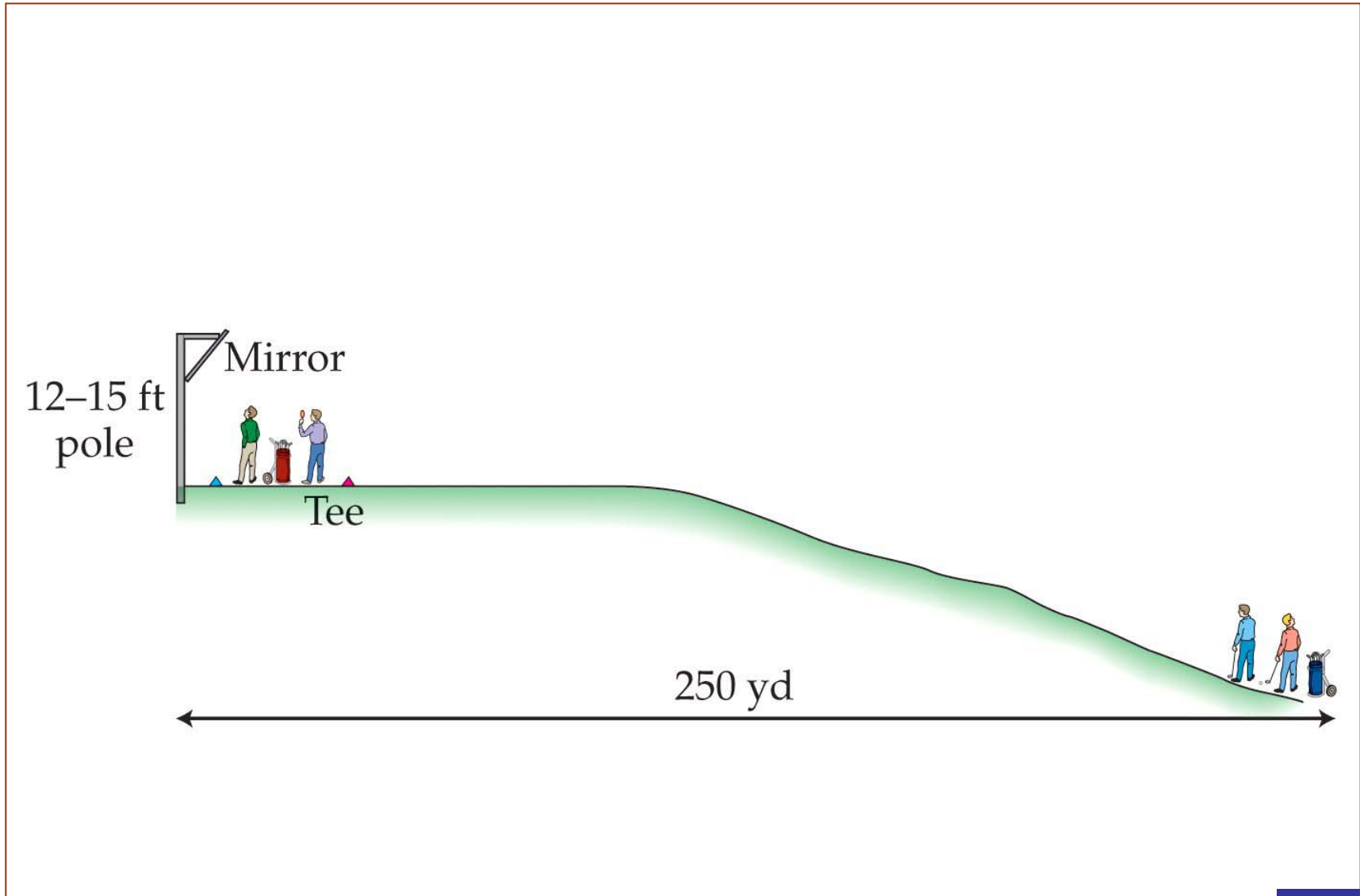
Exercício

Um objecto com 2 cm de altura está a 10 cm de um espelho convexo com raio de curvatura de 10 cm: a) localize a imagem; b) determine a altura da imagem; c) calcule a amplificação lateral.



$R: s' = -3,33 \text{ cm}; m = +0,333; y' = 0,666 \text{ cm}$

Exercício (2)



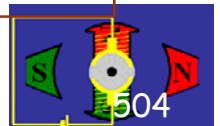


Óptica Geométrica

•

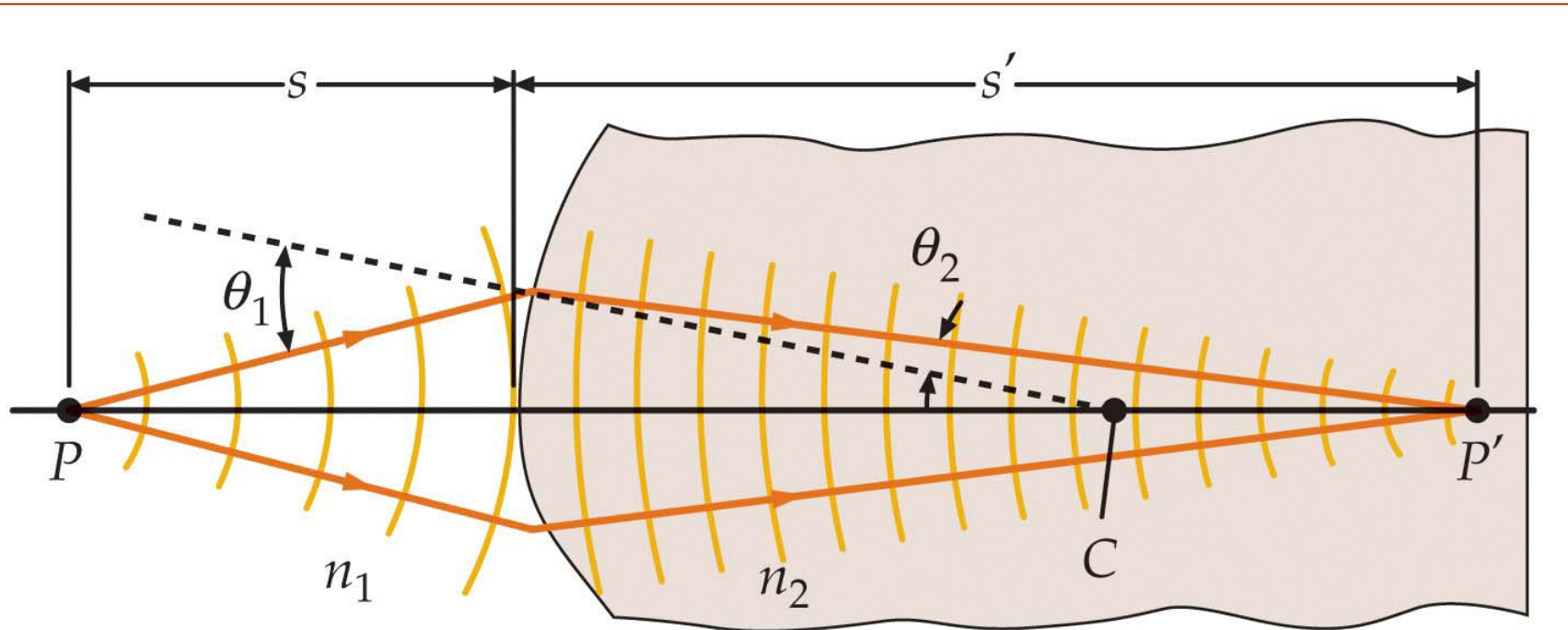
Lentes

Lente: s. f. (fís.) meio transparente limitado por duas faces curvas ou por uma plana e outra curva, destinado à modificação da direcção dos feixes luminosos por refacção, com eventual formação de imagens; ~ acromática: lente que dá imagens sem irisação, quando se emprega luz branca; ~ anamórfica: lente fotográfica com uma das faces cilíndrica, para produzir imagens deformadas; ~ bicôncava: lente divergente limitada por duas superfícies esféricas côncavas; ~ biconvexa: lente convergente limitada por duas superfícies esféricas convexas; ~ de contacto: lente correctora de anomalia visual que se adapta à córnea por simples aderência; ~ electrónica: dispositivo eléctrico ou magnético concebido para focalizar um feixe de electrões, muito usado em microscopia electrónica. (Do lat. lente-, «lentilha»)



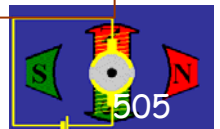


Imagens formadas por refração



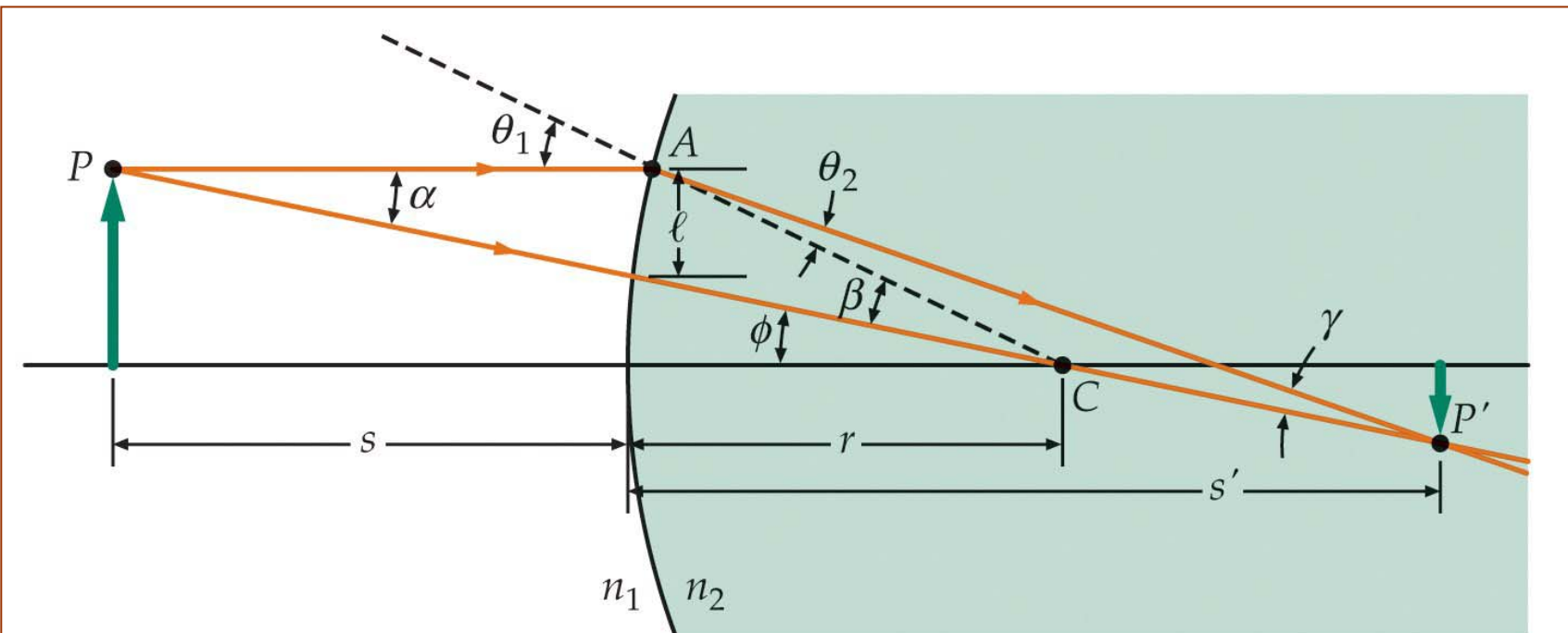
Refração numa superfície esférica

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

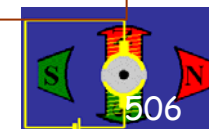




Convenção de sinais para a refração

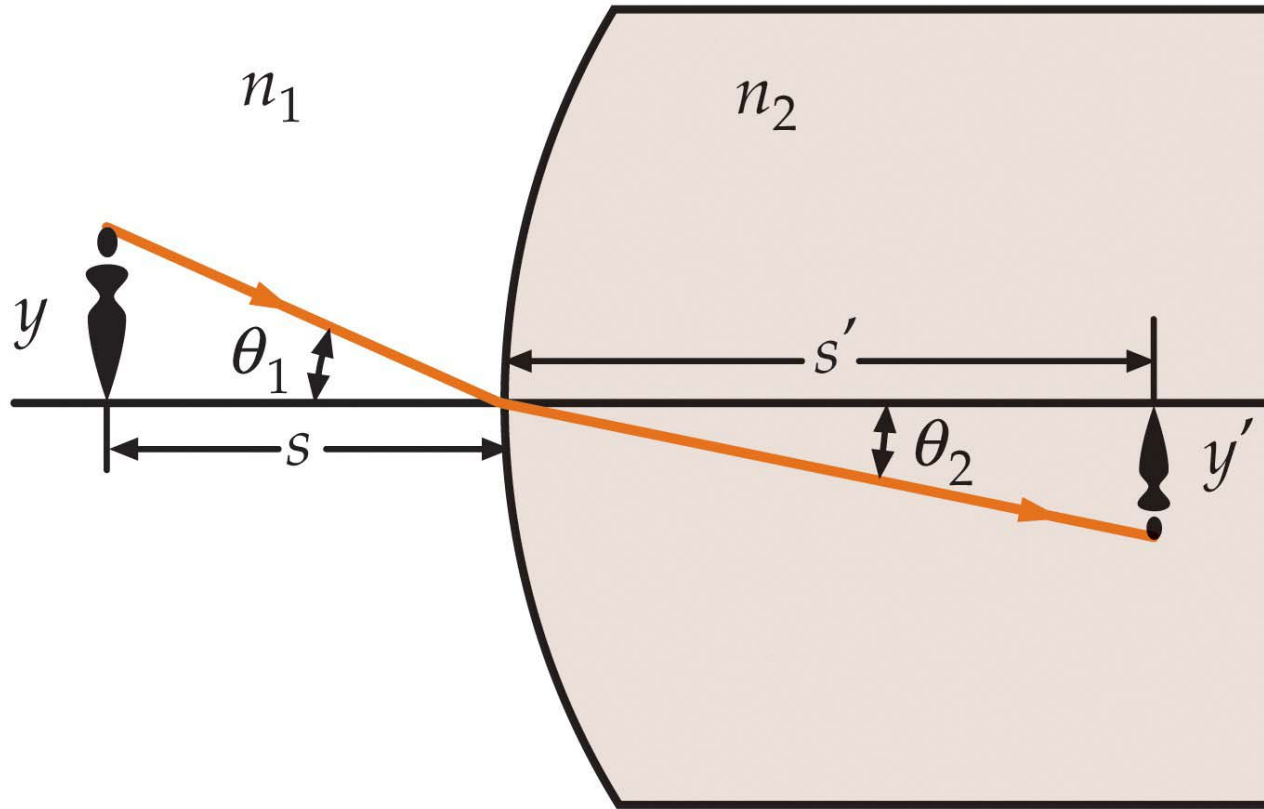


1. s é positiva se o objecto está no lado da luz incidente.
2. s' é positiva se a imagem está no lado da luz refractada
3. r é positivo se o centro de curvatura está no lado da superfície da luz refractada.





Ampliação para uma superfície refractora



$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{n_1 s'}{n_2 s}$$

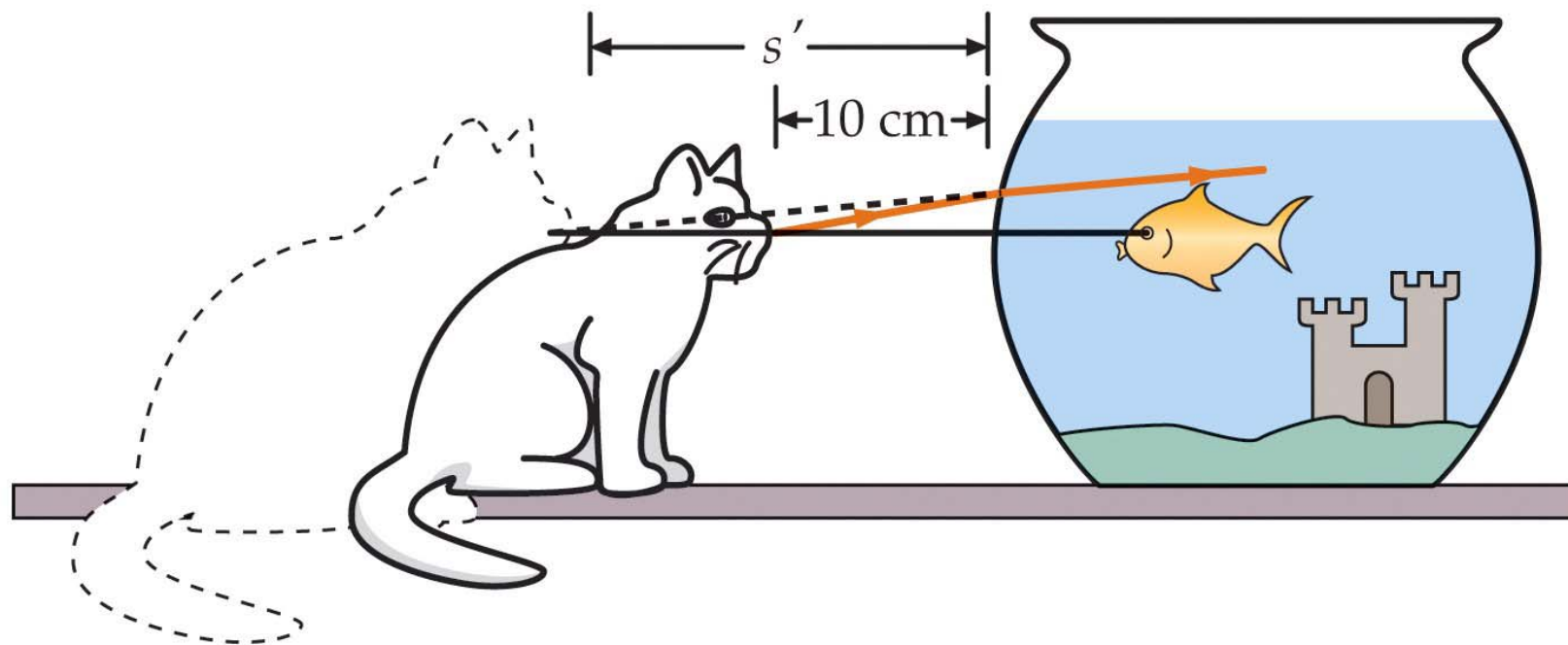
m : ampliação lateral. O sinal negativo significa que a imagem é invertida.





Imagem vista de um aquário de peixe

O peixe dourado está num aquário esférico de 15 cm de raio cheio de água, com um índice de refração 1,33. O gato está sentado sobre a mesa com o nariz a 10 cm da superfície do aquário. A luz do nariz do gato é refracta pela fronteira ar-água para formar uma imagem. Determine a) a distancia à imagem; b) a ampliação da imagem do nariz do gato. Despreze qualquer efeito da parede de vidro do aquárioa.



$$R: s' = -17,1 \text{ cm}; m = 1,29$$

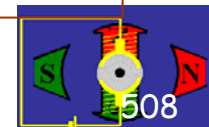
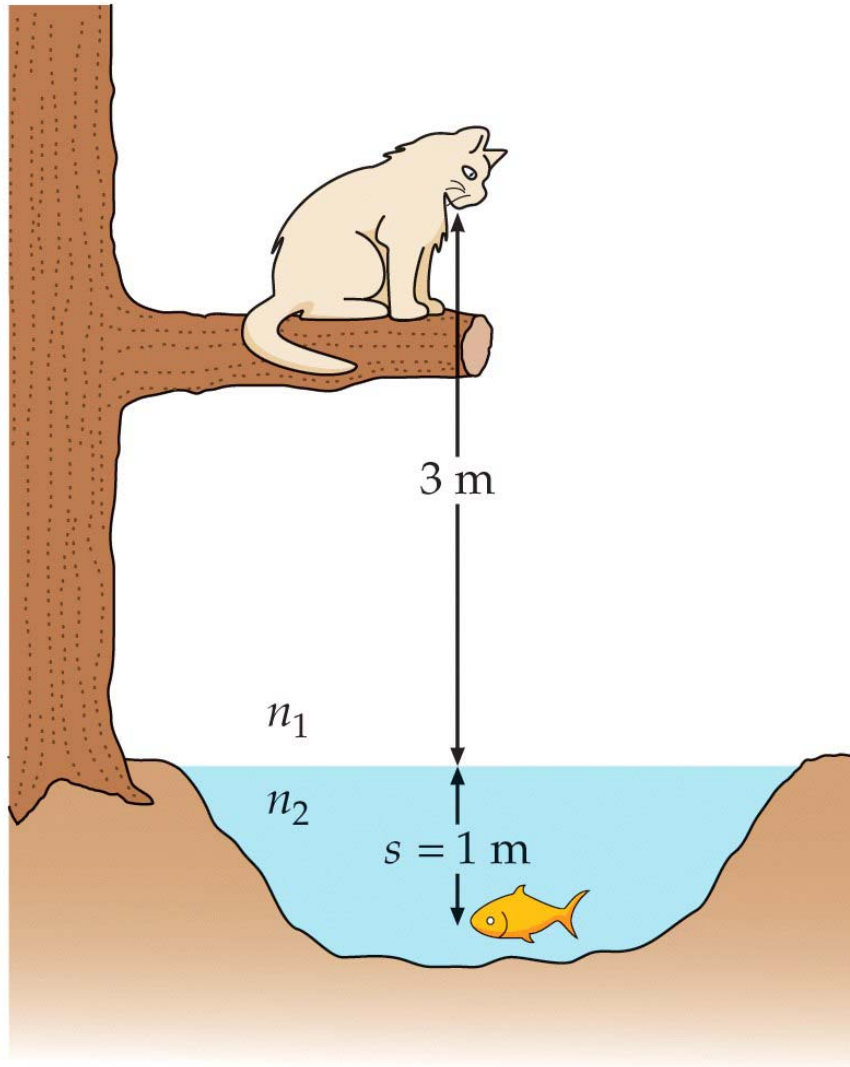


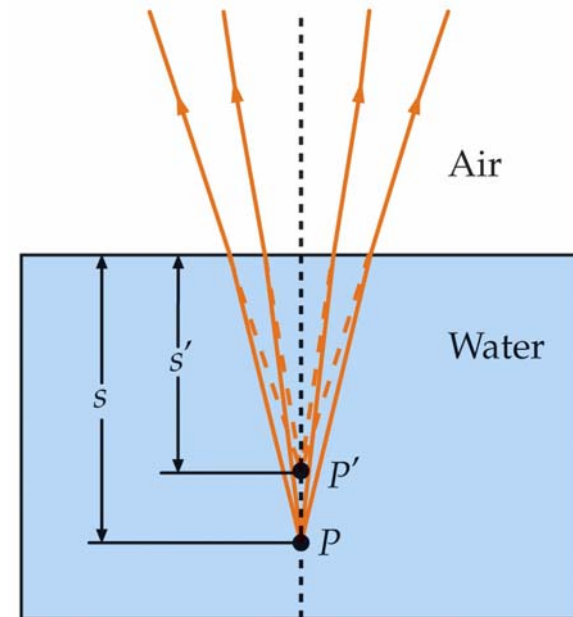


Imagem vista de um galho



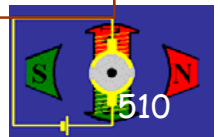
A que profundidade está imagem do peixe vista pelo gato.

R: $s' = -0,75$ cm.



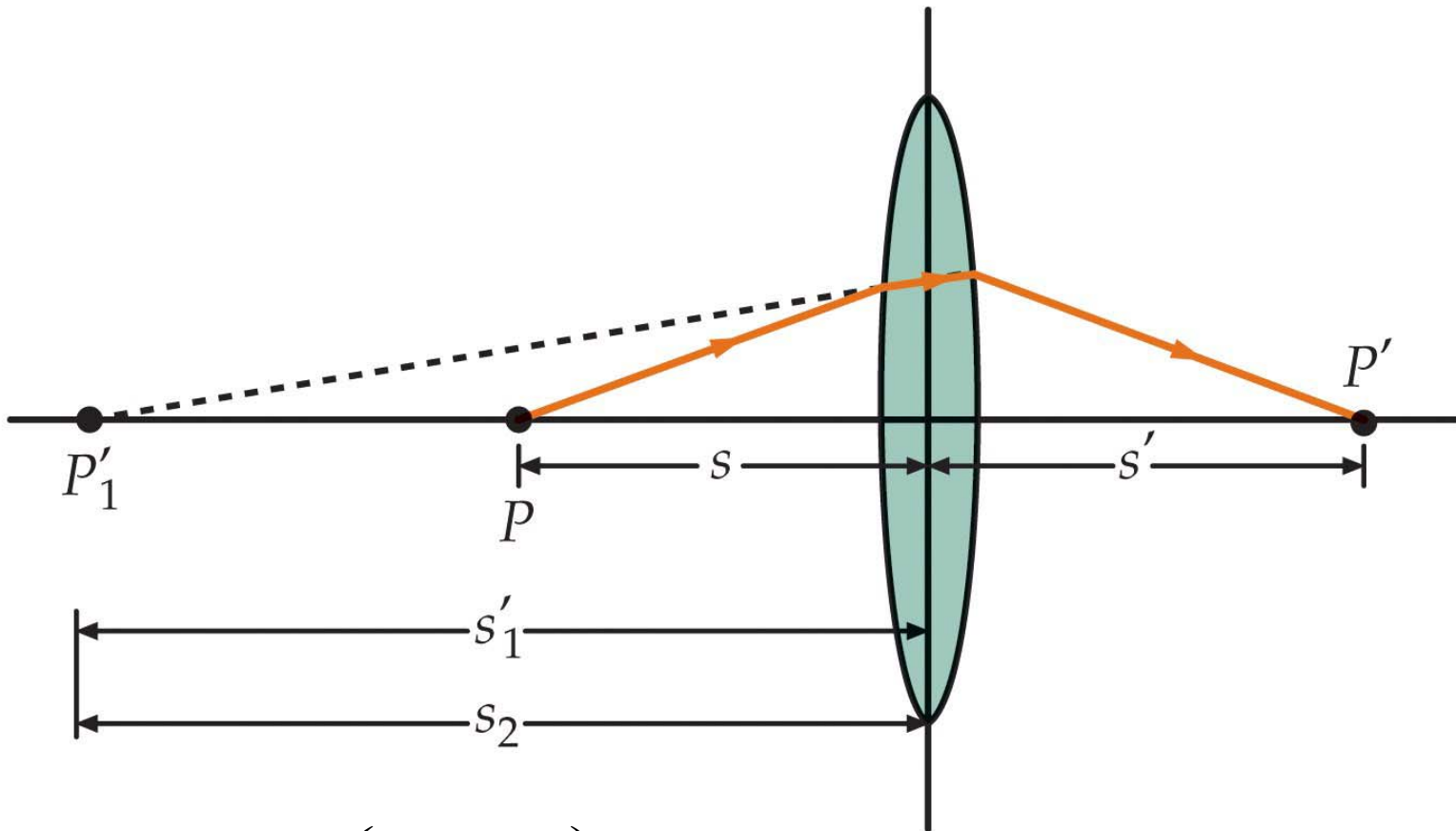
Óptica Geométrica

Lentes finas





Equação dos fabricantes de lentes



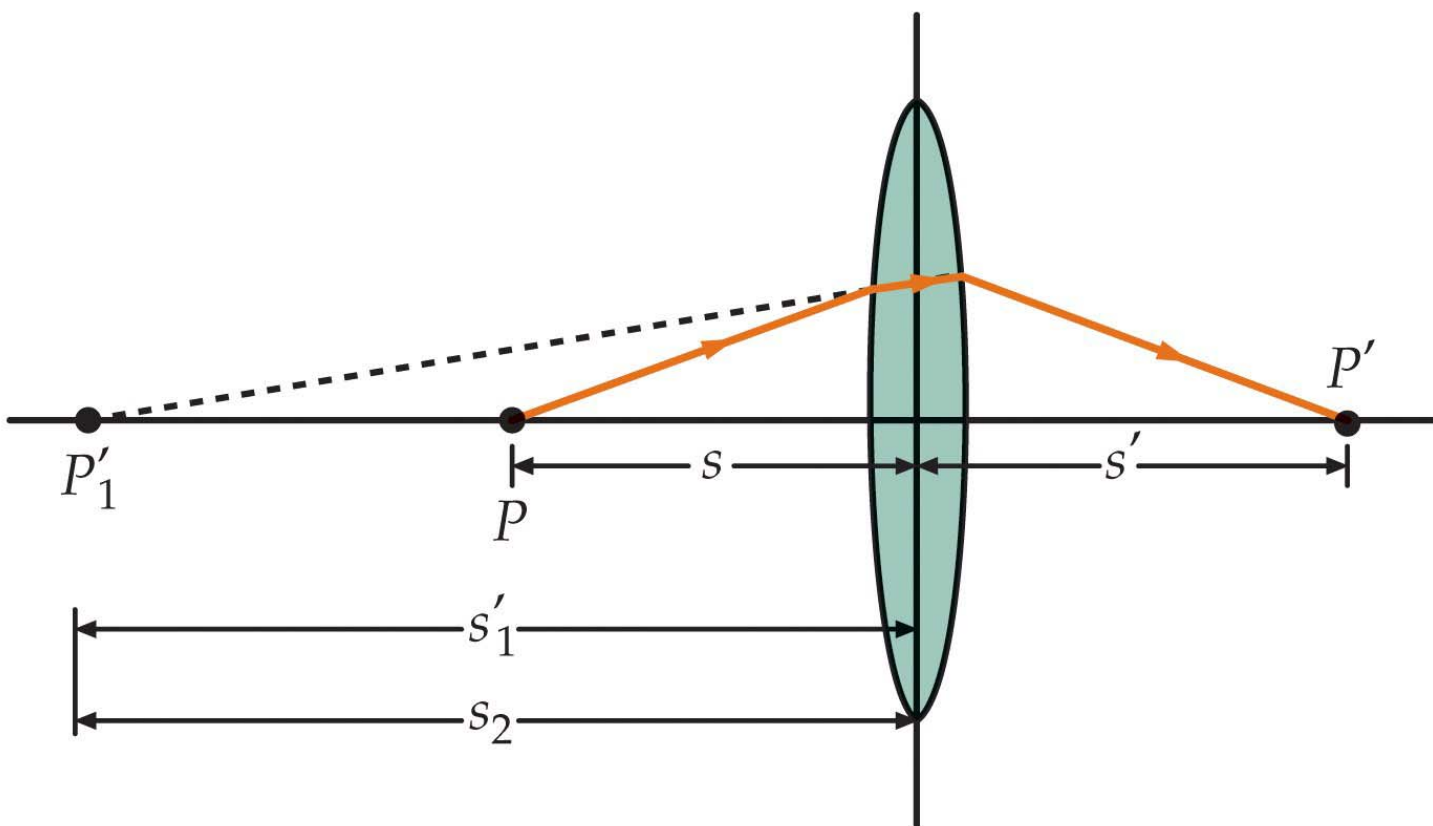
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

n : índice de refração da lente.
 $r_{1,2}$: raios de curvatura das superfícies da lente. f : distância focal





Equação das lentes finas



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

n : índice de refração da lente.

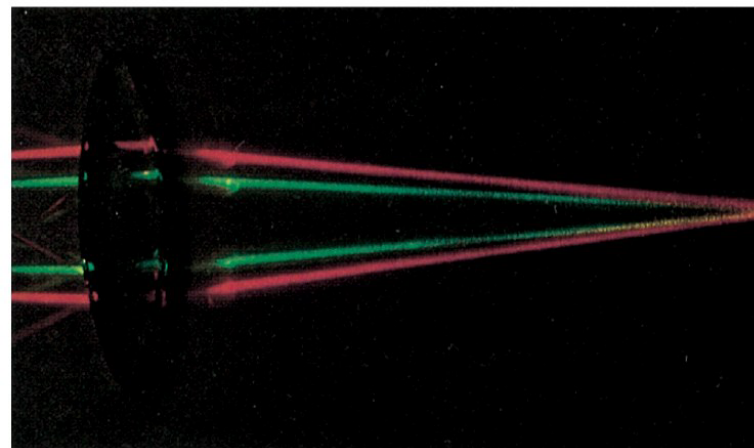
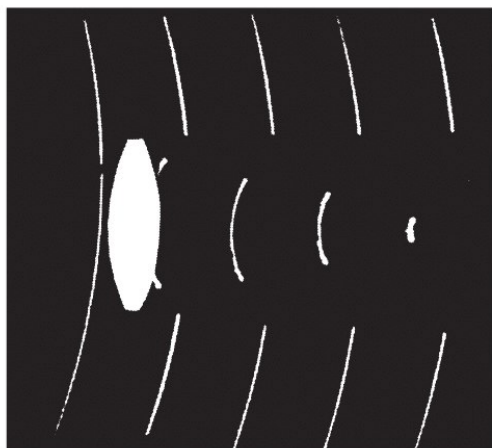
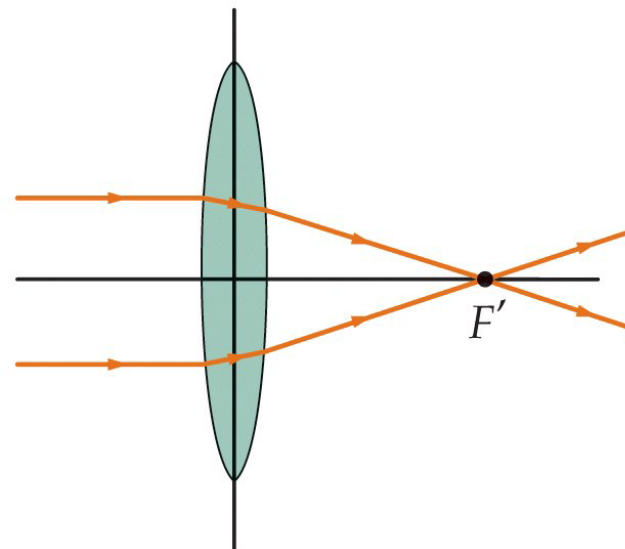
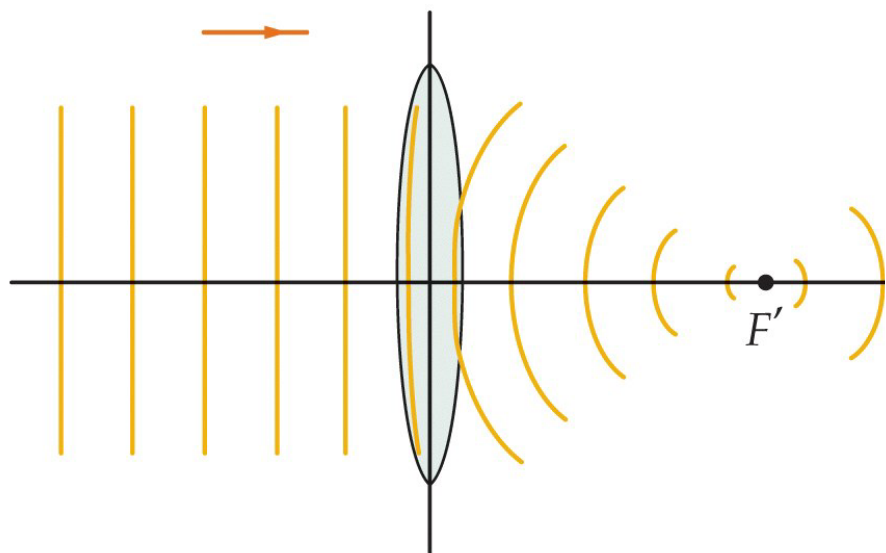
s, s' : distância do objecto e da imagem à lente.

f : distância focal



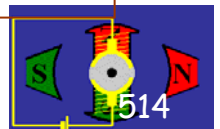
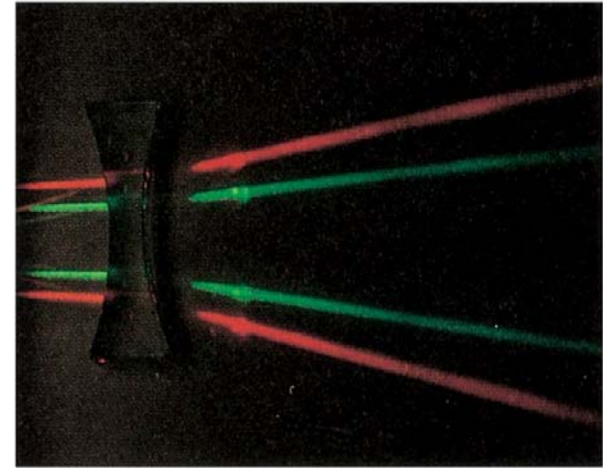
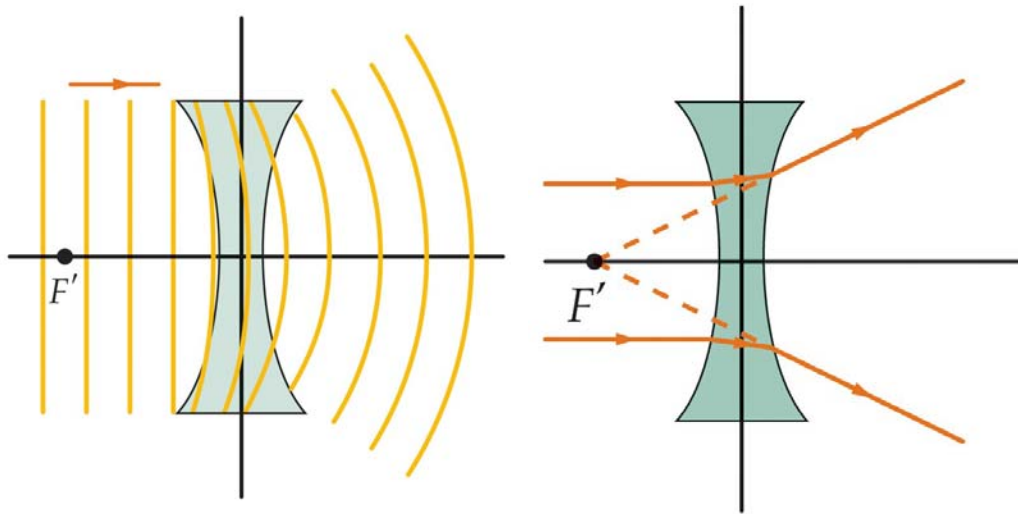


Lente convergente





Lente divergente

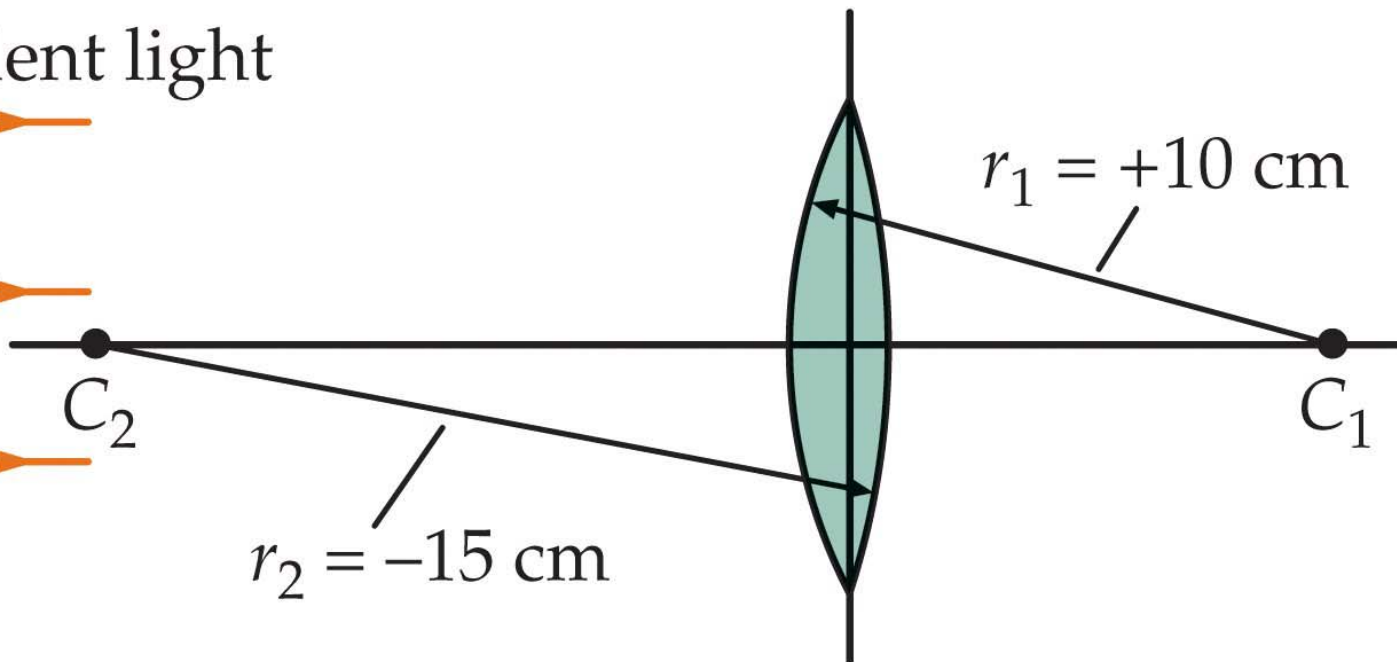




Formula dos fabricantes de lentes

Determine a distância focal.

Incident light



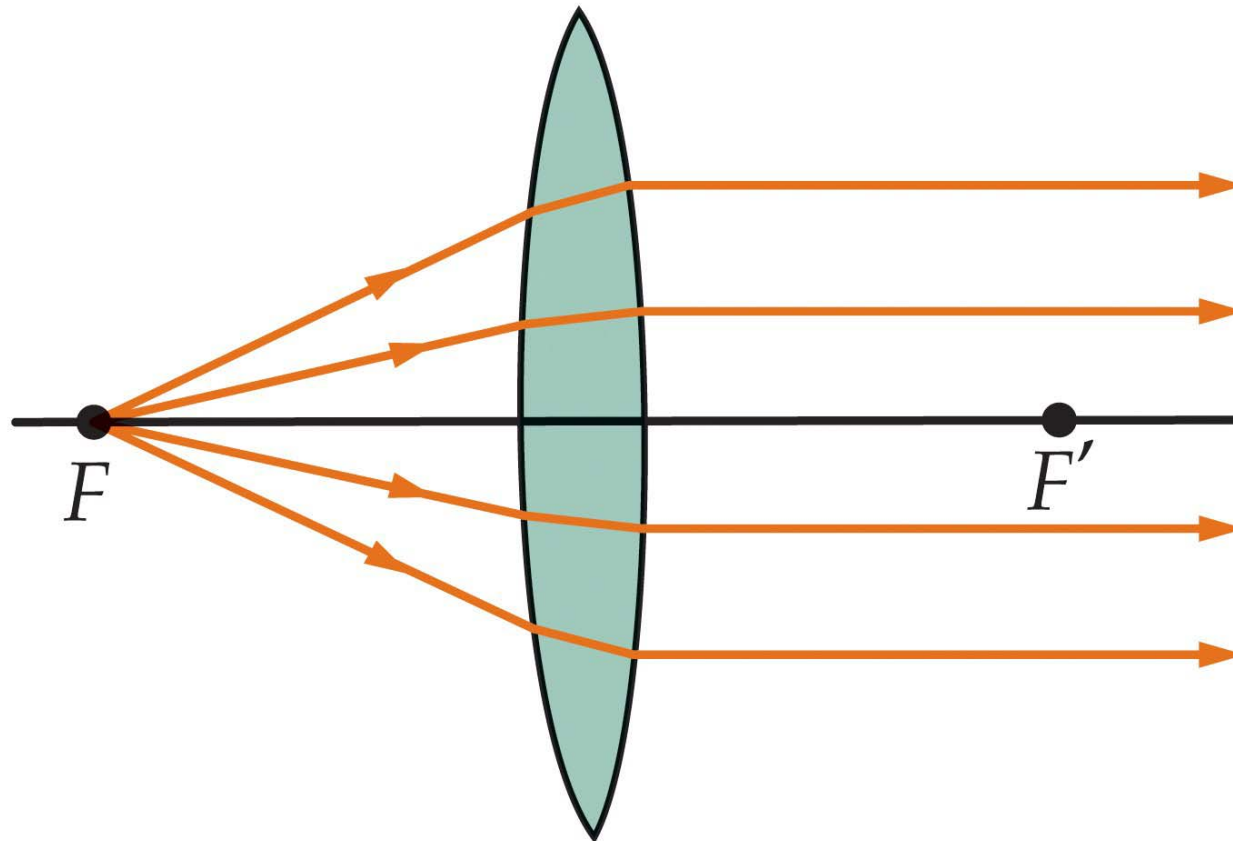
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

R: $f=12$ cm





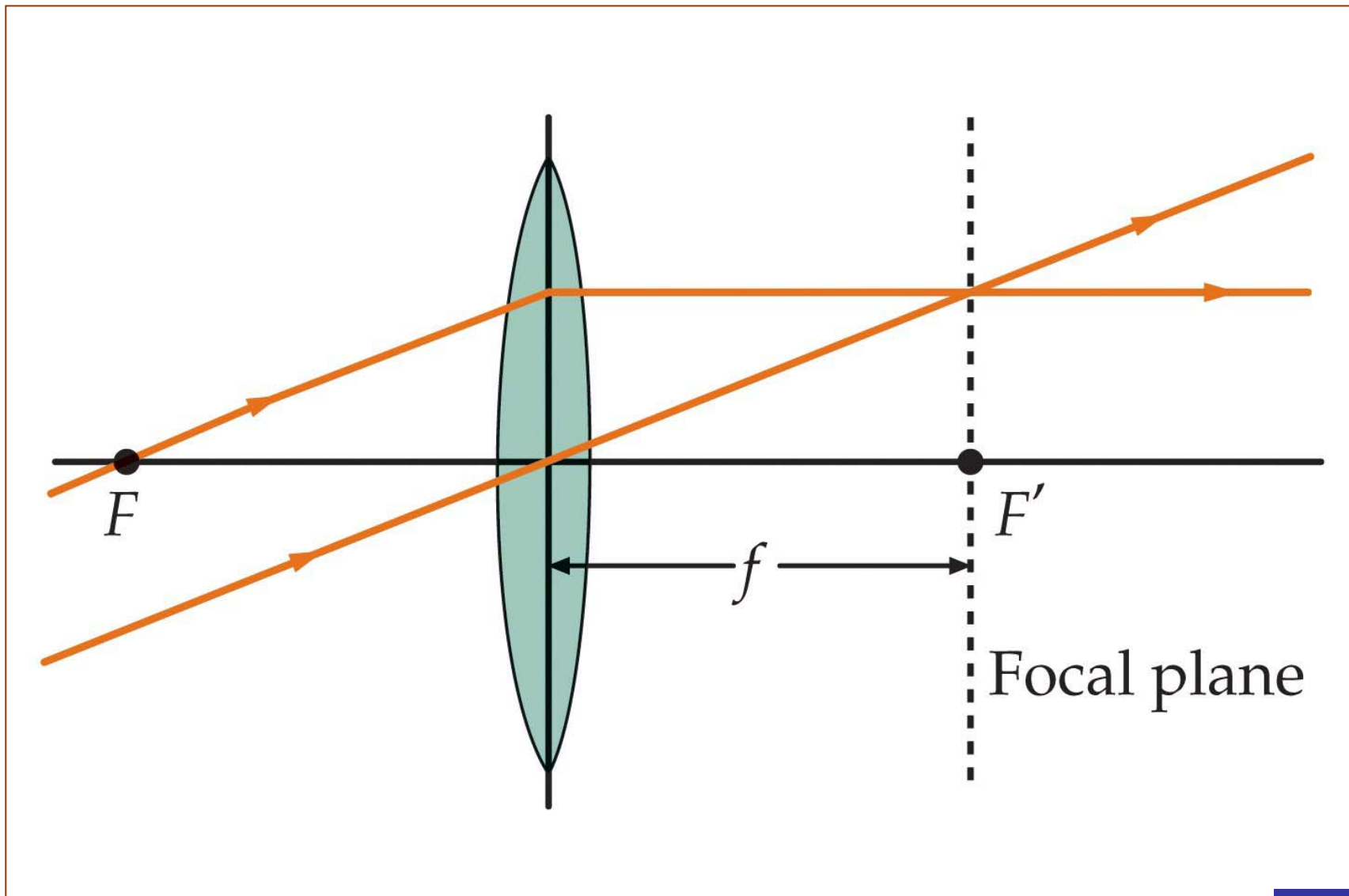
Foco da lente convergente



Potência de uma lente: $P=1/f$, exprime-se em dioptrias, o inverso do metro (D):

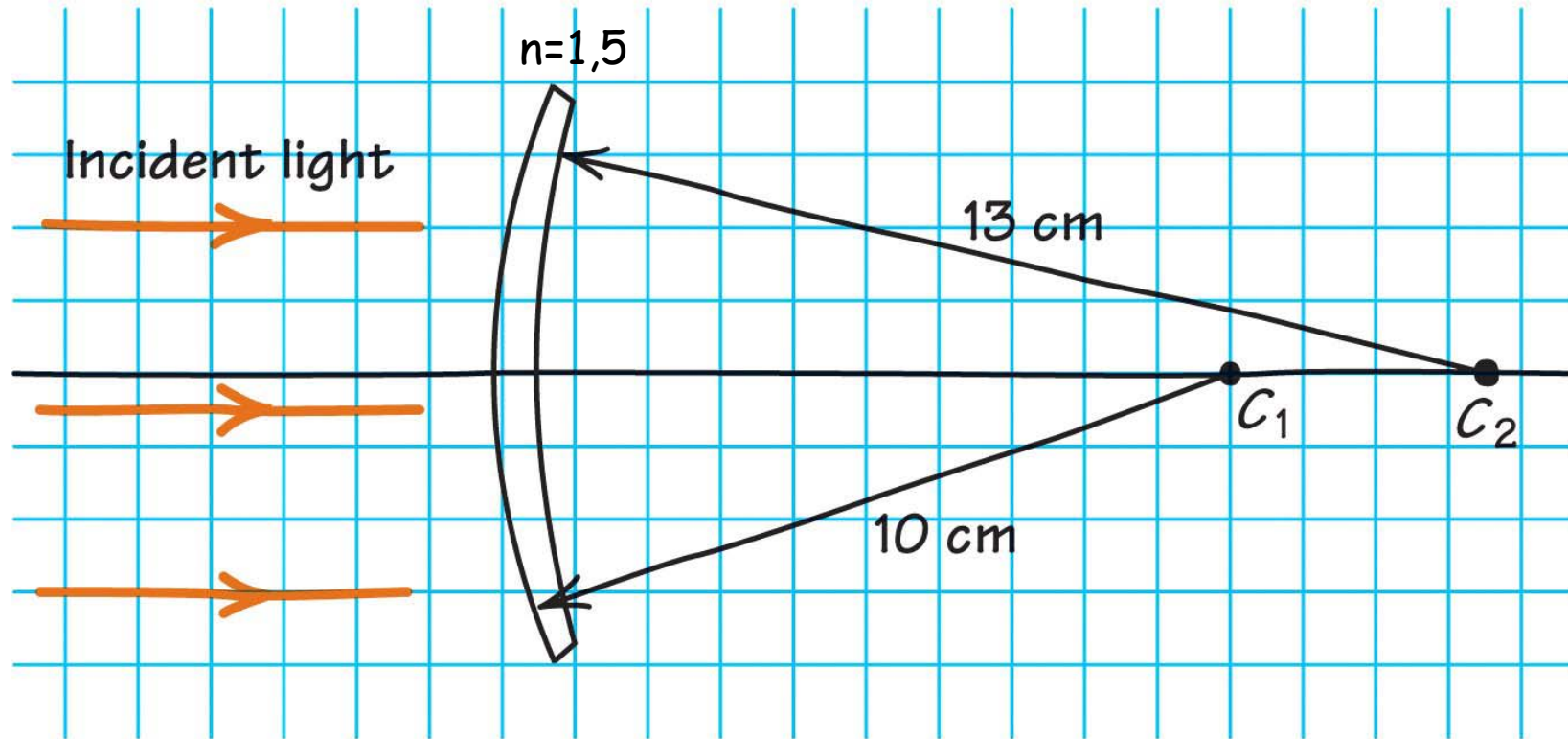


Plano focal



Exercício

Determine a distância focal e a potência da lente



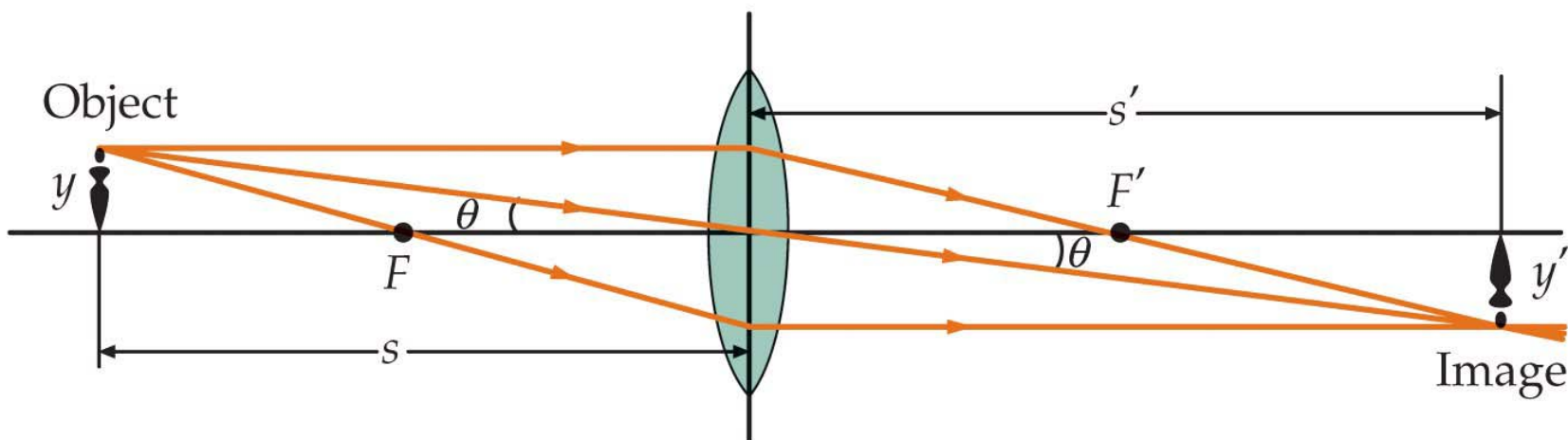
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

R: $f=86,7\text{ cm}$; $P=1,15\text{ D}$





Diagramas de raios para lentes



1. O **raio paralelo**, desenha-se paralelo ao eixo. O raio emergente é direccionado para (ou para fora do) o segundo ponto focal da lente.
2. O **raio central**, desenhado através do centro (ponto central) da lente. Este raio não é deflectido. (As faces da lente são paralelas nesse ponto, de tal modo que ele emerge na mesma direcção mas um pouco deslocado. Uma vez que a lente é fina, o deslocamento é desprezável.)
3. O **raio focal**, desenhado através do primeiro ponto focal. Esse raio emerge paralelo ao eixo.





Diagramas de raios para lentes (2)

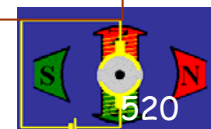
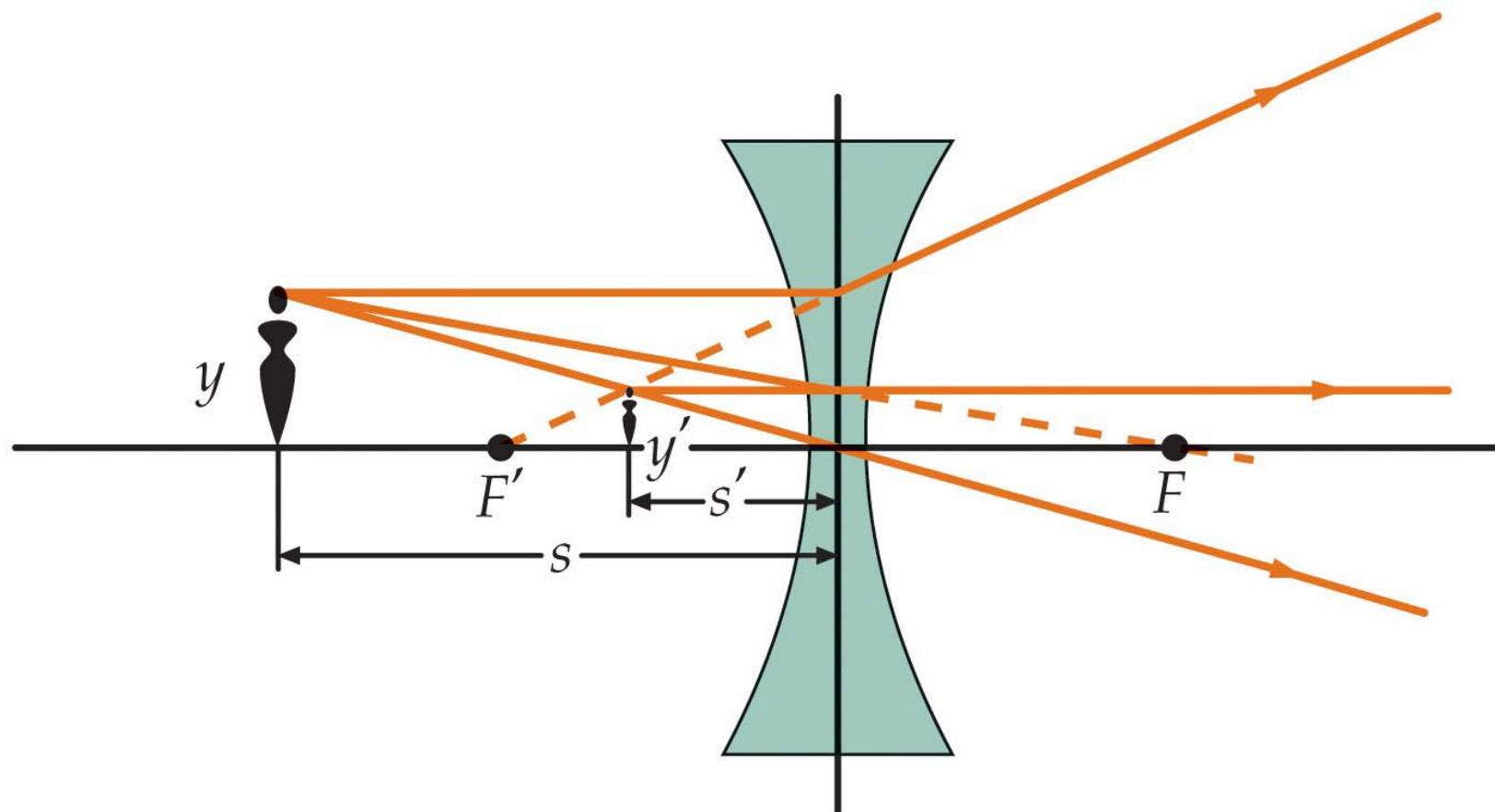
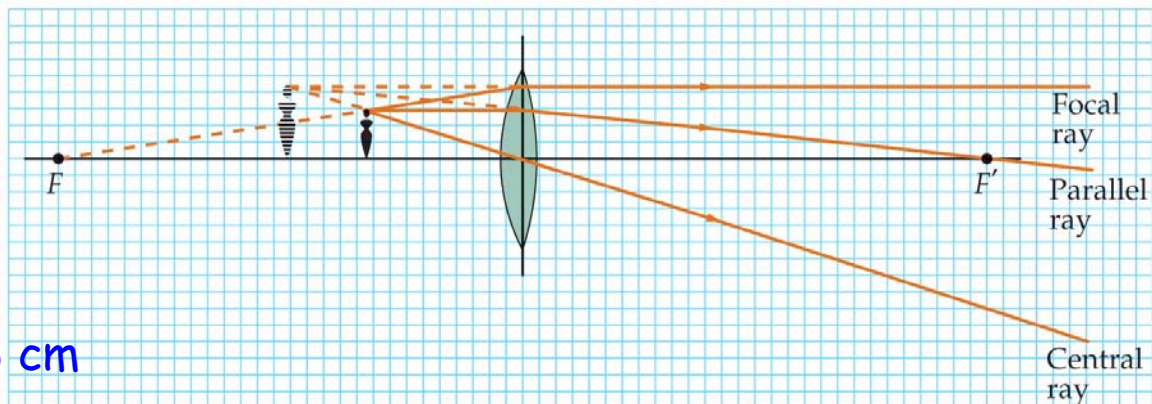
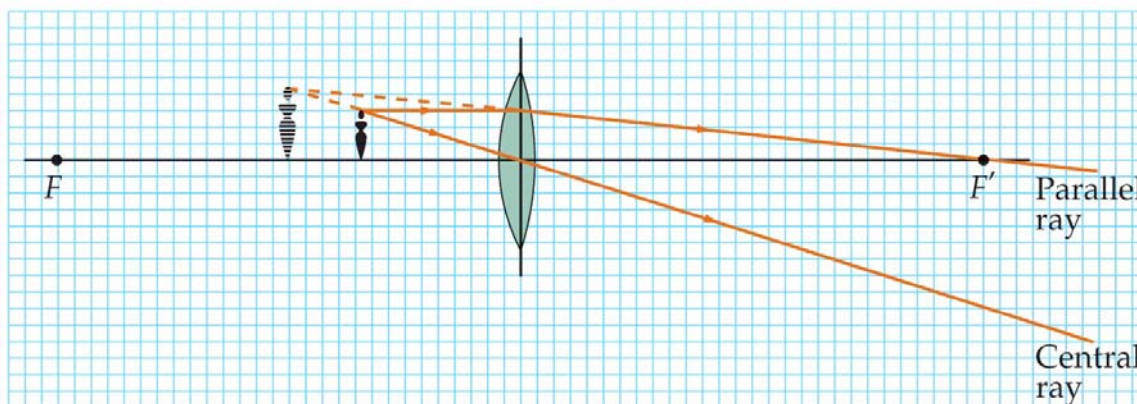
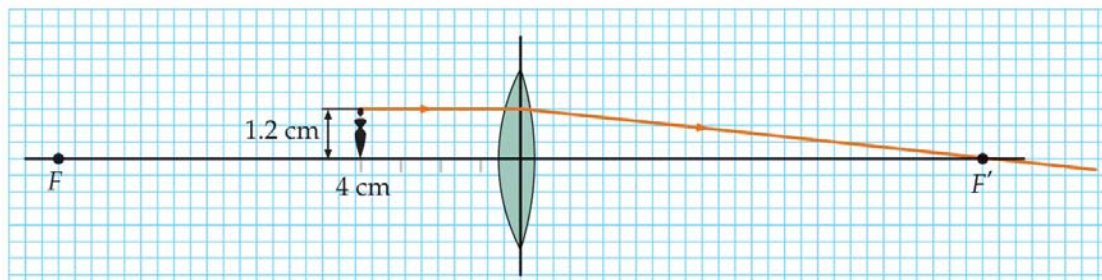




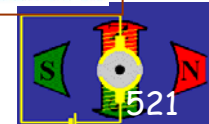
Imagem formada por uma lente

$f=12\text{ cm}$

Localize a imagem tanto graficamente quanto algebricamente; verifique se a imagem é virtual ou real e determine a sua altura.



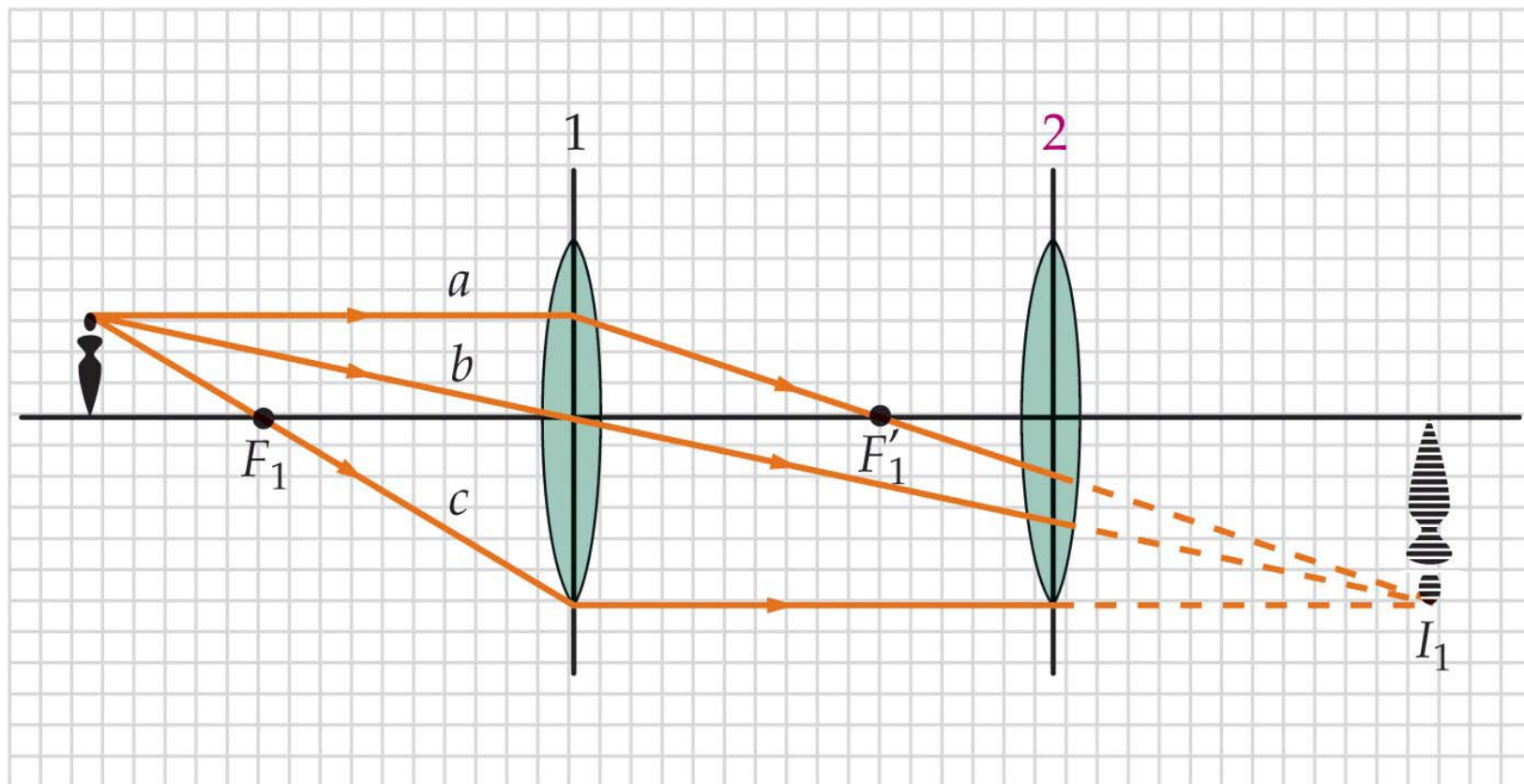
R: $s'=-6\text{ cm}$; $h'=mh=1,8\text{ cm}$





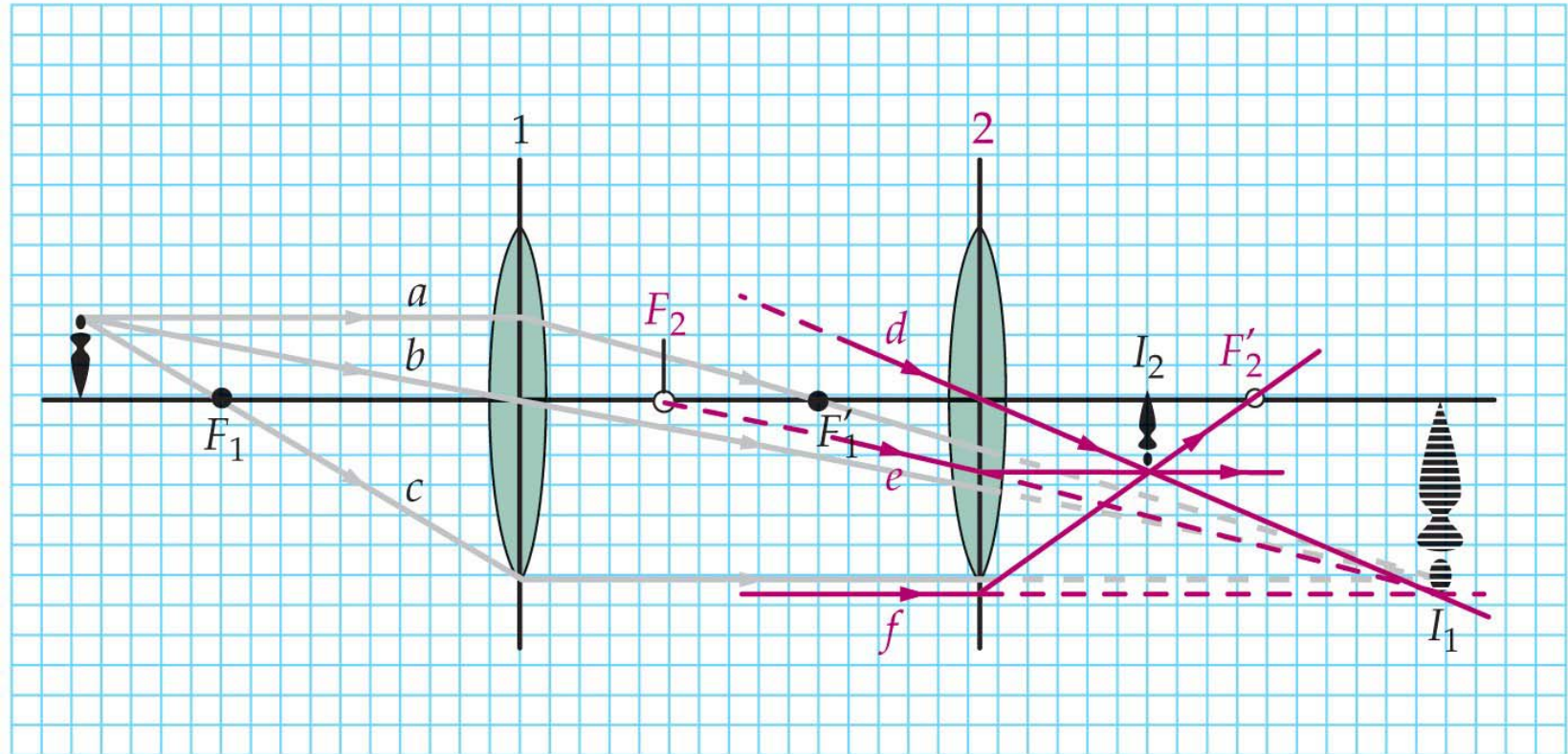
Exercício de combinação de lentes

Duas lentes, cada uma de comprimento focal 10 cm, estão 15 cm afastadas. Determine a imagem final de um objecto a 15 cm de uma das lentes.





Exercício de combinação de lentes (2)



R: $s_1' = 30$ cm; $s_2' = 6$ cm.





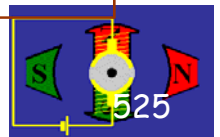
Aberrações das lentes

•

Aberração cromática: formação de imagens coradas quando a luz branca atravessa as lentes, pelo facto de o índice de refração das substâncias transparentes variar com o comprimento de onda da luz incidente;

~ **de esfericidade:** distorção das imagens dadas pelas lentes ou espelhos esféricos;

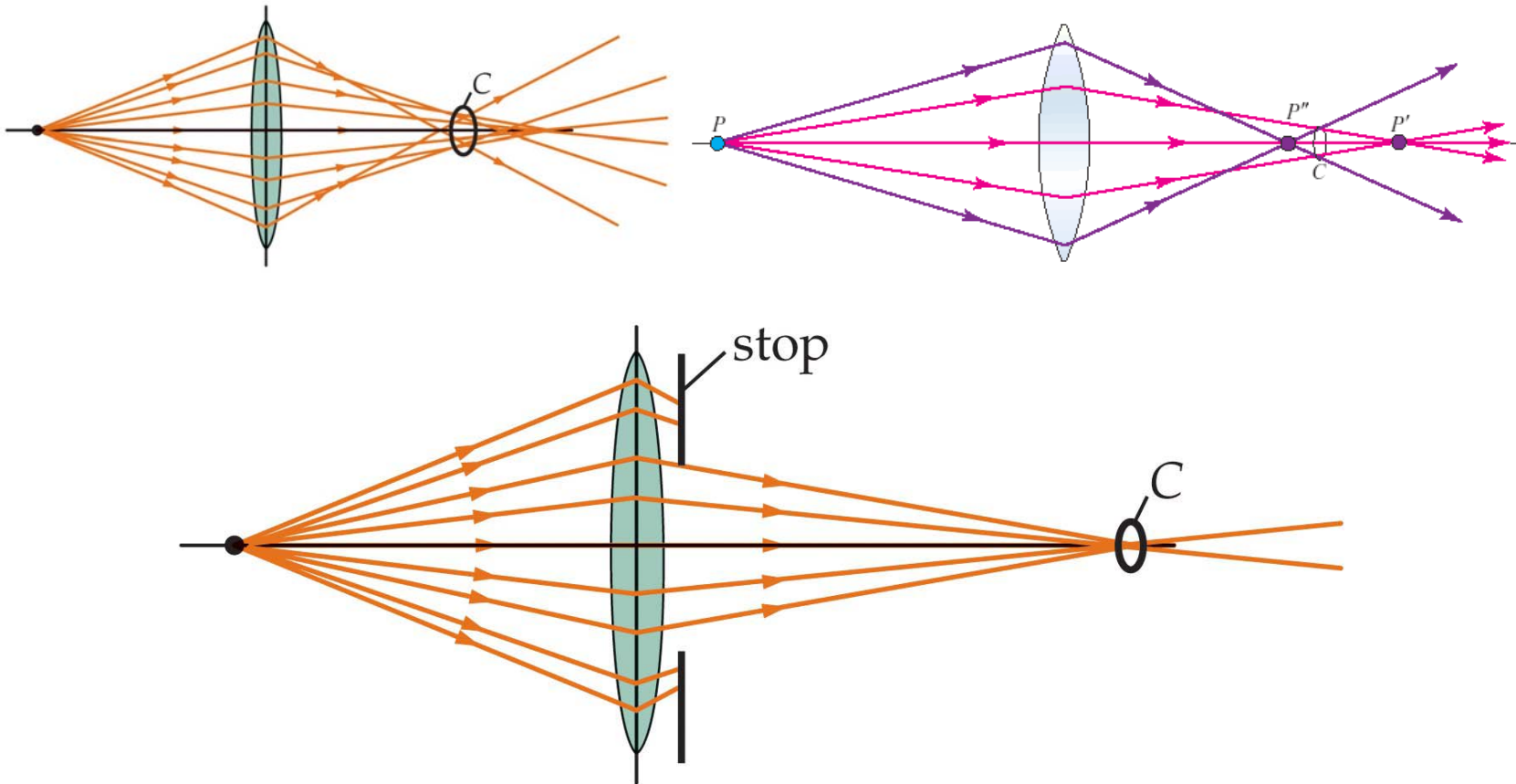
http://en.wikipedia.org/wiki/Aberration_in_optical_systems



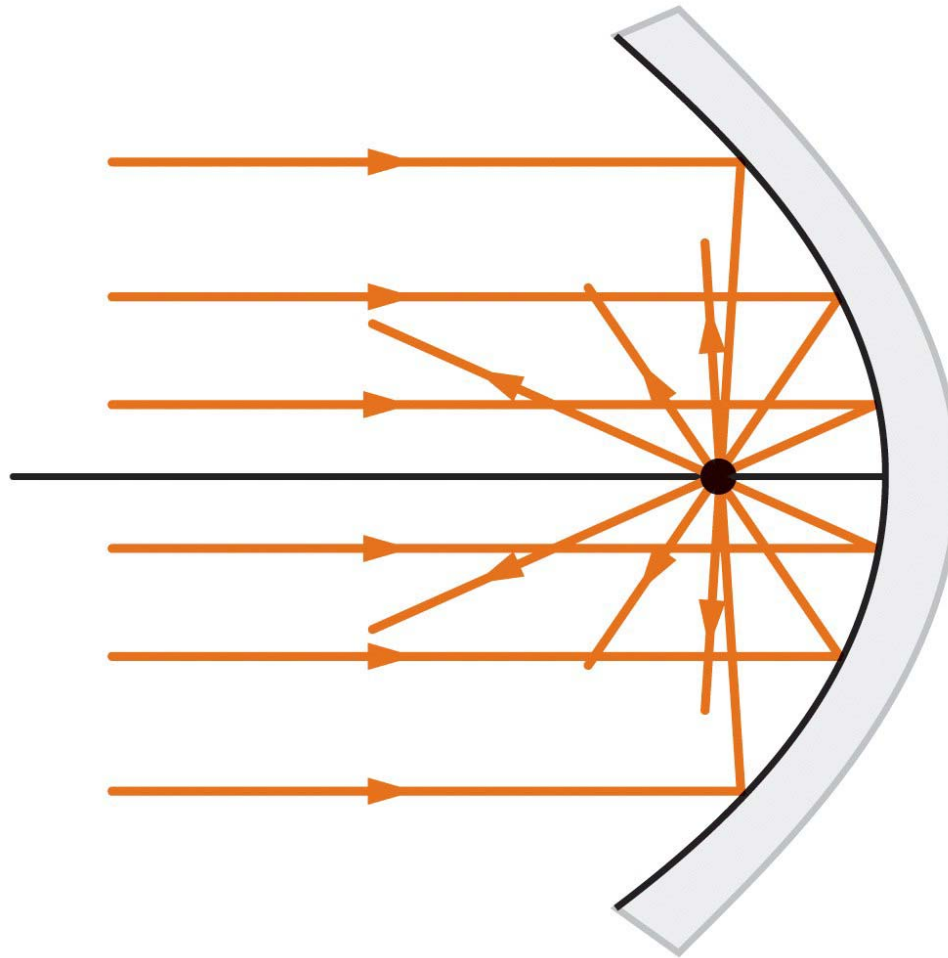


Aberração esférica

Aberração de esfericidade: distorção das imagens dadas pelas lentes ou espelhos esféricos;



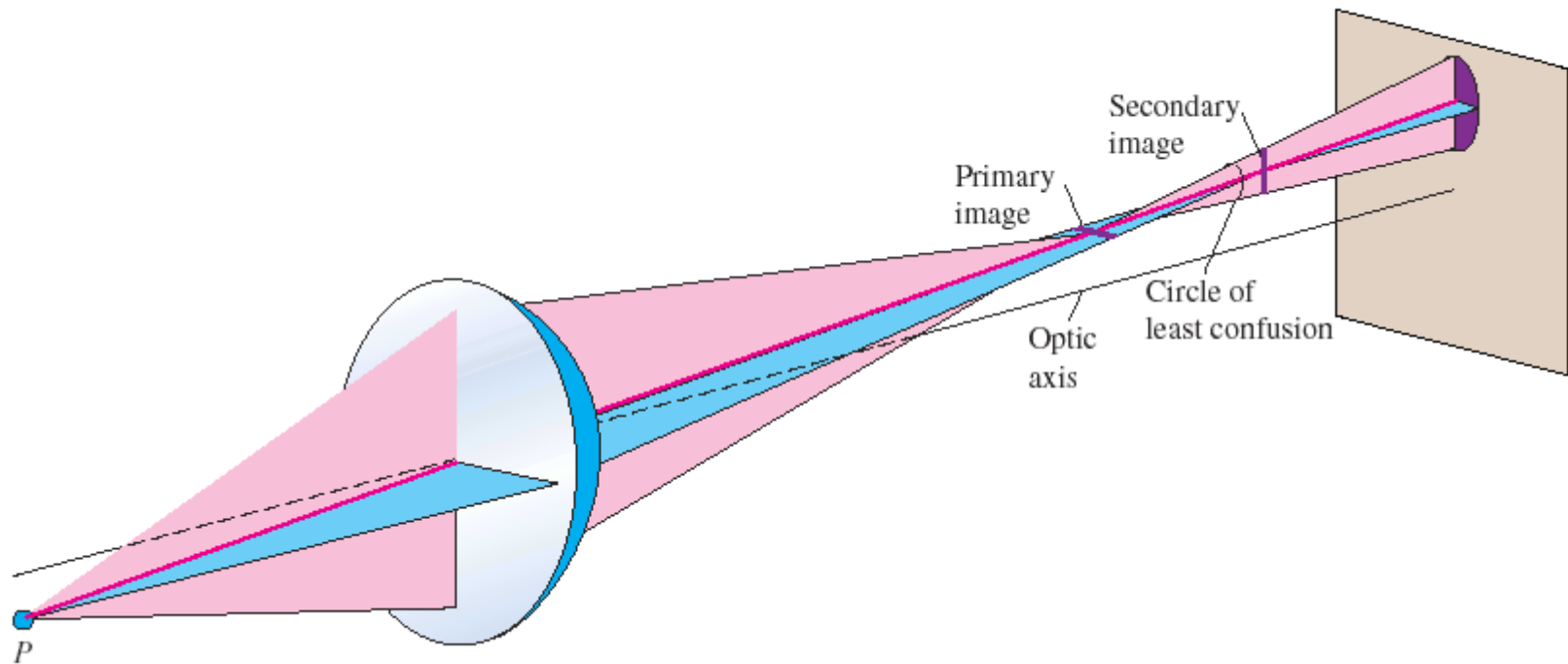
Espelho parabólico



Não produz aberração esférica: todos os raios paralelo passam pelo foco.

Astigmatismo

Astigmatismo: (fís.) ausência de estigmatismo; defeito dos sistemas ópticos que consiste em não existir um só ponto-imagem para cada ponto-objeto, e que se verifica quando a luz incide obliquamente numa superfície reflectora ou refractora; defeito de visão que consiste em o cristalino não ter a mesma distância focal para todas as secções principais. (De a- + estigmatismo)

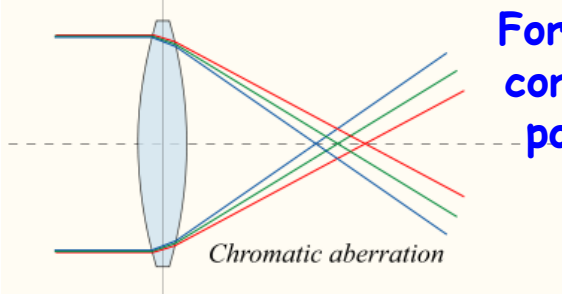


<http://en.wikipedia.org/wiki/Astigmatism>

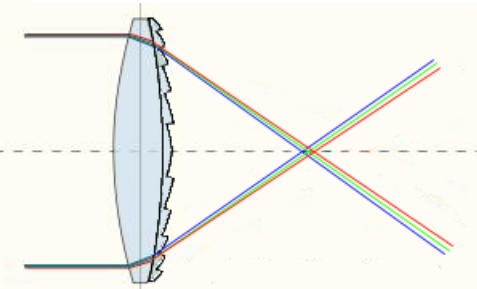
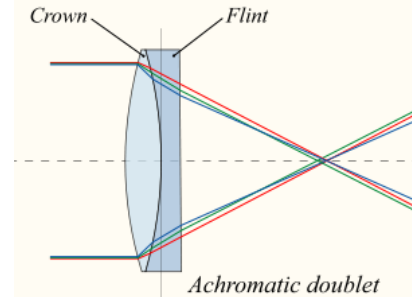


Aberrações cromáticas

Aberração cromática: formação de imagens coradas quando a luz branca atravessa as lentes, pelo facto de o índice de refração das substâncias transparentes variar com o comprimento de onda da luz incidente;



Formas de correção possíveis



Example T12.1

Chromatic aberration

A glass plano-convex lens has its flat side toward the object. The other side has a radius of curvature of 30.0 cm. The index of refraction of the glass for violet light (wavelength 400 nm) is 1.537, and that for red light (700 nm) is 1.517. The color purple is a mixture of red and violet. If a purple object is placed 80.0 cm from this lens, where are the red and violet images formed?

SOLUTION

We use the thin-lens equation in the form given by

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

In this case, using general sign rules, we have $R_1 = \infty$ and $R_2 = -30.0$ cm. For violet light ($n = 1.537$),

$$\frac{1}{80.0 \text{ cm}} + \frac{1}{s'} = (1.537 - 1) \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{-30.0 \text{ cm}} \right)$$
$$s' = 185 \text{ cm}$$

For red light ($n = 1.517$) we find $s' = 211$ cm. The violet light is refracted more than the red, and its image is formed closer to the lens. We see that a rather small variation in index of refraction causes a substantial displacement of the image.

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





Óptica Geométrica



Instrumentos ópticos





Ver mais e ver melhor

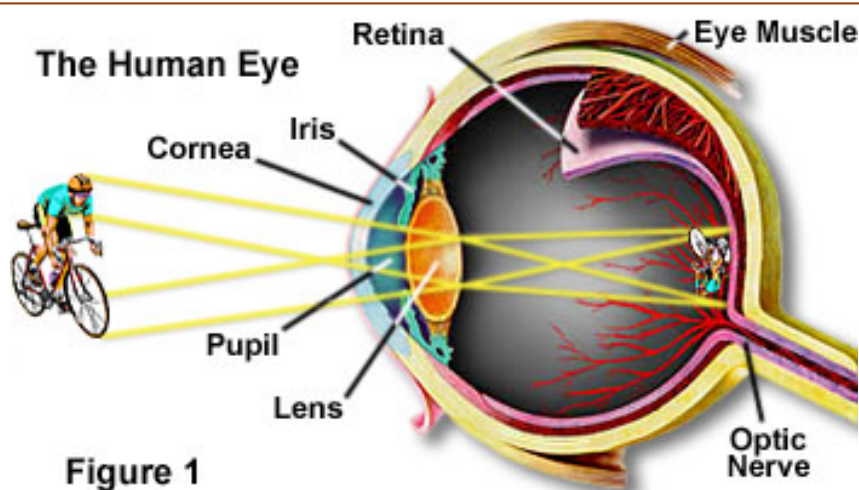
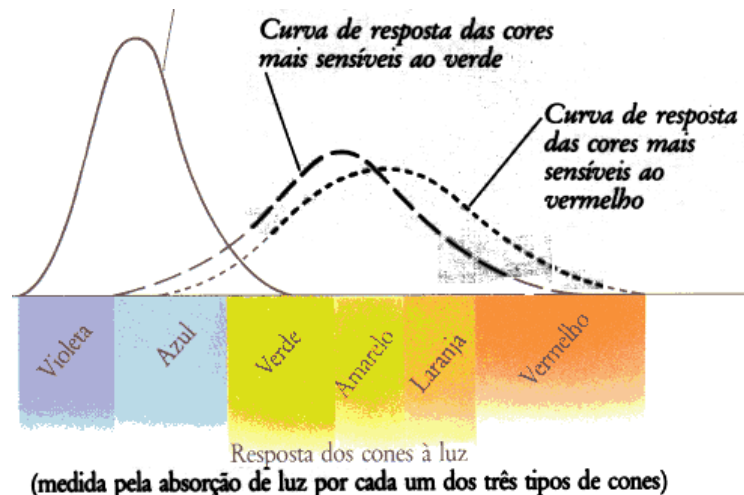


Figure 1



Nearsightedness and Farsightedness

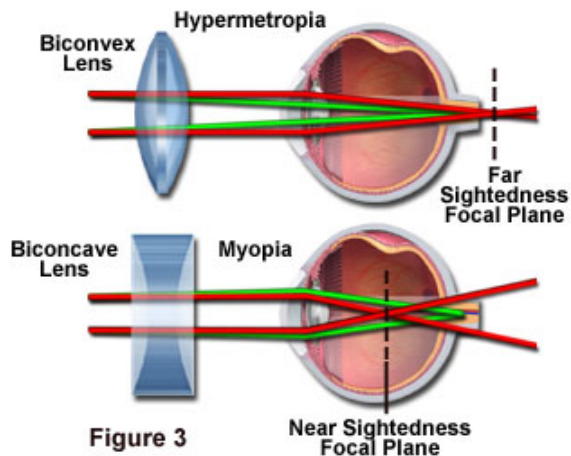
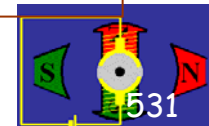
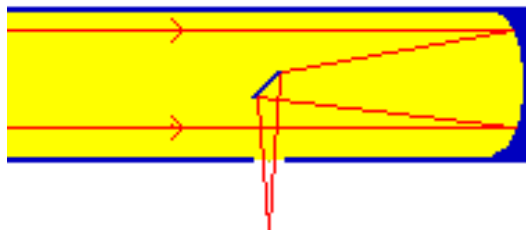
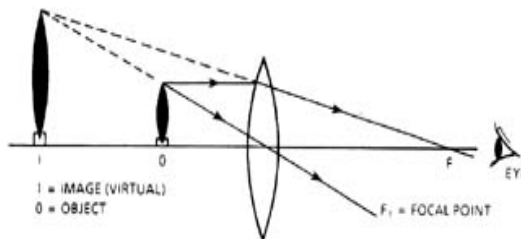
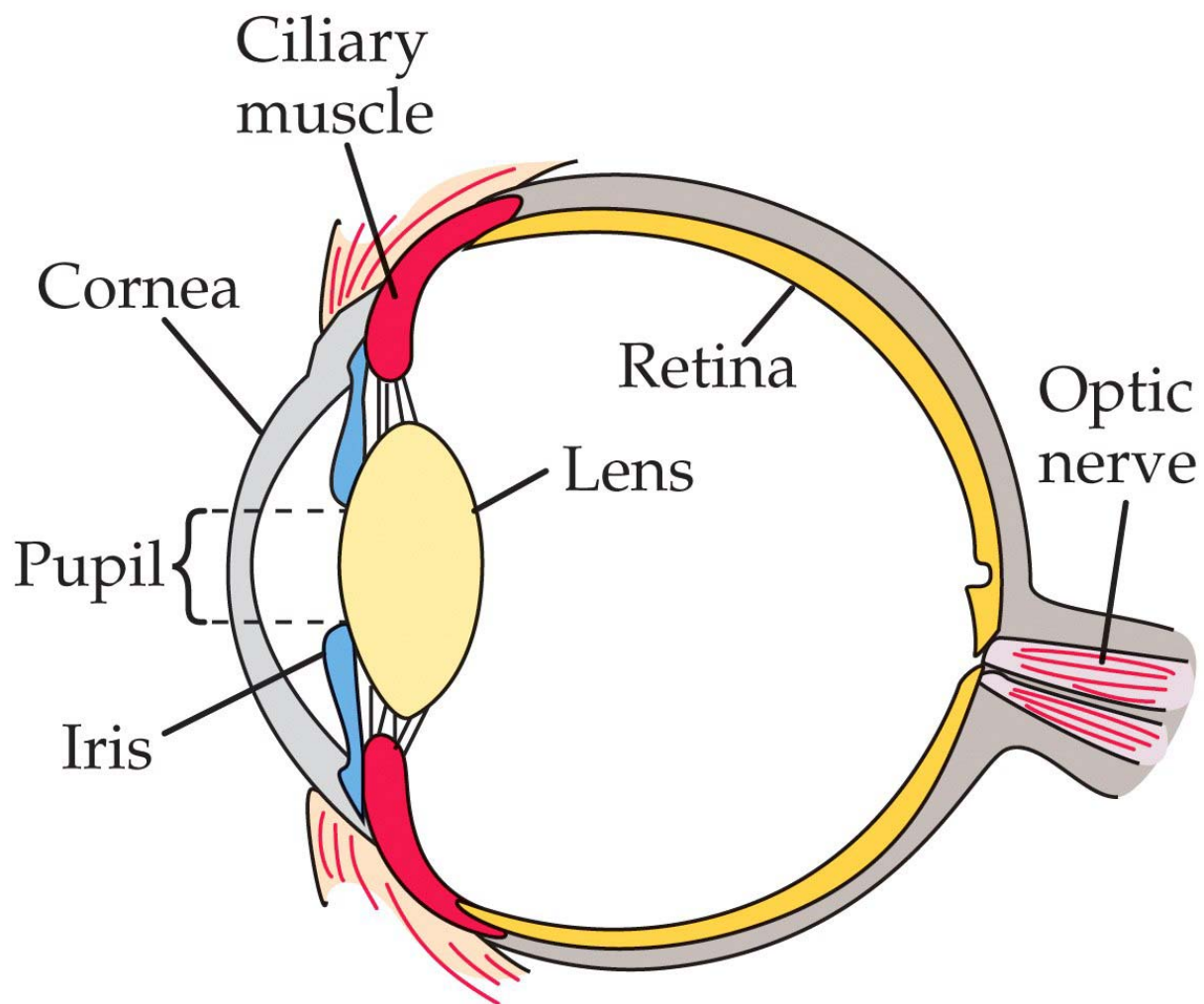


Figure 3

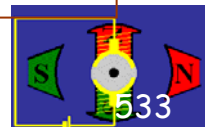
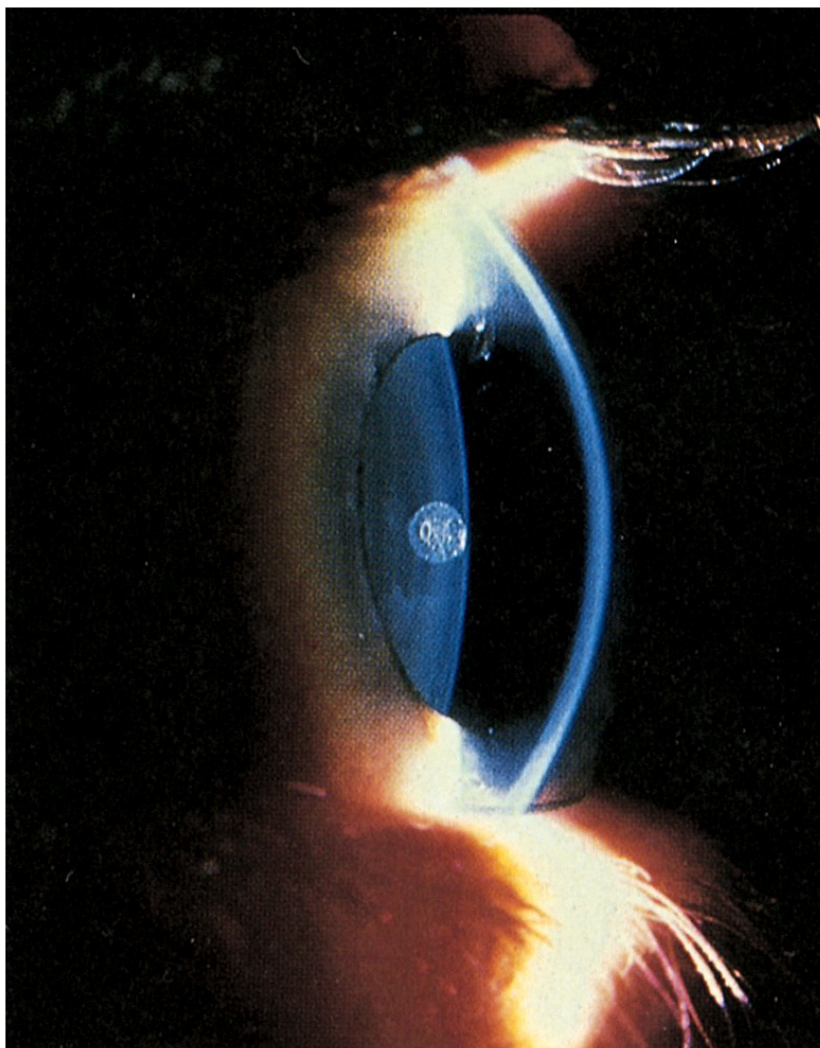


Olho



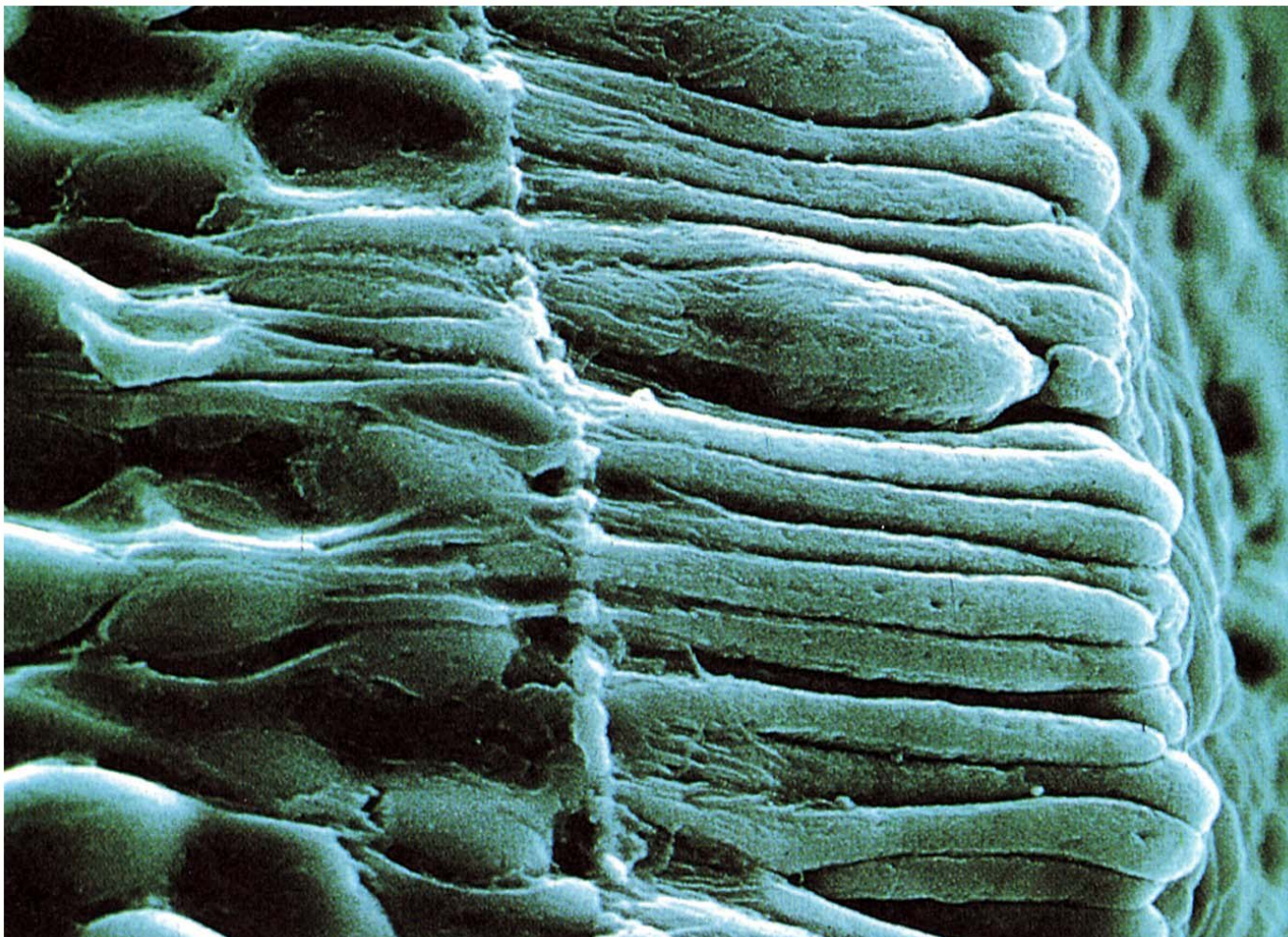


Olho humano de perfil e cristalino





Bastonetes e cones do olho

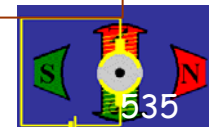
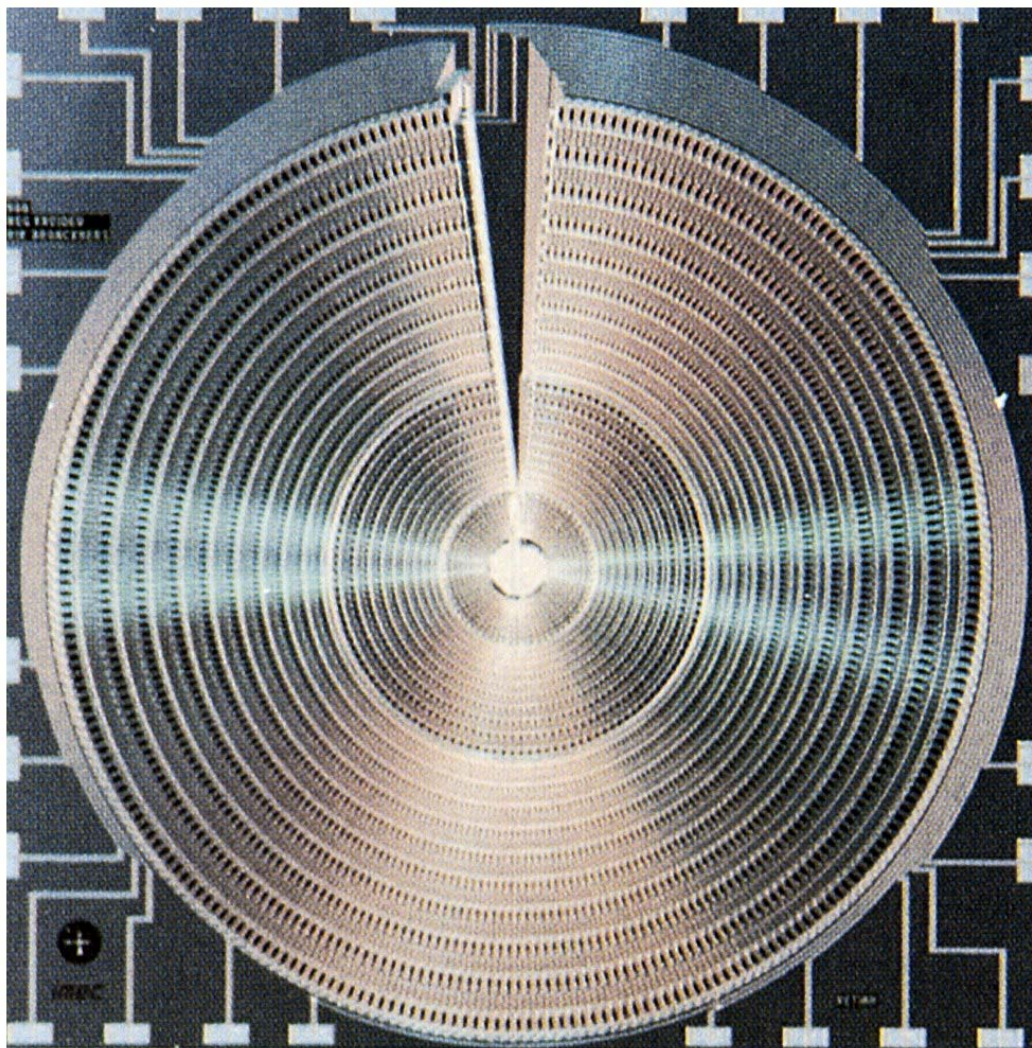


O olho tem cerca de 120 milhões de bastonetes e 7 milhões de cones.





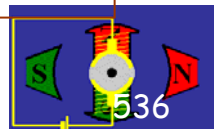
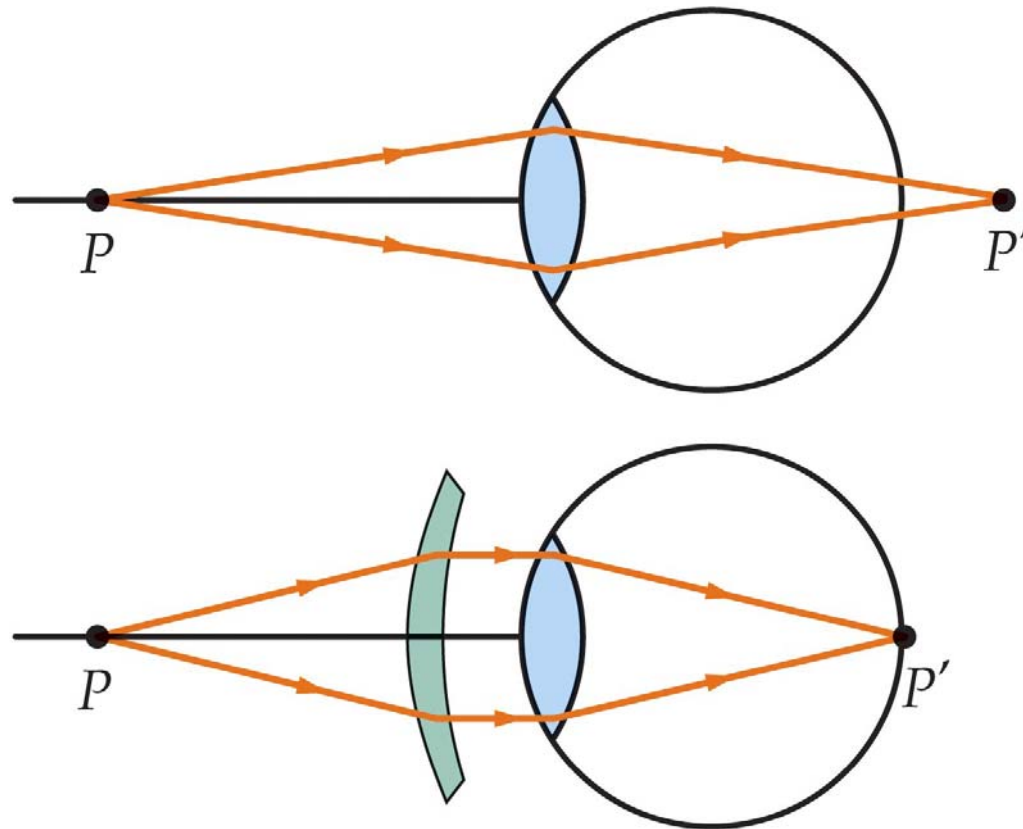
Rede neural para simular o olho humano





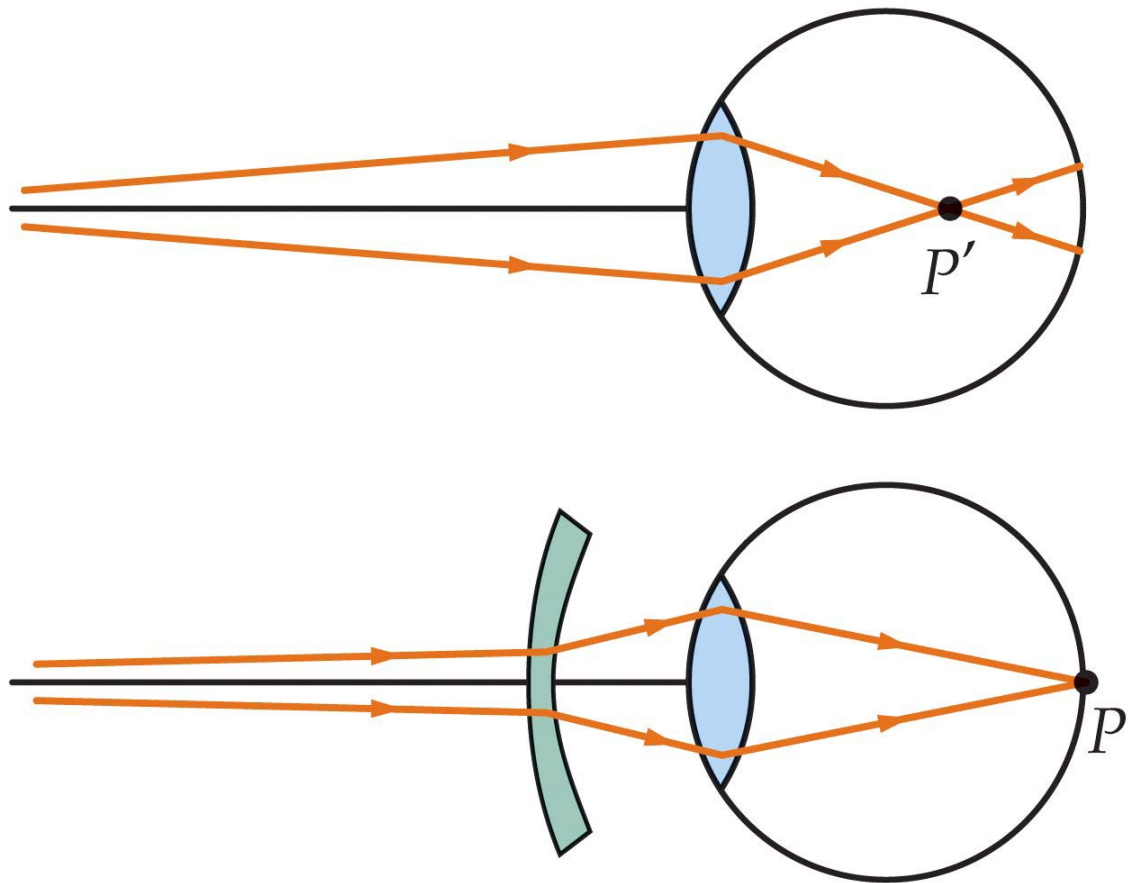
Hipermetropia

Hipermetropia: s. f. (medic.) defeito da visão, geralmente devido a insuficiente convergência do cristalino, caracterizado pela formação da imagem dos objectos, considerados no infinito (óptico), para além da retina; o m. q. hiperopia. (De hipermetrope + -ia)



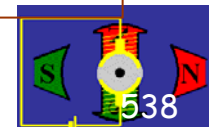
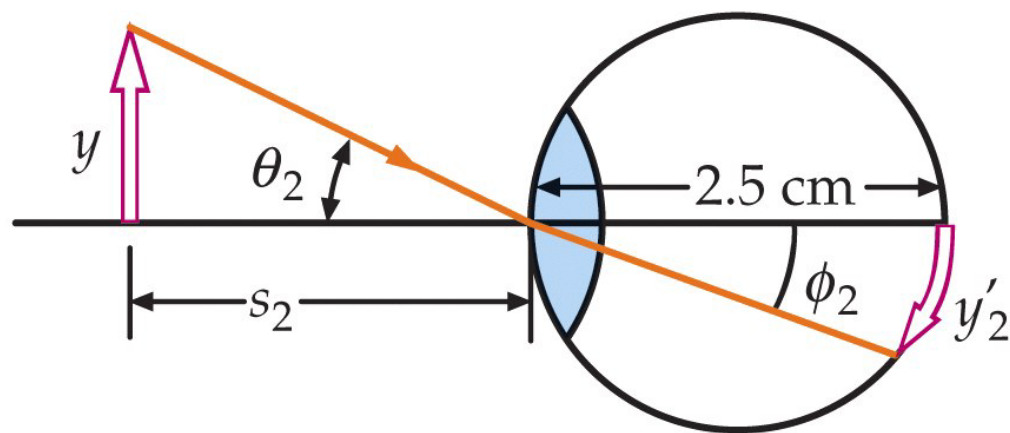
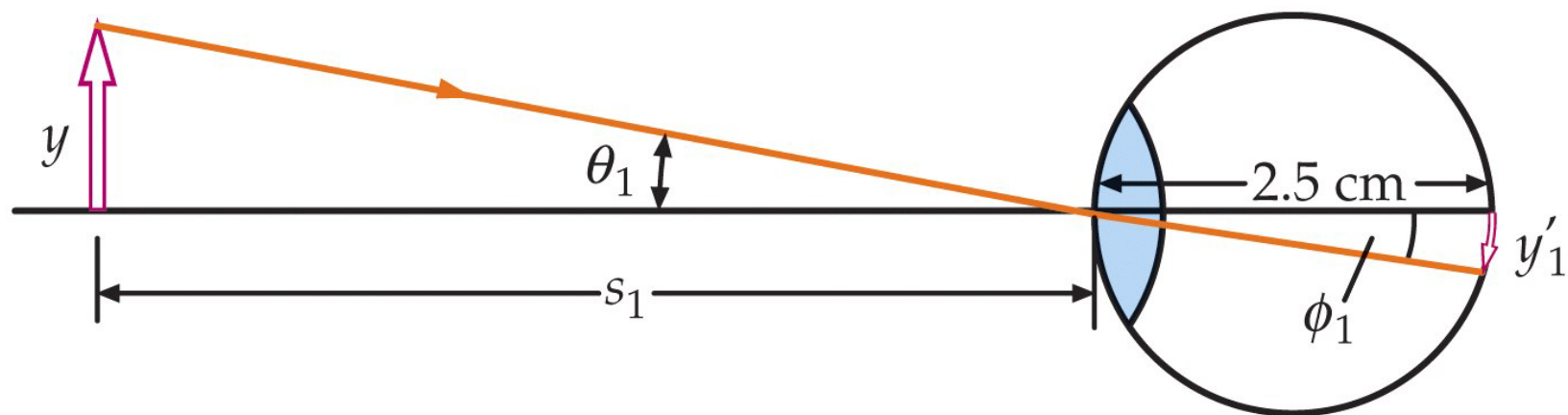
Miopia

Miopia: anormalidade visual que só permite ver com nitidez os objectos a uma distância menor que a normal (Do gr. myopía, «id.»)





Formação de imagens pelo olho

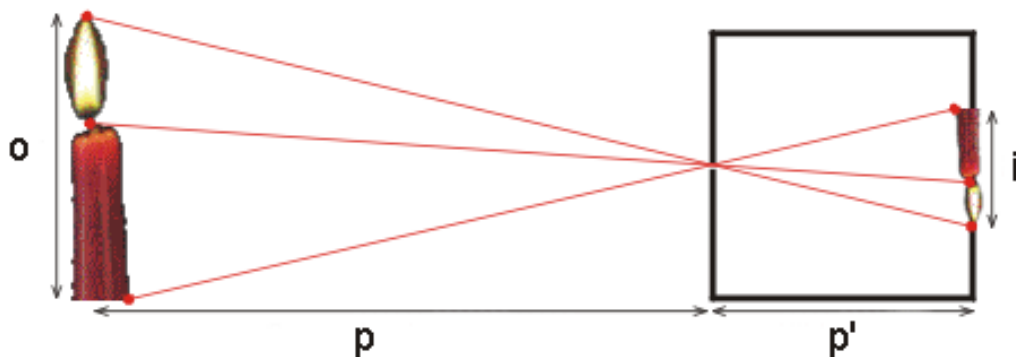
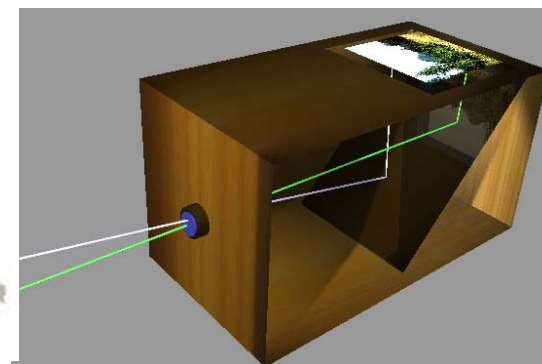
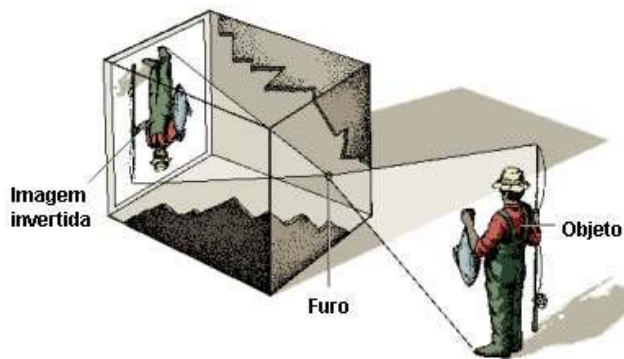
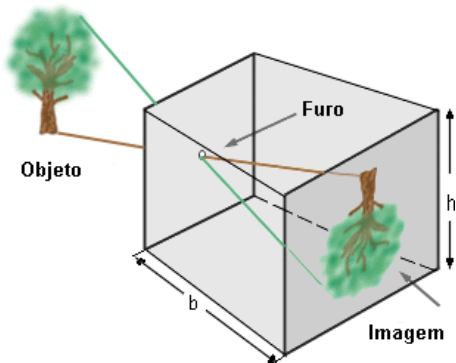




Câmara escura

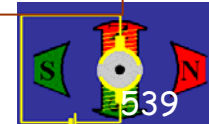
Câmara escura: (fís.) caixa paralelepipedica, com um orifício numa face, usada em física experimental para provar a propagação rectilínea da luz;

Câmara clara: (fís.) dispositivo adaptável aos microscópios, que permite desenhar o que se observa, por um processo semelhante ao decalque;



$$\frac{o}{p} = \frac{i}{p'}$$

o : tamanho do objecto; i : tamanho da imagem;
 p : distância do objecto à câmara; p' : distância da imagem à câmara



Câmara fotográfica

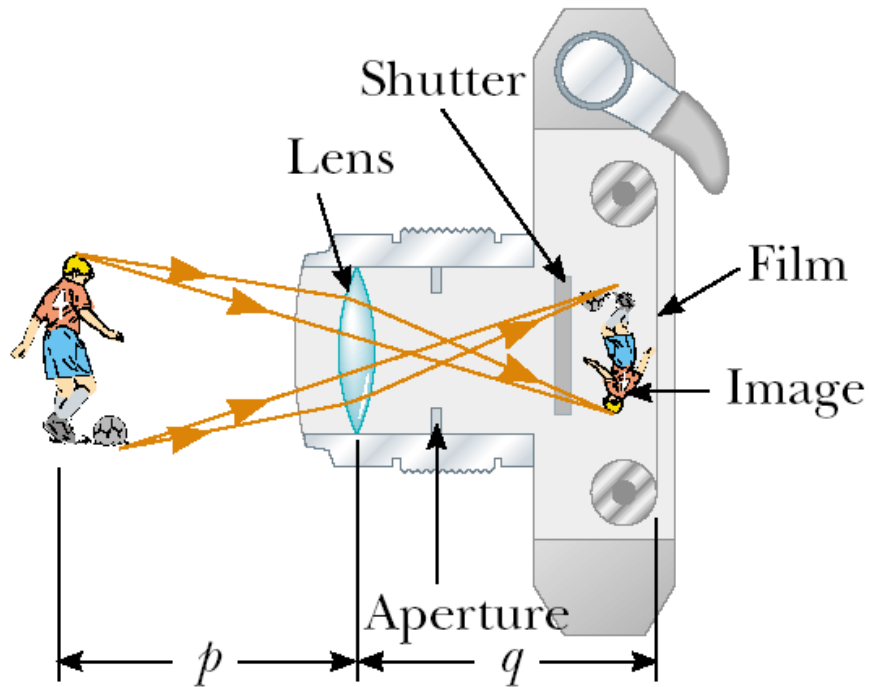


Figure 36.36 Cross-sectional view of a simple camera. Note that in reality, $p \gg q$.

O número- f , $f/\#$, também representado N :

$$f\text{-number} \equiv \frac{f}{D}$$

Intensidade da luz incidente no filme

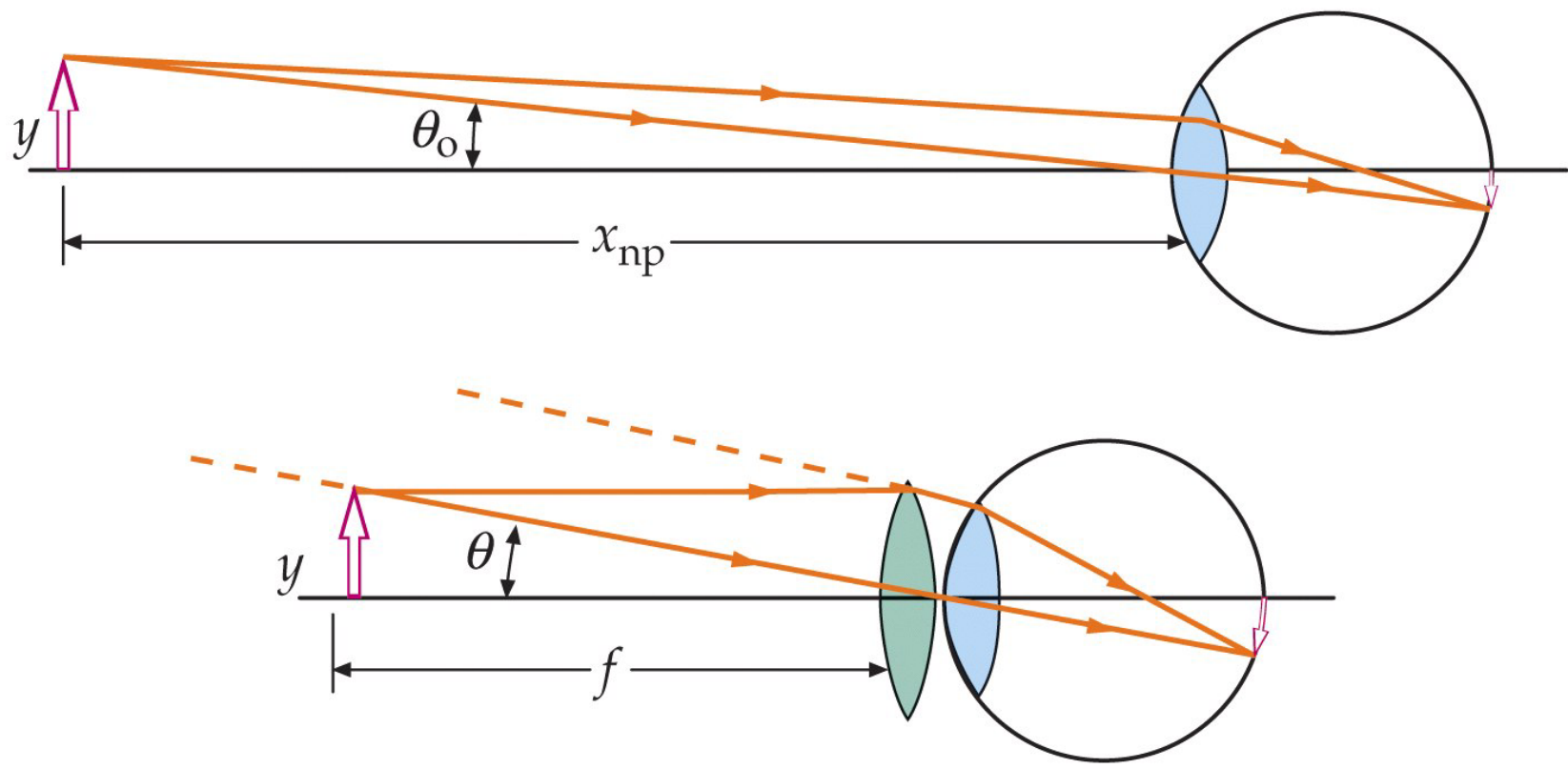
$$I \propto \frac{1}{(f/D)^2} \propto \frac{1}{(f\text{-number})^2}$$

onde f representa a distância focal e D é o diâmetro da pupila de entrada.

<http://en.wikipedia.org/wiki/F-number>



Lupa

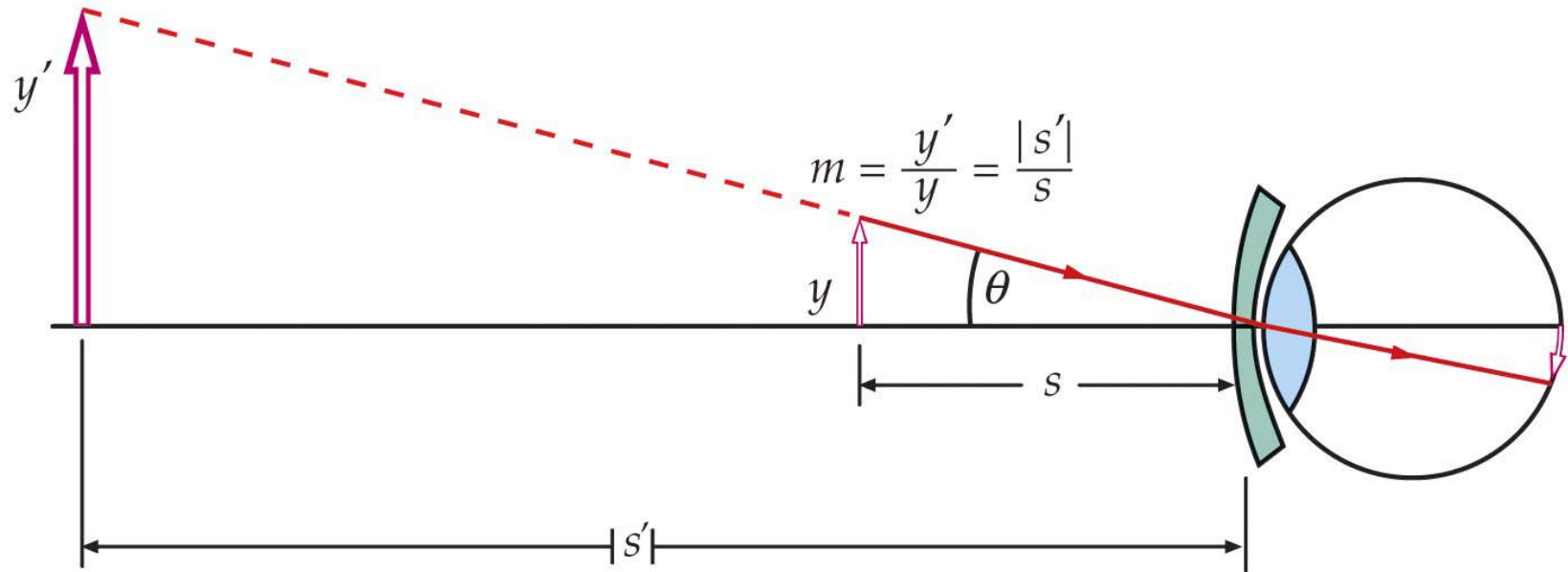


<http://en.wikipedia.org/wiki/Loupe>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lupa> http://en.wikipedia.org/wiki/Magnifying_glass



Lupa (2)



Poder de ampliação da lupa

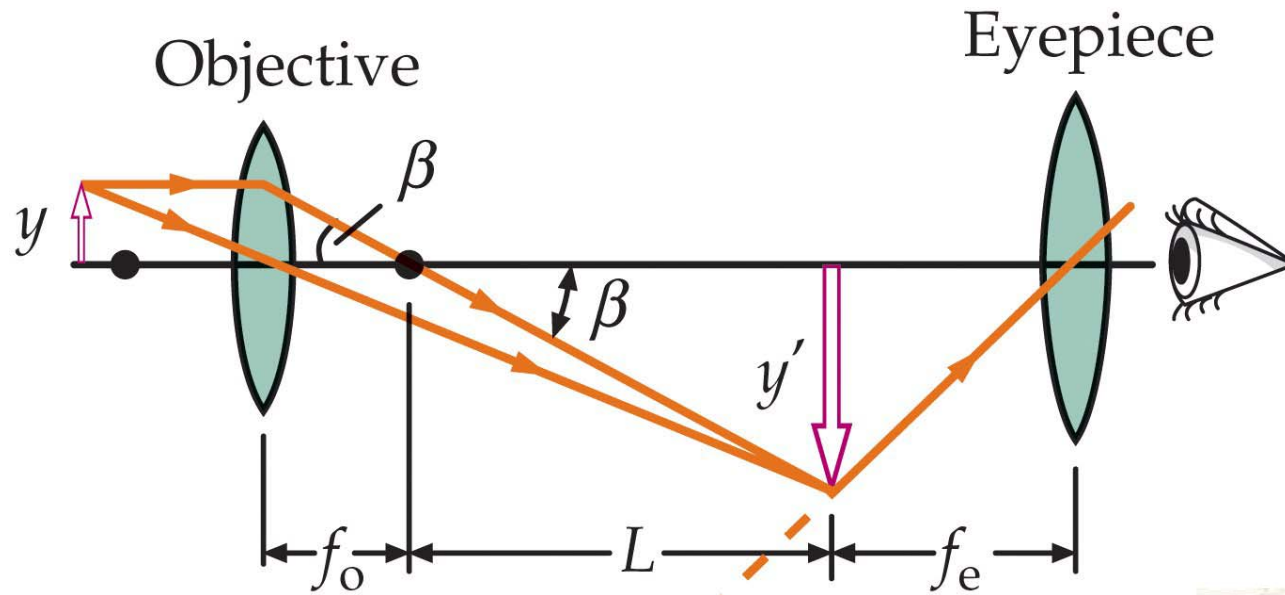
$$m_{\min} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{25 \text{ cm}}{f}$$



A simple magnifier, also called a magnifying glass, is used to view an enlarged image of a portion of a map.



Microscópio composto



$$M = m_o M_e = -\frac{L}{f_o} \frac{x_{np}}{f_e}$$

Poder ampliador do microscópio composto

x_{pp} : distância do ponto próximo da pessoa, ~25 cm

L : comprimento do tubo

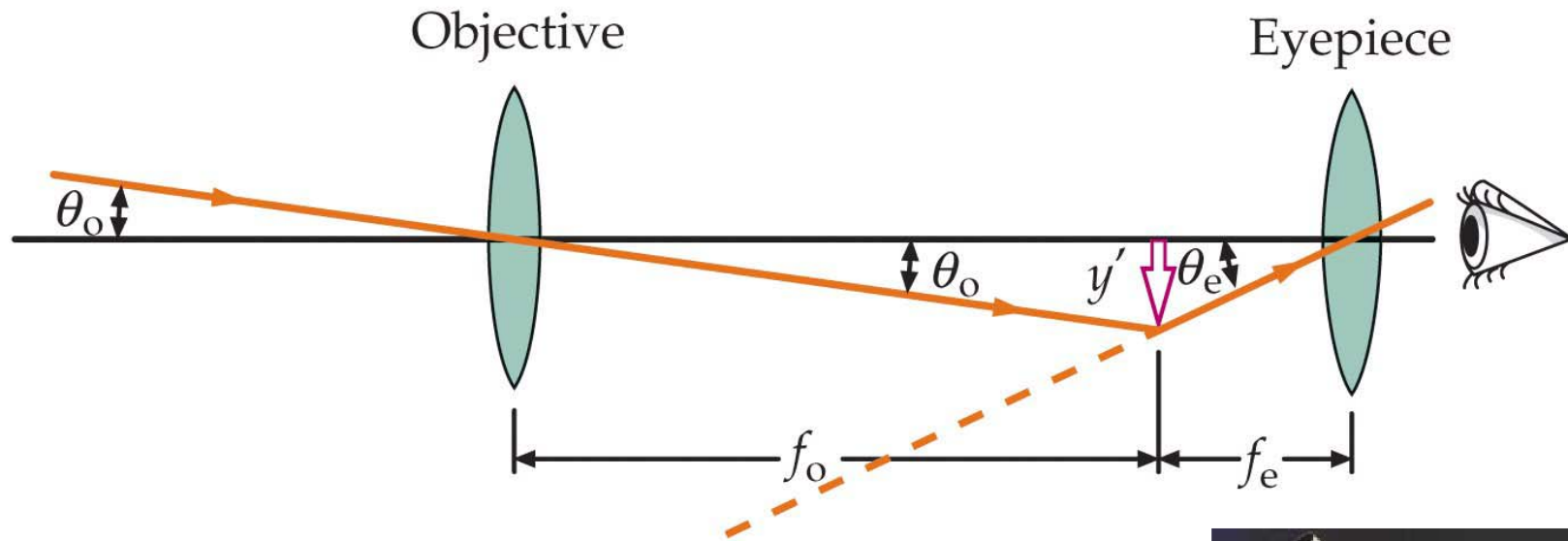


© Tony Freeman/Photo Edf





Telescópio



Poder ampliador de um telescópio

$$M = \frac{\theta_e}{\theta_o} = -\frac{f_o}{f_e}$$





Telescópios refractores

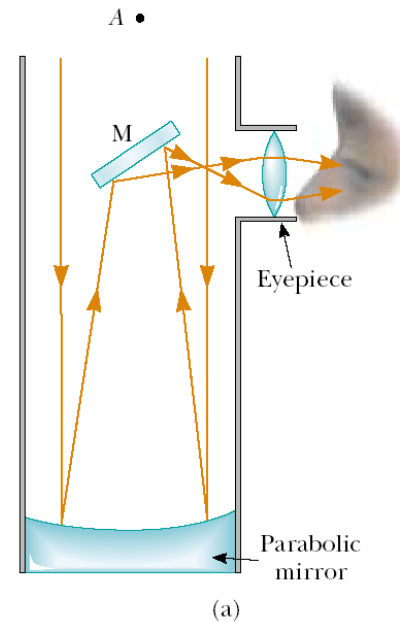
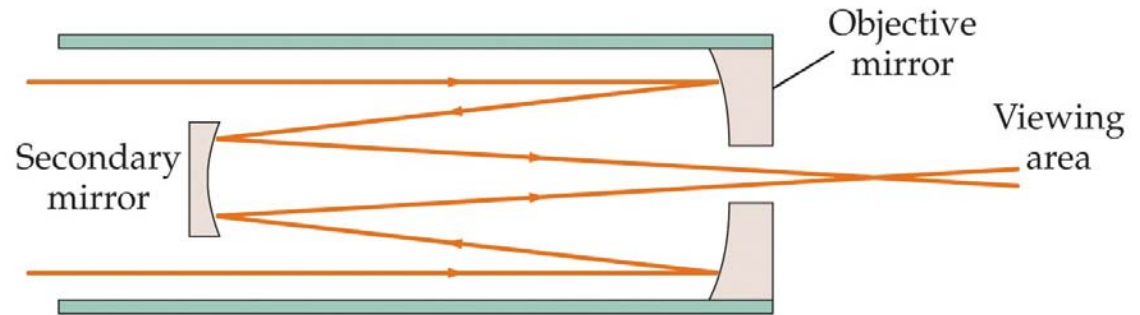
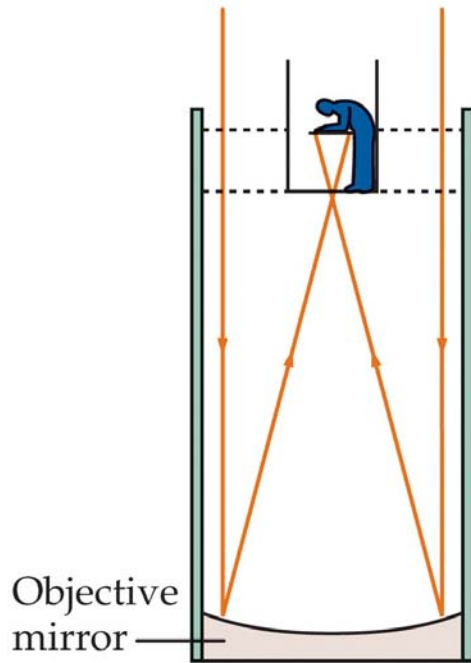
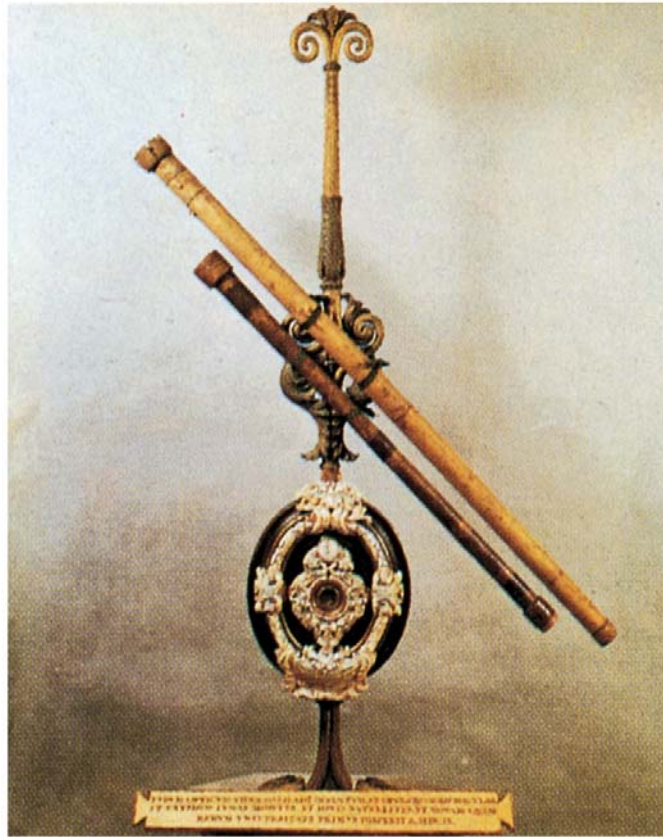


Figure 36.46 (a) A Newtonian-focus reflecting telescope. (b) A reflecting telescope. This type of telescope is shorter than that in Figure 36.45b.



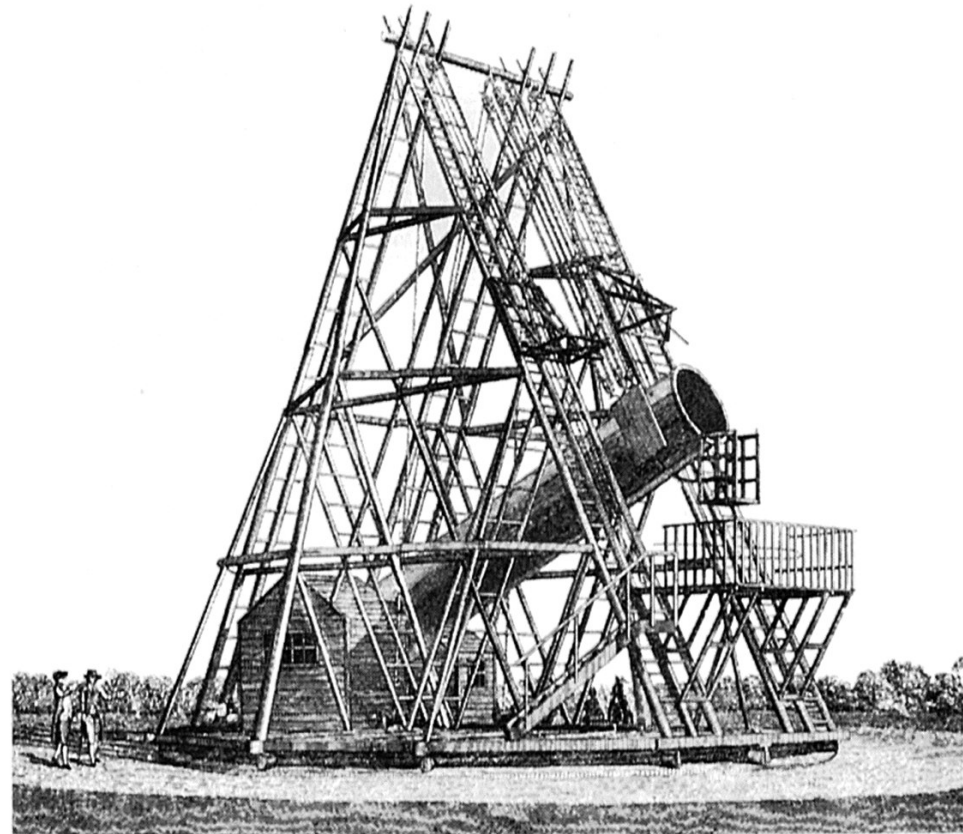


Telescópios históricos



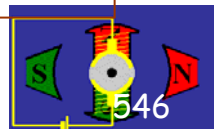
Telescópio usado por Galileu para observar Júpiter e as suas luas, a Lua, etc.

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



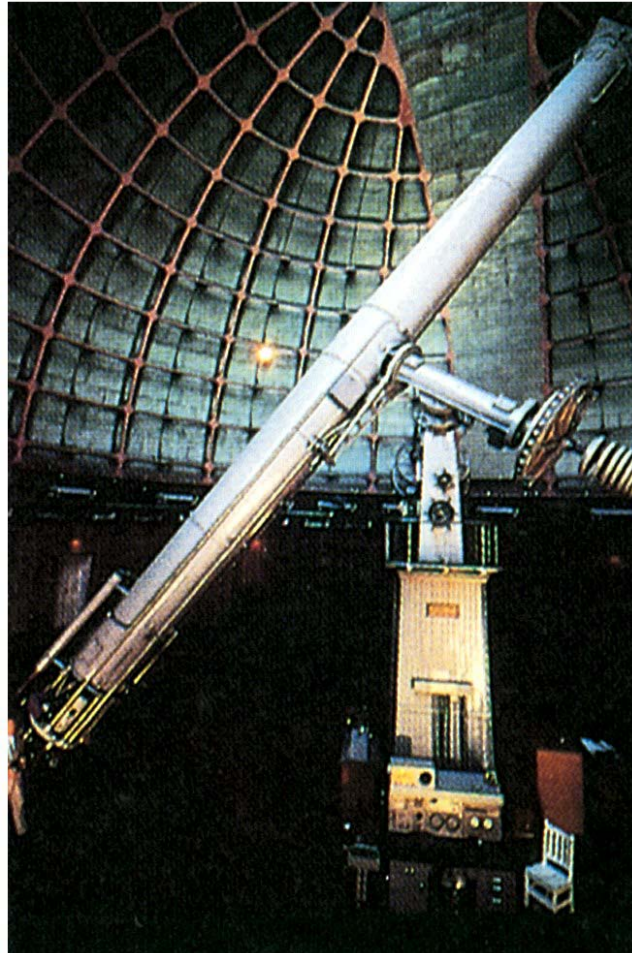
Friedrich Wilhelm Herschel

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

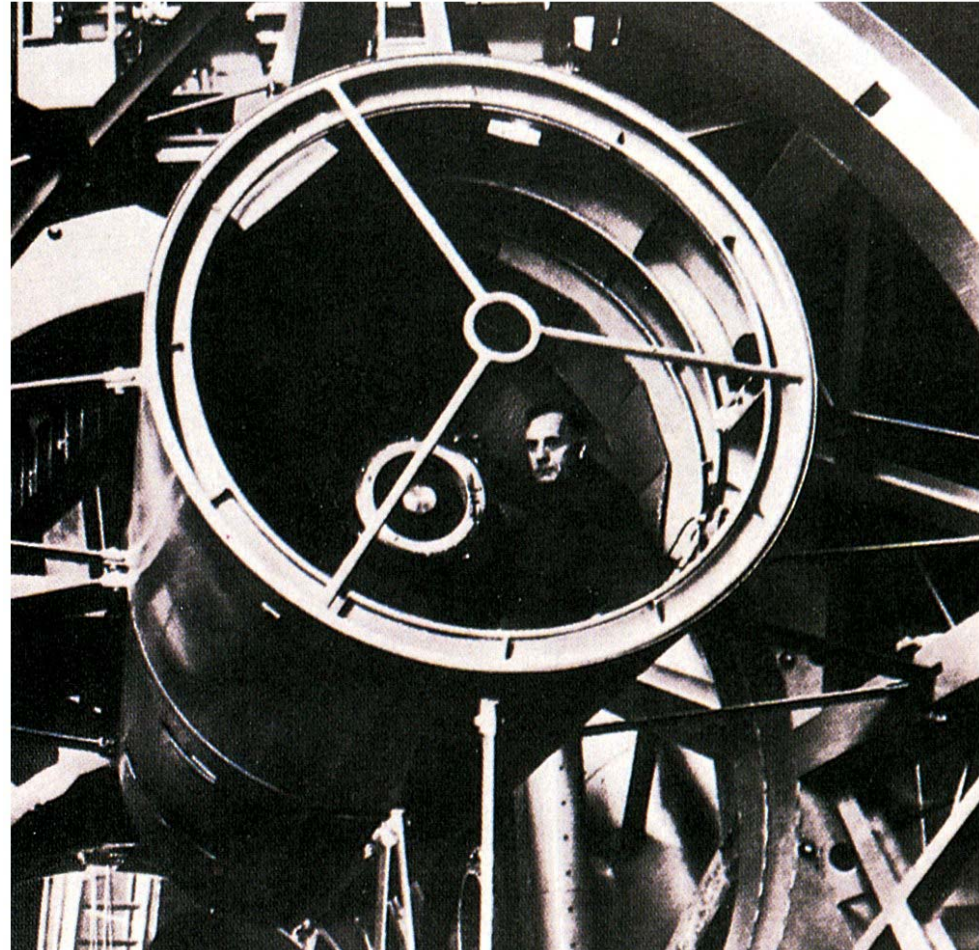




Telescópios históricos (2)



Telescópio refractor
de 91,4 cm



Edwin Powel Hubble





Telescópio de Arecibo

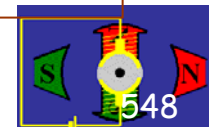


O Radiotelescópio de Arecibo é o maior radiotelescópio fixo do mundo, e localiza-se em Arecibo, Porto Rico. Sua antena parabólica gigante tem 305 metros de diâmetro e foi construída originalmente em 1963, na cratera de um vulcão extinto, para estudar a ionosfera terrestre. É operado pela Univ. de Cornell, e é actualmente a principal ferramenta na busca de vida extraterrestre, através do projecto SETI@home.

<http://www.naic.edu/index.htm>

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

http://pt.wikipedia.org/wiki/Radiotelesco%C3%B3pio_de_Arecibo





Telescópio modernos



Grande Telescópio das Canárias, com um espelho principal de 10,4 metros, é um dos maiores telescópios do mundo para o visível e infravermelho.



Observatório Keck,
Mauna Kea, Havaí

http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_dos_maiores_telesc%C3%B3pios_%C3%B3ticos_refletores





Telescópio espacial Hubble

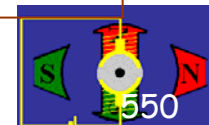


http://pt.wikipedia.org/wiki/Telesc%C3%B3pio_espacial_Hubble

[Scenes from the Hubble](#)

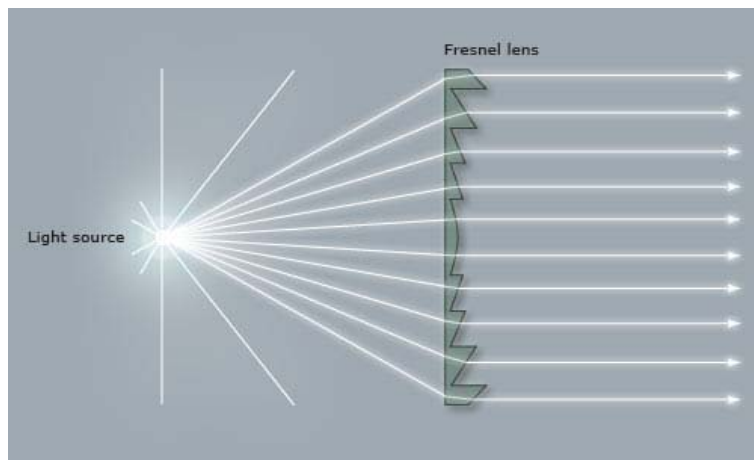
<http://www.spacetelescope.org/> [Telescópio Espacial Hubble](#)

<http://glast.gsfc.nasa.gov/> <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=telescopio-glast-vai-captar-as-maiores-explosoes-do-universo>





Lentes de Fresnel



Uma **lente Fresnel** é um tipo de lente inventada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel. Criada originalmente para uso em faróis, o seu desenho possibilita a construção de lentes de grande abertura e curta distância focal sem o peso e volume do material que seriam necessários com uma lente convencional. Comparadas a estas, as lentes de Fresnel são bem mais finas, permitindo a passagem de mais luz, e assim os faróis com elas equipados são visíveis a distâncias muito maiores. As **Lentes Fresnel** estão presentes também na grande maioria dos sensores de movimento do tipo infra-vermelho, os chamados pirosensores, que utilizam esta lente para aumentar sua área de percepção.



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

<http://br.geocities.com/saladefisica5/leituras/fresnel.htm>





•

Interferência

Interferência: acto de interferir; intervenção; qualidade de interferente; fenómeno que se dá quando se combinam dois ou mais movimentos vibratórios;

Interferência de luz: fenómeno que se dá quando se combinam dois feixes luminosos coerentes, que provenham, portanto, da mesma fonte luminosa. (Do ing. interference, «id.»)

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

<http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Interferometers>

<http://www.ligo.caltech.edu/>

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

<http://lisa.nasa.gov/>





Fenómenos de interferência

Os fenómenos de interferência óptica não são explicáveis no quadro de um modelo meramente corpuscular. As perturbações ópticas parecem ser soluções de uma equação de derivadas parciais de segunda ordem, linear e homogénea. As soluções desta equação de onda satisfazem o **princípio de sobreposição**, segundo o qual o campo eléctrico total E , em qualquer ponto do espaço em que duas ou mais ondas se sobrepõem, é igual à soma vectorial das ondas intervenientes.

A interferência óptica consiste pois na interacção entre duas ou mais ondas luminosas, com geração de um padrão em que a irradiância total difere da soma das irradiâncias individuais.

No que se segue serão considerados dois tipos de **interferómetros** (instrumentos ópticos baseados na interferência de ondas luminosas): **interferómetros de divisão de frente de onda** e **interferómetros de divisão de amplitude**.

No primeiro caso, partes distintas da frente de onda primária permitem gerar ondas secundárias, quer directamente, quer com o auxílio de sistemas ópticos adicionais; estas ondas secundárias são feitas interferir posteriormente.

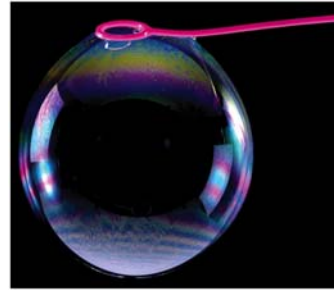
Nos interferómetros por divisão de amplitude, a própria onda primária dá origem a duas ondas com a mesma estrutura que se propagam ao longo de trajectórias distintas e que, uma vez sobrepostas, interferem.

Para que duas fontes luminosas provoquem um padrão de interferência é necessário que a diferença de fase entre as duas frentes de onda seja constante.





Exemplos de interferência da luz na Natureza



Soap Bubble Interference Colors

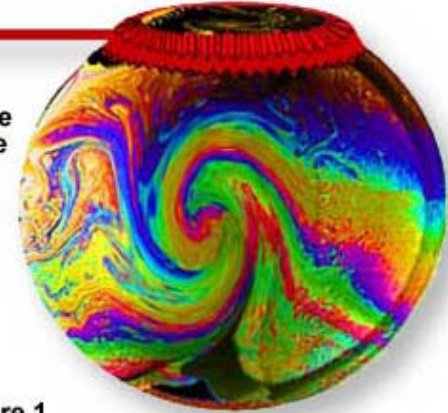
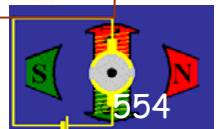


Figure 1



OPALA IRIDISCENTE





Interferência e difracção

Um corpo opaco colocado entre uma fonte ondulatória pontual e um alvo, projecta sobre o alvo uma sombra constituída por regiões claras e escuras. Este efeito pode ser demonstrado facilmente iluminando um lápis com uma fonte pontual (p. ex. uma lâmpada de alta potência a irradiar através de um pequeno orifício) ou, em certas situações, na sombra projecta pela mão directamente iluminada pelo Sol. Este comportamento designado por **difracção** não é explicável pelas leis da óptica geométrica. Ocorre difracção sempre que a fase ou a amplitude de parte da frente de onda se altera, após interacção com obstáculos. Os vários segmentos da frente de onda que se propagam para além do obstáculo interferem, dando origem a uma distribuição particular de energia, correntemente designada padrão de difracção. A primeira referência à difracção foi publicada por Francesco Grimaldi, no séc. XVII, que designou por "diffractio".

Interferência de ondas é um fenómeno que se dá quando se combinam dois feixes ondulatórios coerentes, que provenham, portanto, da mesma fonte ondulatória.

A interferência e a difracção são dois fenómenos que distinguem as propriedades ondulatória de um sistema das propriedades corpusculares desse ou de outro sistema. *Na verdade não existe uma distinção física significativa entre interferência e difracção.* No entanto é corrente falar-se de interferência quando se considera a sobreposição de um número reduzido de ondas, reservando-se a difracção para os casos em que o número de ondas é elevado. Porém, continua-se a falar em interferência de feixes em certos contextos como, por exemplo, a difracção da luz por uma rede de difracção.





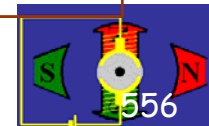
Princípio de Huygens-Fresnel

Uma vez que qualquer "instrumento" óptico só utiliza parte de qualquer frente de onda incidente, os efeitos de difracção-interferência são de grande relevância no seu funcionamento. Assim, é fundamental conhecer o comportamento difractivo dos componentes que formam o instrumento (lentes, diafragmas, fendas, espelhos, etc.). Na ausência total de aberrações, a definição de uma imagem formada por um sistema óptico é limitada apenas por difracção.

O princípio de Huygens pode ser utilizado numa primeira abordagem dos fenómenos da difracção. Contudo, é insuficiente para contabilizar todos os detalhes do processo de difracção. De acordo com o princípio de Huygens, ondas sonoras e ondas luminosas perante os mesmo obstáculos deveriam provocar efeitos semelhantes, pois o princípio em nada depende do comprimento de onda do fenómeno ondulatório. Porém, no caso da luz observam-se sombras muito bem definidas. Esta deficiência foi corrigida por Fresnel, que introduziu o **conceito de interferência**.

O princípio de Huygens-Fresnel propõe que cada ponto de uma frente de onda não obstruída constitui, em qualquer instante, uma frente de ondas esféricas secundárias (com a mesma frequência da onda primária); a amplitude do campo óptico em qualquer ponto do espaço é dada pela sobreposição de todas essas ondas (tendo em conta as suas amplitudes e fases relativas).

Embora não *complemente exacta*, a teoria de Huygens-Fresnel é satisfatória para a análise da grande maioria dos fenómenos ópticos de difracção. Teorias mais rigorosas foram desenvolvidas por Kirchhoff e por Sommerfeld no final do sec. XIX.





Diferença de fase e coerência

Para que duas fontes luminosas provoquem um padrão de interferência é necessário que a diferença de fase entre as duas frentes de onda seja constante - ondas coerentes.

A coerência temporal de uma fonte é uma medida do intervalo de tempo ao longo do qual o campo luminoso varia harmonicamente, isto é a sua fase é constante. Coerência é a propriedade que certos estados do tipo ondulatório (ondas) possuem, que lhe permitem originar o fenómeno de interferência.

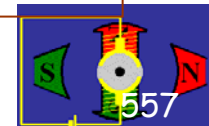
A propriedade de coerência está na base de fenómenos como a holografia, *array* de antenas, tomografia óptica coerente, e telescópios interferométricos e radio-telescópios.

Resultado obtido anteriormente, de grande importância para o estudo da interferência e da difracção: *Diferença de fase devida à reflexão - se a luz propagando-se num dado meio incide na superfície um meio na qual se propaga com menor velocidade, a componente reflectida sofre uma variação de fase de π (180°).*

<http://www.ligo.caltech.edu/>

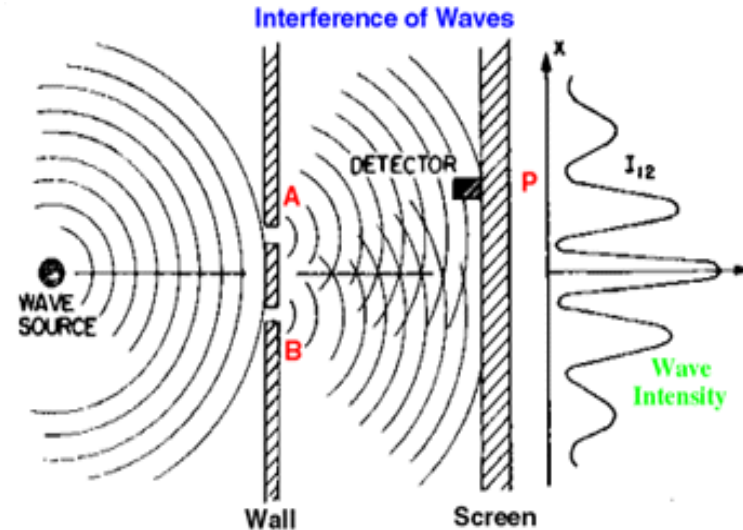
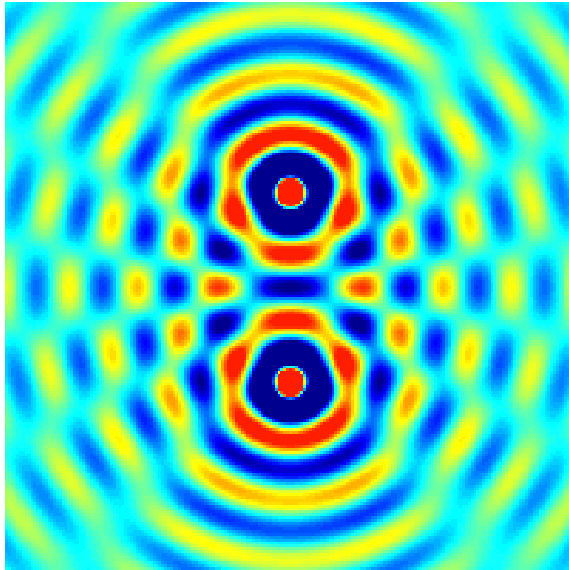
http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_interferometry

<http://lisa.nasa.gov/>





Experiência de Young da dupla fenda (1801)



<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/Doubleslitexperiment.wmv>

<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/wave-interference.jar>

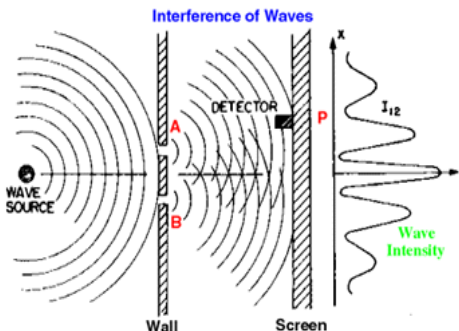
Considerem-se duas fontes pontuais A e B de onda monocromáticas com a mesma frequência, num meio homogéneo. A separação entre as fontes é a, suposta muito maior que o comprimento de onda, λ . As frentes de onda com origem em A e B, E_A e E_B , sobrepõem-se no ponto P do ecrã. O princípio da sobreposição permite concluir que o campo eléctrico total num ponto arbitrário do espaço, a partir dos campo individuais gerados por fontes independentes:

$$\vec{E}_P(r, t) = \vec{E}_A(\vec{r}, t) + \vec{E}_B(\vec{r}, t)$$





Sobreposição de duas frentes de onda



$$\vec{E}_A(\vec{r}, t) \equiv \vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1)$$

$$\vec{E}_B(\vec{r}, t) \equiv \vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2)$$

$$\vec{E}_P(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t)$$

A irradiância em P é dada por: $I_P(r) \propto \langle \vec{E}_P^2 \rangle = \langle \vec{E}_1^2 \rangle + \langle \vec{E}_2^2 \rangle + 2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$

A última parcela $I_{12} = 2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$ corresponde ao termo de interferência.

Desenvolvendo o produto interno do termo de interferência obtém-se:

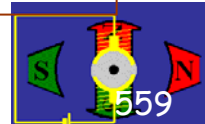
$$\begin{aligned} \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1) \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2) \\ &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \left[\cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1) \cos(\omega t) + \sin(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1) \sin(\omega t) \right] \\ &\quad \times \left[\cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varepsilon_2) \cos(\omega t) + \sin(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varepsilon_2) \sin(\omega t) \right] \end{aligned}$$

Fazendo a média temporal, obtém-se: $\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varepsilon_2)$

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta, \text{ com } \delta = (\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varepsilon_2)$$

Se as fendas forem iguais, $I_1 = I_2$, resulta:

$$I_P = 2I_0 (1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)$$



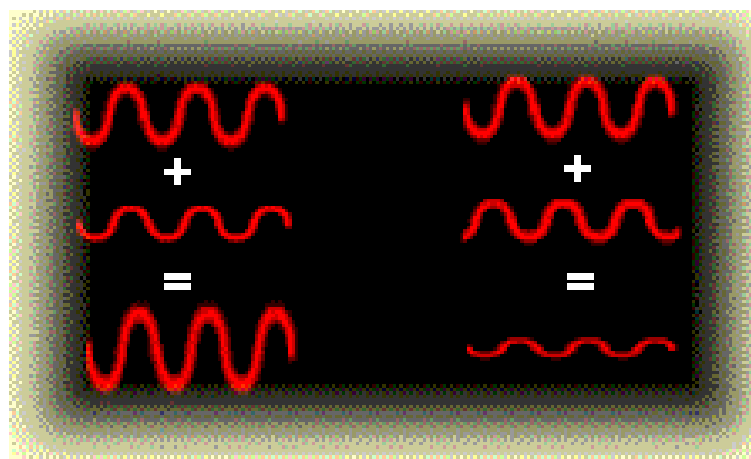
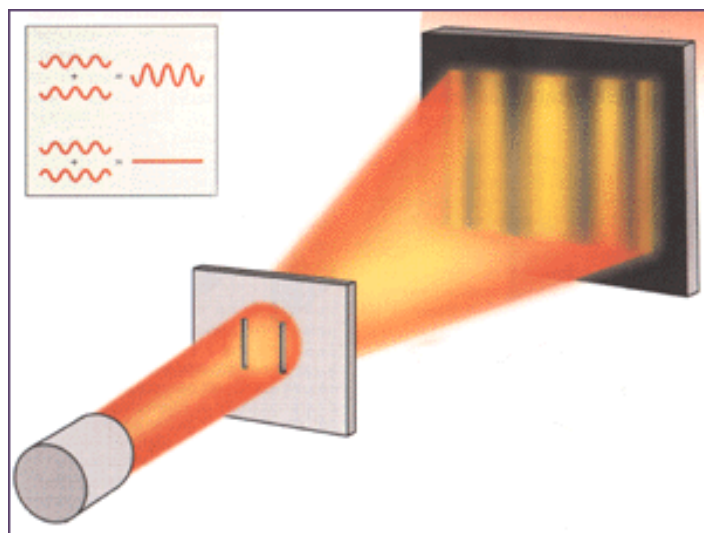


Interferência construtiva e interferência destrutiva

A irradiância em P é: $I_P = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$, $\delta = (\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varepsilon_2)$

$I_P = 4I_0$ se $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots = 2\pi m \rightarrow$ interferência construtiva

$I_P = 0$ se $\delta = \pm \pi, \pm 3\pi, \dots = 2\pi m + \pi \rightarrow$ interferência destrutiva



<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/Doubleslitexperiment.wmv>

Nas regiões onde $(r_1 - r_2) = m\lambda$: luz+luz=4×luz - interferência construtiva

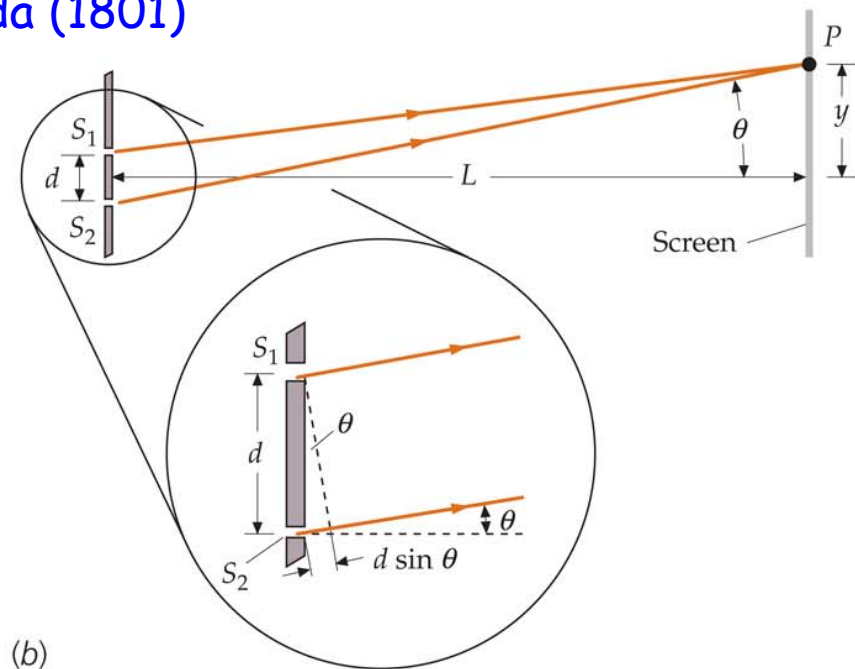
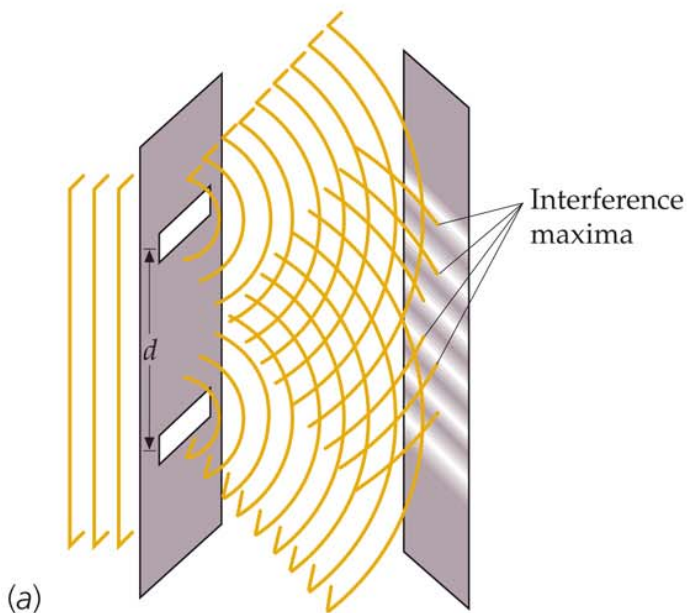
Nas regiões onde $(r_1 - r_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$: luz+luz=escuro!!! - interferência destrutiva





Interferómetro de divisão de frente de onda

Experiência de Young da dupla fenda (1801)



Interferência construtiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = m\lambda$

Interferência destrutiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$

$$d \sin \theta_m = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Máximo}$$

$$d \sin \theta_m = (m - \frac{1}{2})\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Mínimo}$$

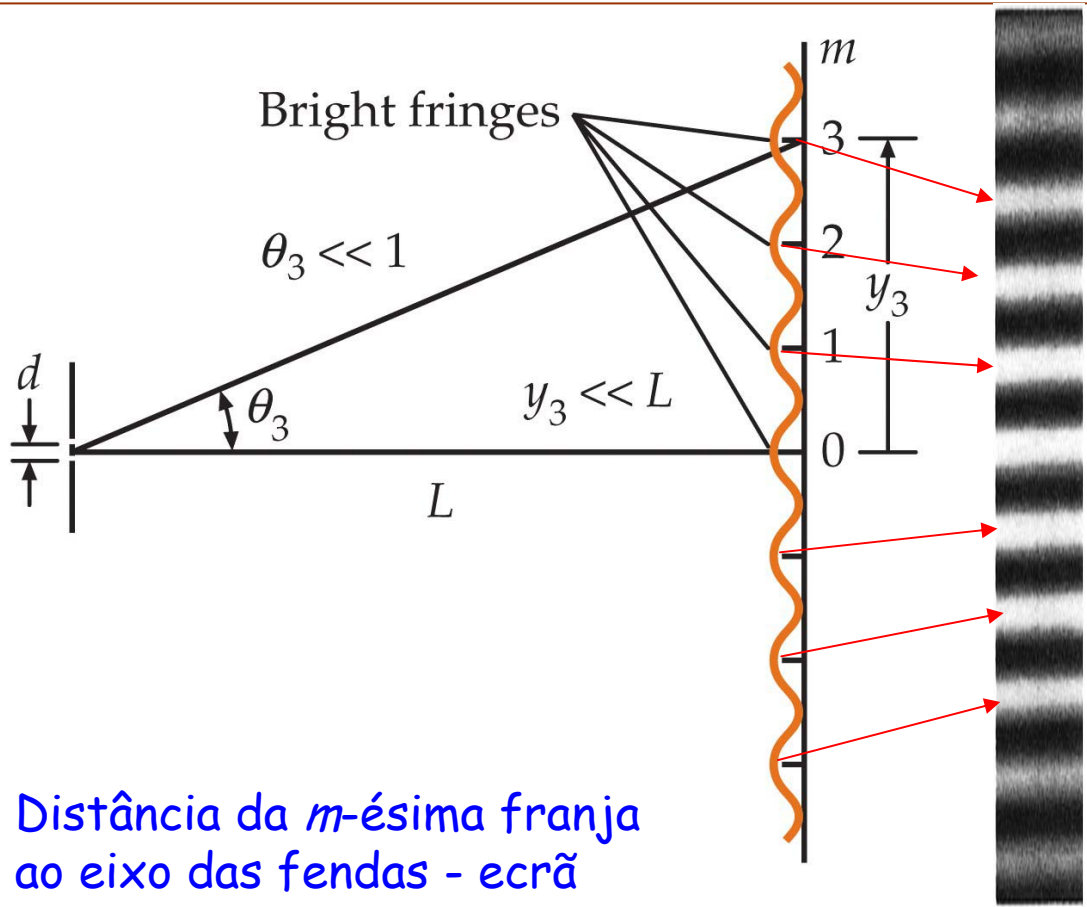
Distância da m -ésima franja ao eixo das fendas-tela

$$y_m = m \frac{\lambda L}{d}$$





Padrão de interferência

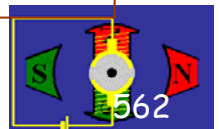
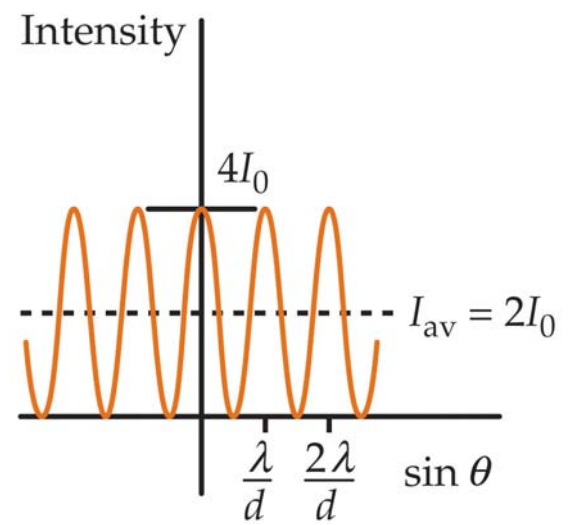


Irradiância em termos de diferença de fase

$$I_P = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)$$

Distância da m -ésima franja ao eixo das fendas - ecrã

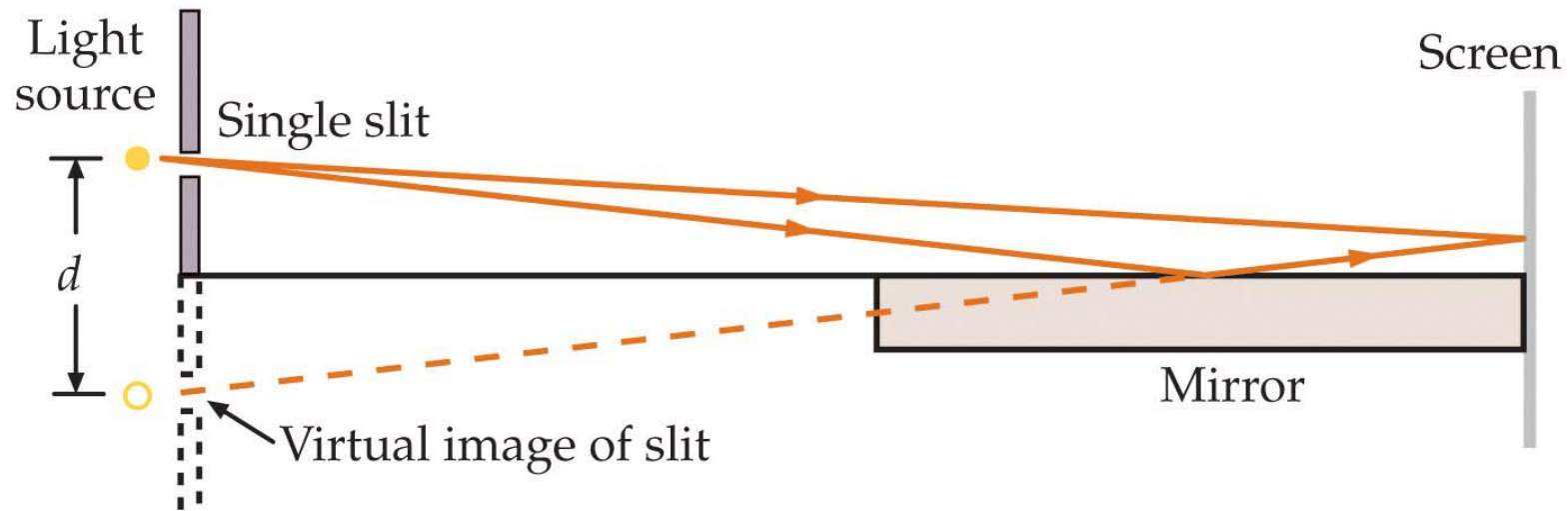
$$y_m = m \frac{\lambda L}{d}$$



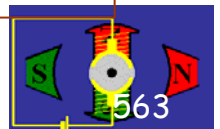


Espelho de Lloyd

Produz um padrão de interferência idêntico ao das duas fendas

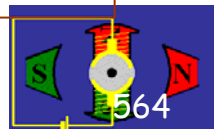
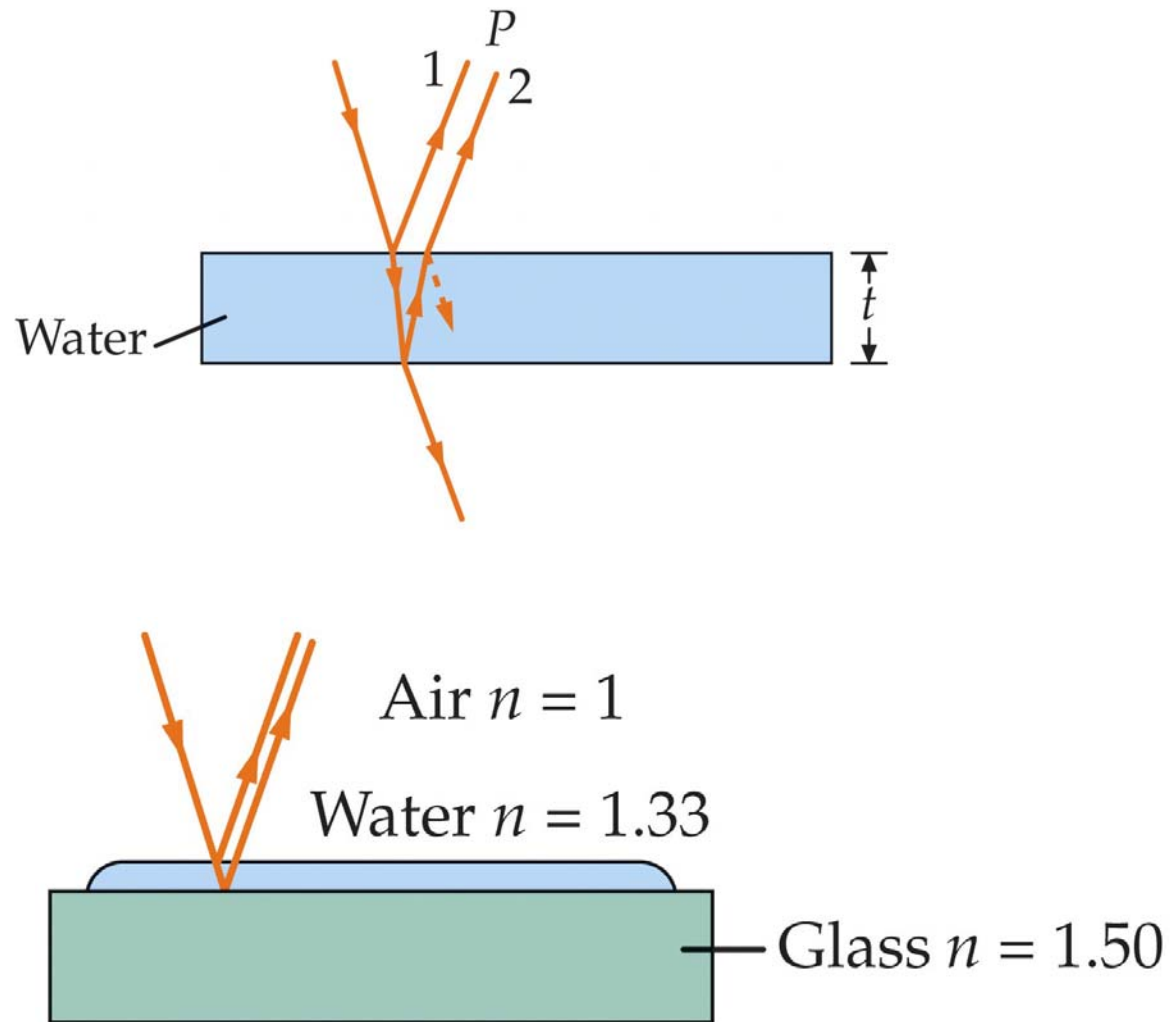


Contudo neste caso, a faixa de interferência central num ponto equidistante das duas fontes é escura (na experiência das duas fendas a faixa central é clara). Consegue explicar porque?





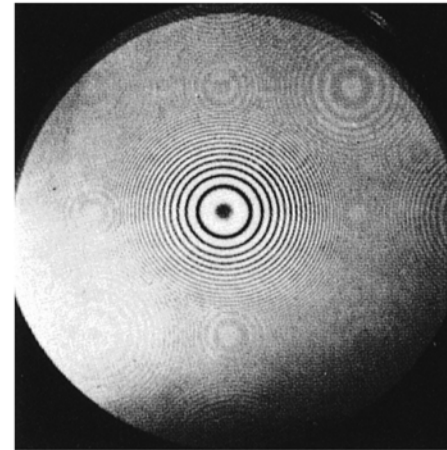
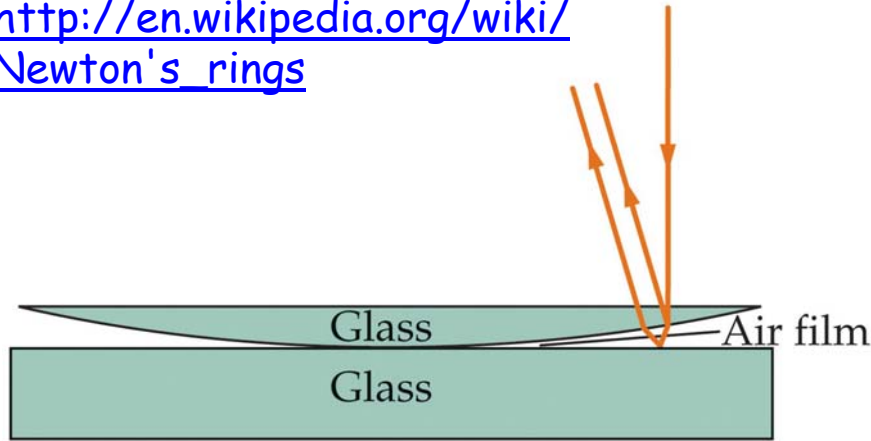
Interferência em filmes finos





Anéis de Newton

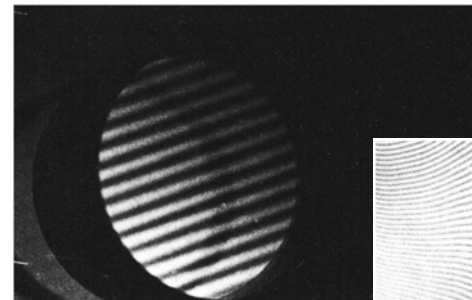
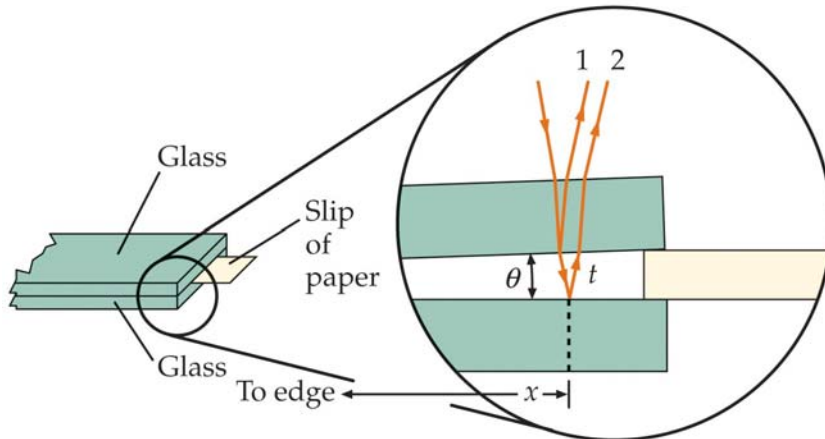
http://en.wikipedia.org/wiki/Newton's_rings



<http://shortwork.net/equipment/review-1Ds-SQ-scantech/#wmount>

<http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/aneisnewton/aneisnewton.htm>

Interferência num filme de ar





Interferómetro de divisão de amplitude

Interferómetro de Michelson é um interferómetro de dois feixes (divisão de amplitude). Foi proposto e construído por Michelson, em 1881, para tentar comprovar a não existência do éter. Este interferómetro pode ser usado para medir comprimentos de onda com grande precisão. No interferómetro de Michelson, um feixe de luz atravessa um espelho semi-transparente, que divide o feixe incidente em dois: uma parte da luz *atravessa* o divisor de feixe até um espelho, é reflectido de volta para o espelho semi-transparente, sendo reflectido para o detector; a outra parte é *reflectida* pelo espelho semi-transparente até a outro espelho colocado perpendicularmente ao anterior, sendo novamente reflectida e passando através do espelho semi-transparente até o detector (ver página seguinte). Quando os dois componentes são recombinados, existe uma diferença de fase entre eles já que eles percorreram, em geral, caminhos ópticos diferentes, podem haver interferência construtiva ou destrutiva dependendo do valor da diferença de caminhos. Se os dois caminhos percorridos diferirem de um número inteiro de comprimento de onda (incluindo 0) ocorre uma interferência construtiva e aparece um sinal forte no detector. Se o caminho diferir de um número inteiro e meio (por exemplo 0,5, 1,5, 2,5 ...) ocorre interferência destrutiva e o sinal indicado pelo detector é fraco.

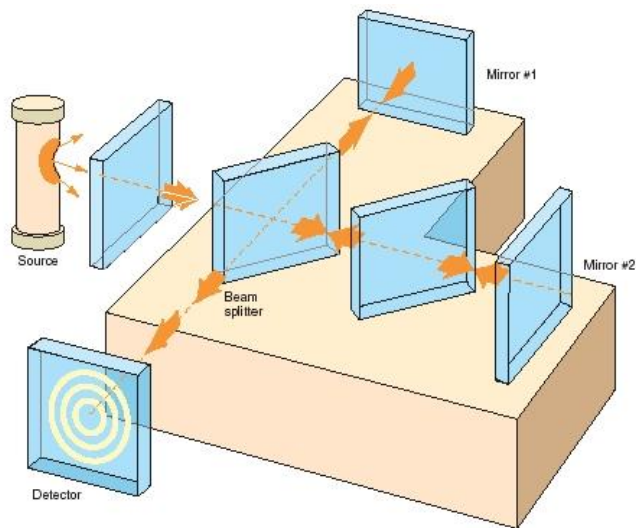
No interferómetro de Mach-Zehnder ...

incompleto



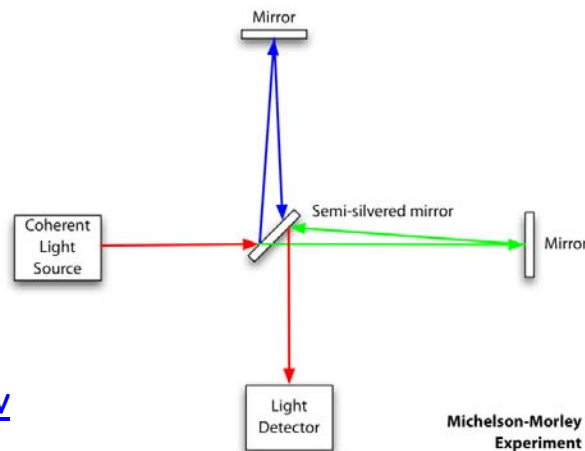


Interferómetro de Michelson

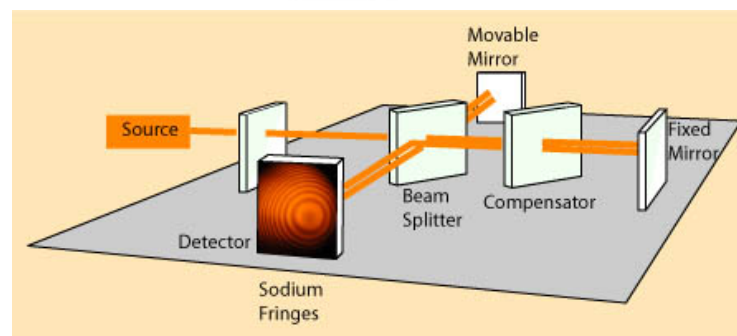
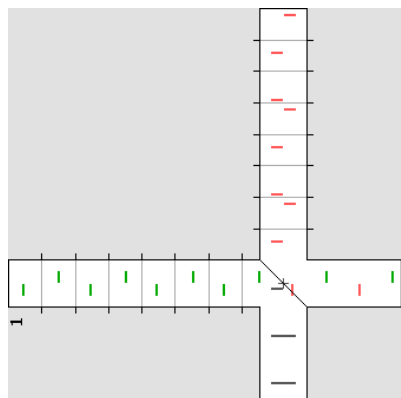


Interferência construtiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = m\lambda$

Interferência destrutiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$

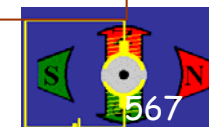


<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/Michelson-interf.wmv>



http://www.youtube.com/watch?v=Nsa8D5_DMIq&feature=related

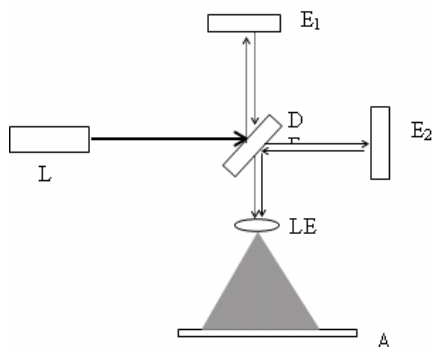
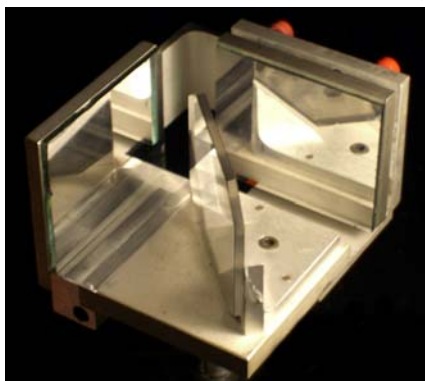
http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment





Aplicações do interferómetro de Michelson

<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/Michelson-interf.wmv>



A aplicação mais comum do interferómetro de Michelson é a experiência de Michelson-Morley para verificar o efeito do éter na velocidade da luz. Está na base das experiências para detecção de ondas gravitacionais, sendo usado como uma espécie de filtro sintonizável. Também faz parte dos sistemas usados para detectar planetas em torno de estrelas próximas. Também é a *peça* fundamental da espectroscopia de transformada de Fourier.

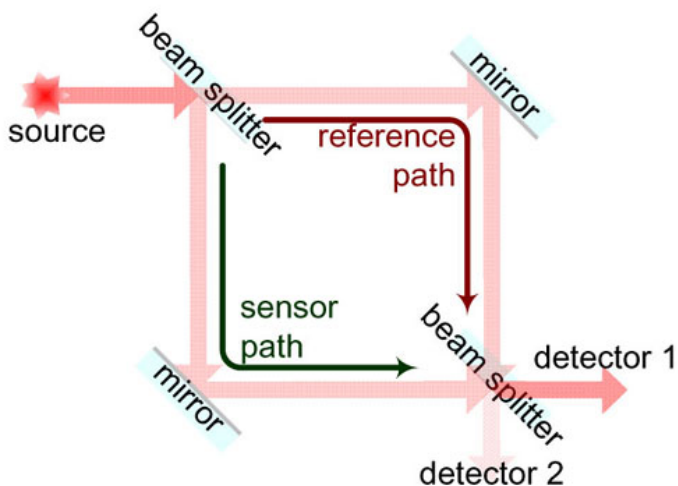
Outras aplicações prendem-se com a implementação de interferómetros de linhas de atraso, como por exemplo em moduladores ópticos DPSK que convertem modulação de fase em modulação de amplitude nas redes DWDM.

http://www.youtube.com/watch?v=Nsa8D5_DMIg&feature=related

http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment

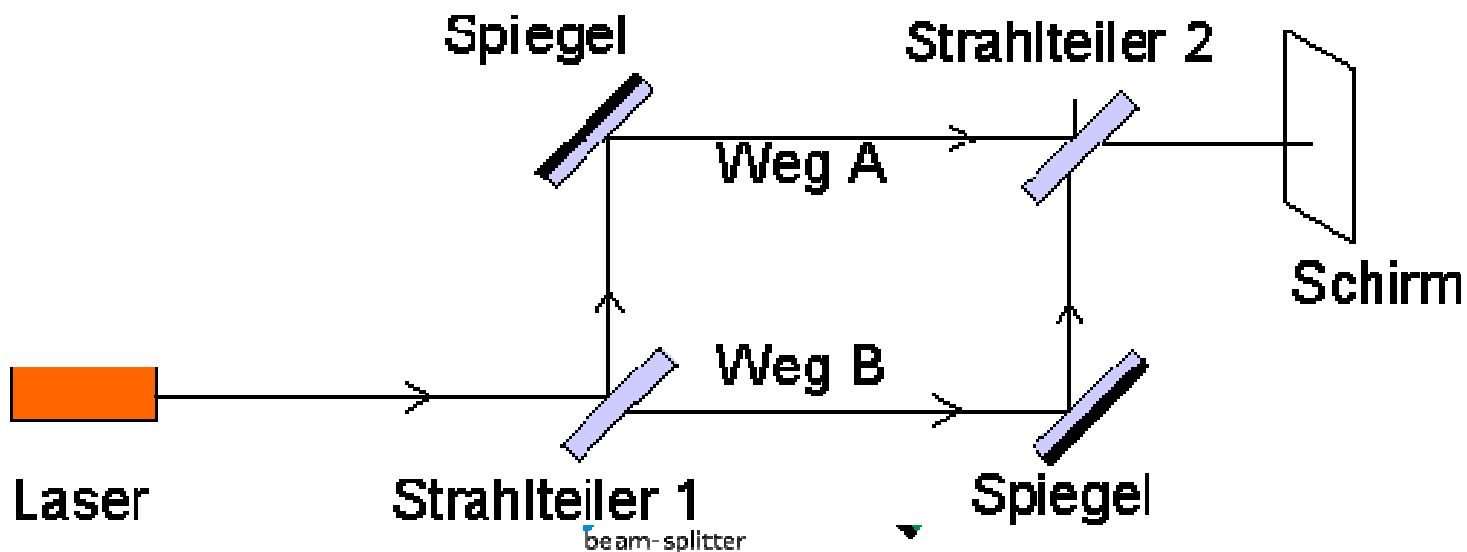


Interferómetro de Mach-Zehnder



Interferência construtiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = m\lambda$

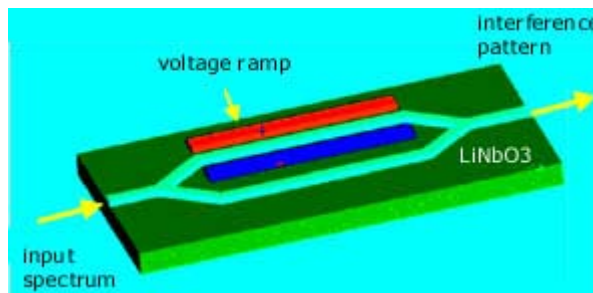
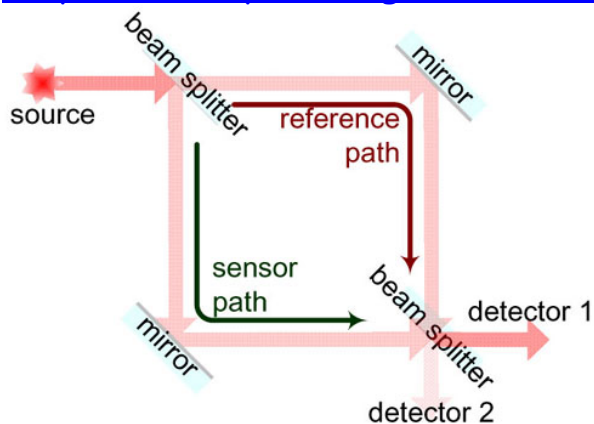
Interferência destrutiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$





Aplicações do interferómetro de Mach-Zehnder

http://en.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder_interferometer



incompleto





Difracção

•
Difracção s. f. acto ou efeito de difractar ou difractar-se; (fís.) 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;

~ **acústica**: distorção de uma onda acústica, devido à presença de um obstáculo situado na direcção de propagação dessa onda;

rede de ~: 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).

(Do lat. cient. diffractiōne-, «id.», de diffringâre, «quebrar em pedaços»)

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





Interferência e difracção

Um corpo opaco colocado entre uma fonte ondulatória pontual e um alvo, projecta sobre o alvo uma sombra constituída por regiões claras e escuras. Este efeito pode ser demonstrado facilmente iluminando um lápis com uma fonte pontual (p. ex. uma lâmpada de alta potência a irradiar através de um pequeno orifício) ou, em certas situações, na sombra projecta pela mão directamente iluminada pelo Sol. Este comportamento designado por **difracção** não é explicável pelas leis da óptica geométrica. Ocorre difracção sempre que a fase ou a amplitude de parte da frente de onda se altera, após interacção com obstáculos. Os vários segmentos da frente de onda que se propagam para além do obstáculo interferem, dando origem a uma distribuição particular de energia, correntemente designada padrão de difracção. A primeira referência à difracção foi publicada por Francesco Grimaldi, no séc. XVII, que designou por "diffractio".

A interferência e a difracção são dois fenómenos que distinguem as propriedades ondulatória de um sistema das propriedades corpusculares desse ou de outro sistema. *Na verdade não existe uma distinção física significativa entre interferência e difracção.* No entanto é corrente falar-se de interferência quando se considera a sobreposição de um número reduzido de ondas, reservando-se a difracção para os casos em que o número de ondas é elevado. Porém, continua-se a falar em interferência de feixes em certos contextos como, por exemplo, a difracção da luz por uma rede de difracção.





Princípio de Huygens-Fresnel

Uma vez que qualquer "instrumento" óptico só utiliza parte de qualquer frente de onda incidente, os efeitos de difracção-interferência são de grande relevância no seu funcionamento. Assim, é fundamental conhecer o comportamento difractivo dos componentes que formam o instrumento (lentes, diafragmas, fendas, espelhos, etc.). Na ausência total de aberrações, a definição de uma imagem formada por um sistema óptico é limitada apenas por difracção.

O princípio de Huygens pode ser utilizado numa primeira abordagem dos fenómenos da difracção. Contudo, o princípio de Huygens é insuficiente para descrever todos os detalhes do processo de difracção. De acordo com o princípio de Huygens, ondas sonoras e ondas luminosas perante os mesmo obstáculos deveriam provocar efeitos semelhantes, pois o princípio em nada depende do comprimento de onda do fenómeno ondulatório. Porém, no caso da luz observam-se sombras muito bem definidas. Esta deficiência foi corrigida por Fresnel, através da introdução do **conceito de interferência**. O princípio de Huygens-Fresnel propõe que *cada ponto de uma frente de onda não obstruída constitui, em qualquer instante, uma frente de ondas esféricas secundárias (com a mesma frequência da onda primária); a amplitude do campo óptico em qualquer ponto do espaço é dada pela sobreposição de todas essas ondas (tendo em conta as suas amplitudes e fases relativas).*

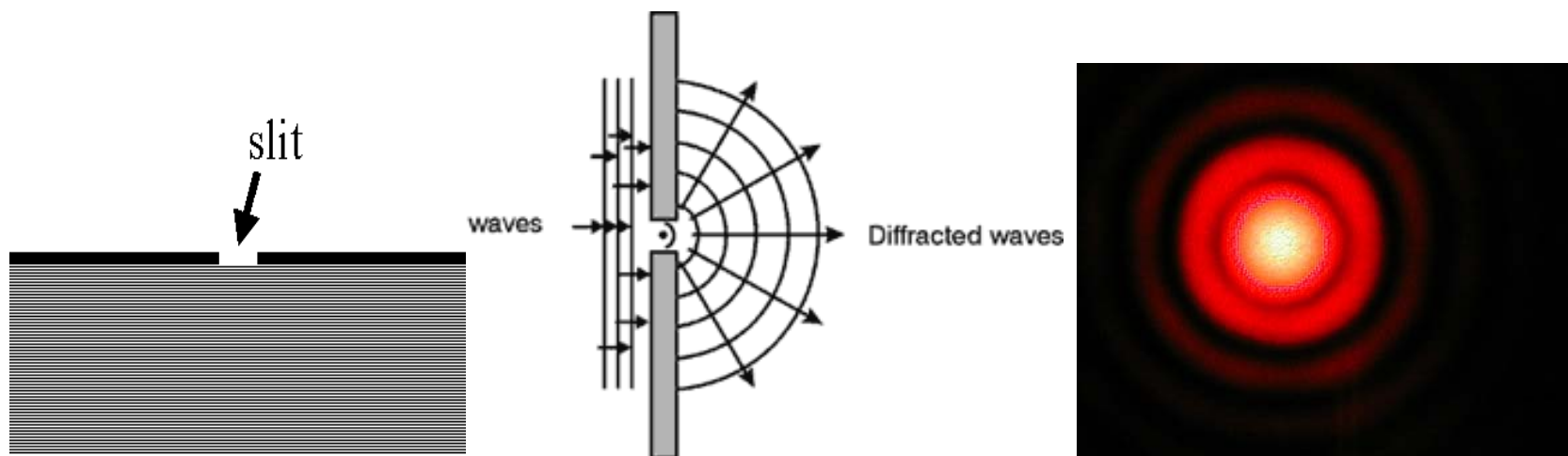
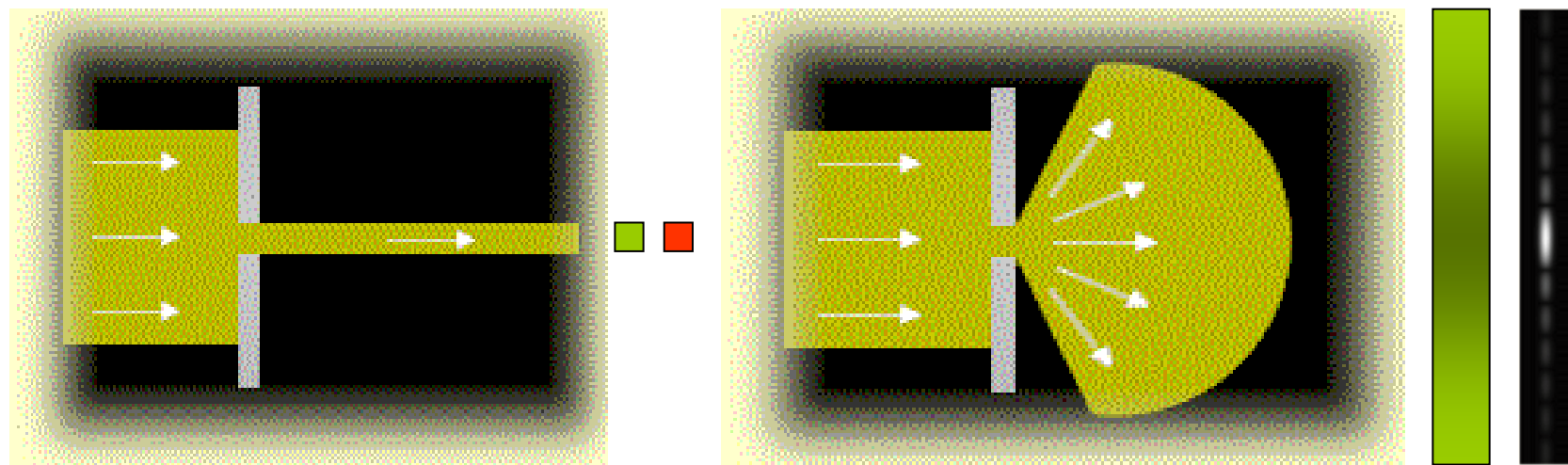
Embora não *complemente exacta*, a teoria de Huygens-Fresnel é satisfatória para a análise da grande maioria dos fenómenos ópticos de difracção, e será usada para descrever os fenómenos aqui tratados.





Exemplos do fenómeno de difracção (vídeos)

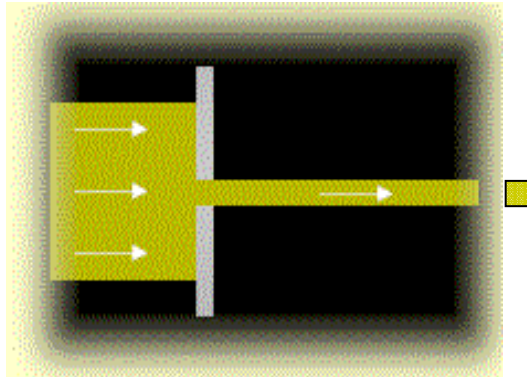
Difracção (Francesco Grimaldi)



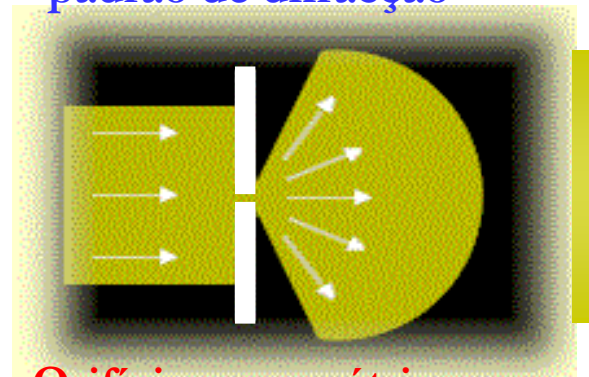


Exemplos do fenómeno de difracção (vídeos)

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

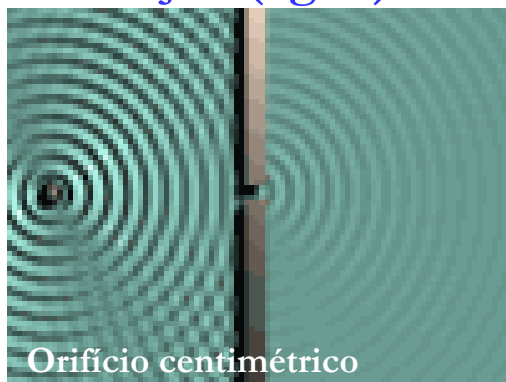


Se o orifício for muito estreito observa-se o **padrão de difracção**



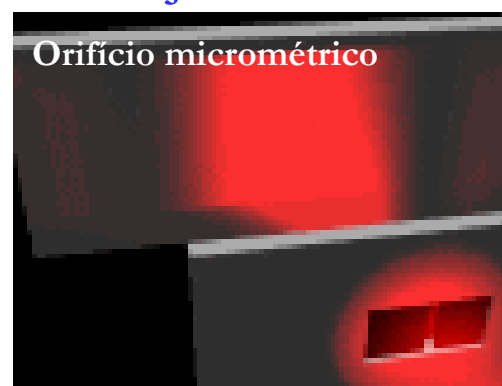
Orifício nanométrico

Difracção (água)



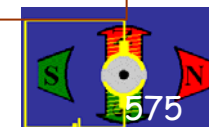
Orifício centimétrico

Difracção da luz



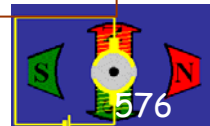
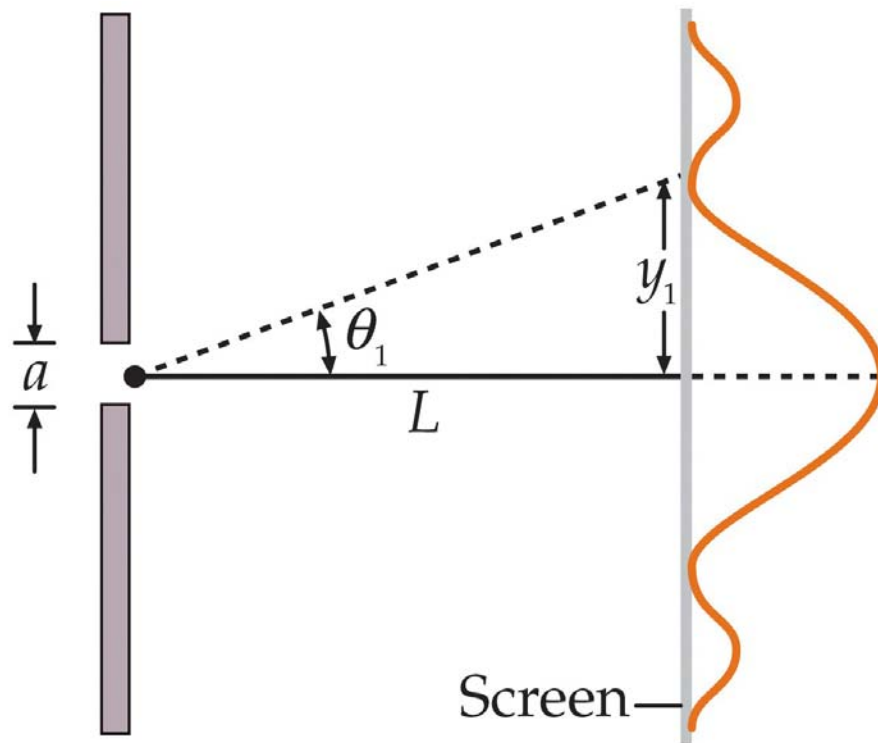
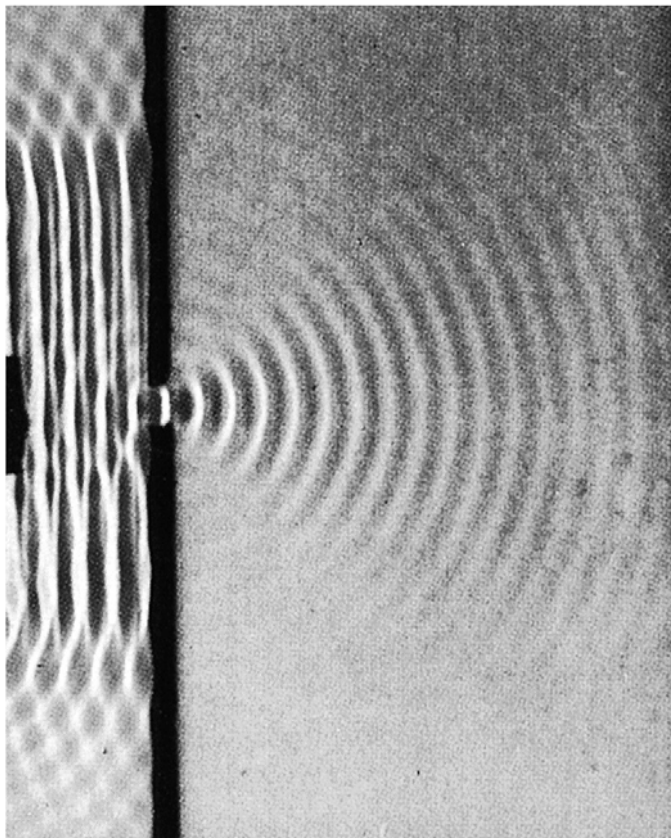
Orifício micrométrico

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



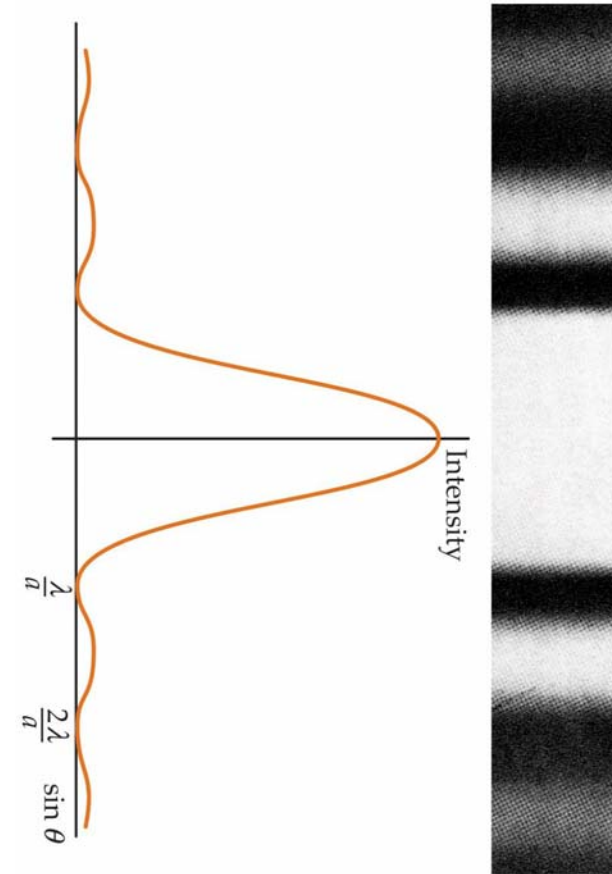
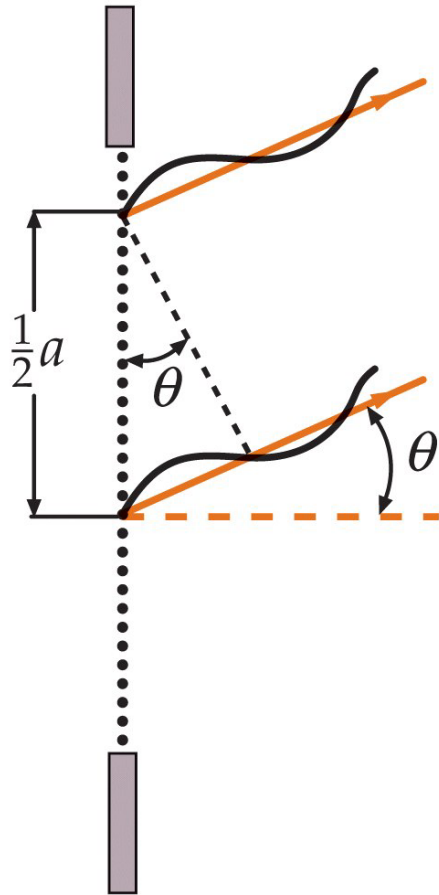


Difracção numa fenda

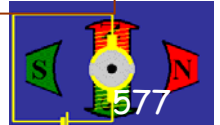




Pontos de intensidade nula na difracção numa fenda



$$a \sin \theta_m = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3 \dots$$





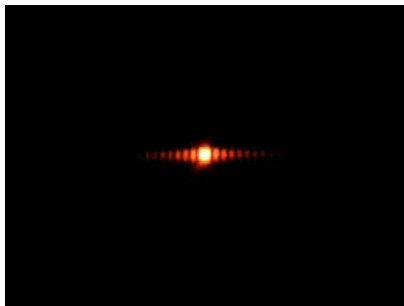
Demonstrações de difracção numa fenda

Montagem; arco-íris, guiagem da luz, efeito fotoelétrico, difracção, ...



Difracção da luz através de uma fenda

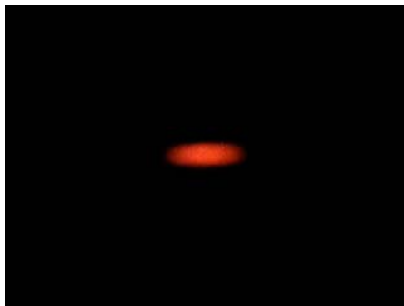
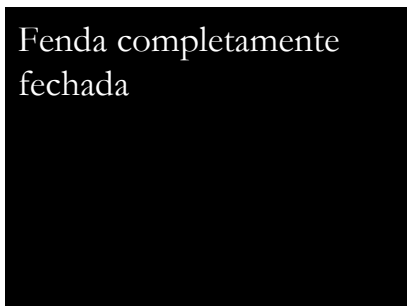
Fenda completamente aberta



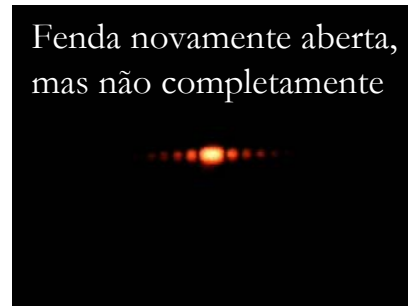
Fenda quase fechada



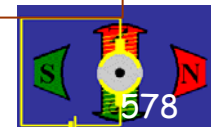
Fenda completamente fechada



Fenda novamente aberta, mas não completamente



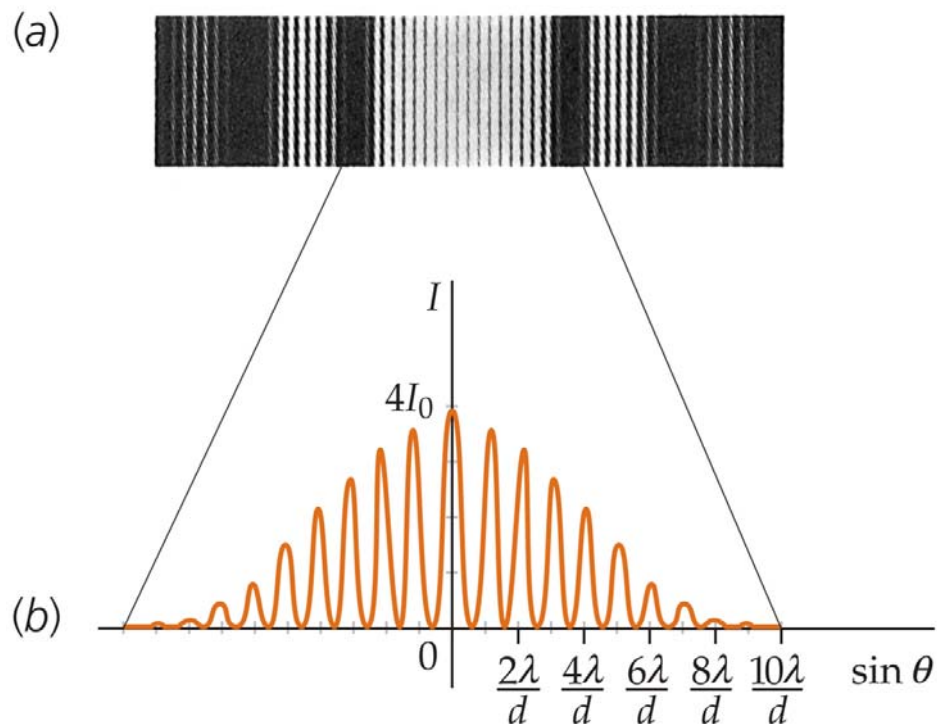
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Difracção%20da%20Luz%20-%201%20fenda.wmv>





Padrão de interferência-difracção de duas fendas

Quando existem duas ou mais fendas, o padrão de intensidade sobre o ecrã afastado é a combinação do padrão de difracção de uma única fenda e do padrão de interferência de múltiplas fontes.



Padrão de interferência-difracção para duas fendas cuja separação d é igual a 10 vezes a largura de cada fenda individual a .

O décimo máximo de interferência não se observa em cada um lado do máximo de interferência porque coincide exactamente com o primeiro mínimo de difracção

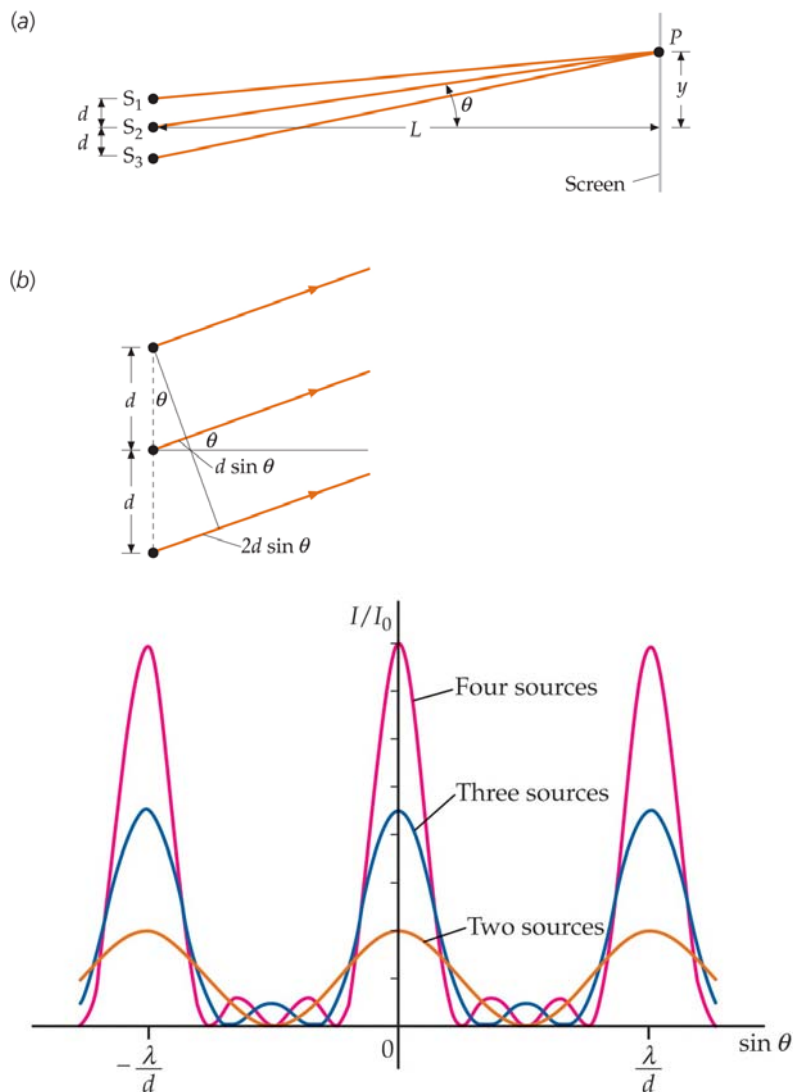
Em geral, se $m=d/a$, o m -ésimo máximo de interferência irá coincidir com o primeiro mínimo de difracção.

Uma vez que a m -ésima franja não é vista, existem $m-1$ franjas de cada lado da franja central para um total de $N=2(m-1)+1=2m-1$ franjas no máximo central.





Padrão de interferência de três ou mais fontes



Two sources



Three sources

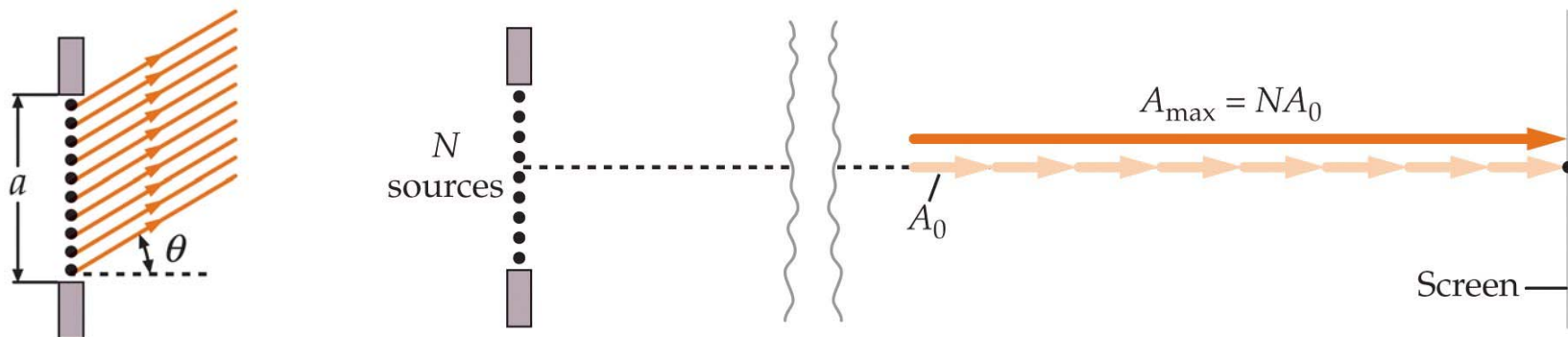


Four sources





Cálculo do padrão de difracção de fendas estreitas



Uma fenda

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \frac{1}{2} \phi}{\frac{1}{2} \phi} \right)^2$$

Duas fendas

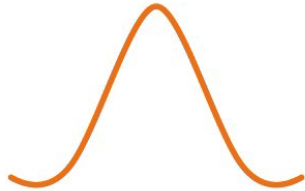
$$I = 4I_0 \left(\frac{\sin \frac{1}{2} \phi}{\frac{1}{2} \phi} \right)^2 \cos^2 \frac{1}{2} \delta$$





Difracção de Fraunhofer e Fresnel

As the screen is moved closer,



the Fraunhofer pattern observed far from the slit . . .

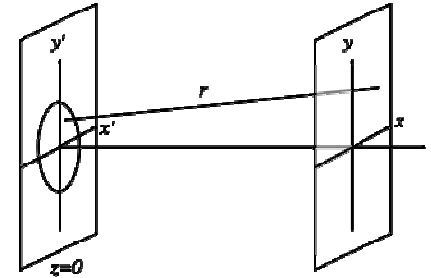


gradually changes into . . .

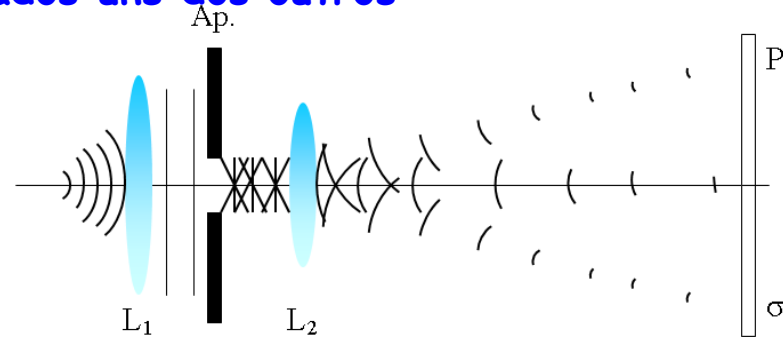


the Fresnel pattern observed near the slit.

Fresnel: a fonte, o obstáculo e o ecrã estão próximos uns dos outros



Fraunhofer: a fonte, o obstáculo e o ecrã comportam-se como se estivessem muito afastados uns dos outros



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

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

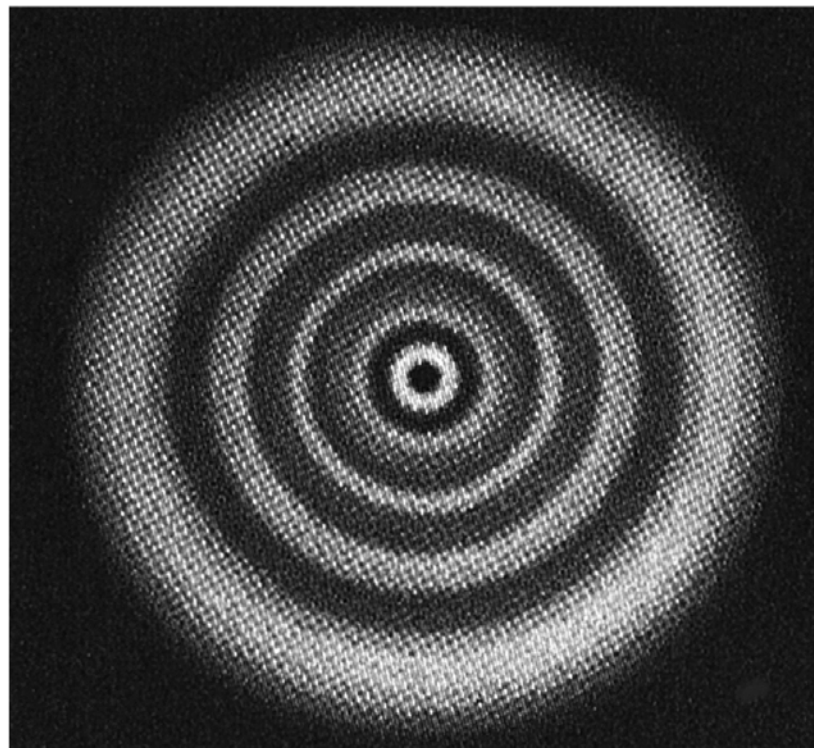
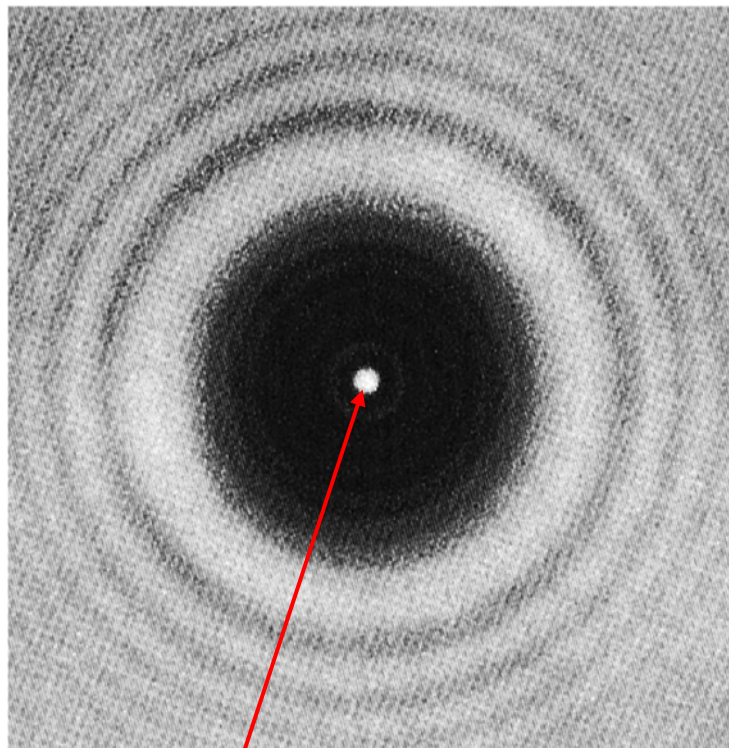
<http://www.rodenburg.org/theory/y1200.html>



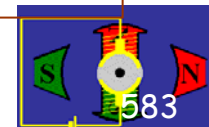


Padrões de difracção de Fresnel

Padrões de difracção de Fresnel de um disco opaco e de uma abertura circular

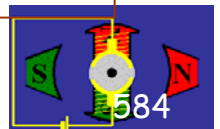
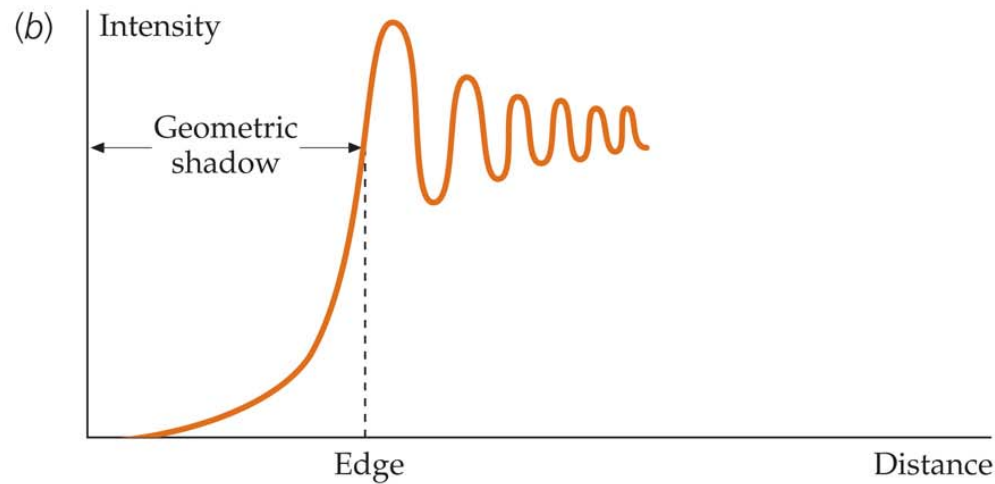
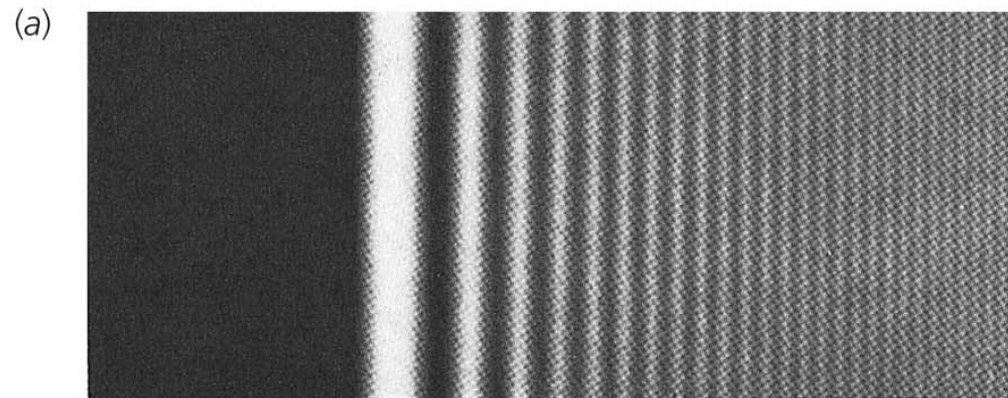


Ponto de Poisson



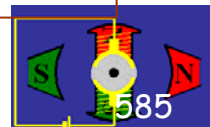
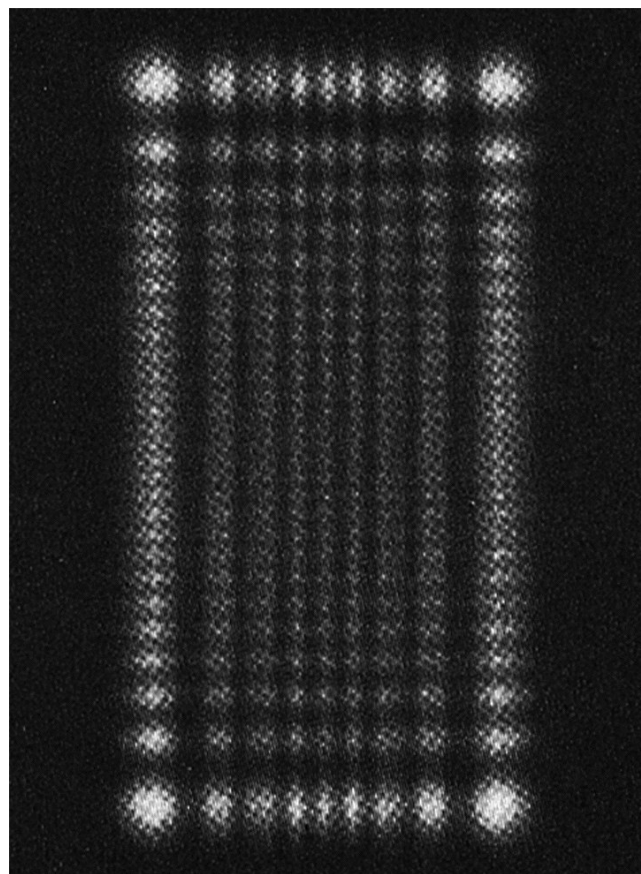
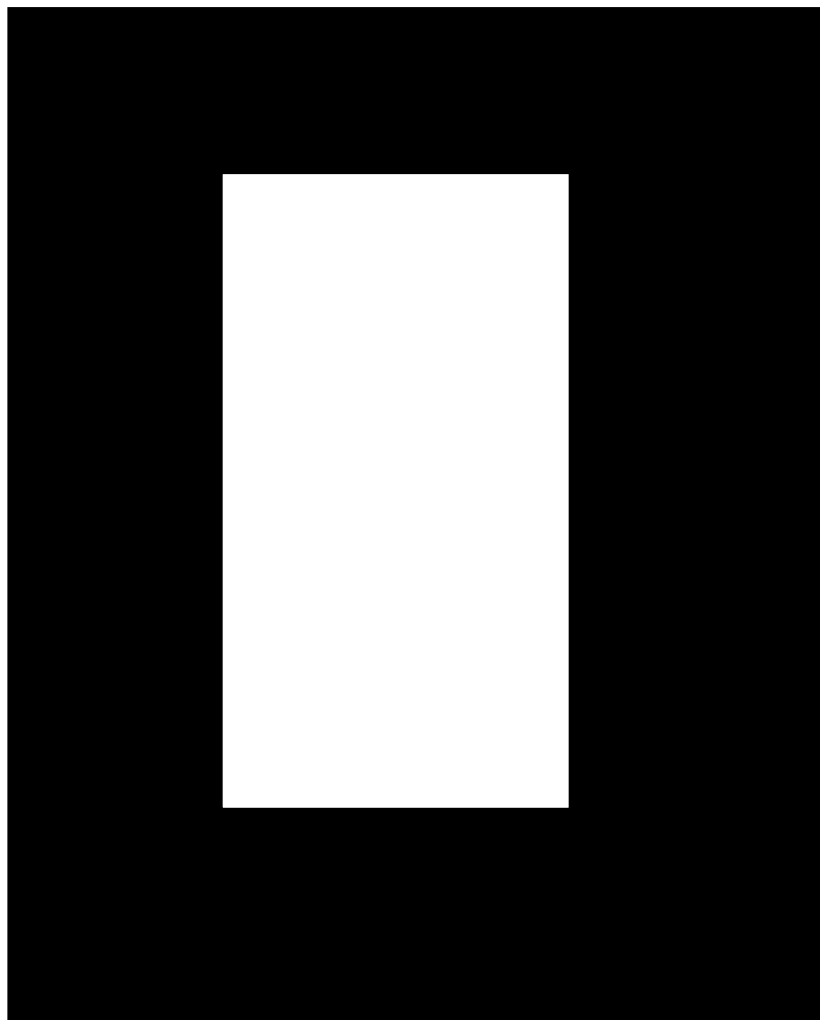


Padrões de difracção de Fresnel de uma interface plana





Padrão de difracção de Fresnel de uma abertura rectangular



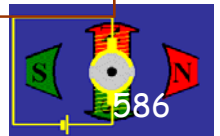


Difracção e resolução dos sistemas ópticos

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

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

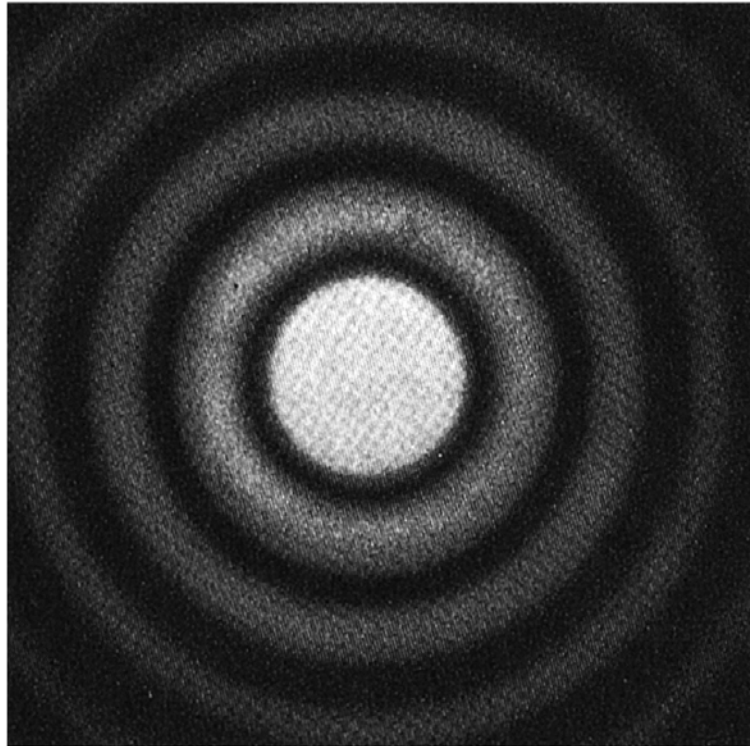
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/raylei.html#c1>



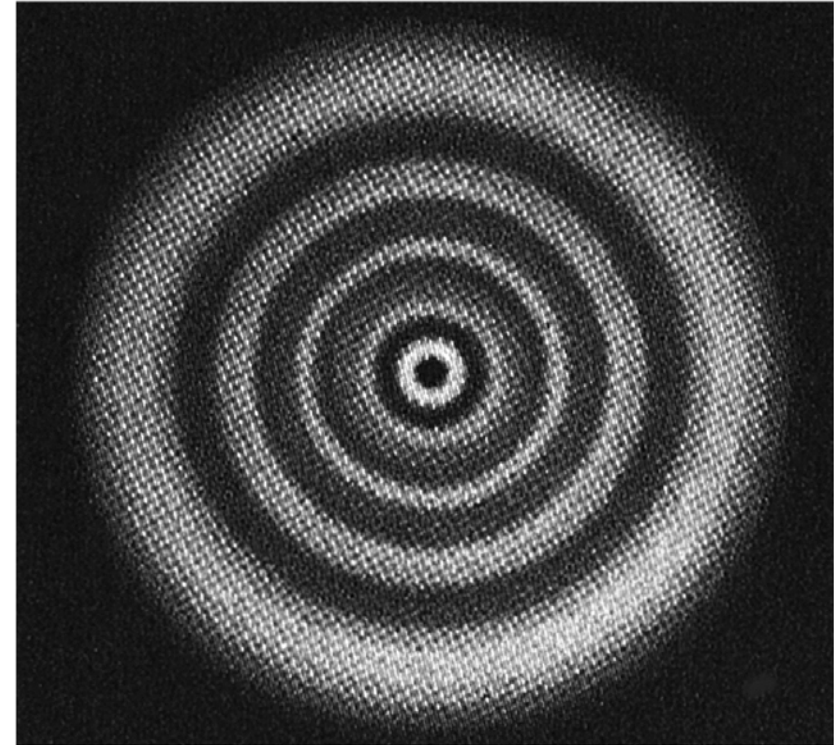


Difracção de Fraunhofer de uma abertura circular

Fraunhofer



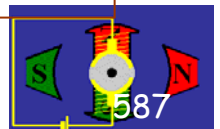
Fresnel



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

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

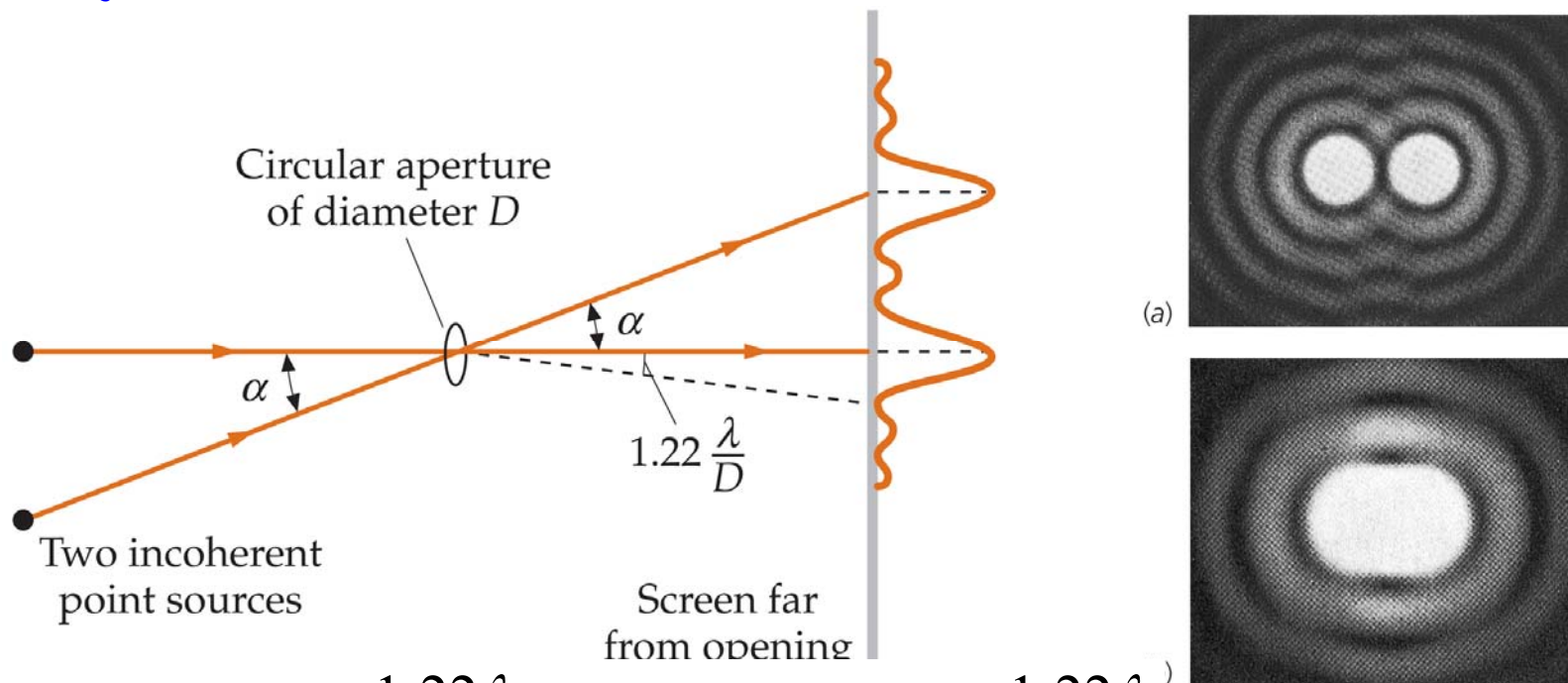
<http://www.rodenburg.org/theory/y1200.html>





Critério de resolução de Rayleigh

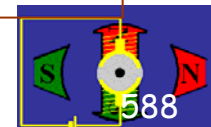
Difracção de Fraunhofer de duas fontes incoerentes



$$(a) \quad \alpha \gg \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (b) \quad \alpha = \alpha_{IR} = \frac{1,22\lambda}{D}$$

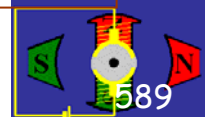
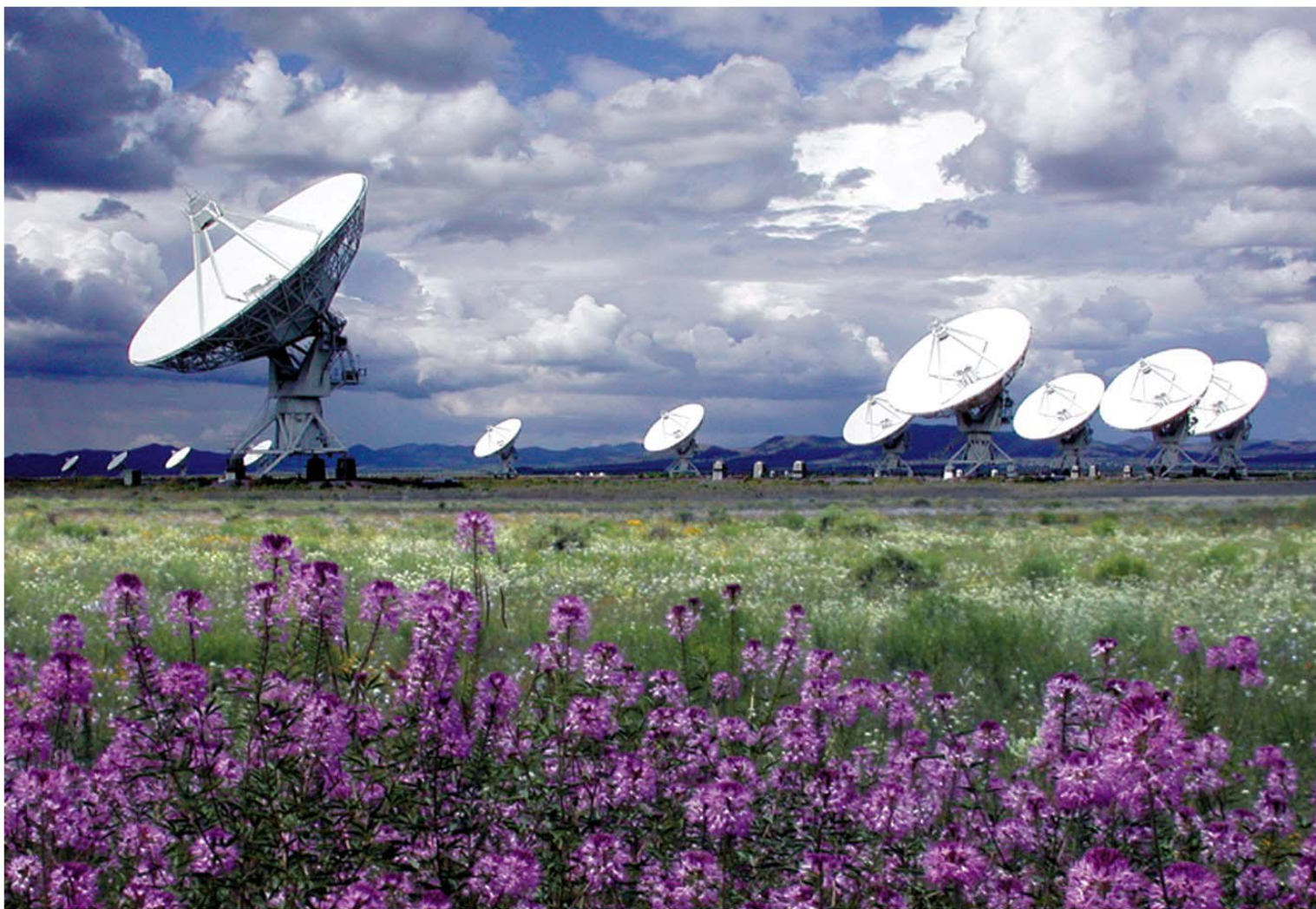
Critério de resolução de Rayleigh: no limite de resolução o mínimo do padrão de difracção de uma fonte cai sobre o máximo do padrão de difracção da segunda fonte.

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





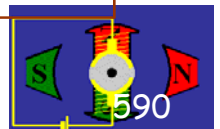
Telescópio formado por 27 antenas rádio de 25 m





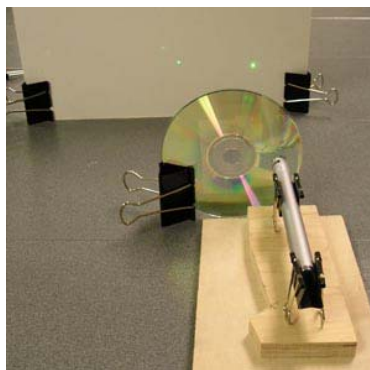
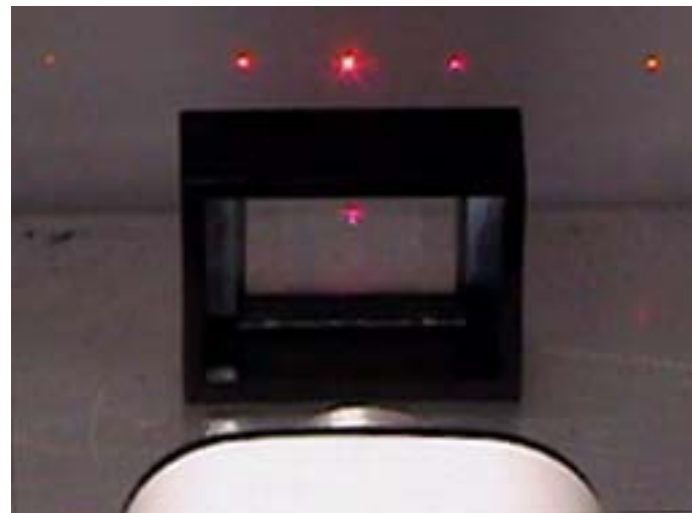
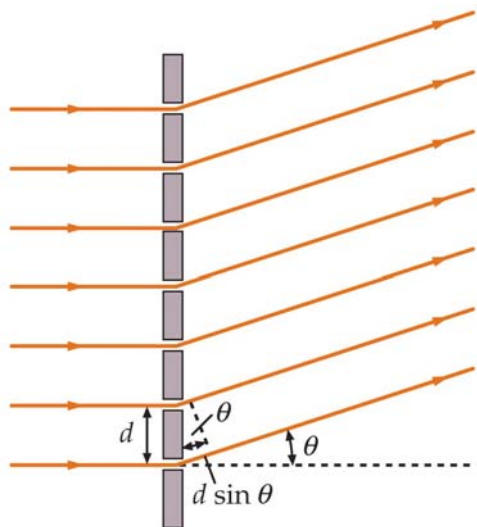
Redes de difracção

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).
(Do lat. cient. diffractiōne-, «id.», de diffringâre, «quebrar em pedaços»)





Rede de difracção



http://www.jobinyvon.com/SiteResources/Data/Templates/1custom_breadcrumb.asp?DocID=555&v1ID=&lang=1&gclid=COrNlrS4v5MCFQ9pQgodzyF7CQ

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

<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





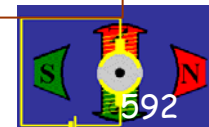
CDs e DVDs actuam como redes de difracção



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



Electromagnetismo e Óptica, José Figueiredo, DF, UALG
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EO.htm>)





Espectroscópio

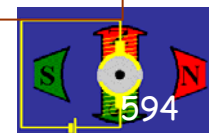
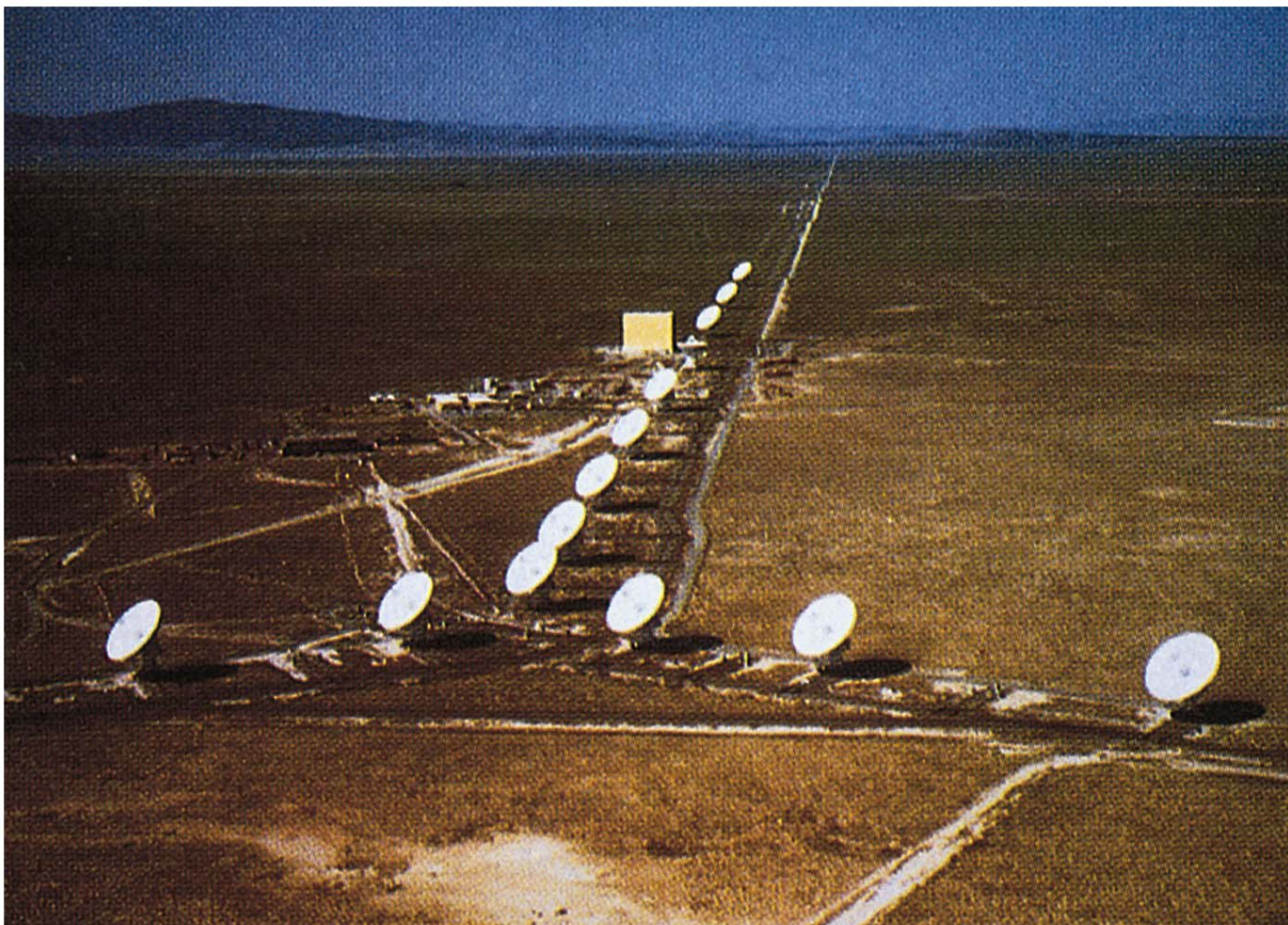


Electromagnetismo e Óptica, José Figueiredo, DF, UALG
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/EO.htm>)





Rede de radiotelescópios





Holografia

Holograma: registo, em chapa fotográfica, dos efeitos da sobreposição de duas ondas emanadas da mesma fonte luminosa, uma directa e outra reflectida pelo objecto fotografado (dá a ilusão de relevo, quando iluminado por um feixe de raios laser) (De holo- + -grama)

Holografia: conjunto de técnicas de obtenção e utilização de hologramas; documento hológrafo (De hológrafo + -ia)

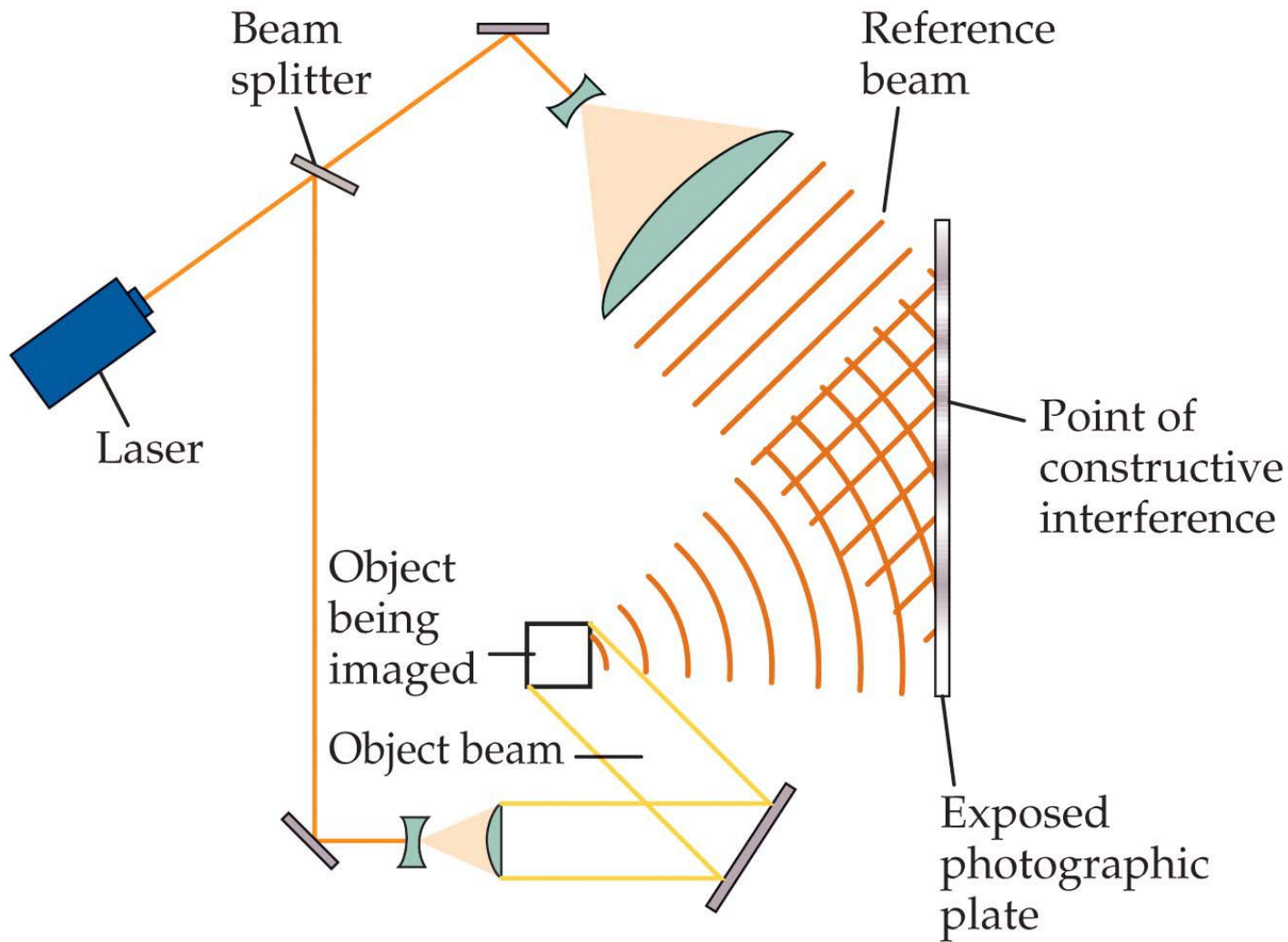
hol(o)-: elem. de formação de palavras que exprime a ideia de inteiro, todo, completo (Do gr. hólos, «todo»)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/optmod/holog.html>

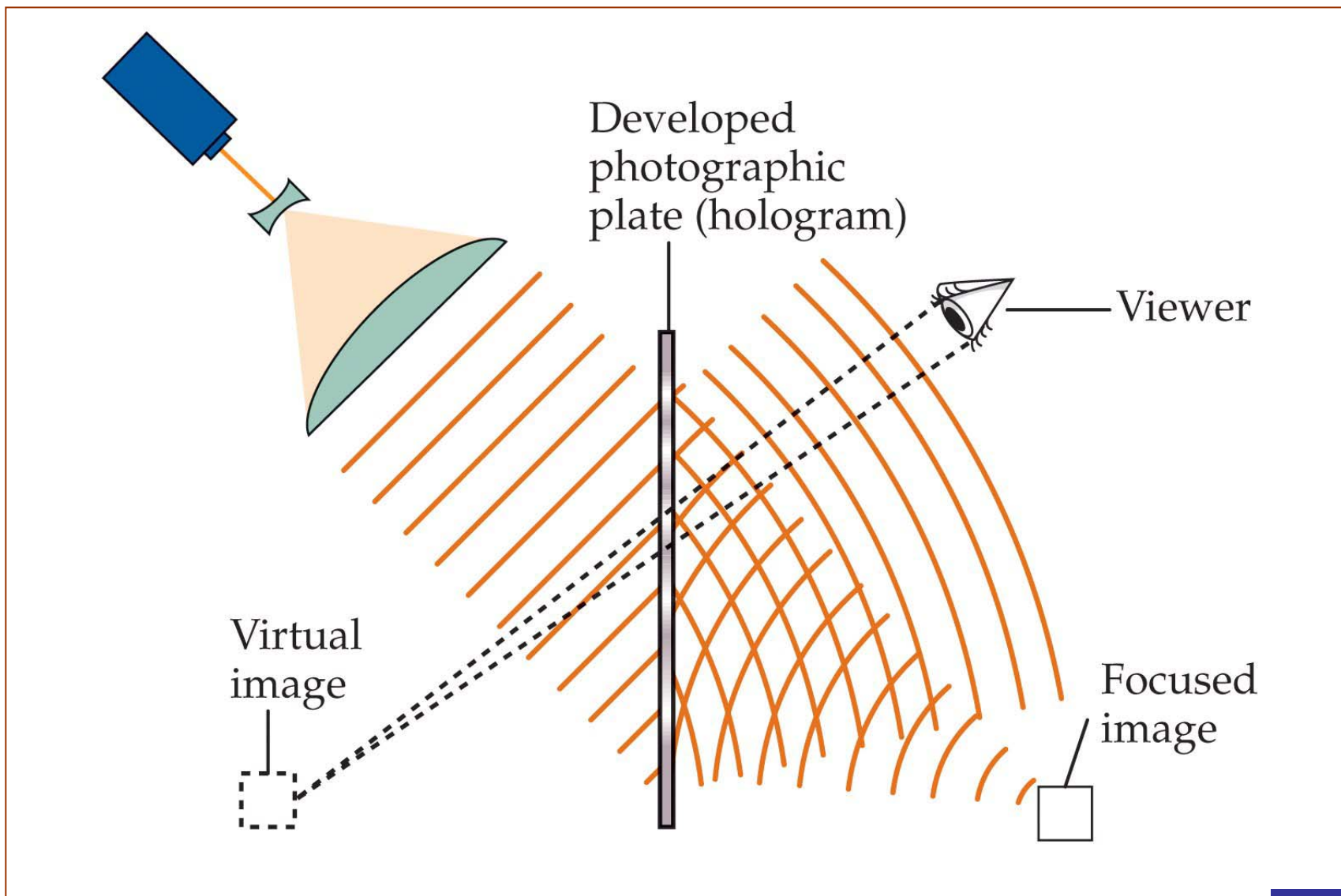
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Holografia> <http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>



Registrar (*fazer*) um holograma

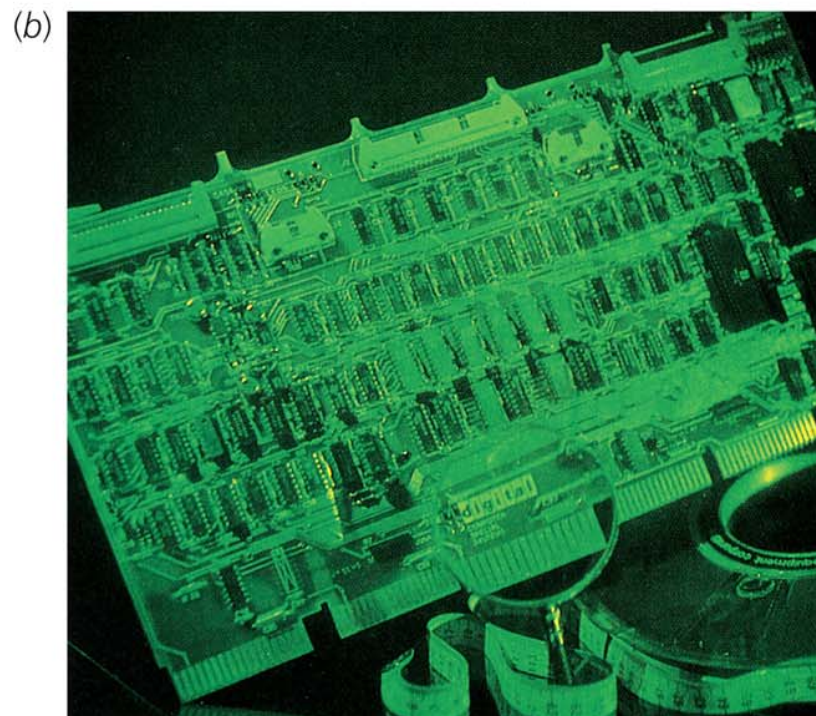
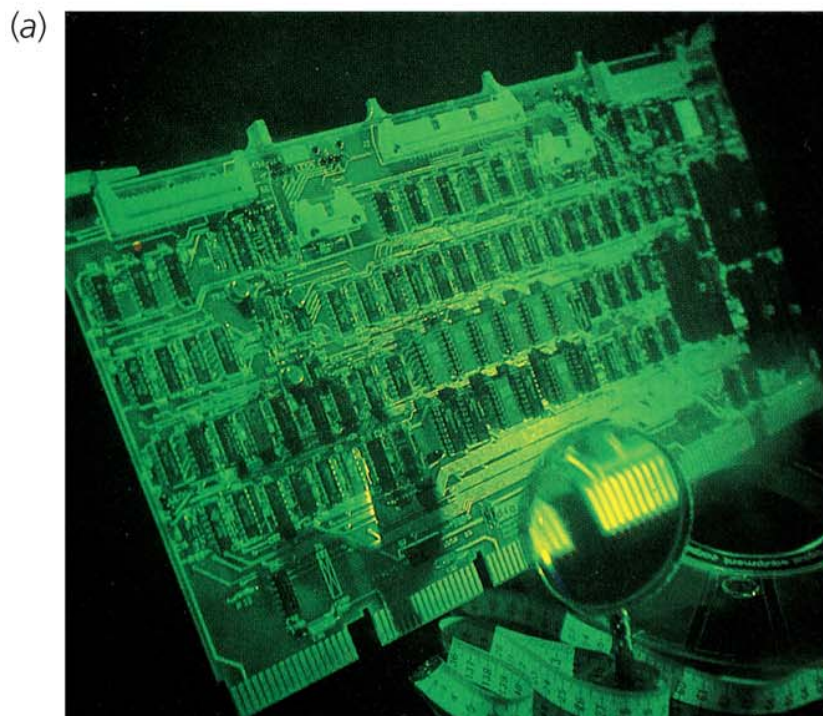


Observar (*ler*) um holograma

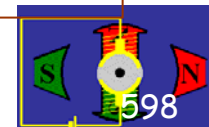




Holograma visto de dois ângulos diferentes



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/optmod/holog.html>





Curiosidade: o telectroscópio

- Story > The Telectroscope - 22 May-15 June 2008. London and New York.

<http://www.tiscali.co.uk/telectroscope/cn/story/index.php>

<http://www.youtube.com/watch?v=3xm1u8pO8MQ&eurl=http://socialissimo.blogspot.com/2008/05/o-telectroscopio.html>

A 4 de Outubro de 1879, no número 239 do 'Comércio do Porto', divulgava-se uma notícia que envolvia um lente professor português: Adriano de Paiva de Faria Leite Brandão (1847-1907).

O Comércio do Porto

— *[...]Mais uma maravilla devida á electricidade : o telectroscopio, por meio do qual diversos individuos, separados pelo Atlantico, por exemplo, poderão ao mesmo tempo fallar uns com os outros, ouvir-se e vêr-se, sem sahirem de suas casas. Esta invenção tem sido submettida ao exame de physicos abalisados.[...]*

<http://socialissimo.blogspot.com/2008/05/o-telectroscopio.html>

Bom trabalho e boa sorte para o exame
José Figueiredo





Diferentes manifestações da radiação EM

