



Física Experimental I

- Interferência
- Difracção
- Holografia

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.

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;

Holografia: conjunto de técnicas de obtenção e utilização de hologramas; documento hológrafo. (De hológrafo + -ia)

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)





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.





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, protão, 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 paralelepípedica, 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.

Chegados 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.

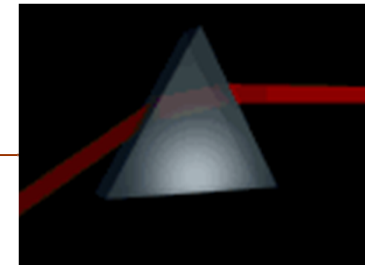
A obra de Newton, *A Óptica*, contém a descrição das suas experiências sobre a dispersão da luz e uma formulação da sua teoria corpuscular.

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)

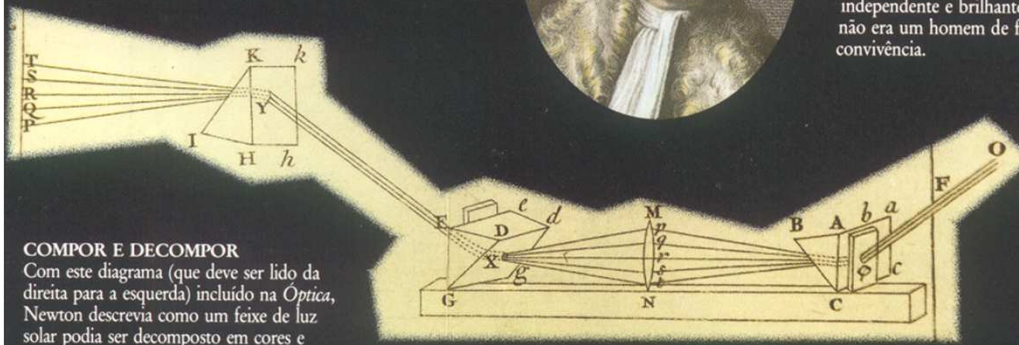


prisma, formando um espectro. O espectro é projectado num écran com uma pequena fenda. Por essa fenda passa a luz de uma só cor, que atravessa outro prisma que a desvia mas não a decompõe em cores. Com esta experiência Newton concluiu que as cores existentes na luz branca não são produzidas pelo prisma.



ISAAC NEWTON

O trabalho de Isaac Newton quase dois séculos. Publicou científicos escritos desde as suas leis de movimento que investigava a luz. Em mais antiga associação científica Grã-Bretanha (fundada em 1660) Newton, um pensador independente e brilhante, não era um homem de fácil convivência.



http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz#Teoria_corpuscular_da_luz





O Grande Newton ... ~1675



Alto aí! A luz não é uma onda. A luz é um **fluxo de corpúsculos**.
Dixi Newton

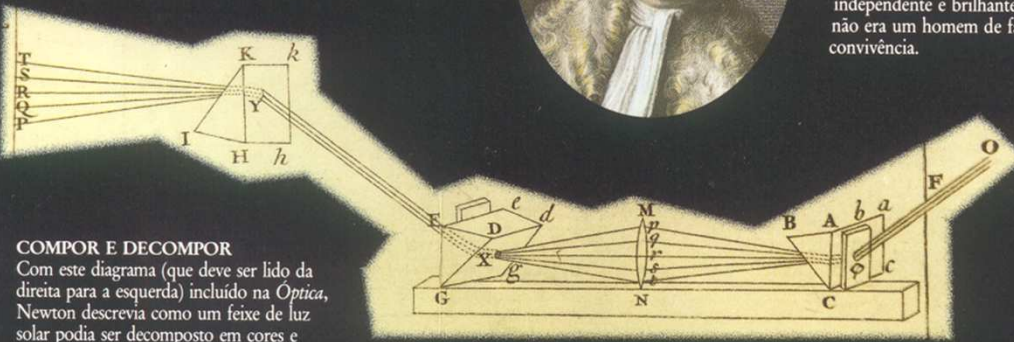
Decomposição espectral da luz visível (luz branca)



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 Royal Society da Grã-Bretanha (fundada em 1660), Newton, um pensador independente e brilhante, não era um homem de fácil convivência.

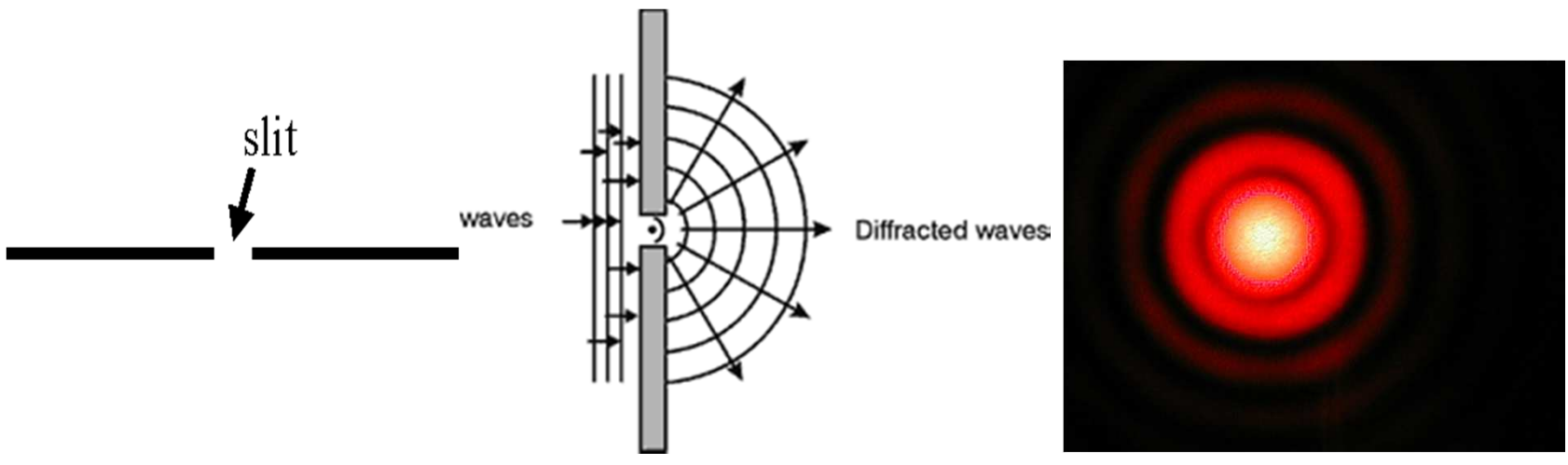
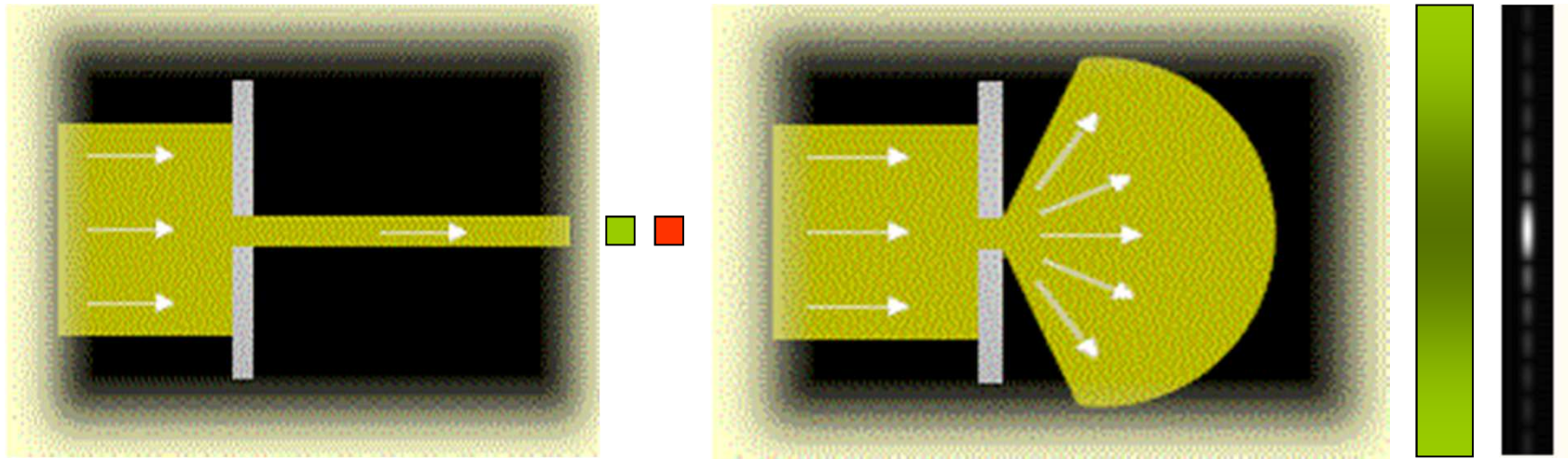




A luz é uma onda

Difracção (Francesco Grimaldi)

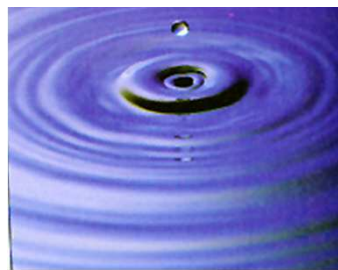
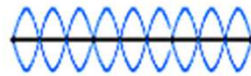
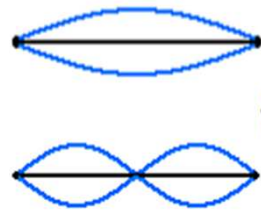
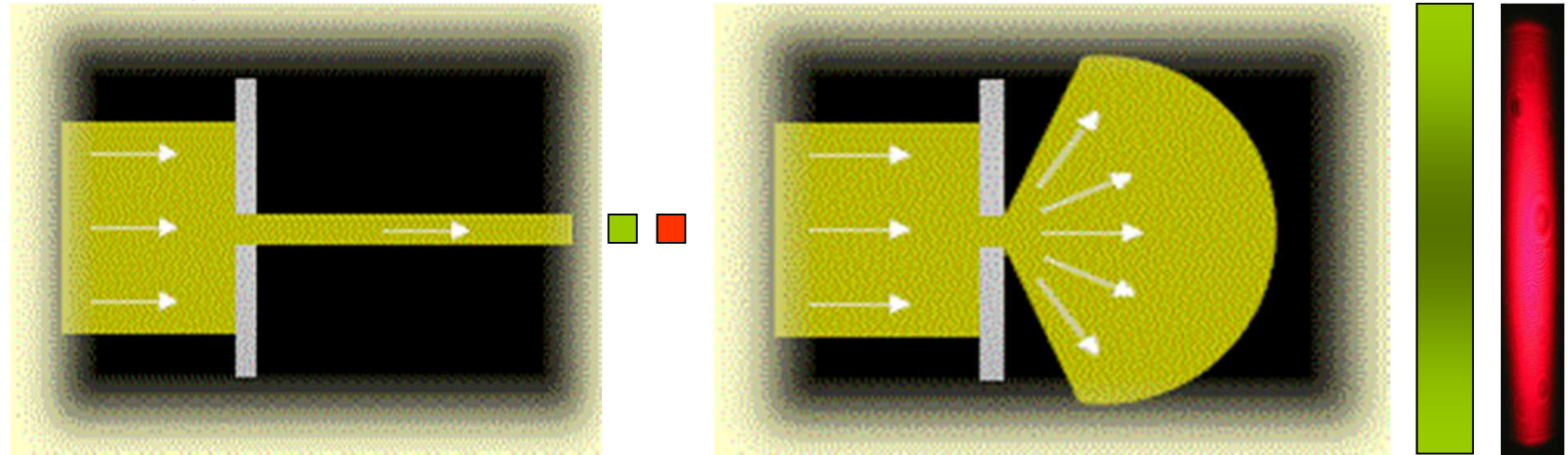
*Ver adiante, Cap. 14.



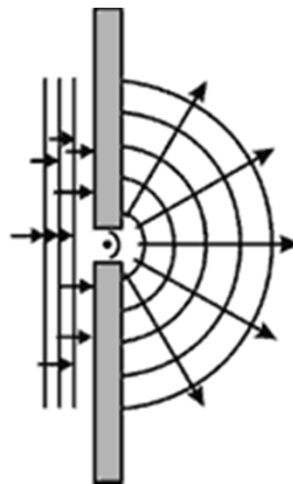


Robert Hooke e Huygens: a luz é uma onda (~1660)

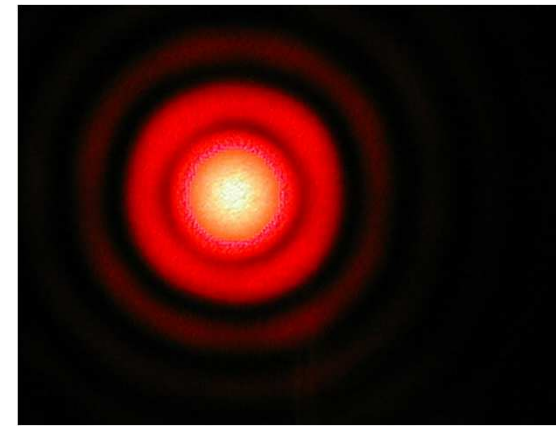
Difracção *Ver adiante, Cap. 14.



Plane waves



Diffracted waves





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.

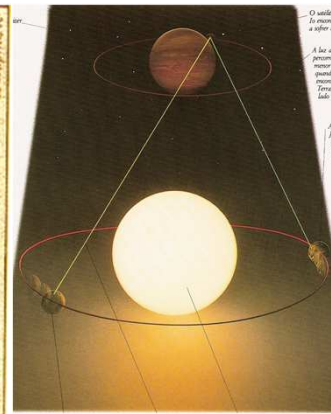
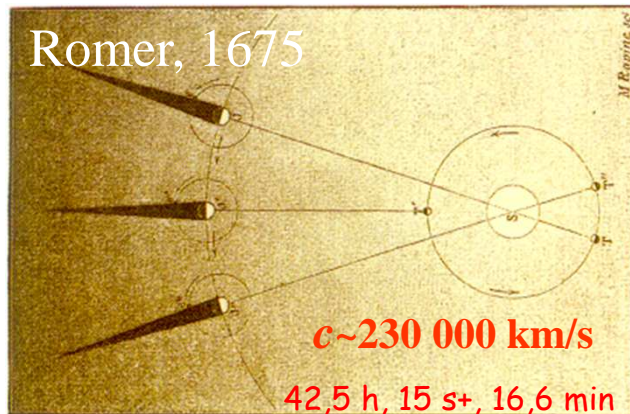
A primeira técnica de medição que produziu um resultado aceite pela comunidade científica foi proposta em 1676 por Ole Romer. Enquanto observava Júpiter e seu satélite Io, ele notou que havia um atraso no início dos eclipses de Io. Propôs que esse atraso se devia à finitude da velocidade da luz. As suas 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.





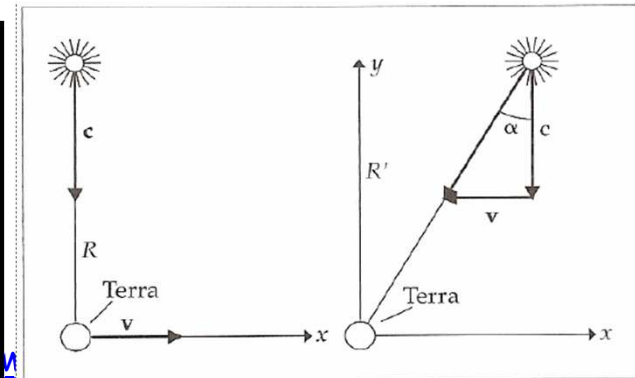
Determinação da velocidade da luz por Ole Romer e James Bradley



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.

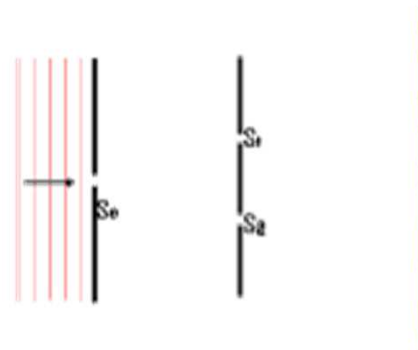
Para Young, o mesmo devia acontecer com a luz. Tal como Francesco Grimaldi, Young observou que os raios luminosos se espalhavam e difractavam quando passavam através de uma fenda estreita. Fez, então, passar a luz solar que deixava a fenda por outras duas fendas colocadas lado a lado e afastadas da primeira, 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.



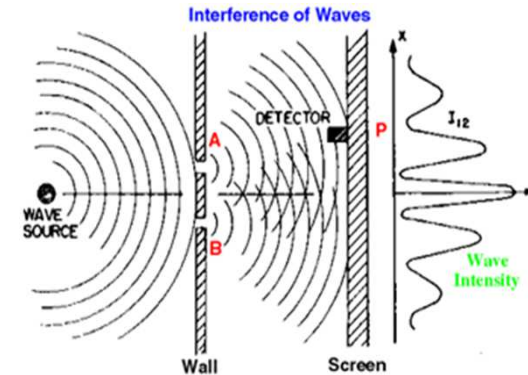


~1801: experiência de Young das fendas

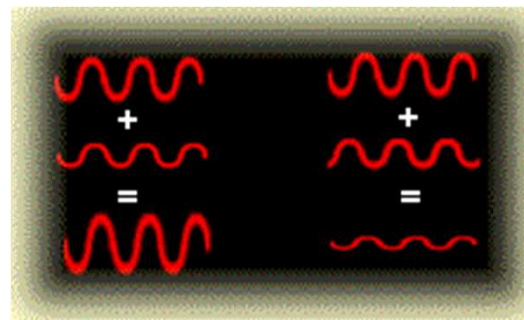
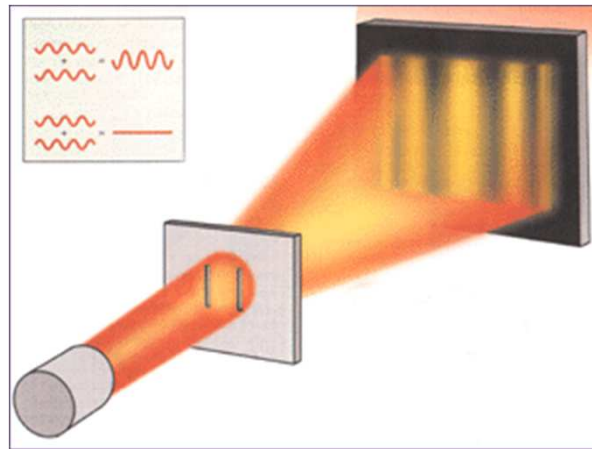
Interferência da Luz



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.

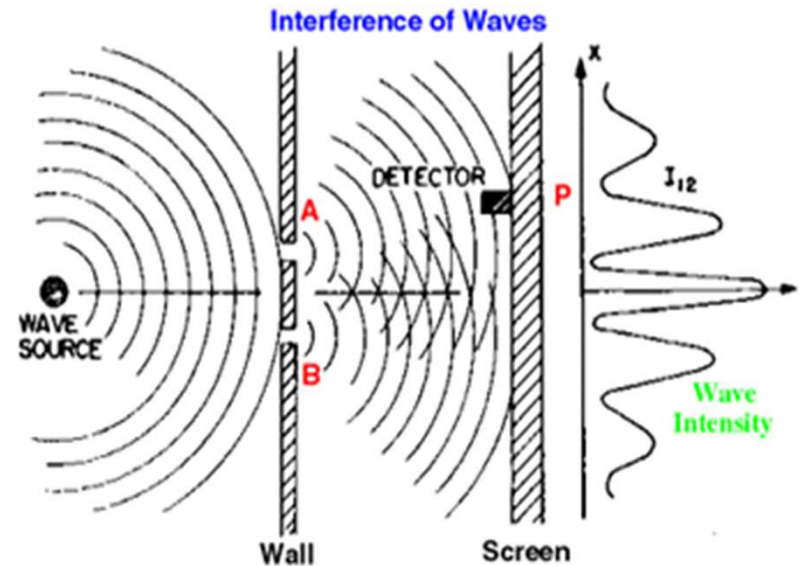
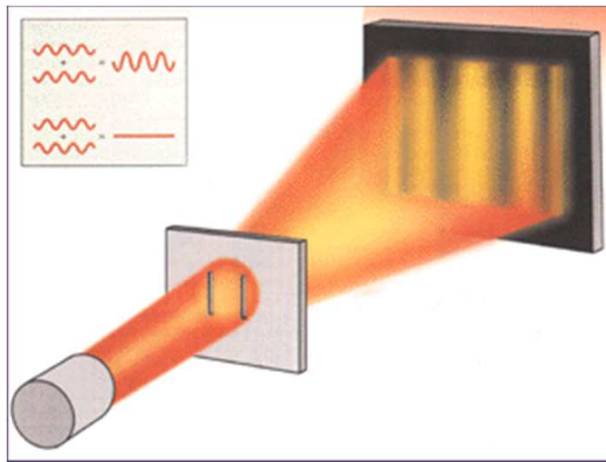
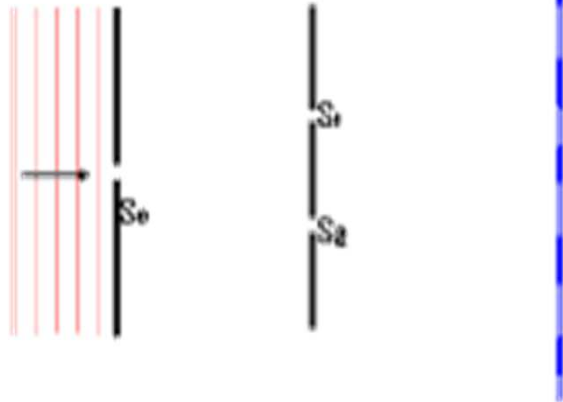




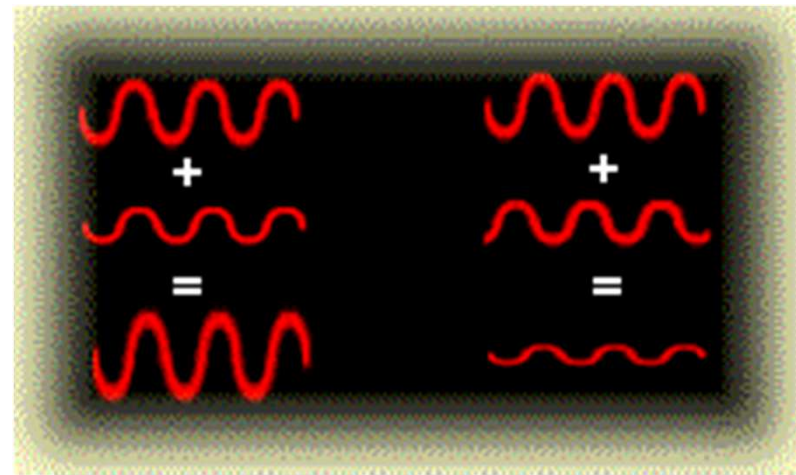
~1801: experiência das Fendas de Young

A luz volta a «ser» uma onda!

Interferência da Luz



*Ver adiante, Cap. 13.





Exemplos de interferência da luz na Natureza

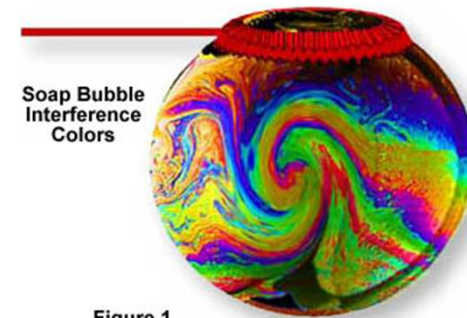
Young concluiu que as bandas coloridas observadas (franjas de interferência) só poderiam ser produzidas por ondas de diferentes comprimentos de onda. As experiências de interferência da luz fizeram ressuscitar a teoria ondulatória de Huygens, uma vez que não poderiam ser explicadas pela teoria corpuscular.



cauda de um pavão
As cores que vemos
as olhamos. Si
podem at
essas cores
dese
muit
refle
es



OPALA IRIDISCENTE



Soap Bubble
Interference
Colors

Figure 1

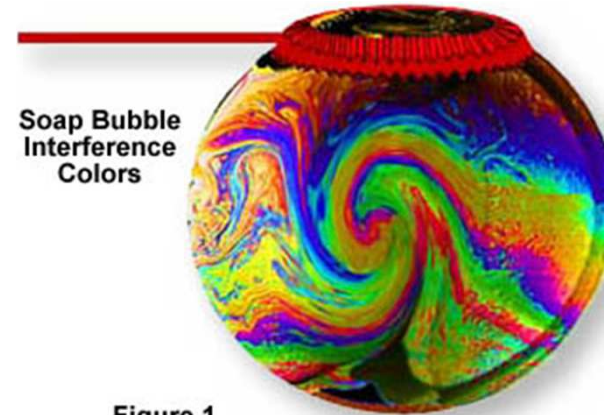


http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz#Teoria_corpuscular_da_luz





Exemplos de interferência da luz na Natureza



Soap Bubble Interference Colors

Figure 1





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 concentram-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 meio 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

1849

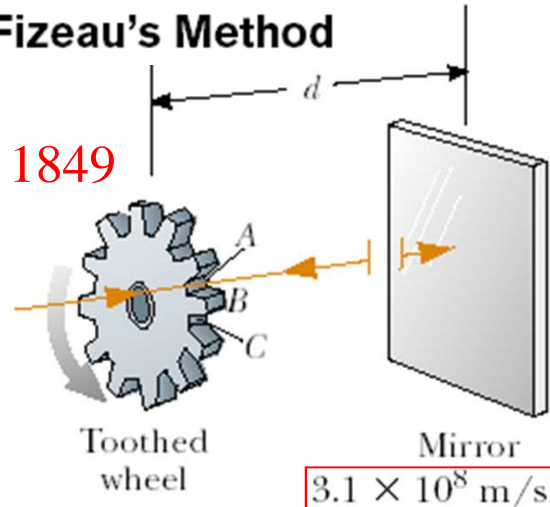


Figure 35.2 Fizeau's method for measuring the speed of light using a rotating toothed wheel. The light source is considered to be at the location of the wheel; thus, the distance d is known.

A velocidade da luz no vácuo é de 300 000 km/s; índice de refração do ar 1



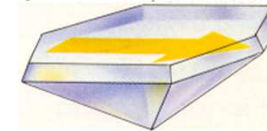
Índice de refração n (de um meio para determinada radiação): razão entre a velocidade da luz no vácuo (que é a mesma para todas as radiações) e a velocidade dessa radiação no meio considerado (e que é variável com a frequência f da radiação). Em meios não magnéticos ($\mu_r \approx 1$):

$$n(f) = c / v(f) = \sqrt{\epsilon_r(f) \mu_r(f)} \approx \sqrt{\epsilon_r(f)}$$

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.

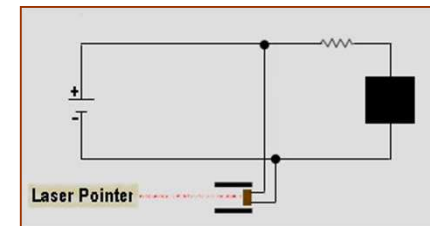
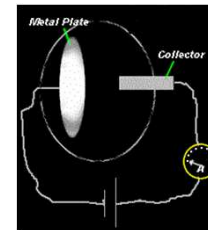
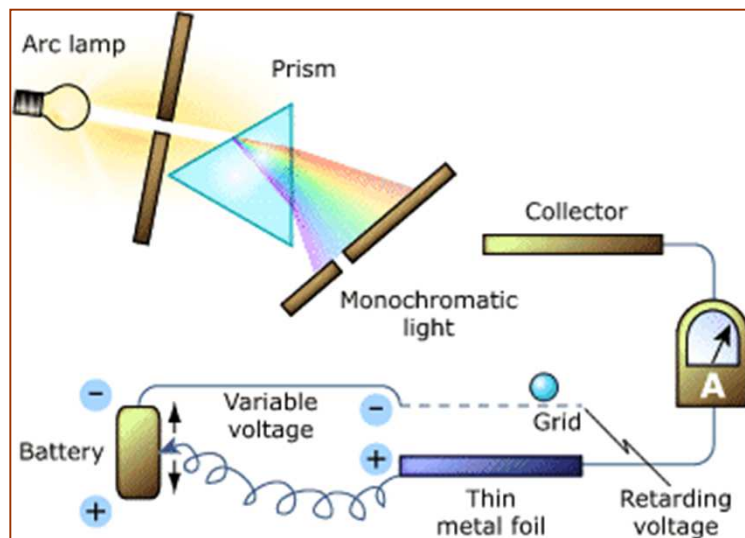
Albert Michelson iniciou pouco depois uma experiência para determinar os efeitos do movimento da Terra através do éter. Como a velocidade da luz no éter seria constante, e como a Terra se deveria deslocar relativamente ao éter cerca de 107 803 km/h (), seria de esperar que a velocidade da luz em relação 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>).

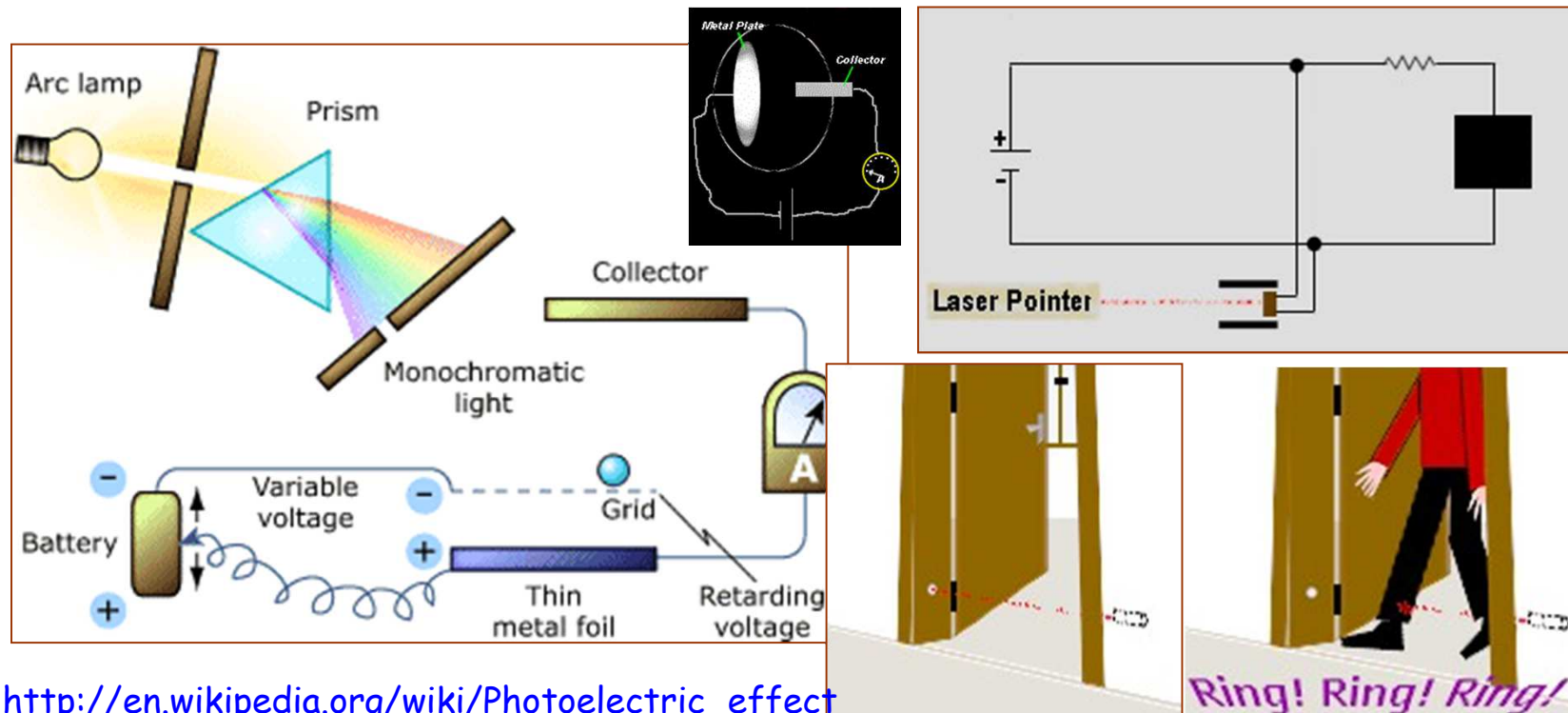




Efeito Fotoelétrico

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>).





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.

http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz#Teoria_corpuscular_da_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 $\epsilon=hf$ (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 .





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

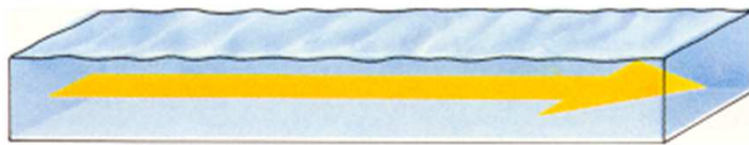
$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}, \text{ com } \nabla^2 = (\nabla \cdot \nabla)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

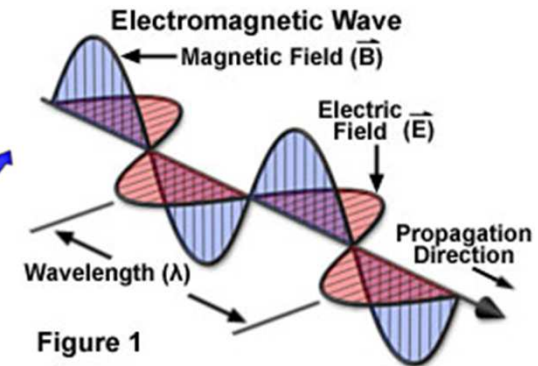
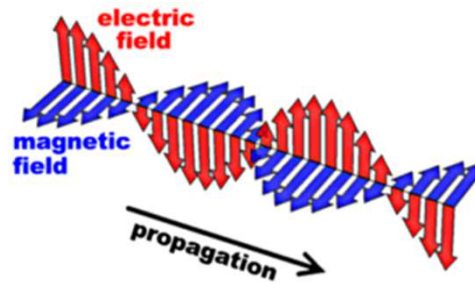
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

A velocidade da luz no vácuo é de 300 000 km/s;

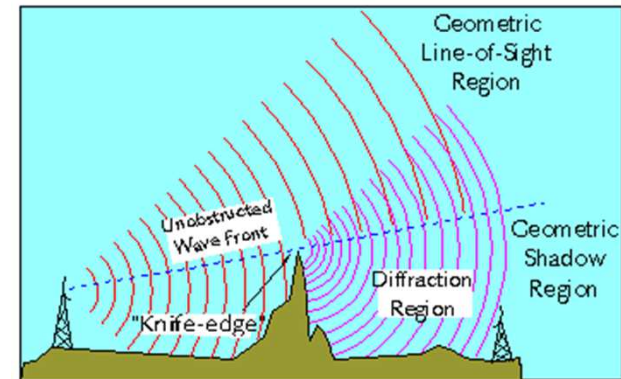


A partir das equações de onda para **E** e **B**

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

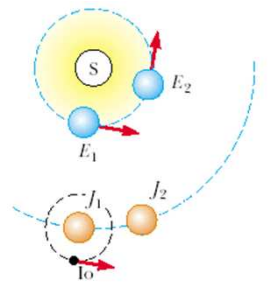
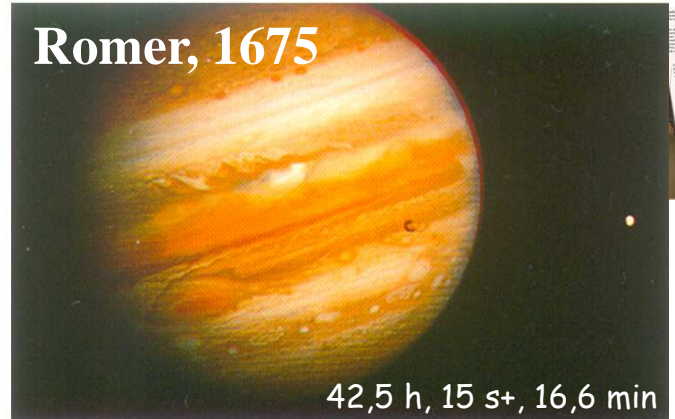
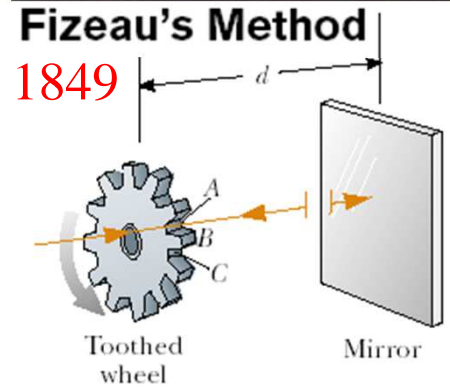
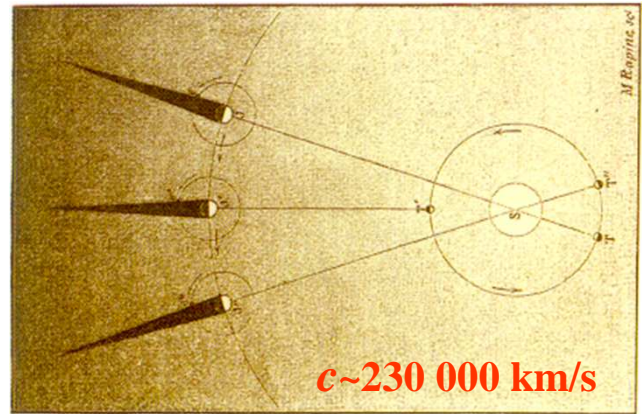


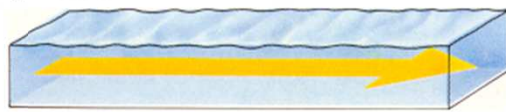
Figure 35.1 Roemer's method for measuring the speed of light. In the time interval during which the Earth travels 90° around the Sun (three months), Jupiter travels only about 7.5° (drawing not to scale).



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.

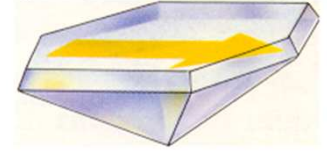
A velocidade da luz no vácuo é de 300 000 km/s; índice de refração do ar 1



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.

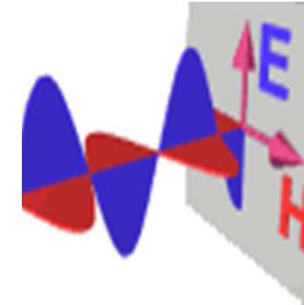
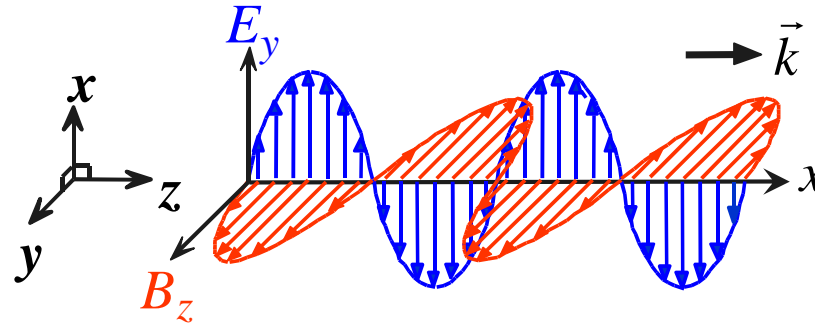
Índice de refração n (de um meio para determinada radiação): razão entre a velocidade da luz no vácuo (que é a mesma para todas as radiações) e a velocidade dessa radiação no meio considerado (e que é variável com a frequência da radiação). (Do lat. refractiōne-, «id.»)

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



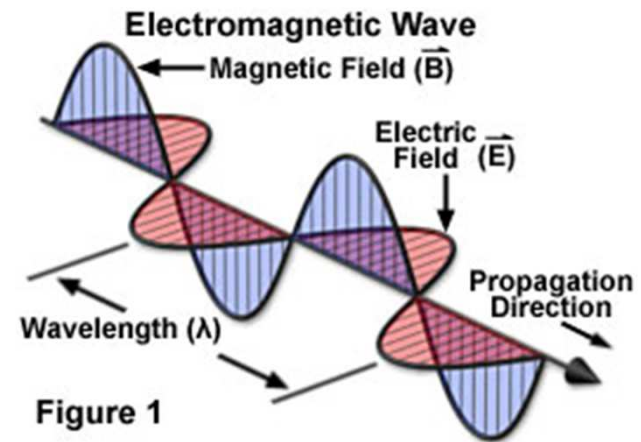
A velocidade das ondas electromagnéticas (OEM) deve ser igual à velocidade da luz c ($\sim 300\,000$ km/s). Em 1887 Hertz mostra experimentalmente que as ondas EM existem.

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

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

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

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



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

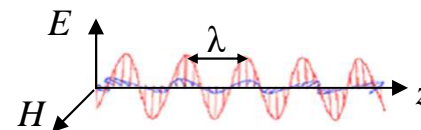




Conceito de onda

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).



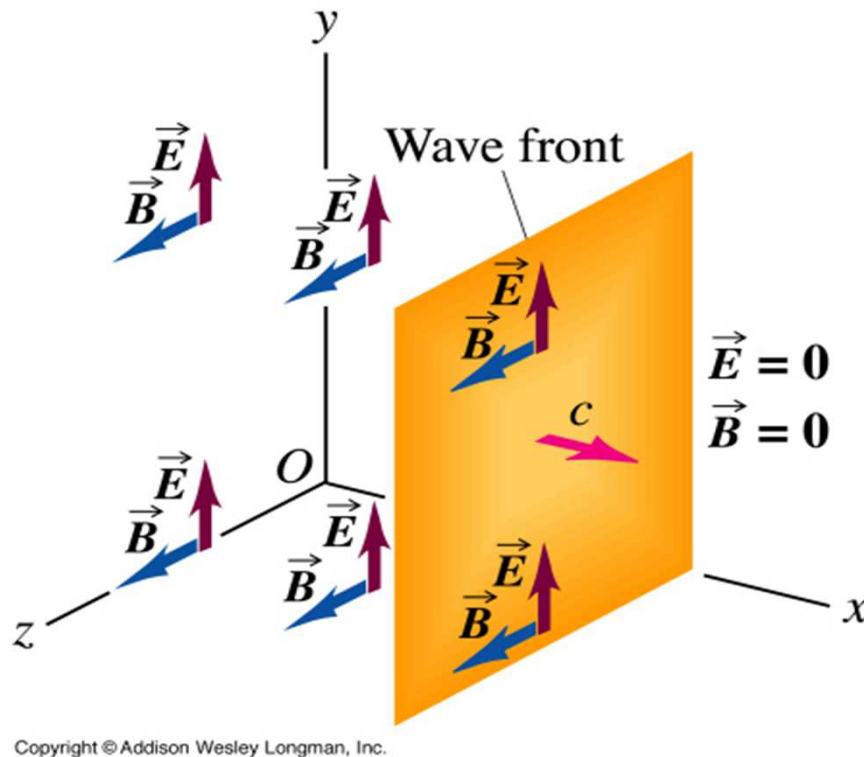
O comprimento de onda (λ) é a distância ou «espaço» de propagação durante um período T .

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

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{e} \quad \nabla^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

<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:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad \Psi = E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z \quad \text{e} \quad v = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

Solução geral (ondas planas progressivas):

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega t)$$

$$\vec{B}(x, y, z, t) = \vec{B}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega t), \quad \text{com } k = \frac{2\pi}{\lambda}, v = c = \frac{\omega}{k}, \omega = 2\pi f.$$

$$\text{se } c = \frac{E}{B} = \frac{E_0}{B_0} \left(= \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \right). \quad \vec{k} \equiv \text{vector de onda, } |\vec{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

$$\vec{E} \perp \vec{B}, \vec{E} \perp \vec{k} \text{ e } \vec{B} \perp \vec{k}$$

$$\vec{E} \times \vec{B} \propto \vec{k}$$

O vector \mathbf{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:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_y \hat{y} = E_{0y} \hat{y} \cos \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \theta \right]$$

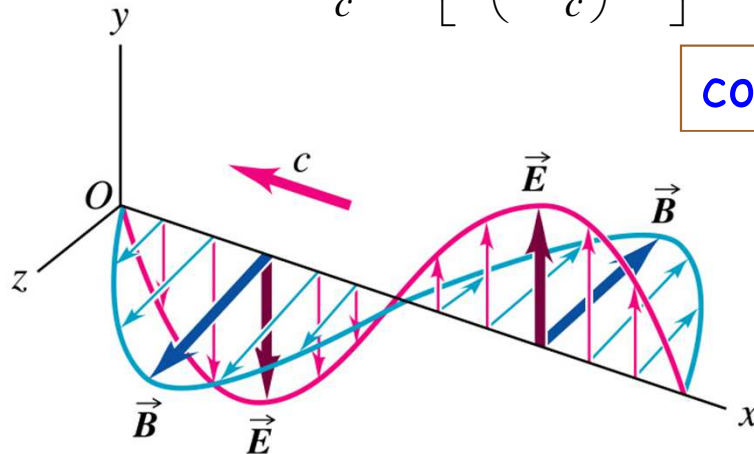
$$\vec{B}(x, y, z, t) = B_z \hat{z} = - \int \frac{\partial E_y}{\partial x} dt = - \frac{E_{0y} \omega}{c} \int \sin \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \theta \right] dt$$

$$\vec{B}(x, y, z, t) = B_z \hat{z} = \frac{E_{0y}}{c} \cos \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \theta \right]$$

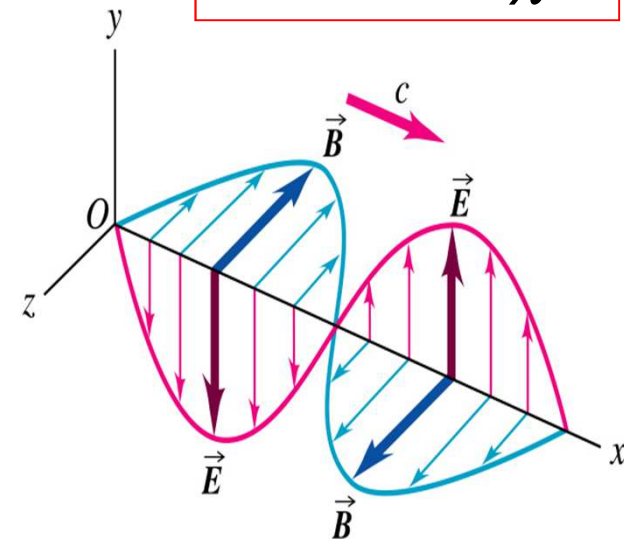
$$\text{com } E_y = cB_z$$

$$\vec{B} \perp \vec{E}$$

$$\vec{E} \times \vec{B} // \vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{x}$$



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).

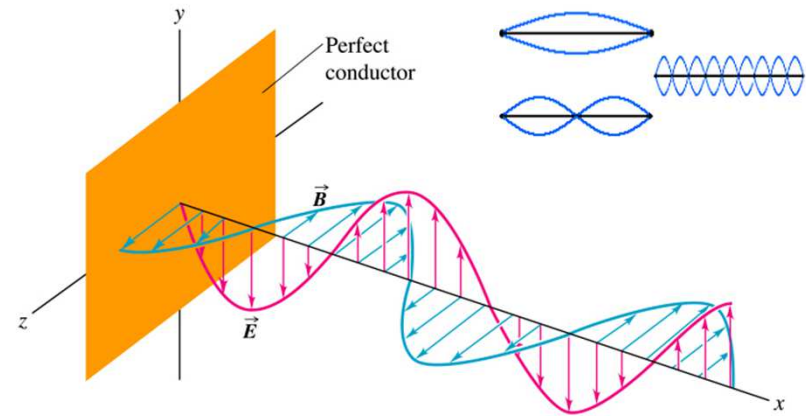




Ondas estacionárias: laser e forno de microondas

Uma onda electromagnética estacionária não se propaga.

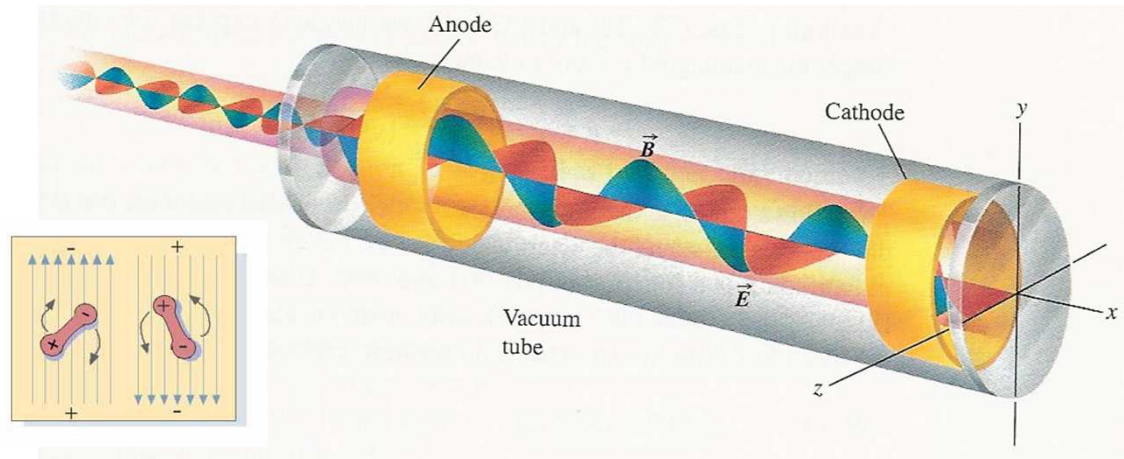
<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/standwave.swf>



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



Figure 3



<http://www.youtube.com/watch?v=4h1ESUz2H3E>





Radiação electromagnética

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;

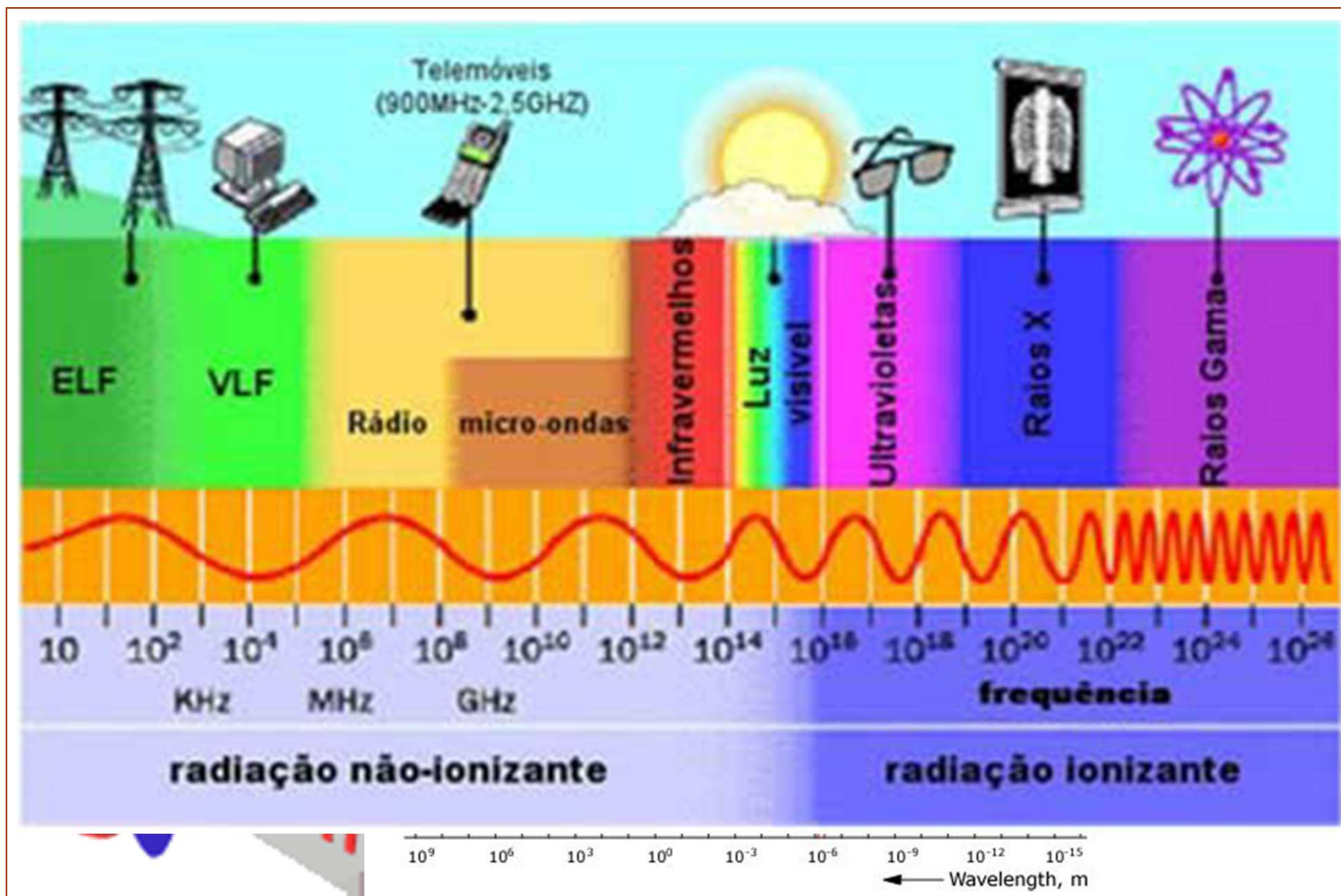
~ **de absorção:** riscas ou bandas observadas, para certos comprimentos de onda, em resultado da absorção de radiação electromagnética por átomos, moléculas, iões ou radicais;

~ **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**

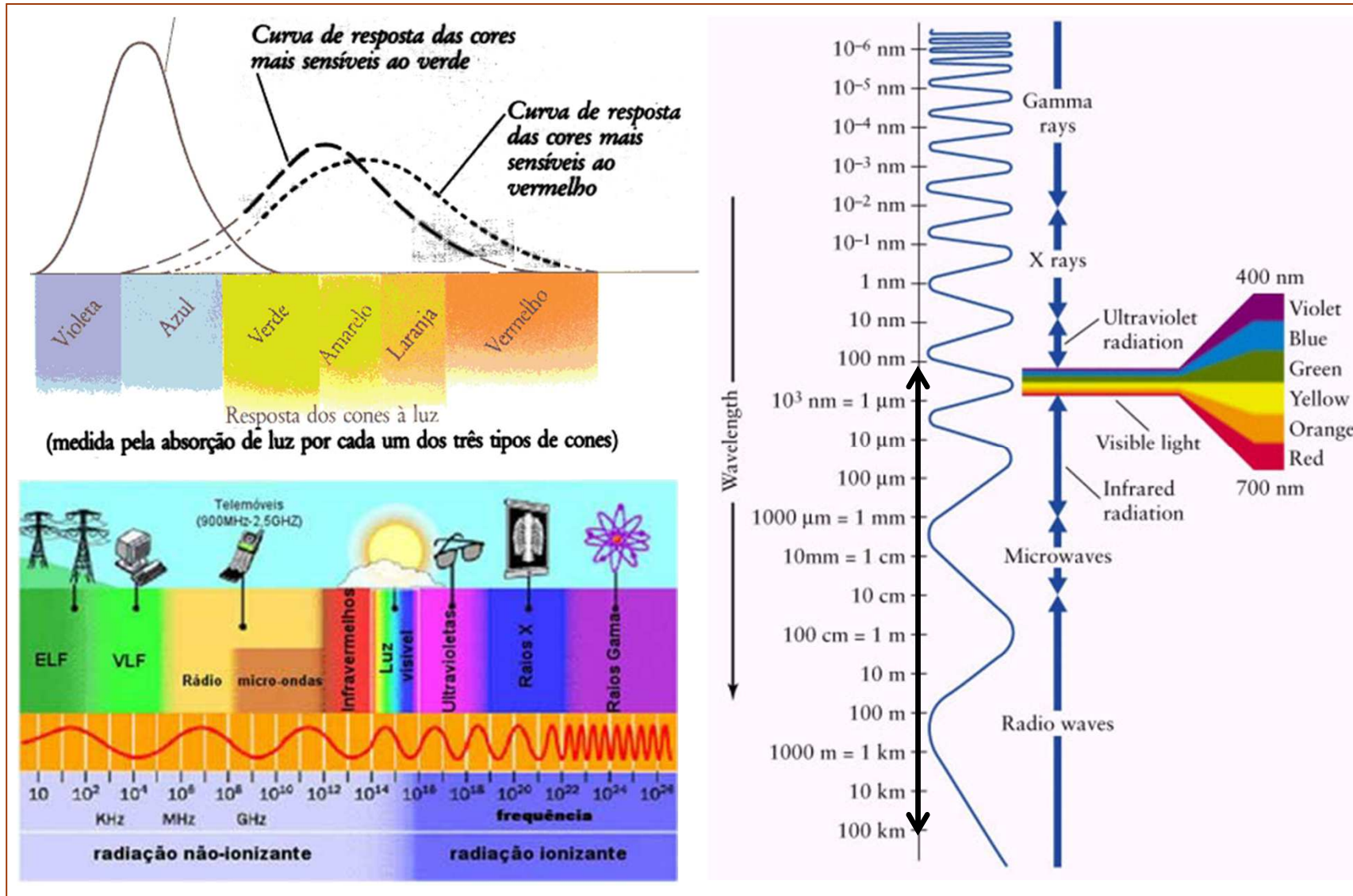


Espectro electromagnético





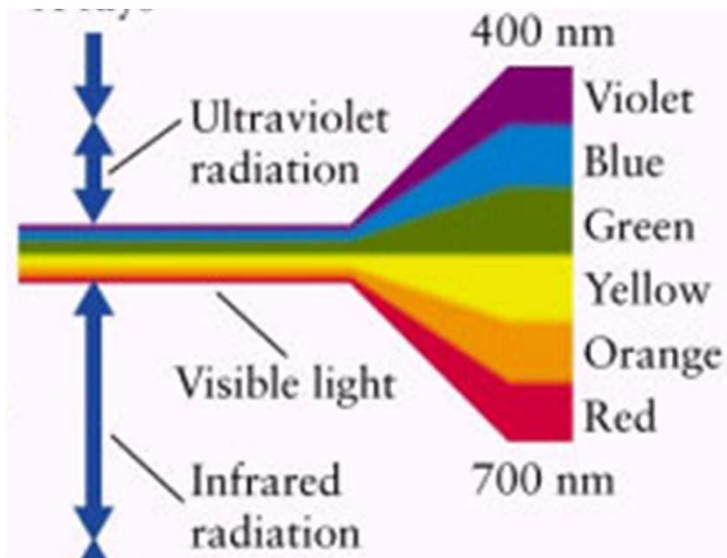
O espectro electromagnético





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 ...)

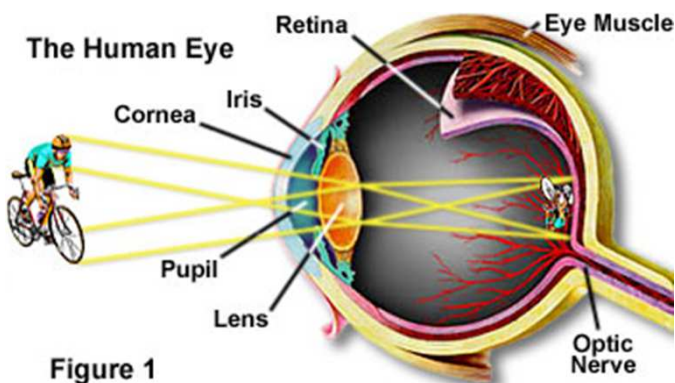
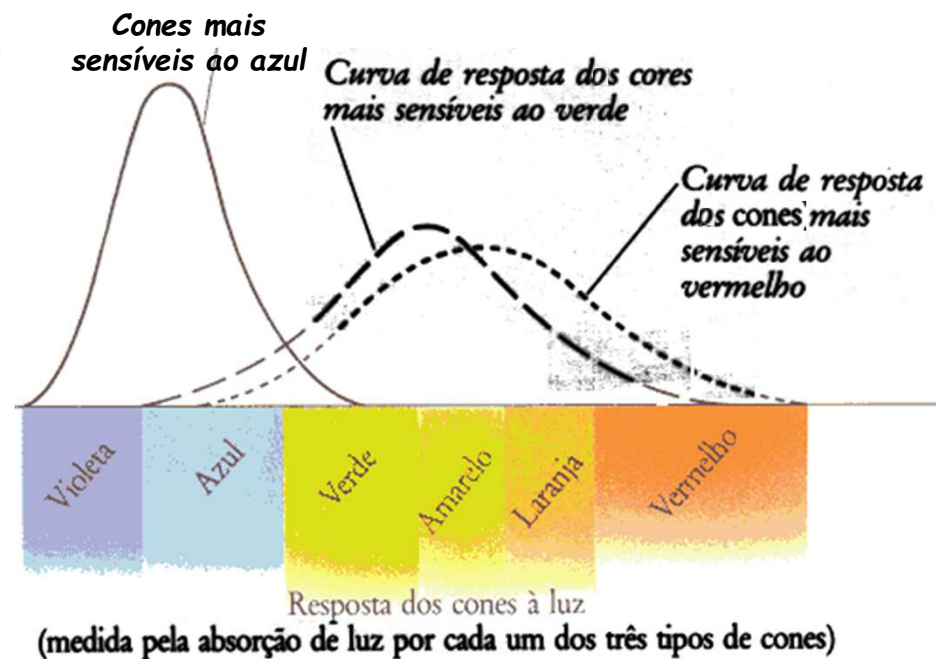


Figure 1





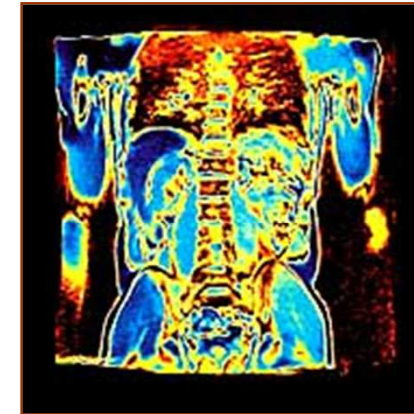
~1800: descoberta da luz infravermelha

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.



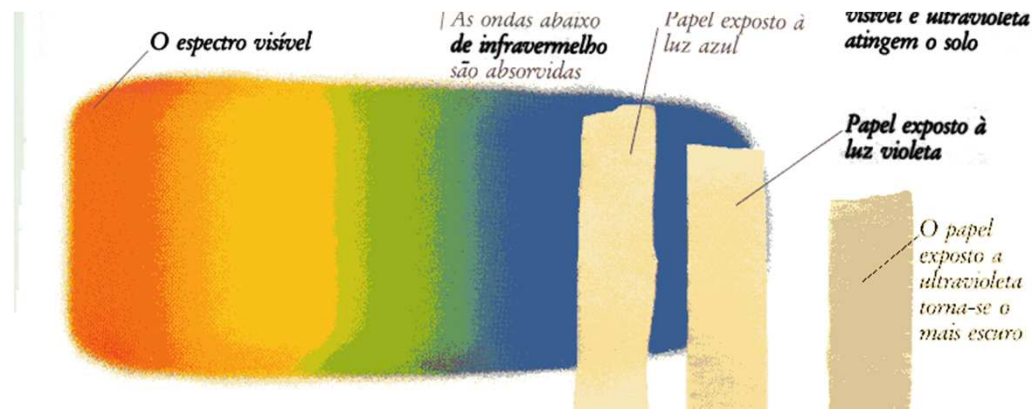
O espectro visível



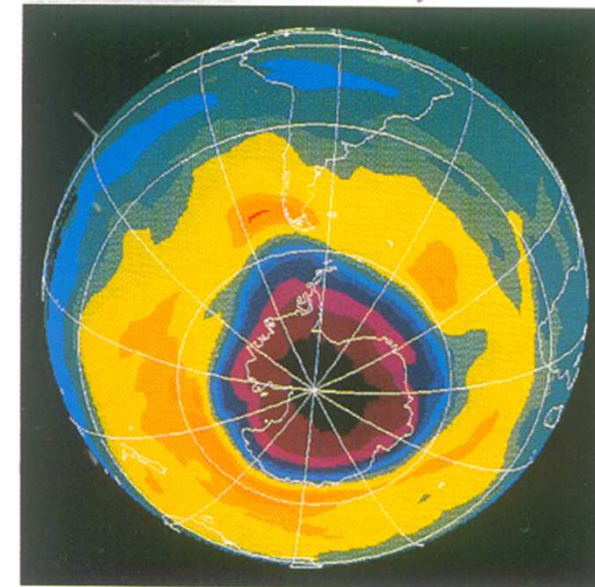
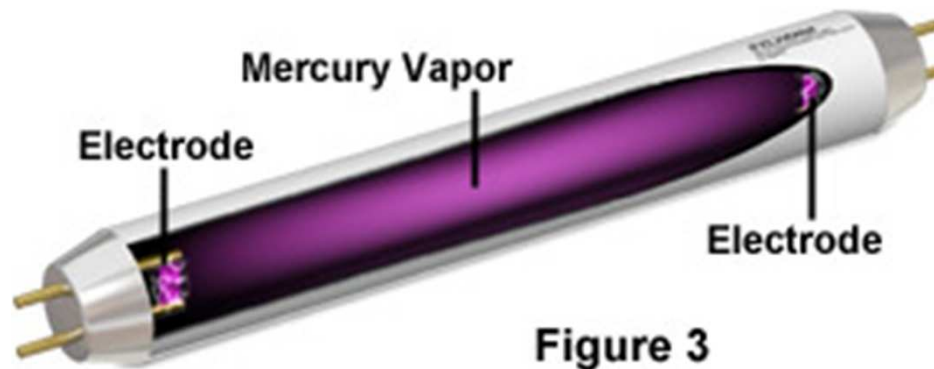


~1801: descoberta da luz ultravioleta

Carl Wilhelm Scheele descobriu a luz ultravioleta ao estudar o poder «escurecedor» da radiação solar no nitrato de prata.

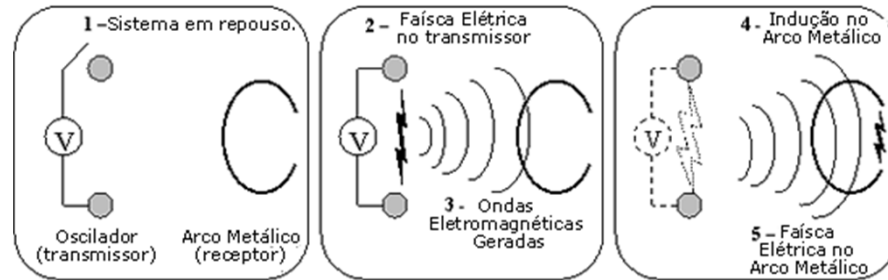
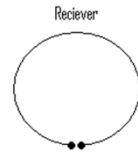
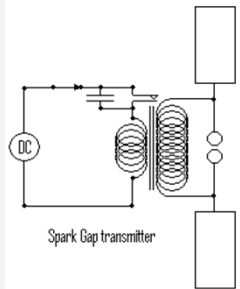


Fluorescent Mercury Vapor Lamp

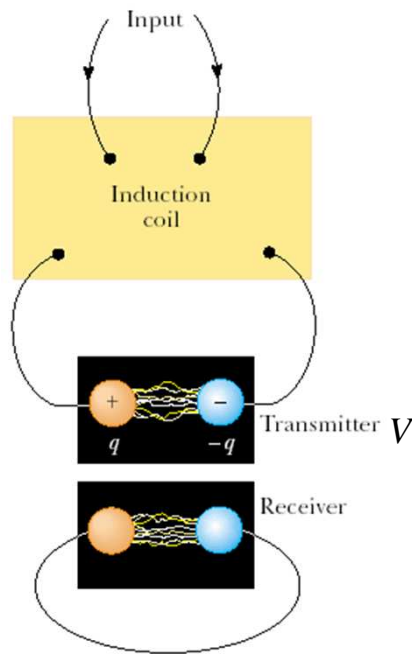




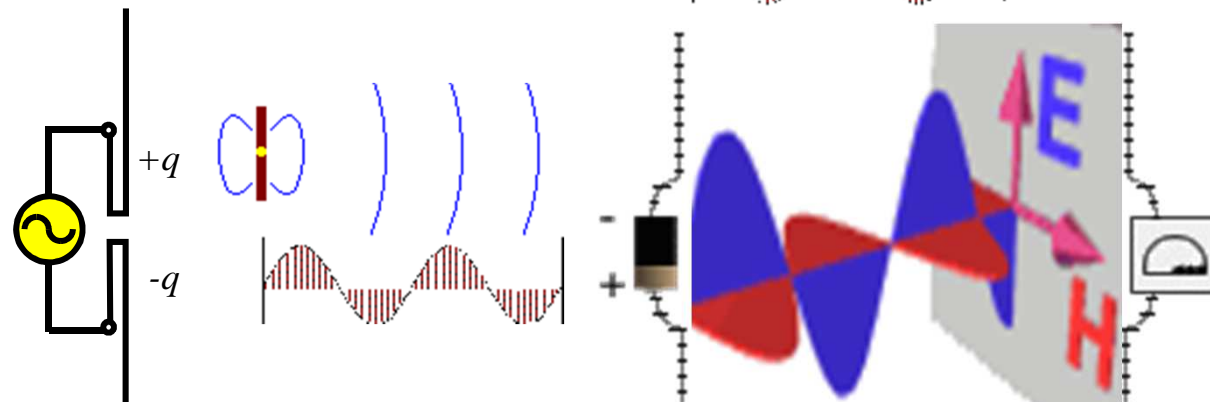
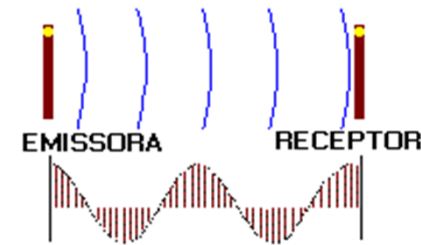
Em 1887 Hertz produz e detecta ondas electromagnéticas



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



ondas hertzianas
(dipolo oscilante)

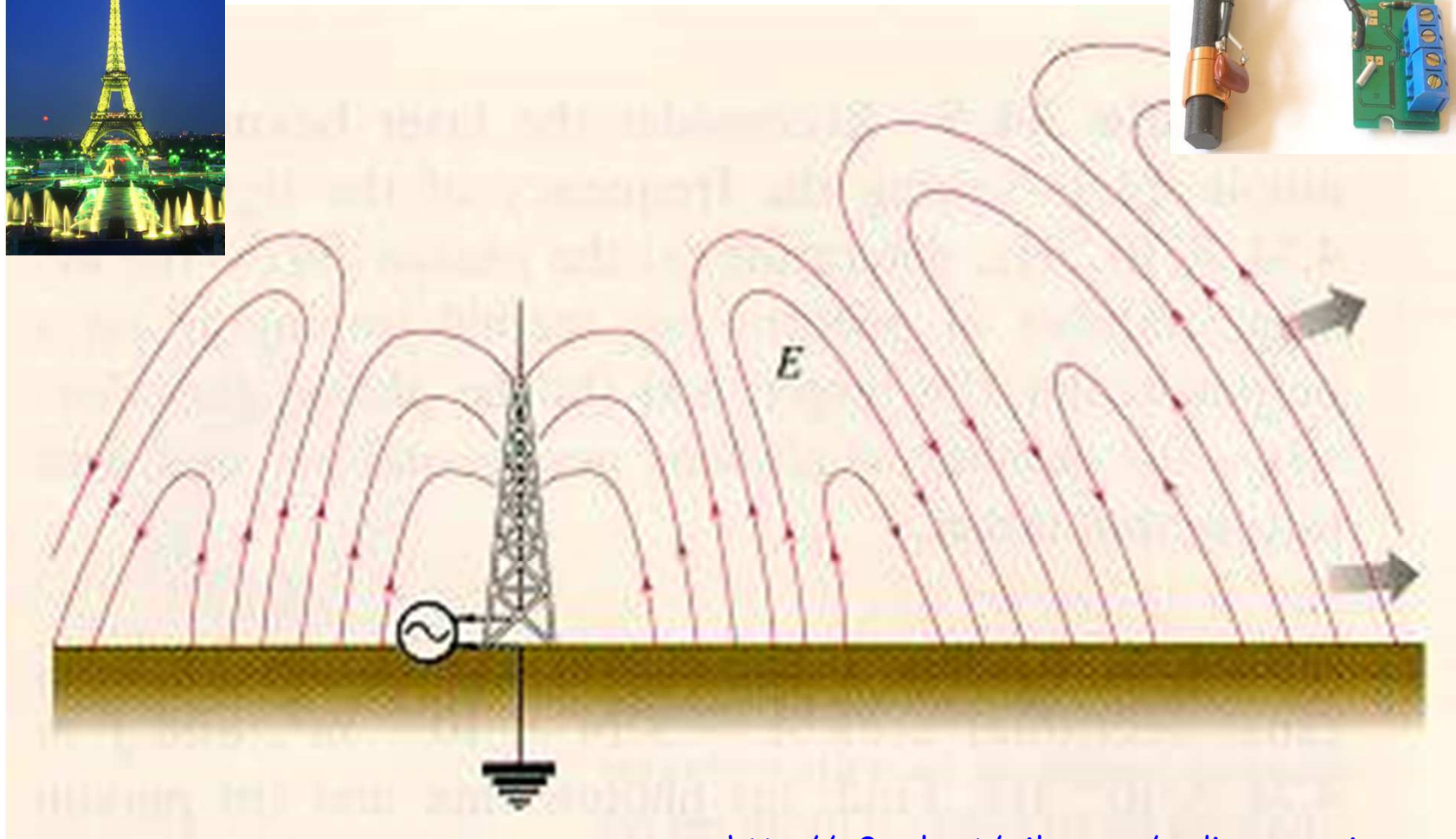
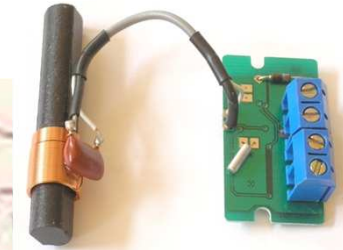


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/TheLightWaveEquation.flv>





Campo eléctrico emitido por uma antena



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/radio-waves.jar>

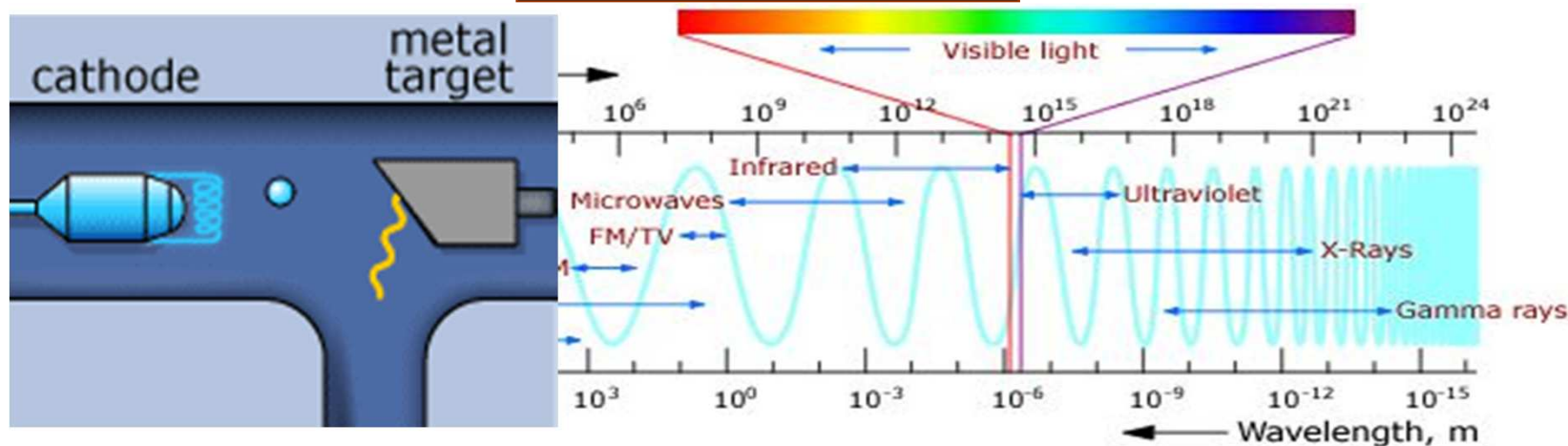
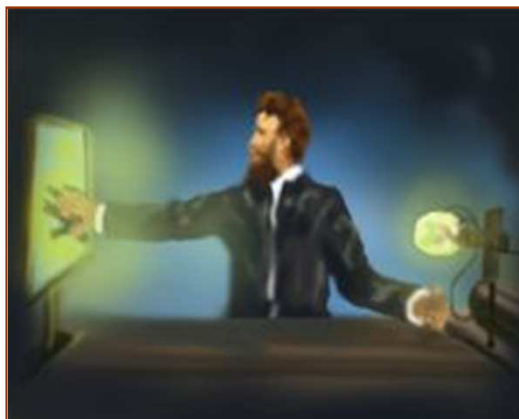




~1895: descoberta dos raios x



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

Scattered x-ray photon

X-ray photon

Electron

$d = 0.3 \text{ nm}$

Cl^-

Na^+

0.34 nm

3.4 nm

Nucleotides

Sugar phosphate bond

Crystal

Diffraction rings

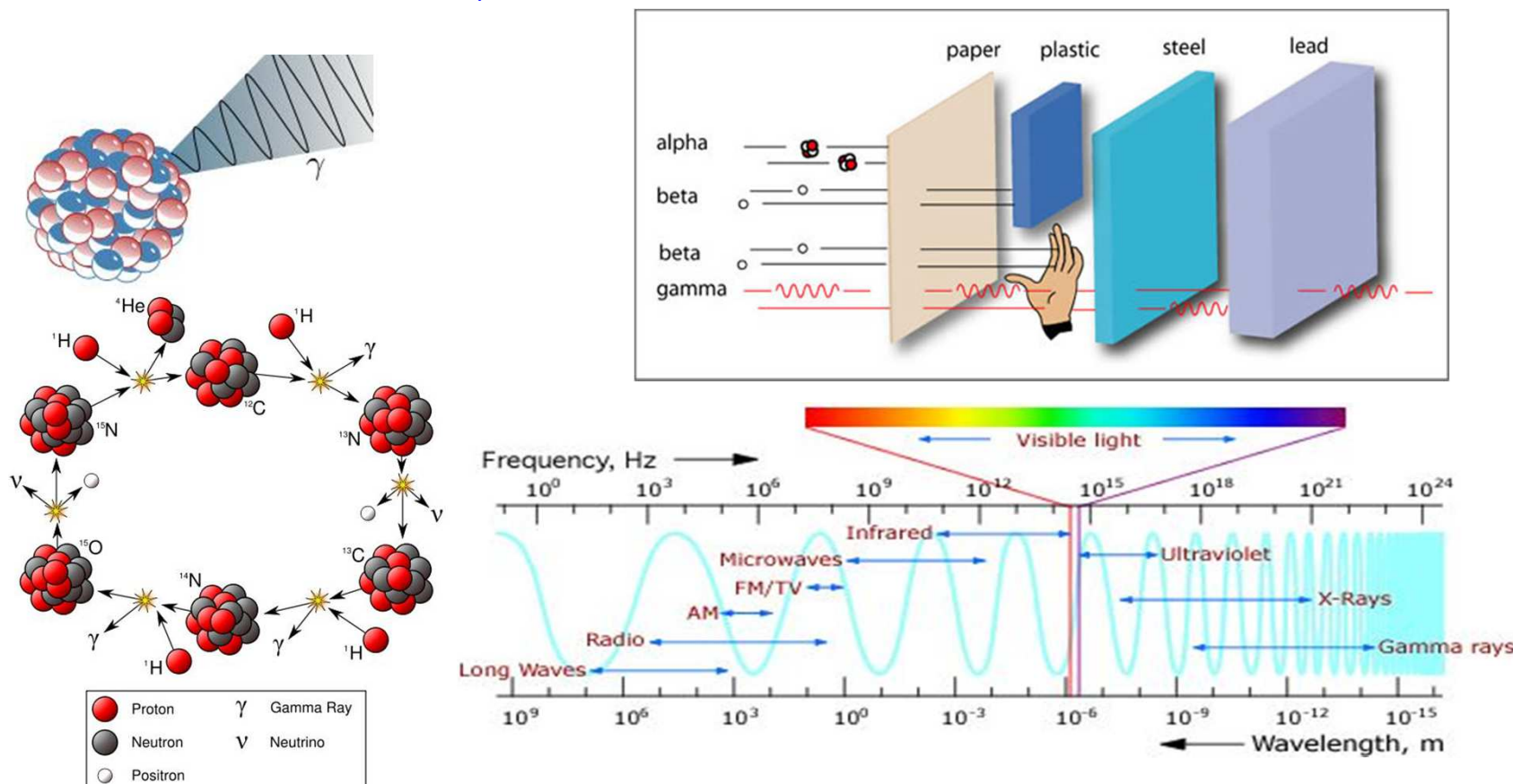
GATE 7

X-rays



~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=7v0S95kMmok>





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;

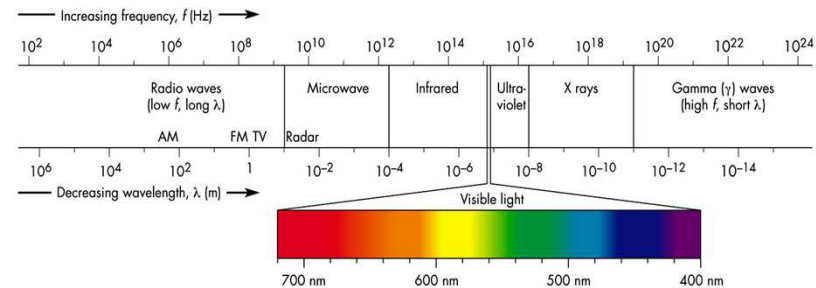
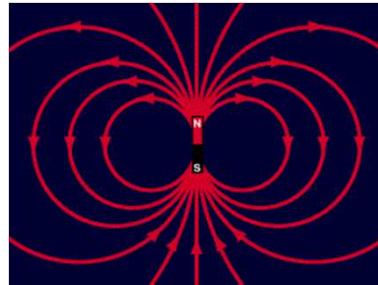
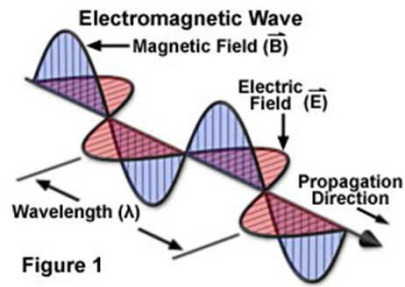
Antena [e]: s. f. condutor eléctrico destinado à emissão ou recepção de ondas electromagnéticas;

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



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:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B} = c^2 \epsilon \vec{E} \times \vec{B}, \quad |\vec{S}| = uc = \frac{1}{\mu} EB = \frac{1}{c\mu} E^2$$

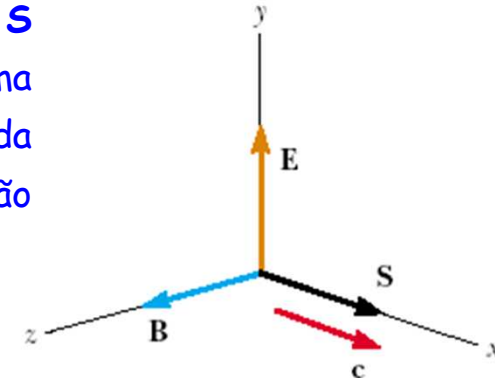




Energia transportada pela OEM: irradiância

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:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B} = c^2 \epsilon \vec{E} \times \vec{B}, \quad |\vec{S}| = uc = \frac{1}{\mu} EB$$



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 S , constitui uma medida da **irradiância** I ou **intensidade**.*

$$\langle S \rangle = \langle |\vec{S}| \rangle = c^2 \epsilon |\vec{E}_0 \times \vec{B}_0| \langle \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} c^2 \epsilon |\vec{E}_0 \times \vec{B}_0| \rightarrow I = \langle S \rangle = \frac{1}{2} c^2 \epsilon E_0^2$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{c}{\mu} \langle B^2 \rangle = c \epsilon \langle E^2 \rangle$$

*Em Óptica usa-se o termo **irradiância**.

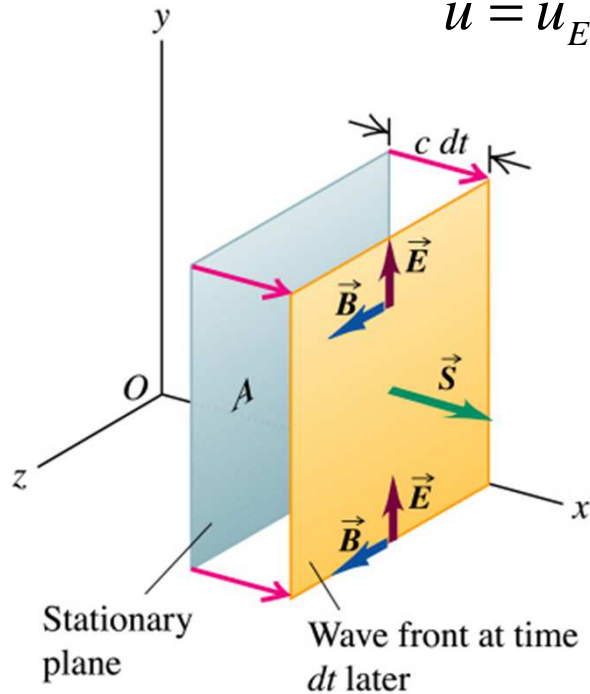




Potência emitida pelo Sol e constante Solar

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.

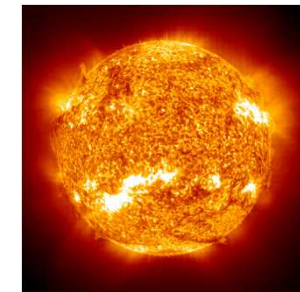
Frente de onda dt segundos após ter atravessado um plano estacionário de área A . O volume entre o plano e a frente de onda contém a quantidade de energia electromagnética:

$$U_{V=Ac dt} = uAc dt$$

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.





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** $\epsilon = hf$ (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 .





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:

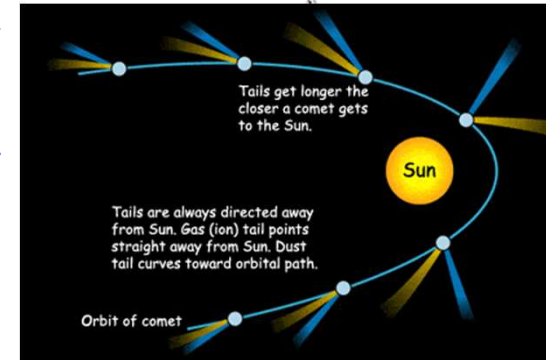
$$P = u = u_E + u_B = \frac{S}{c} \rightarrow \langle P \rangle = \frac{\langle S \rangle}{c} = \frac{I}{c}$$

Se o momento for p , a pressão exercida pelo feixe sobre superfícies absorvente e reflectoras é:

$$AP = \frac{\Delta p}{\Delta t}; \text{ se } p_V = \frac{\Delta p}{(c\Delta tA)} :$$

$$p_{V, \text{ com absorção}} = \frac{\langle S \rangle}{c^2} = \frac{U}{c} \quad \text{e} \quad p_{V, \text{ com reflexão}} = 2 \frac{\langle S \rangle}{c^2} = 2 \frac{U}{c}$$

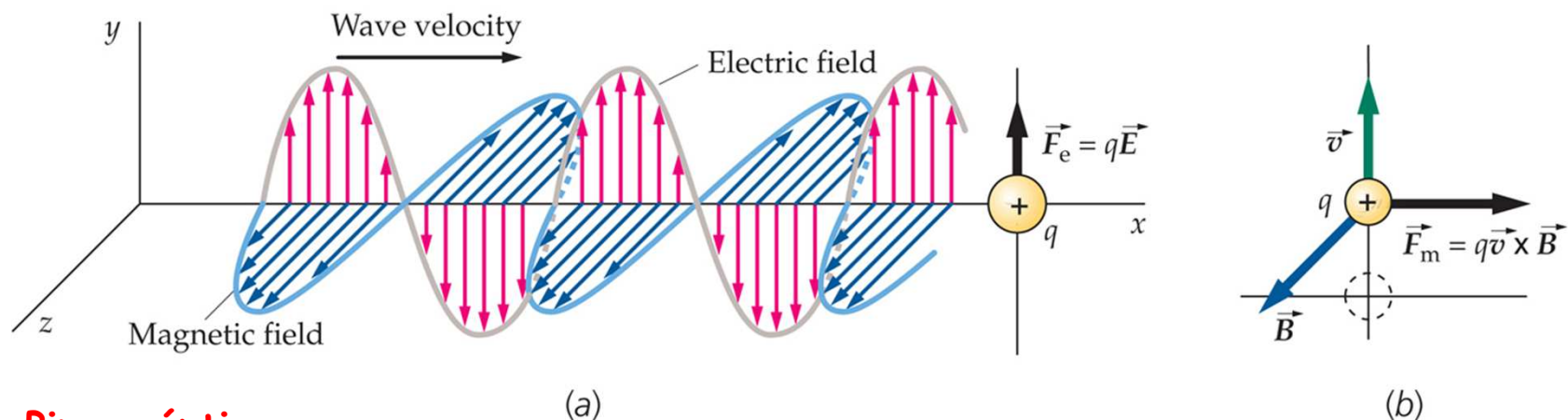
http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail





Pressão de radiação

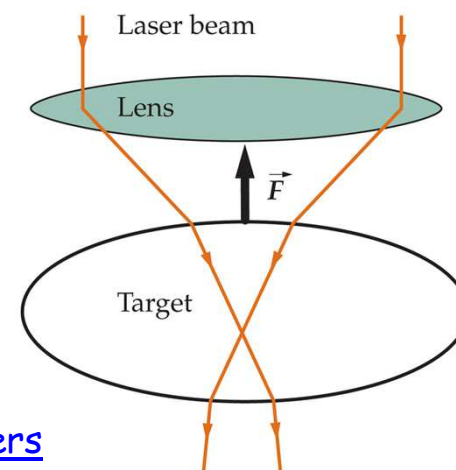
Uma onda electromagnética incidente numa carga pontual em repouso: a força eléctrica acelera a carga para cima; quando a velocidade da carga é para cima, a força magnética acelera a carga na direcção do vector de onda da onda.



Pinças ópticas

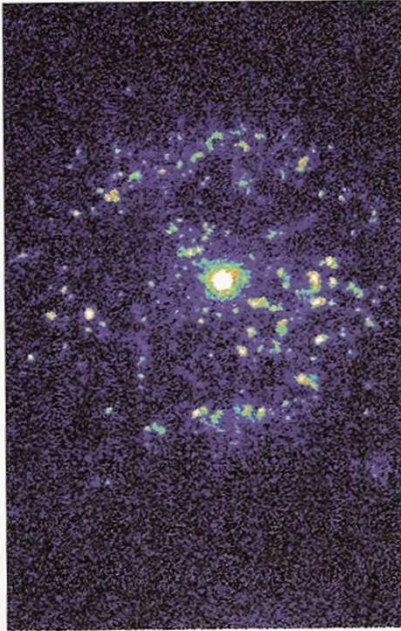
As "pinças ópticas" fazem uso da quantidade de movimento (momento) transportada por ondas electromagnéticas para manipular objectos de dimensões microscópicas. Os dois "feixes/raios" são desviados ao passar pelo alvo transparente, como uma célula biológica, o que faz com que o alvo seja puxado para cima. 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.

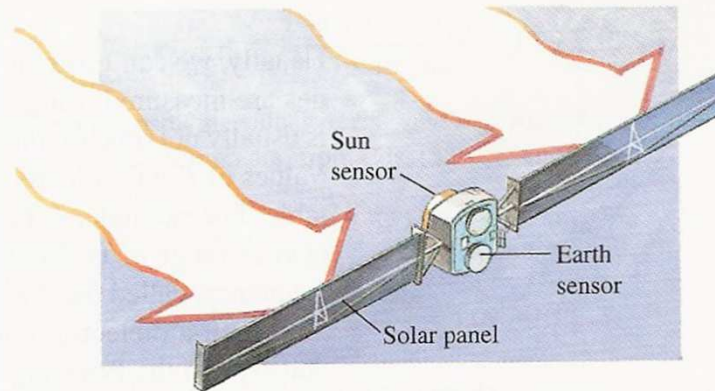
EXAMPLE 33-4

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

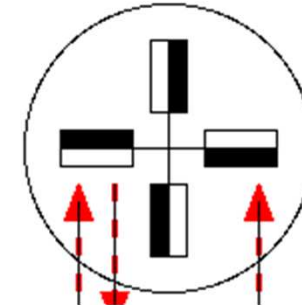
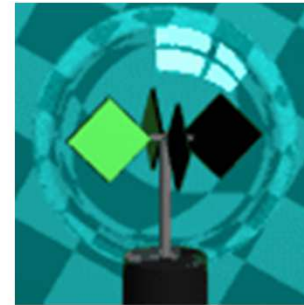
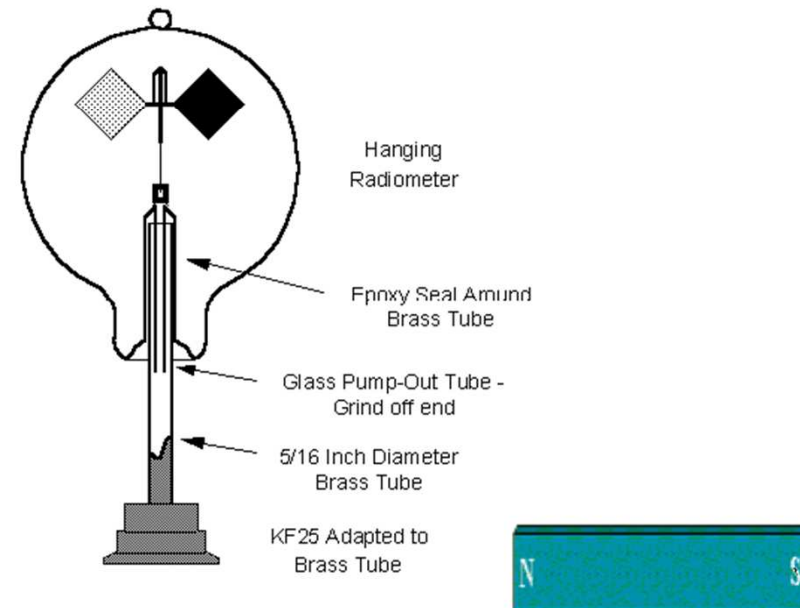


Figure 1 - Radiometer Adaptation



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





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 $h\nu$, onde ν 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;

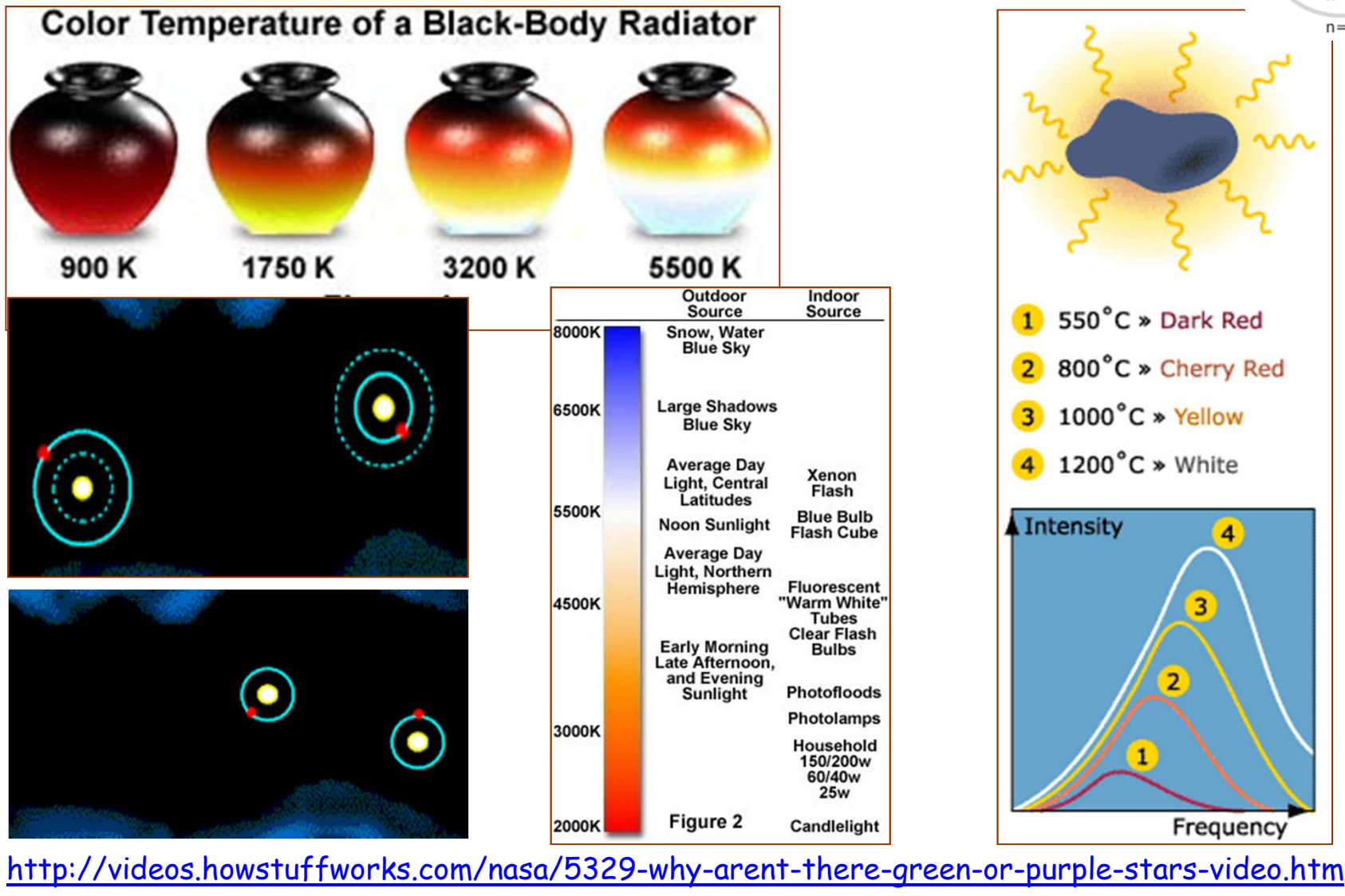
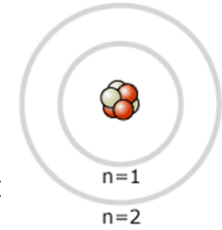
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_light_sources

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



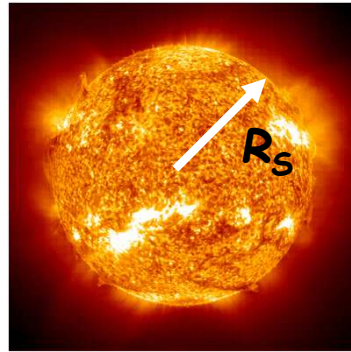


Emissão de luz pelos sólidos





Espectro de emissão do Sol



Potência emitida pelo

Sol (P_S):

$$P_S = \sigma T_S^4 (4\pi R_S^2)$$

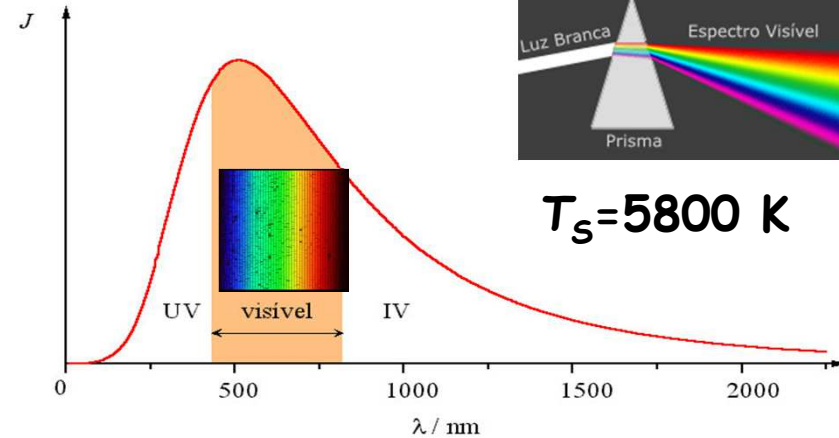
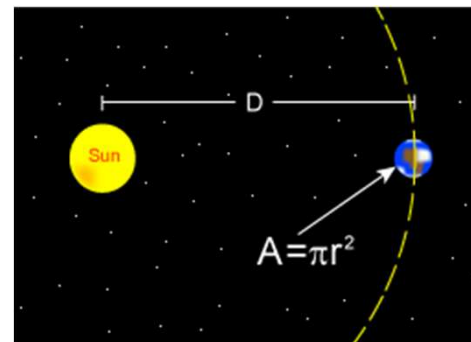
$$P_S = 3.839 \times 10^{26} \text{ W}$$

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

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

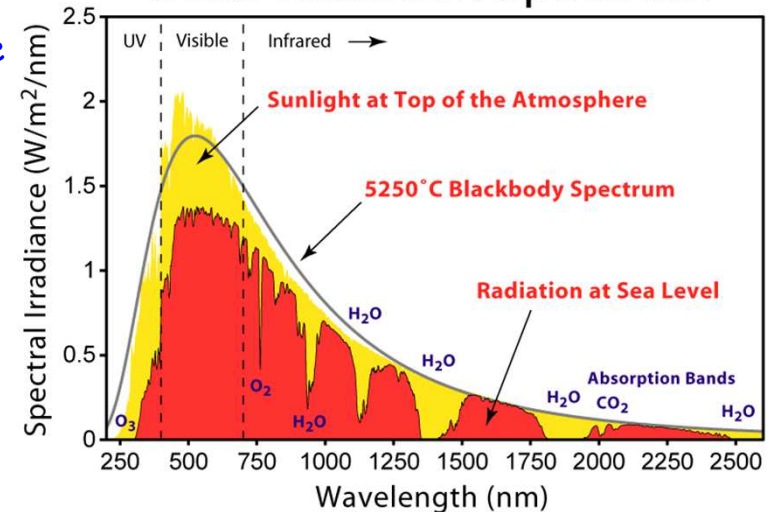
Constante solar: quantidade de energia que atinge o limite superior da atmosfera por unidade de área, perpendicularmente aos raios solares, por unidade de tempo, cujo valor médio é: $1,4 \text{ kW}/\text{m}^2$.

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



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

Solar Radiation Spectrum

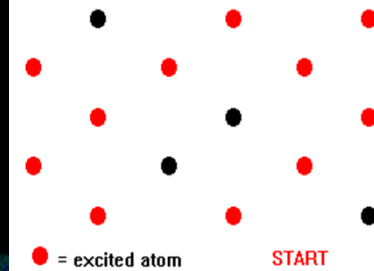
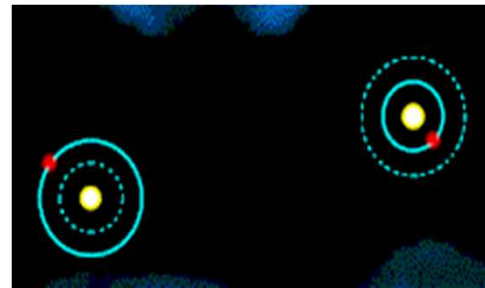
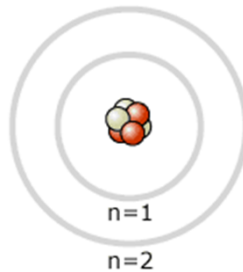




Emissão e absorção de luz pelos átomos

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.

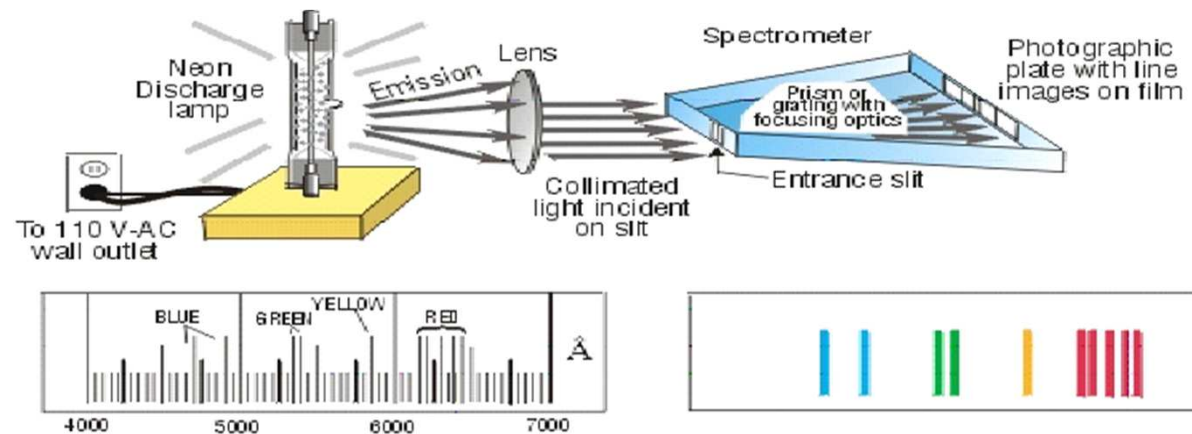
Assim, se quisermos que uma fonte emita radiação de uma dada frequência f só temos de procurar um meio em que dois níveis atômicos satisfaçam a condição $hf = E_i - E_f$, e fornecer energia ao meio para permitir a missão da energia hf . **Ter presente que os átomos também podem emitir/absorver energia por processos não radiativos, isto é, sem emissão de luz. Em geral, a luz emitida por um grande número de átomos não é polarizada.**





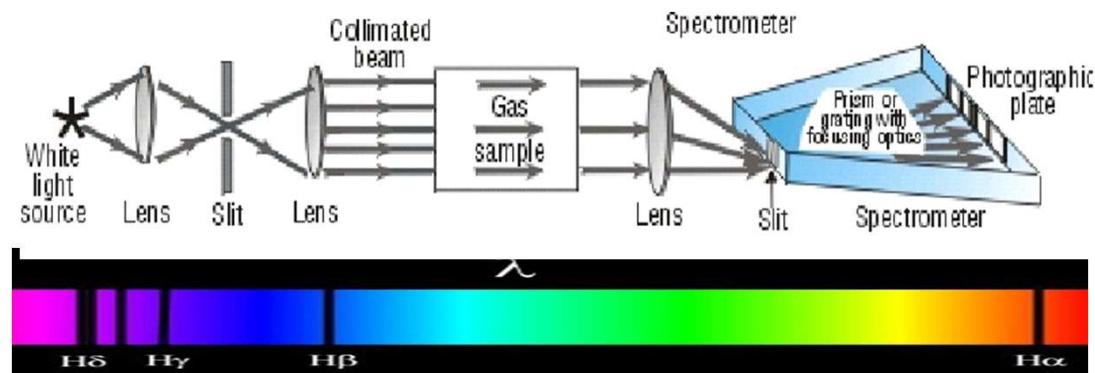
Espectros de absorção e de emissão de um gás

Espectro de emissão de um gás rarefeito



Espectroscopia: do lat. *spectru-*, «espectro» + gr. *skope_n*, «olhar» + *-ia*.

Espectro de absorção de um gás rarefeito



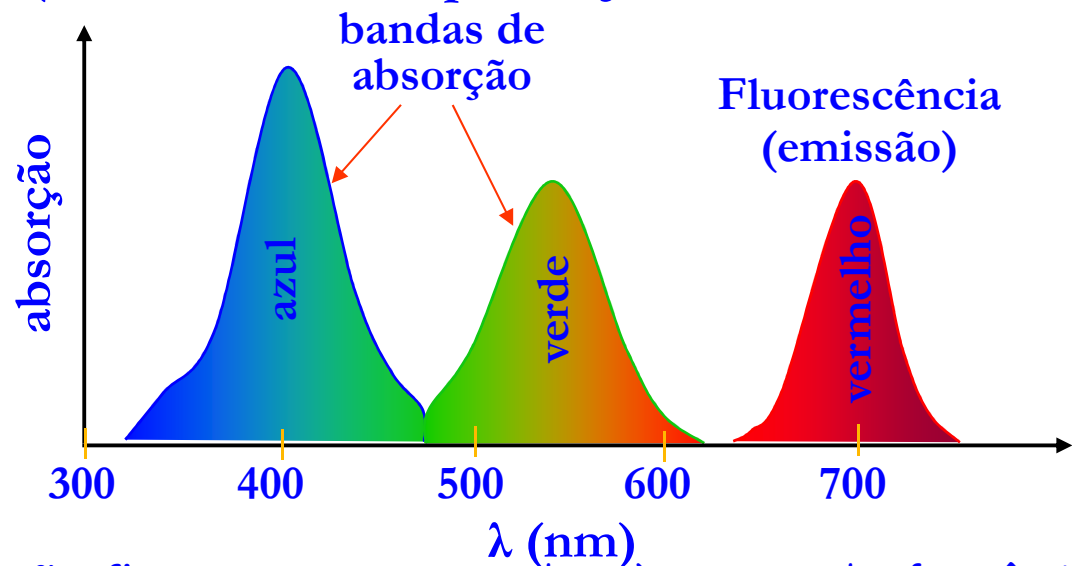


Espectros de absorção e de emissão do rubi

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)

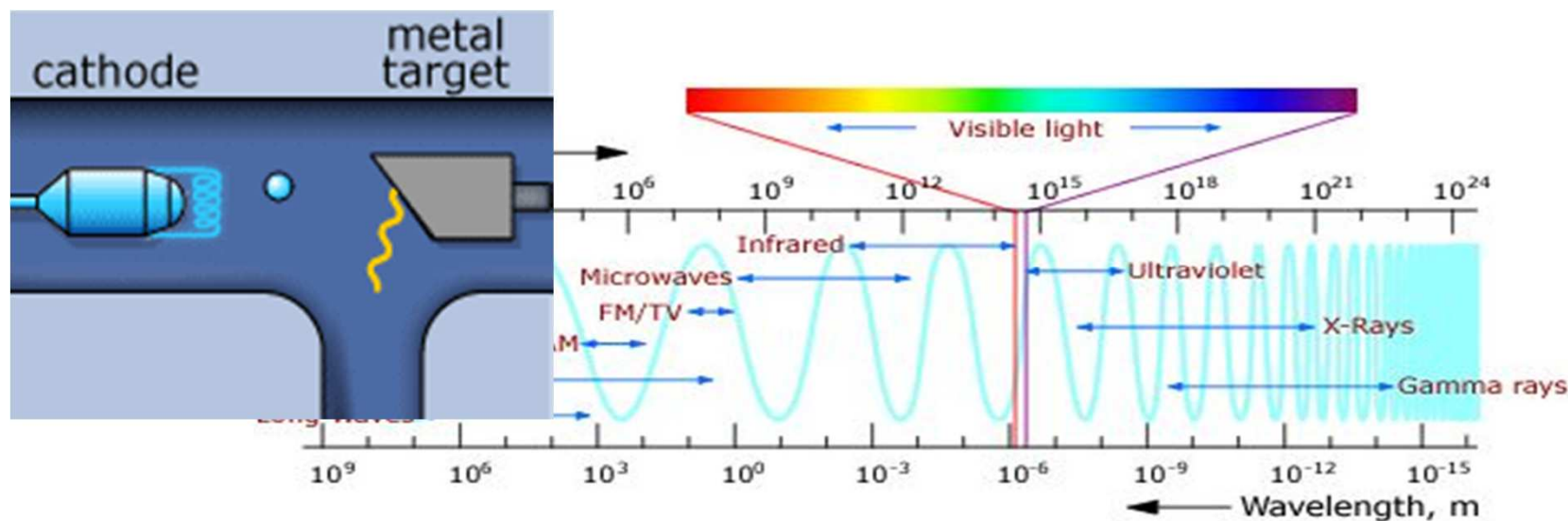


As bandas de absorção/emissão fluorescente correspondem às gamas de frequências disponíveis associadas às transições radiativas permitidas.





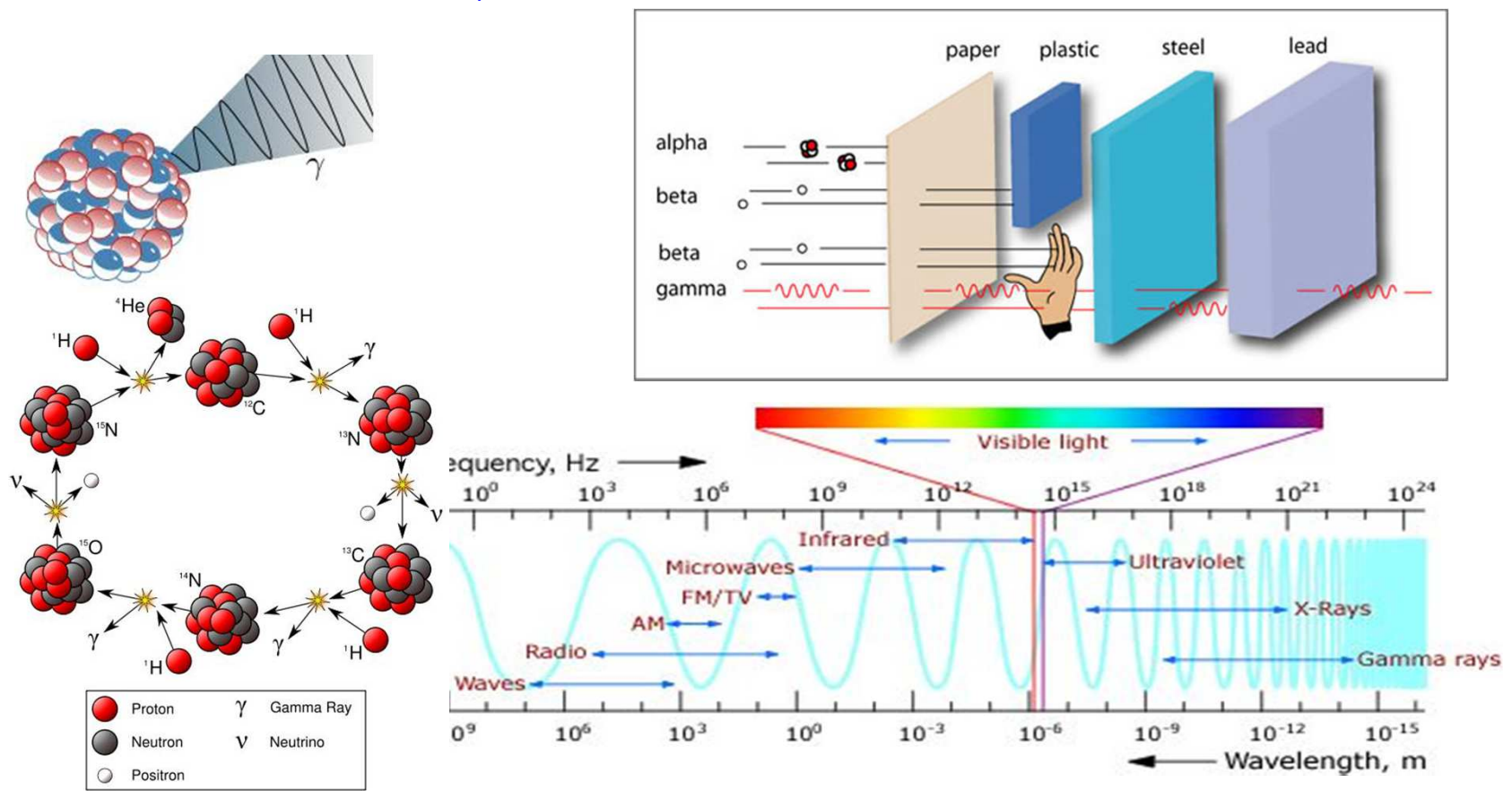
Produção de raios X





~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=7v0S95kMmok>





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)

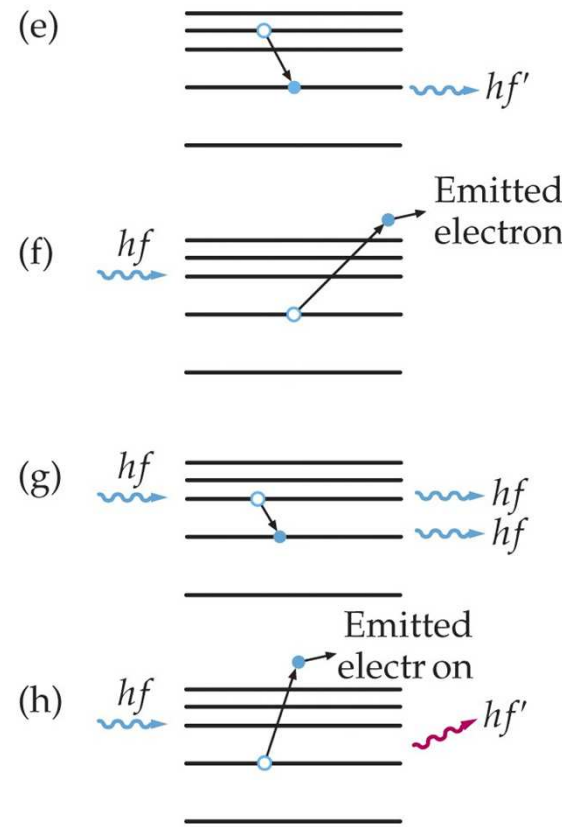
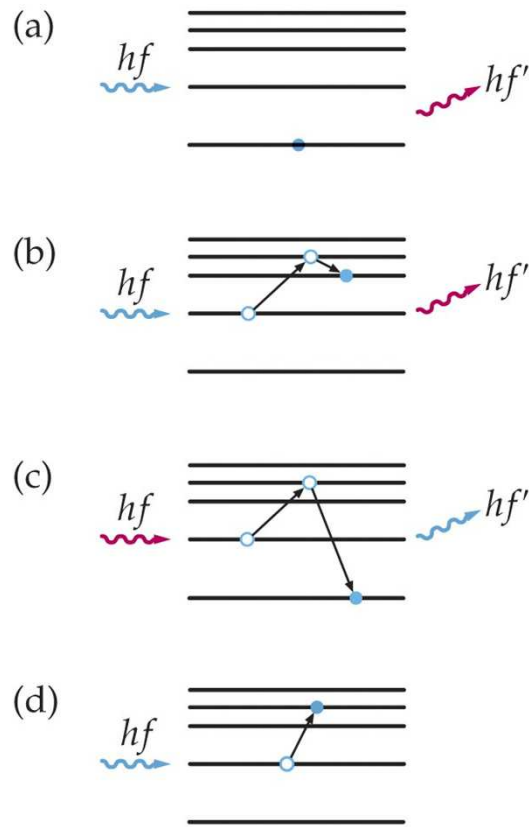
<http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>





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.

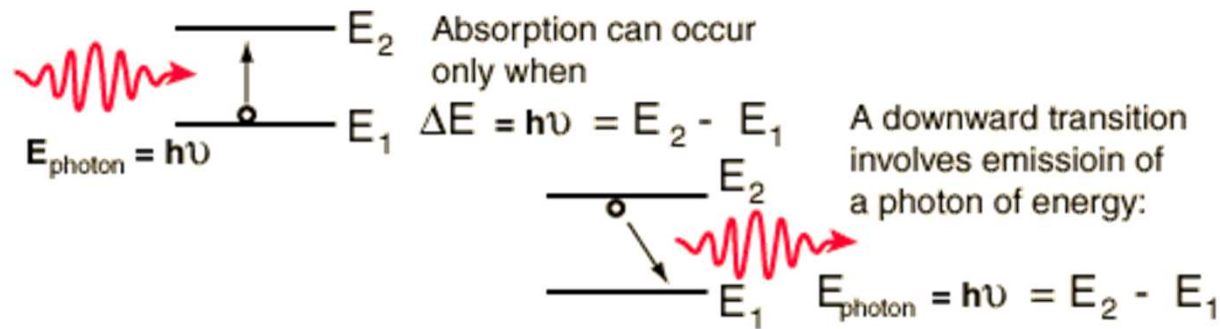
Em geral, a luz emitida é não polarizada. Para obter emissão de luz polarizada é necessário seleccionar o estado de polarização que se deseja de forma "externa".



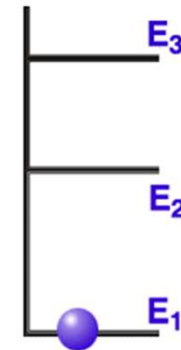
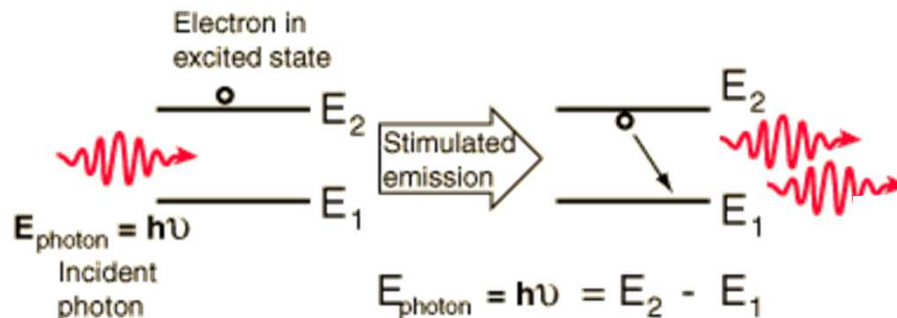


Absorção, emissão espontânea e emissão estimulada

- Absorção (estimulada) e emissão espontânea



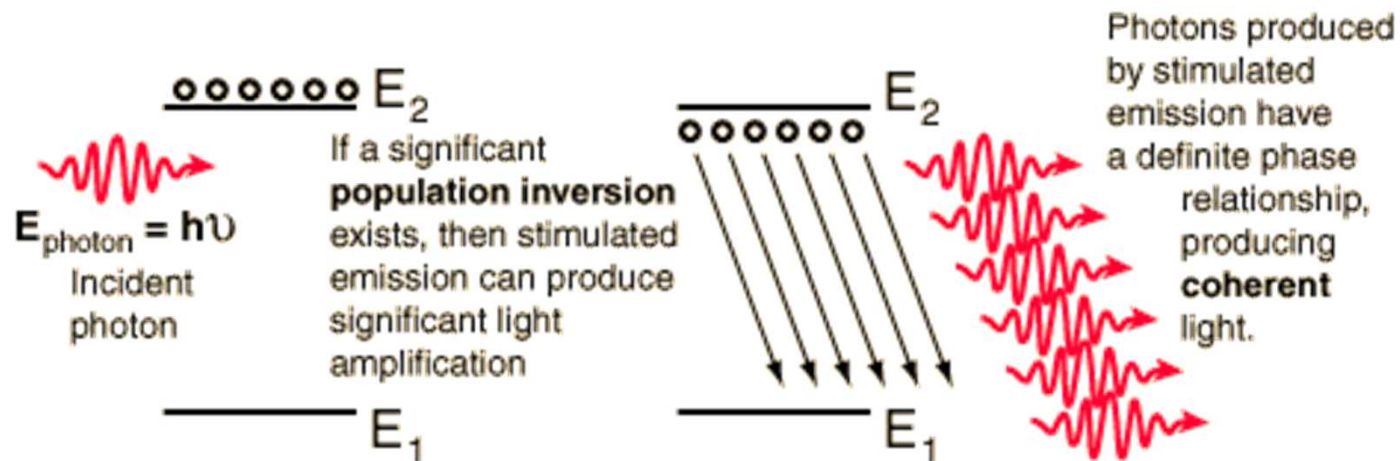
- Emissão estimulada



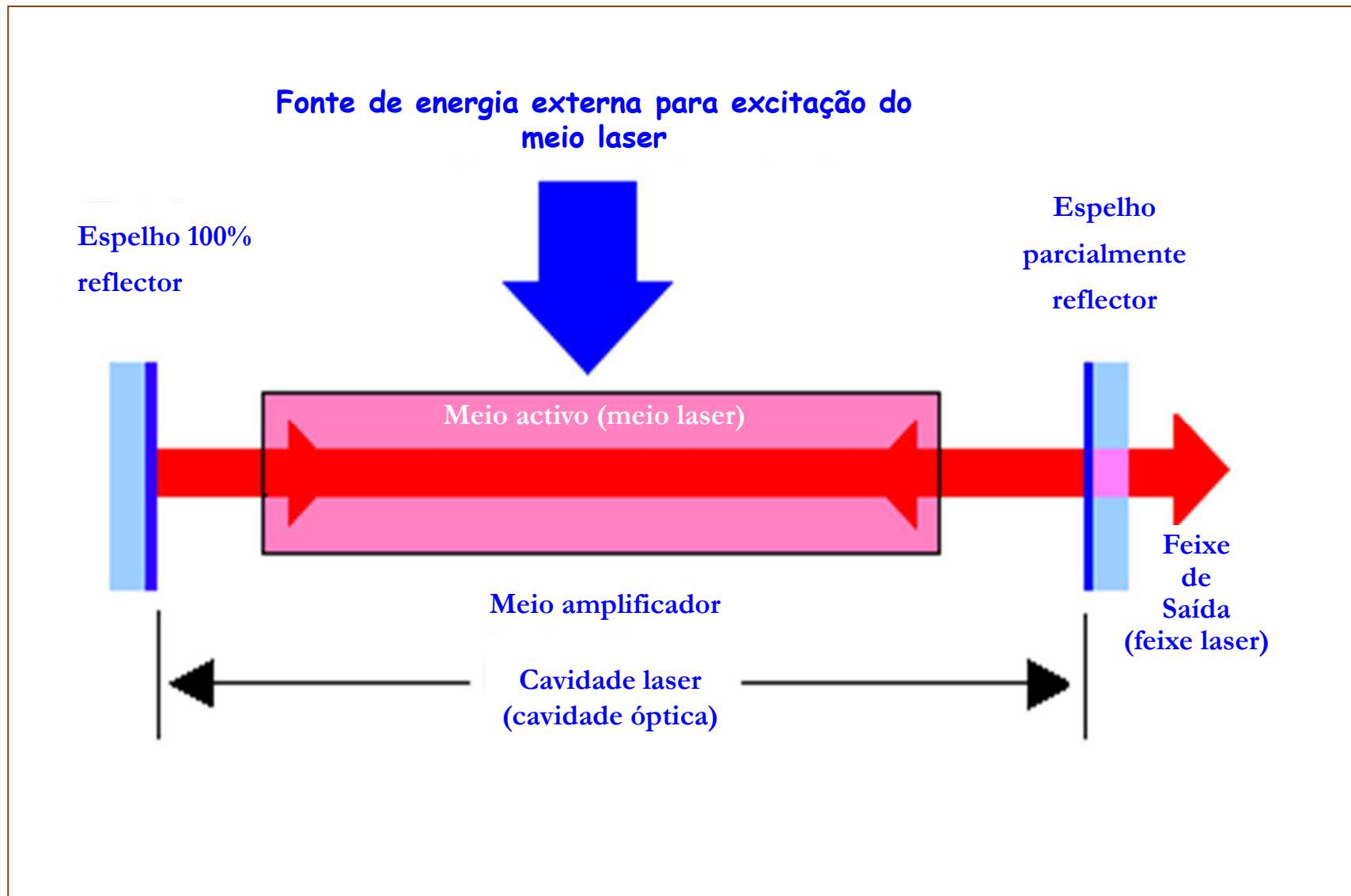


Inversão da população e amplificação de radiação

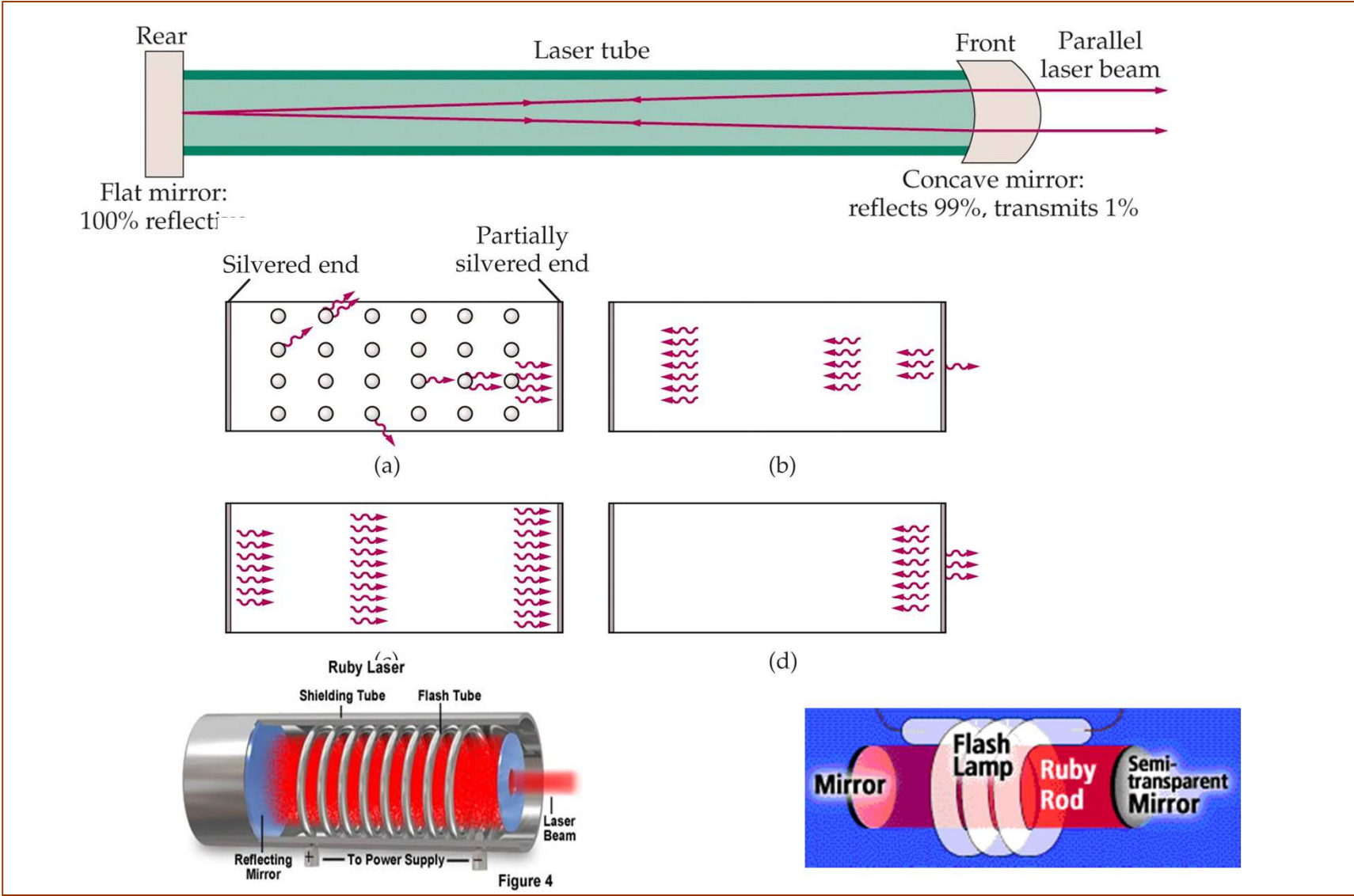
Por vezes quando a radiação interage com os átomos, verifica-se que a emissão estimulada é superior à absorção, provocando a amplificação da radiação incidente isto é aumentando a densidade de fótons $\rho(\nu)$ - amplificação por emissão estimulada de radiação. A inversão de população pode ser obtida 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



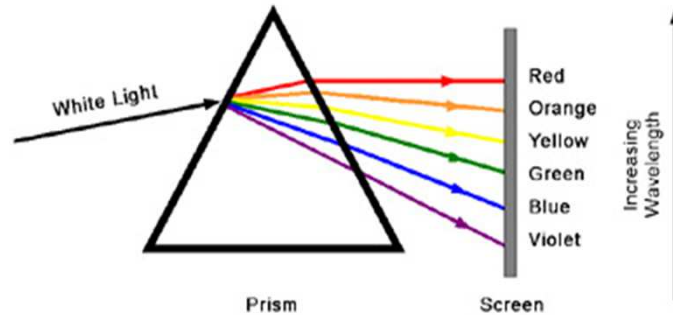
Geração da radiação laser



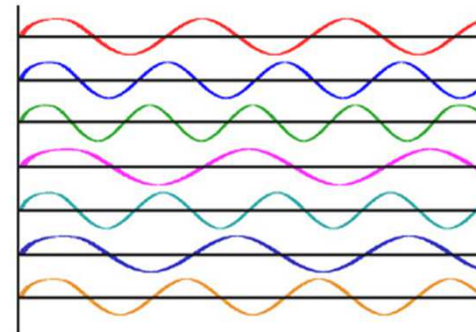


Diferenças entre a luz comum e a luz laser

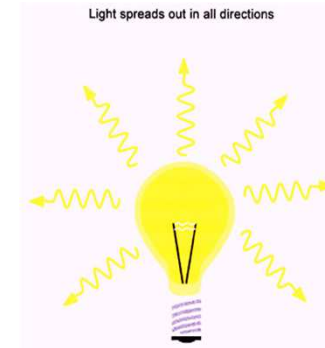
- Luz "comum"
Policromática



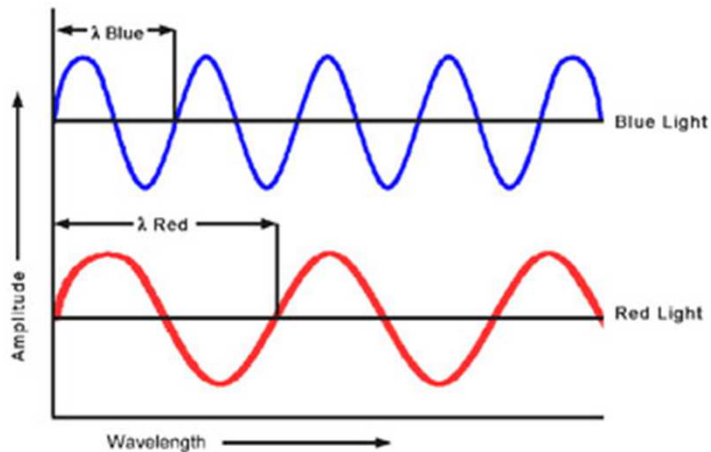
Incoerente



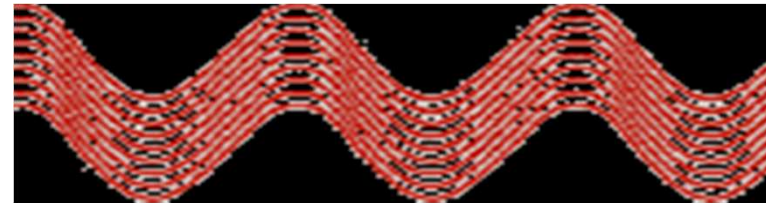
Muito divergente



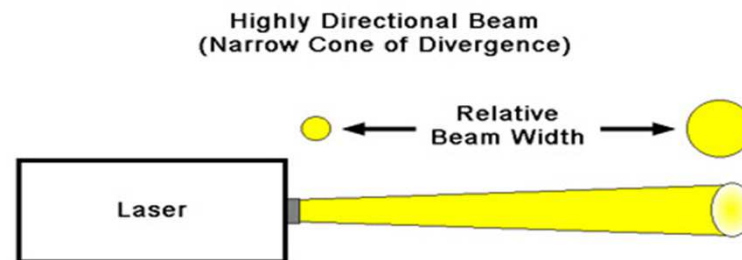
- Luz laser
Quasi-monocromática (☺)



Coerente (☺☺)

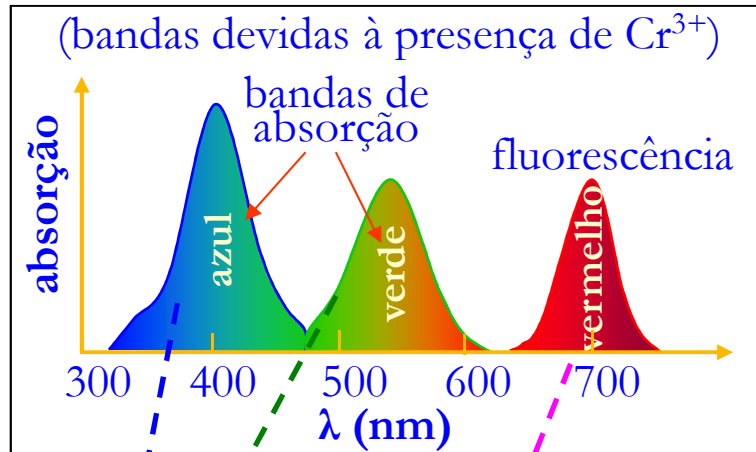


Pouco divergente (☺)

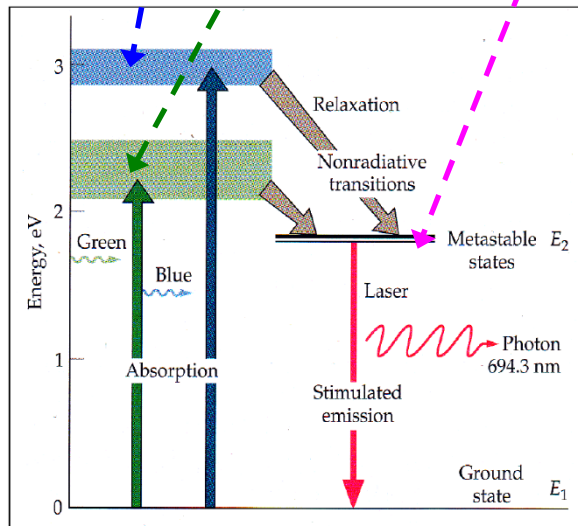
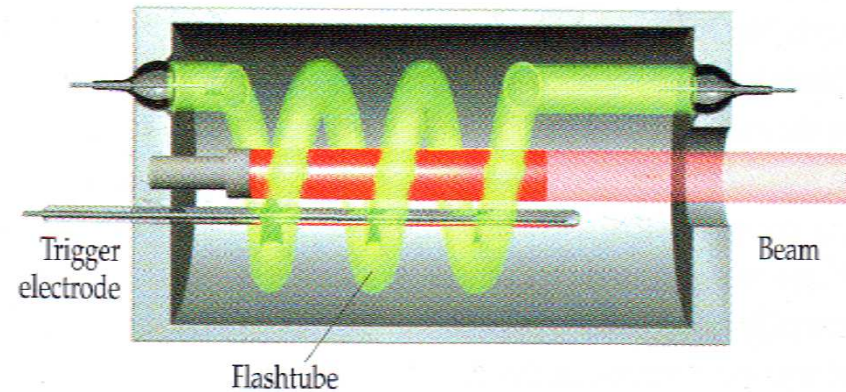




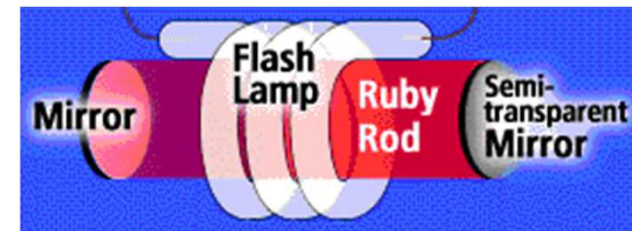
Laser de rubi pulsado



Primeiro sistema laser,
Theodore Maiman, 1960



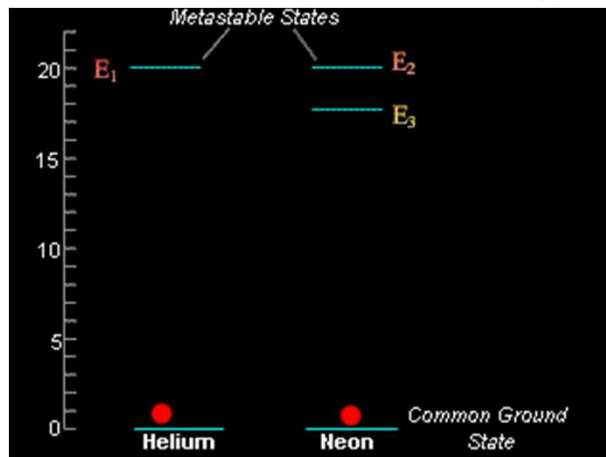
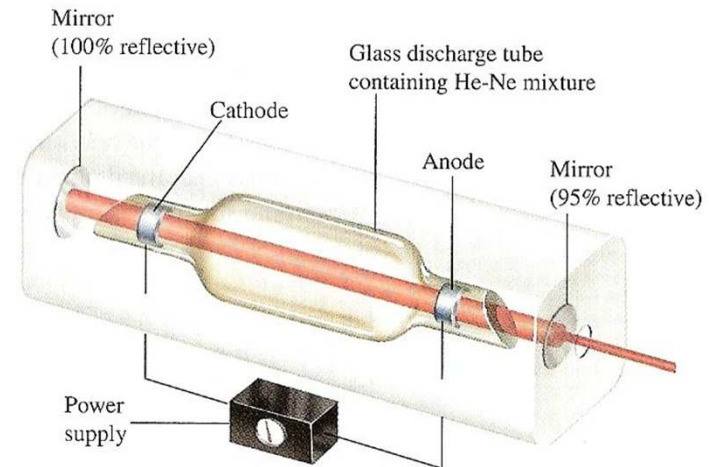
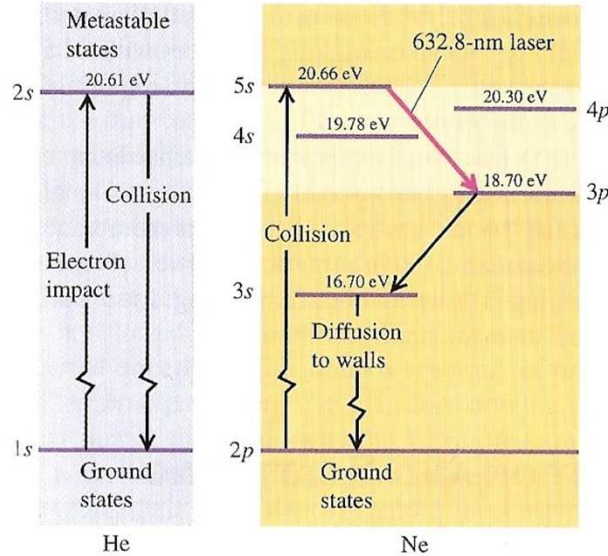
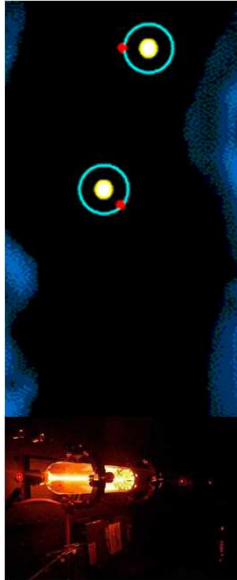
O laser de rubi é um sistema a três níveis, que requer muita energia de bombeamento para se obter a inversão entre o nível E_2 e o nível E_1 (estado fundamental), porque o estado final da emissão laser é o estado fundamental.





Laser de hélio-néon: laser de gás contínuo

Inventores: Ali Javan, W. R. Bennett Jr. E D. R. Herriott, 1961.

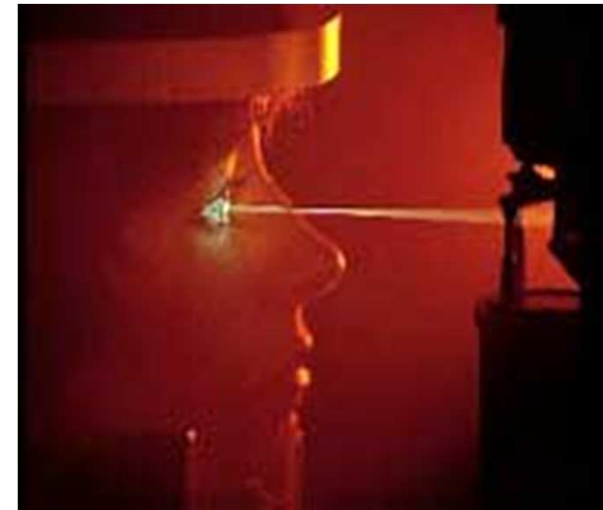


O laser de hélio-néon pode emitir em vários comprimentos de onda (3391 nm, 1523 nm, 1152 nm, 1118 nm, 632,8 nm, 594,5 nm, 543 nm), sendo o mais comum 632,8 nm. A eficiência dos lasers de hélio-néon comerciais é inferior a 0,1%.

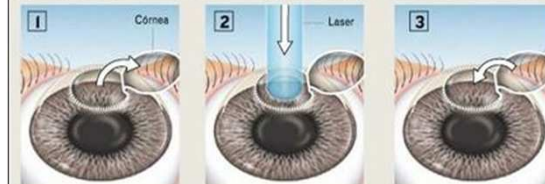




Exemplos de aplicações: metrologia e medicina



Cirurgia com Lasik, uma das técnicas de utilização do laser Eximer

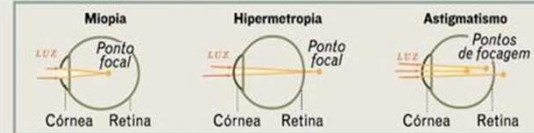


Primeiro o cirurgião corta e destaca uma aba à superfície, denominada lenticulo

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

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



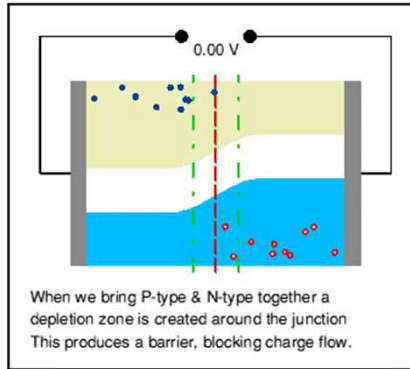
FONTE: "Laservue Eye Center, Califórnia"

ANA SERRA

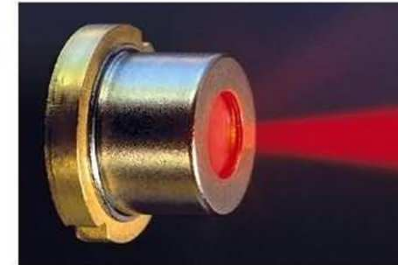
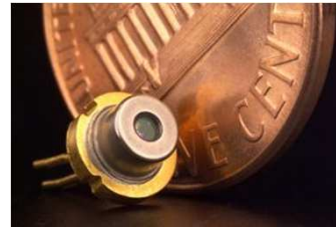




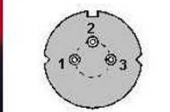
Laser de diodo (LD)



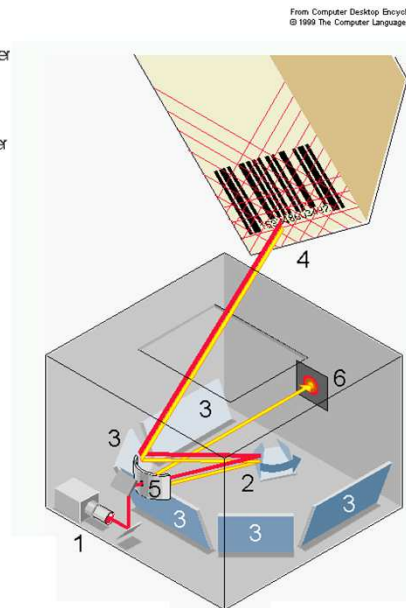
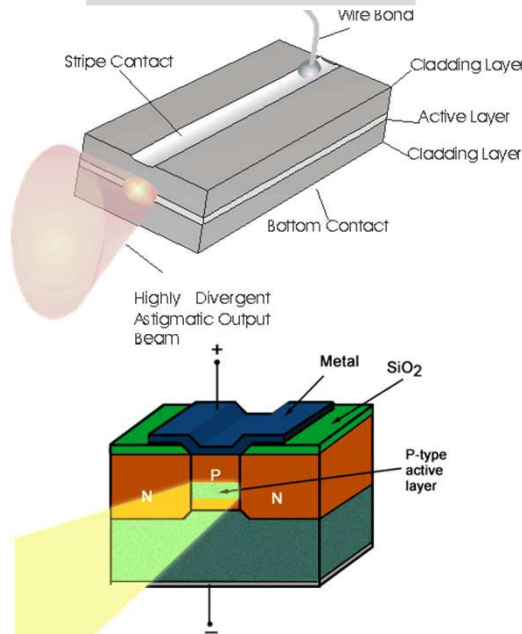
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



LASER DIODE HEAD

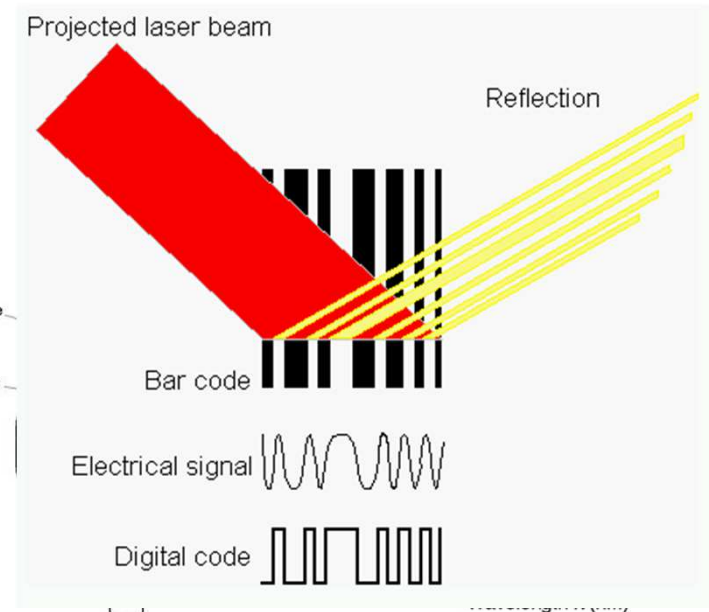


- 1: LD - Laser Diode
- 2: COM
- 3: PD - Photo Diode



From Computer Desktop Encyclopedia © 1999 The Computer Language Co. Inc.

From Computer Desktop Encyclopedia © 1999 The Computer Language Co. Inc.

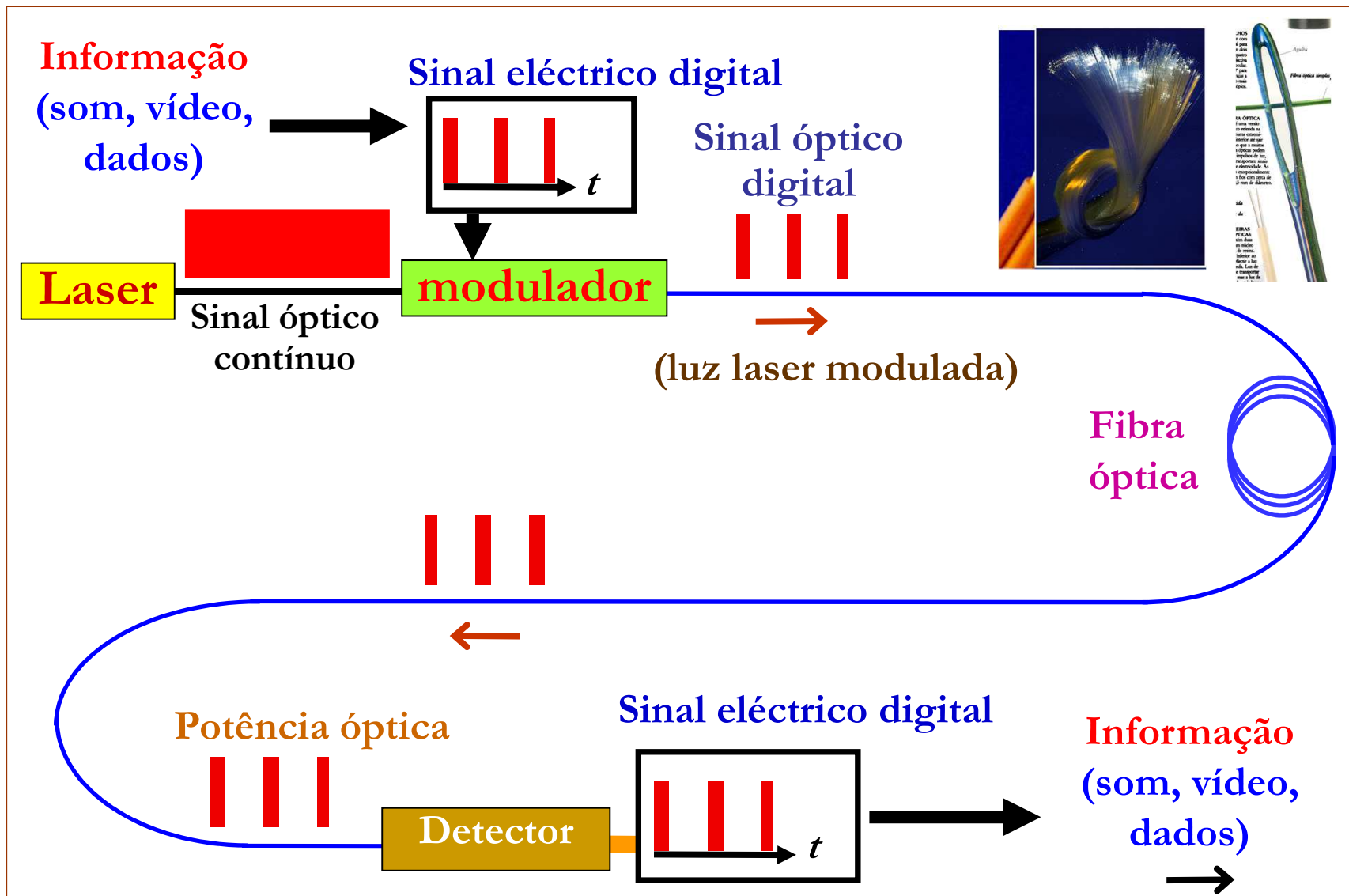


http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode



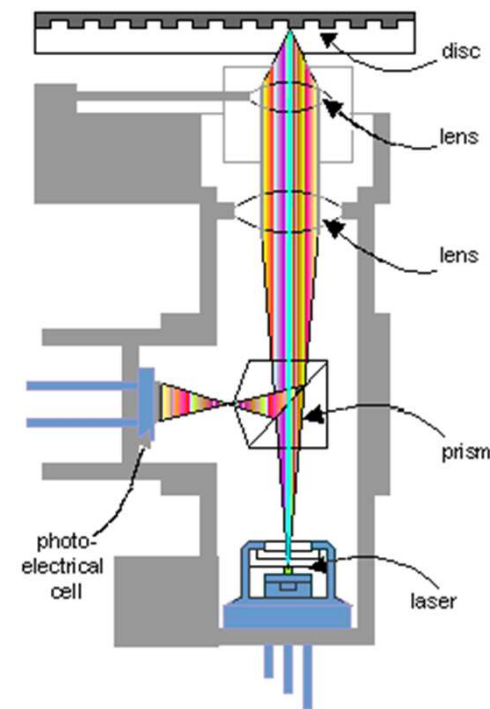
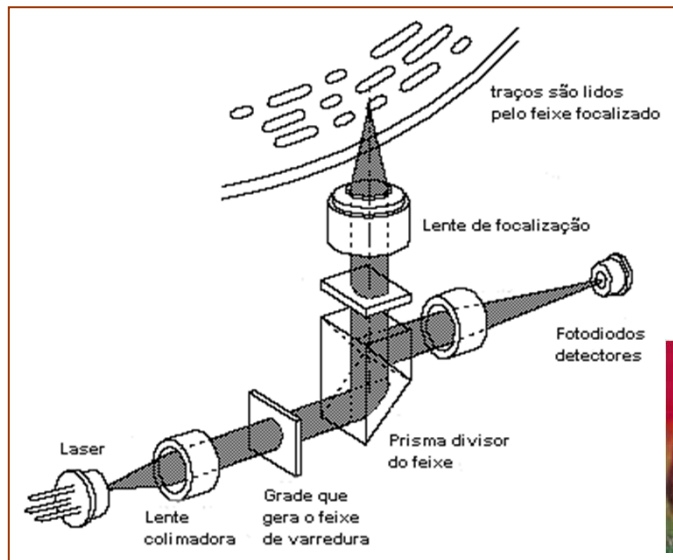
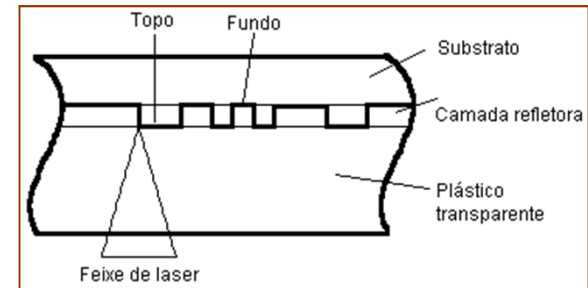
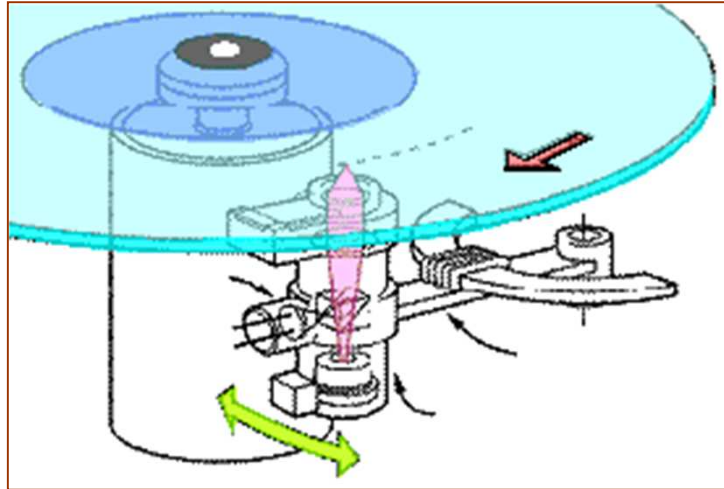


Aplicação dos lasers de diodo nas comunicações





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;





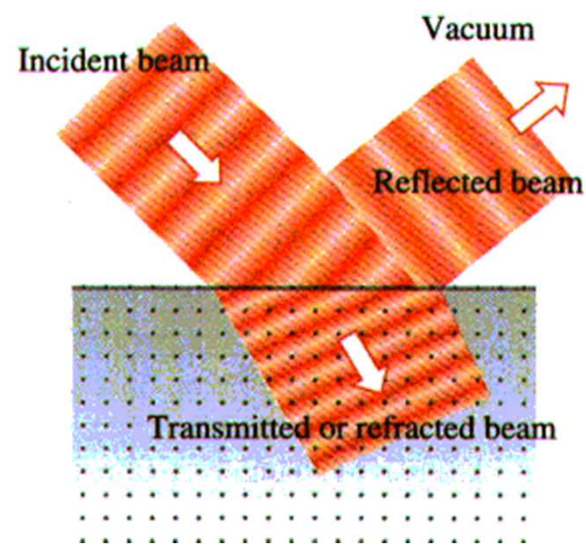
Dioptro

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»)].

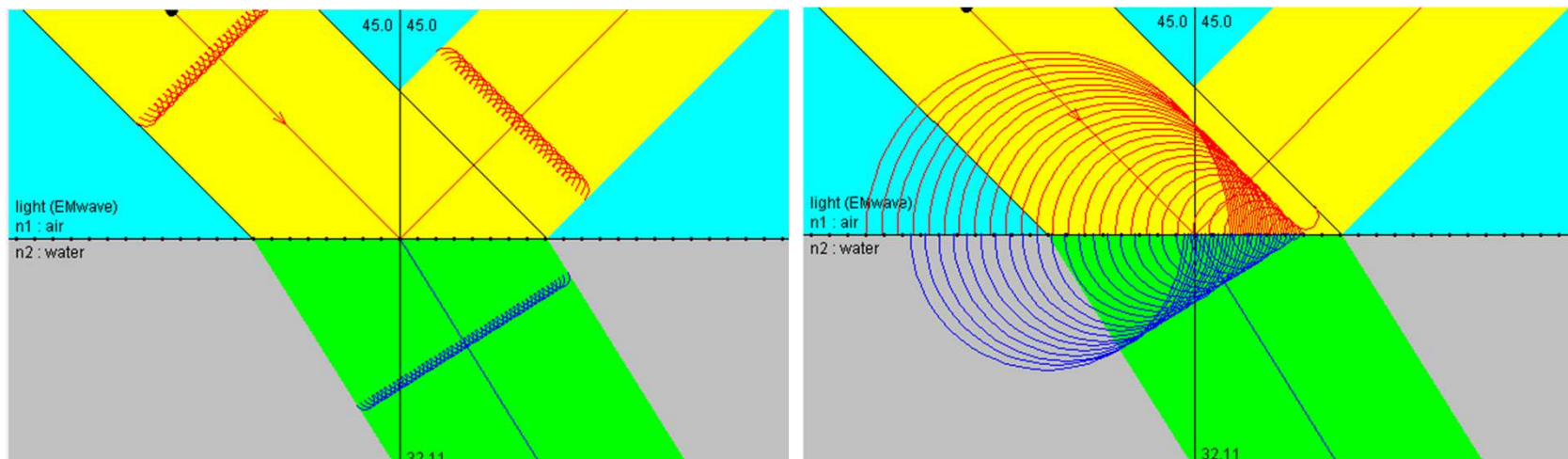
A experiência revela que parte do fluxo incidente é reflectido, dando origem à onda reflectida, e que o restante é transmitido através do dioptro, para o segundo meio, sob a forma de uma onda refractada.





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.

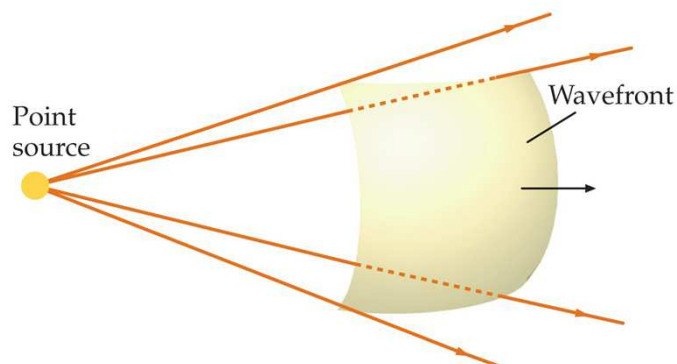


O **princípio Huygens** é um método de análise aplicado a problemas da propagação de ondas: cada ponto de uma frente de onda progressiva comporta-se como o centro de novas perturbações e uma fonte de novas ondas. A onda progressiva como um todo pode ser vista como a soma de todas as ondas secundárias 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.



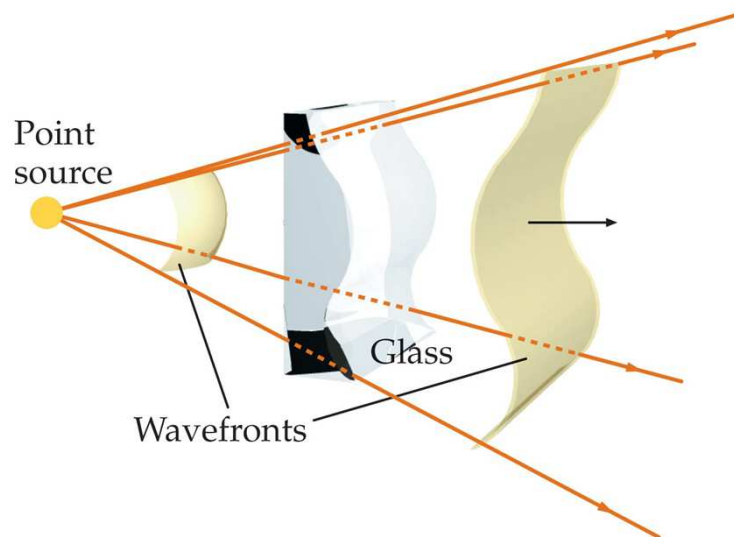
Propagação de frentes de onda

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?

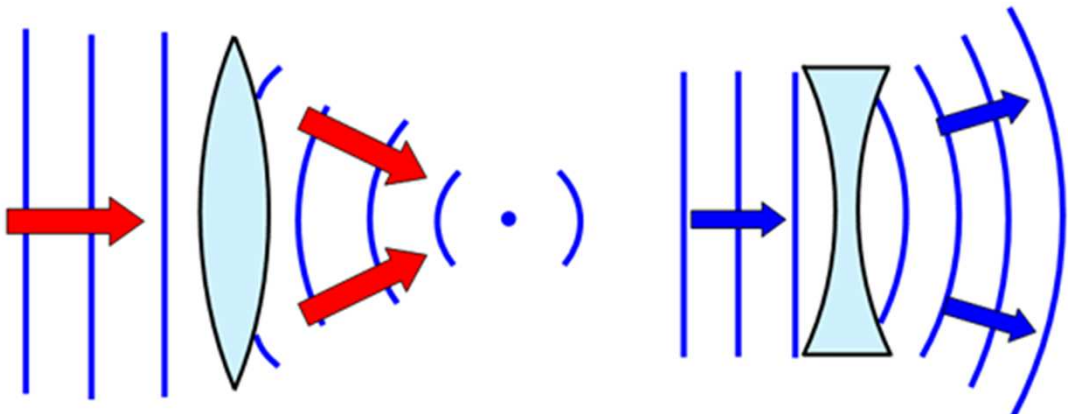
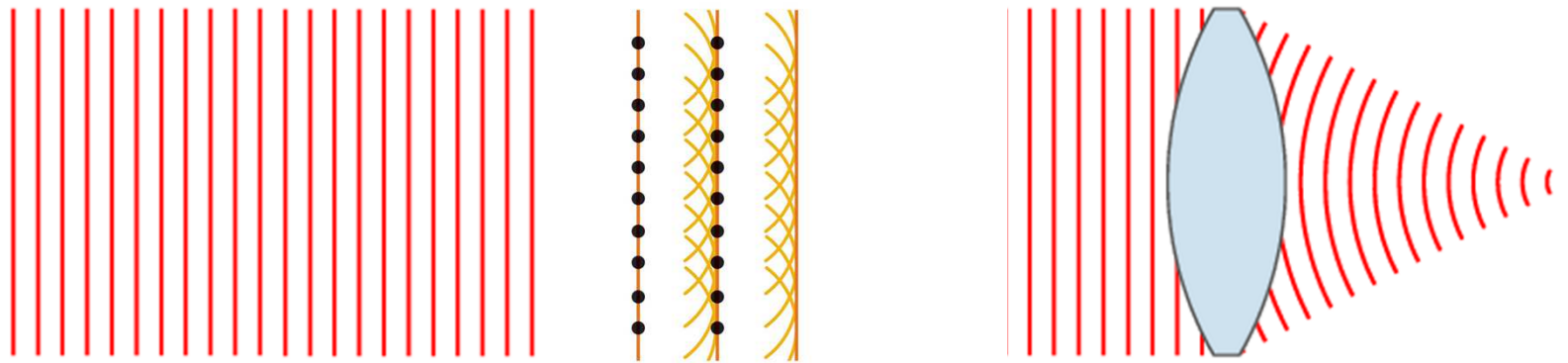


Em 1690, Huygens propõe o que viria a ser conhecido como **princípio de Huygens**: cada ponto de uma frente de onda primária constitui uma fonte para ondas esféricas secundárias, e a posição da frente de onda primária num instante posterior é determinada pela envolvente de todas estas ondas secundárias, que se propagam com velocidade e frequência igual à da onda primária.



Princípio de Huygens

Em meios homogéneos, as ondas secundárias podem ser construídas com raio finito. Em meios não homogéneos o raio deve ser infinitesimal.



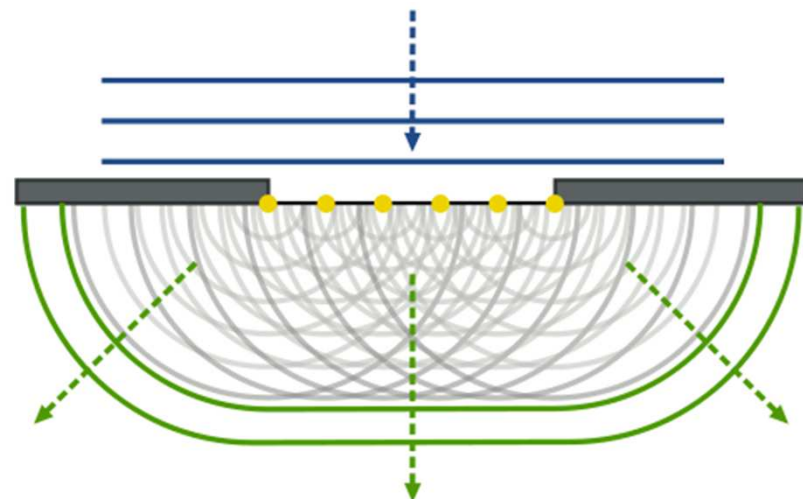
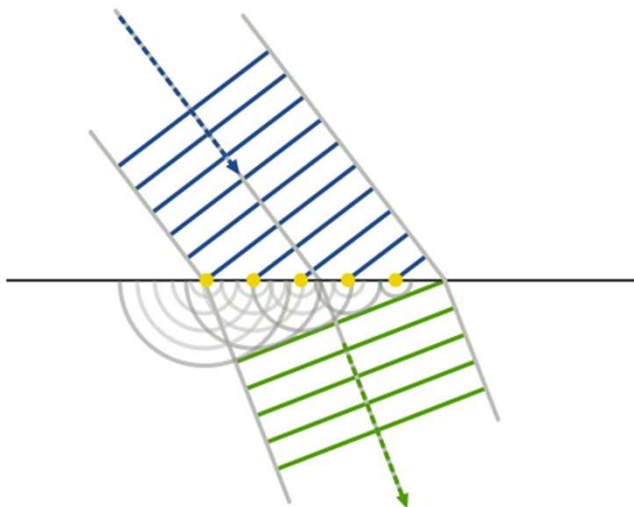
(resourcefulphysics.org)





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:

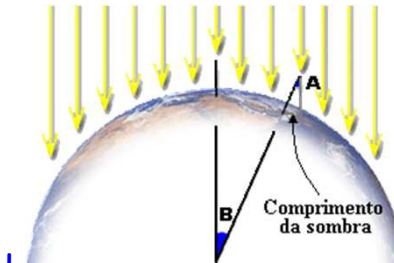
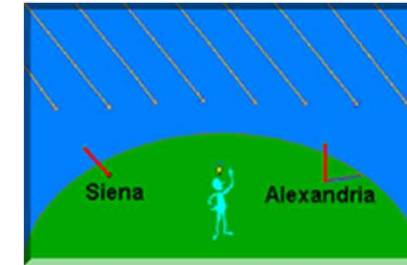
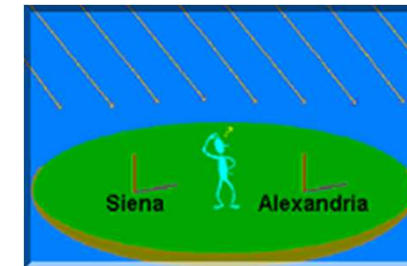
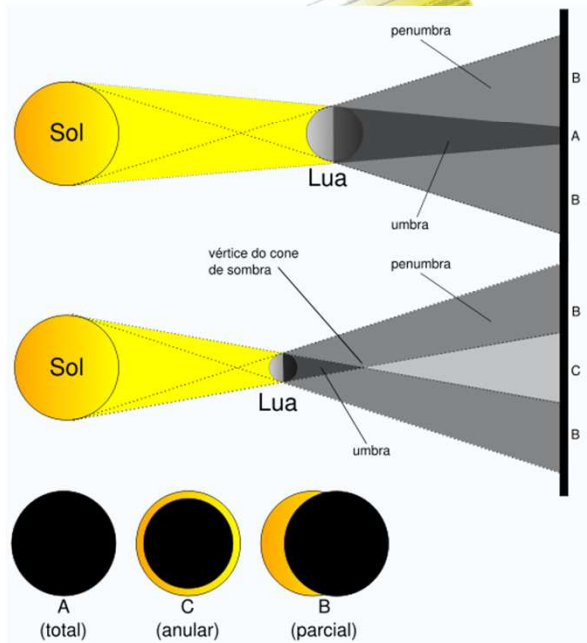
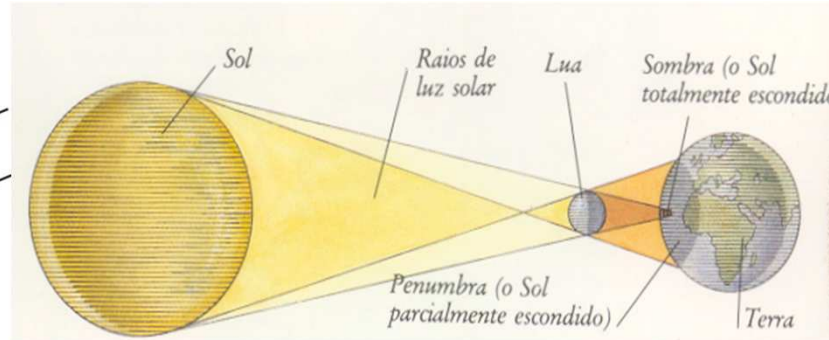
- **Propagação rectilínea da luz:** num meio homogéneo e transparente a luz propaga-se em linha recta. Cada uma dessas "rectas" é designada raio de luz.
- **Independência dos raios de luz:** quando dois raios de luz se cruzam, um não interfere na trajectória do outro, comportando-se como se o outro não 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>





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.»)

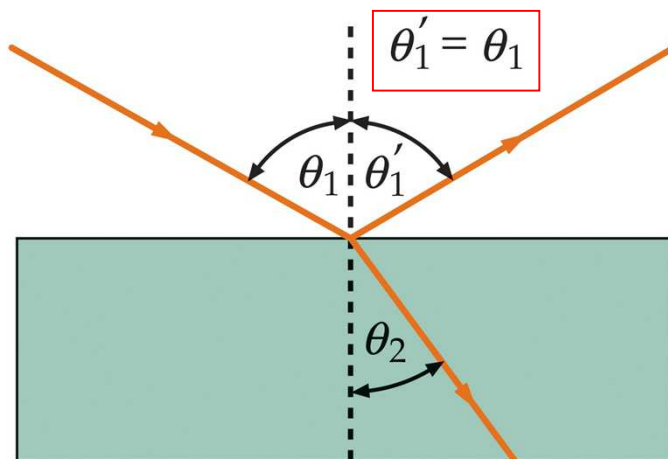
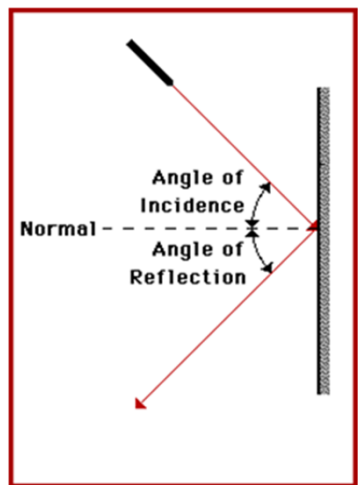
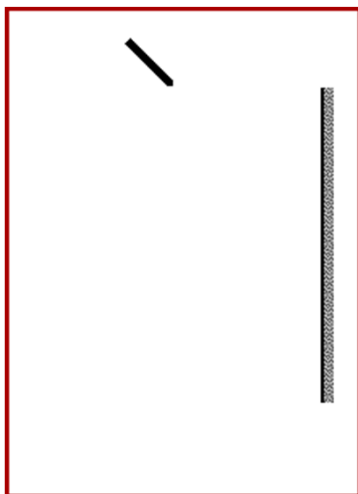
Plano de incidência: plano definido pelo raio incidente e pela normal à superfície de separação dos dois meios (dioptra)





Lei da reflexão

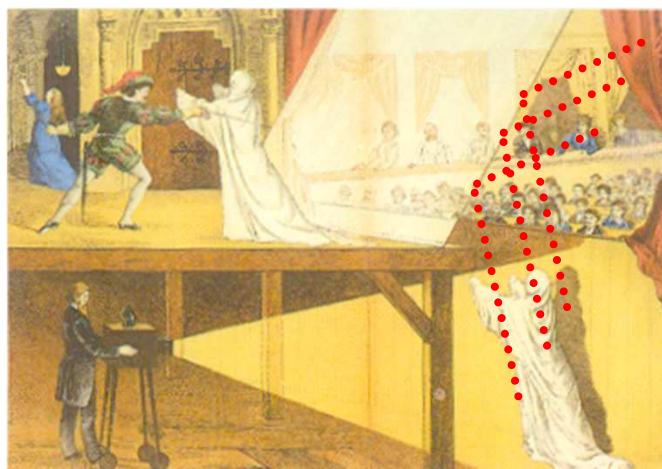
O raio incidente e a normal à superfície de separação dos dois meios (dióptro) definem o plano de incidência



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Reflection.swf>

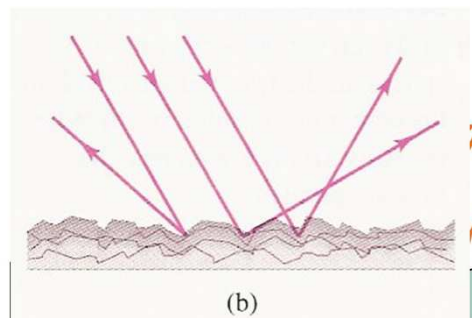

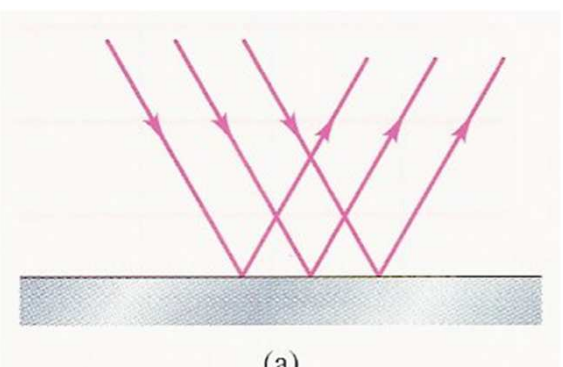
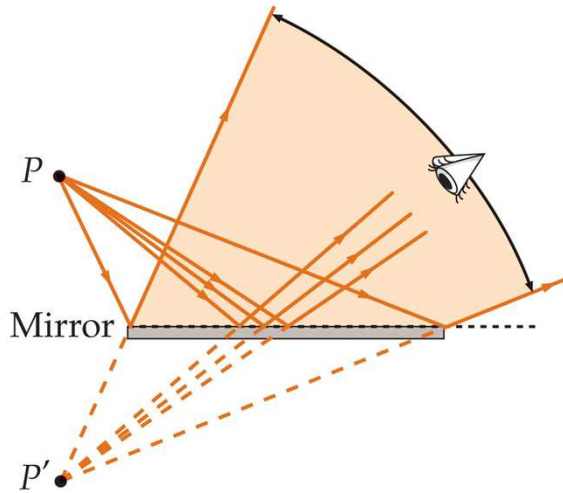


ESPELHO DE ÁGUA
A superfície de água quieta constitui um espelho natural. Conta uma lenda grega que um jovem chamado Narciso apaixonou-se pela sua própria imagem reflectida num lago. Ao tentar tocar-lhe caiu à água e afogou-se.

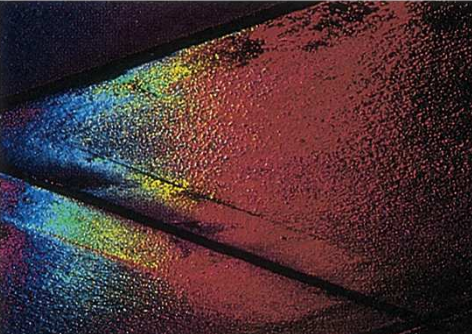




Reflexão especular e difusa



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

Ver adiante, Cap. 10.

$$n_i = \frac{c}{v_i} : \text{índice de refração do meio } i$$

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.

Raio de luz

O raio de luz desvia-se quando deixa o ar e entra na face esquerda do bloco.

Bloco de vidro transparente

DOBRÁ
Esta haste de papel, toda em acople porq do ar para. Em cada muda

Rai des água

Olho

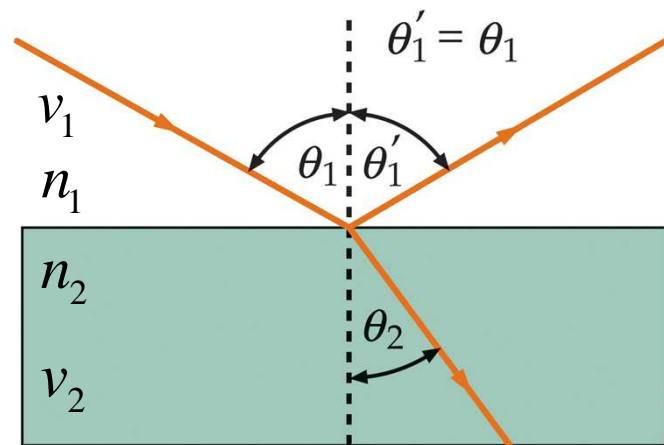
Luz do obj

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.



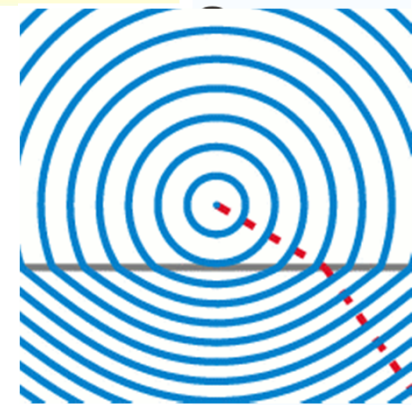
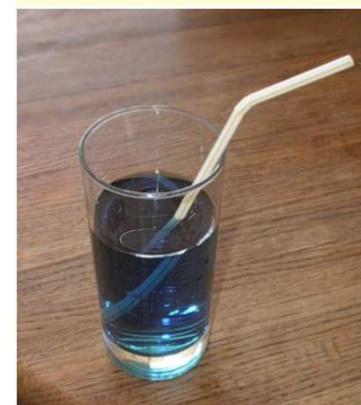
A luz no interior do bloco desvia-se em linha recta

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-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm>

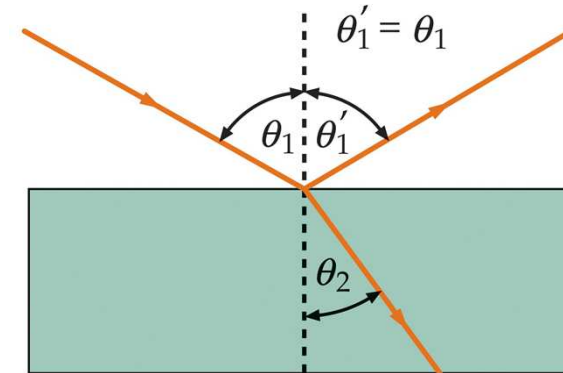
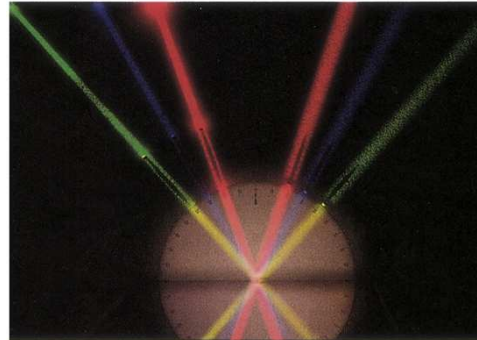
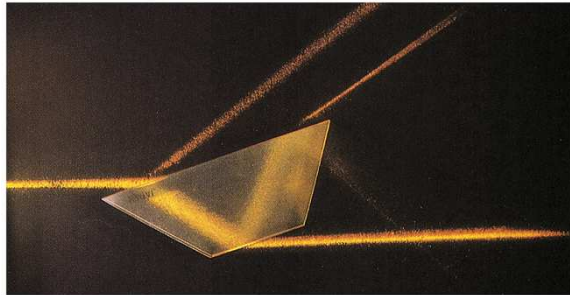
<http://www.lon-capa.org/~mmp/kap25/Snell/app.htm>





Reflexão e refração

O raio incidente e a normal à superfície de separação dos dois meios (diopetro) definem o plano de incidência

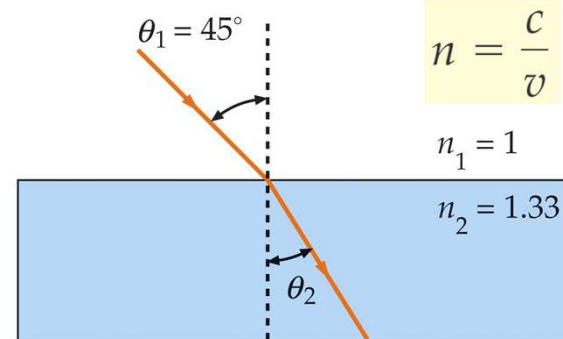


Princípios básicos da reflexão e da refração:

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

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$





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.

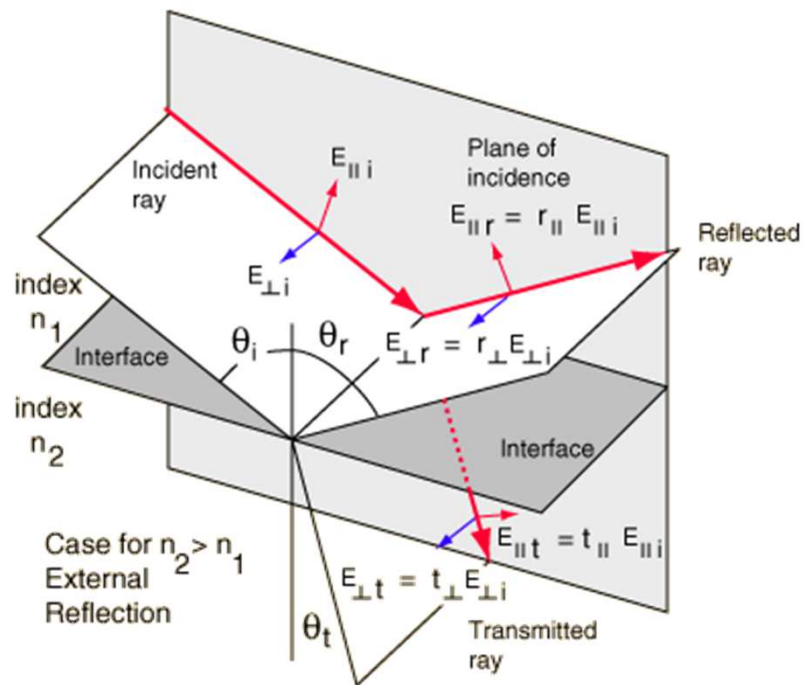
*Ver, por exemplo, Óptica, Eugene Hecht, Fundação Caloste Gulbenkian, secção 4.3, Aproximação electromagnética.





Equações de Fresnel*

Considere-se uma onda plana monocromática incidente numa superfície plana de separação entre dois meios isotrópicos. Cada um dos campos eléctrico e magnético, E e B , pode decompor-se em duas componentes ortogonais entre si: uma paralela ao plano de incidência e outra perpendicular.



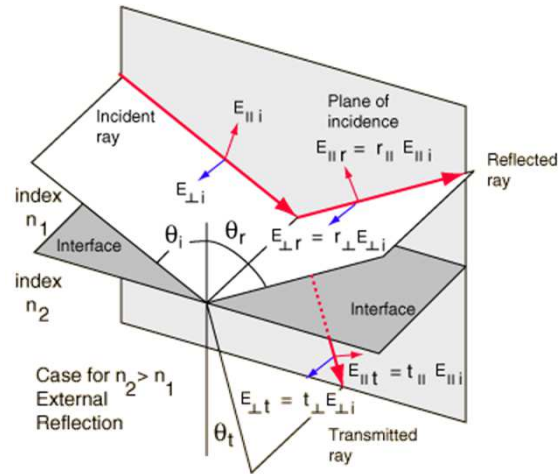
As equações de Maxwell impõem certos constringimentos a que os campos devem obedecer (**condições fronteira**): uma dessas restrições é que a componente do campo eléctrico E tangente à superfície seja contínua (o mesmo se passa para o campo H). Isto é, a componente tangencial de E imediatamente acima 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, 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 isotropos.

$$r_{\perp} = \left[\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right]_{\perp} = \frac{n_i \cos(\theta_i) - n_t \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)};$$

$$t_{\perp} = \left[\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right]_{\perp} = \frac{2n_i \cos(\theta_i)}{n_i \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)};$$

$$r_{\parallel} = \left[\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right]_{\parallel} = \frac{n_t \cos(\theta_i) - n_i \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)};$$

$$t_{\parallel} = \left[\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right]_{\parallel} = \frac{2n_i \cos(\theta_i)}{n_i \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)};$$

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 $R_{\parallel} = (r_{\parallel})^2 = 0$ quando $\theta_i + \theta_t = 90^\circ$ ($\theta_p = \theta_i$).





Reflectância e transmitância*

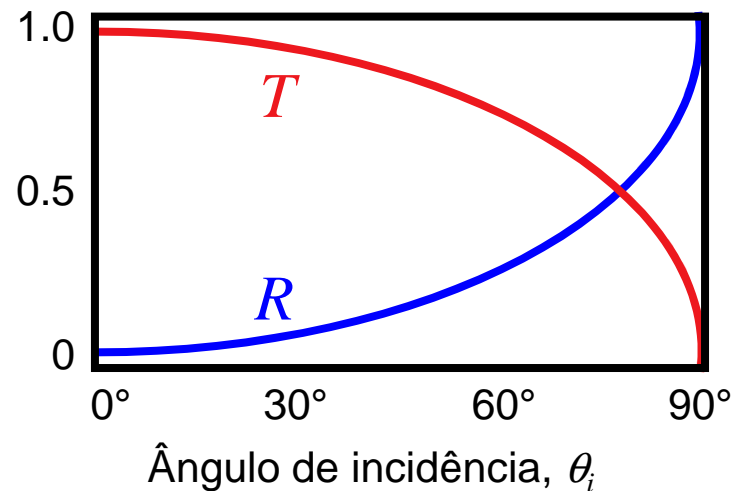
Define-se **reflectância** R como a razão entre as potências reflectida e a potência incidente; da mesma forma a **transmitância** T corresponde à razão entre os fluxos transmitido e incidente.

$$R \equiv \frac{I_r \cos(\theta_r)}{I_i \cos(\theta_i)} \quad \text{e} \quad T \equiv \frac{I_t \cos(\theta_t)}{I_i \cos(\theta_i)} : \quad R_{\perp, \parallel} = (r_{\perp, \parallel})^2 \quad \text{e} \quad T_{\perp, \parallel} = \frac{n_t \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_i)} (t_{\perp, \parallel})^2$$

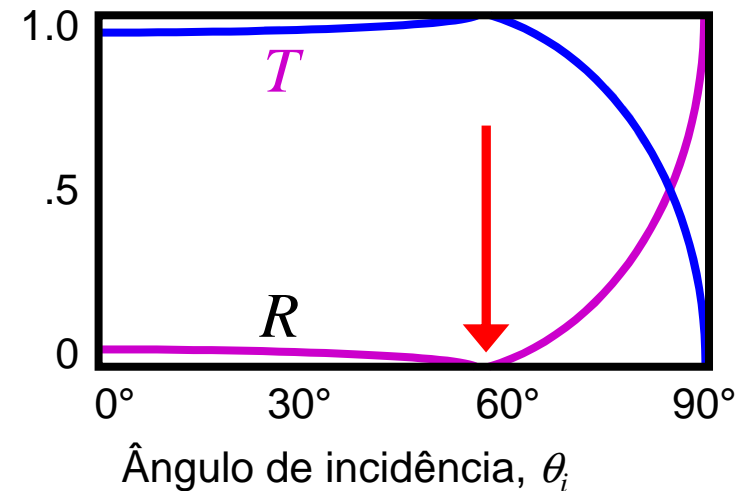
Note que $R + T = 1$

Reflectância R e transmitância T para o caso de uma interface ar-vidro

Polarização perpendicular



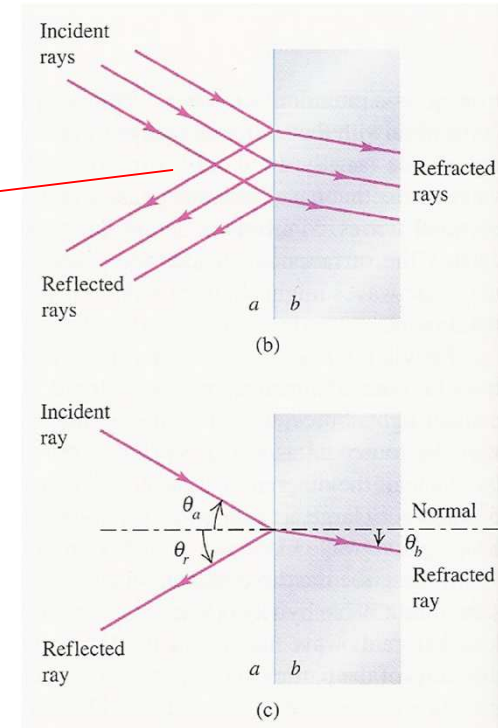
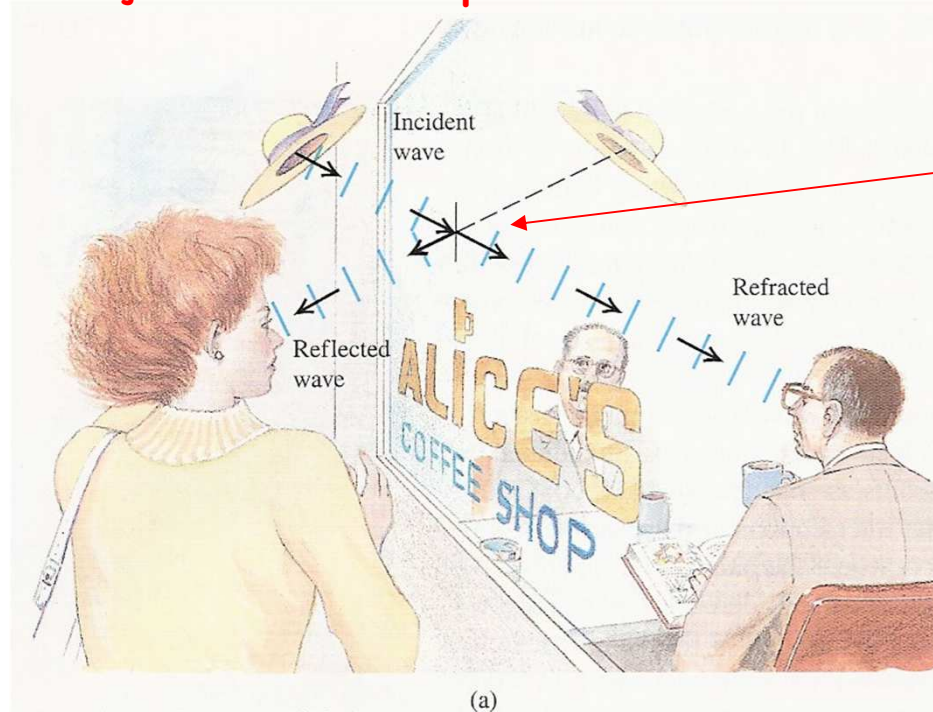
Polarização paralela





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:

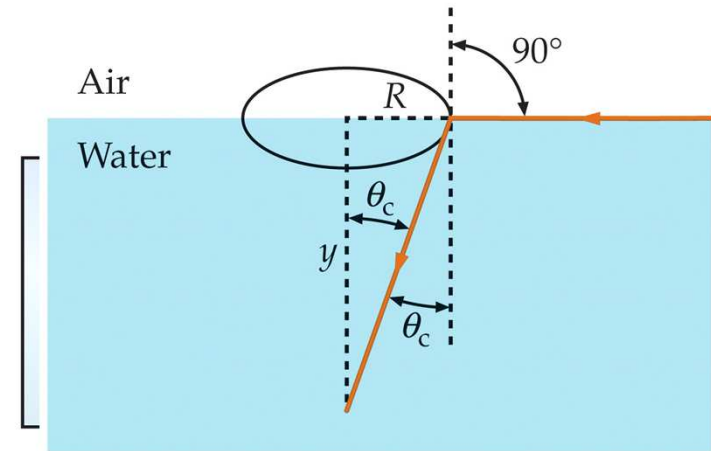
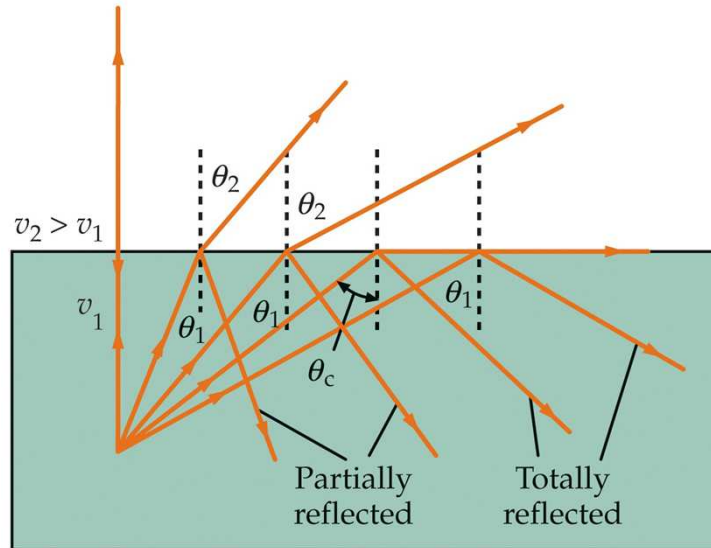
$$R(\theta_i = 0) \approx 4\%, T(\theta_i = 0) \approx 96\%$$

$$R(\theta_i = 0) \approx \left(\frac{n_a - n_b}{n_a + n_b} \right)^2, \quad T(\theta_i = 0) \approx \frac{4n_a n_b}{(n_a + n_b)^2}$$

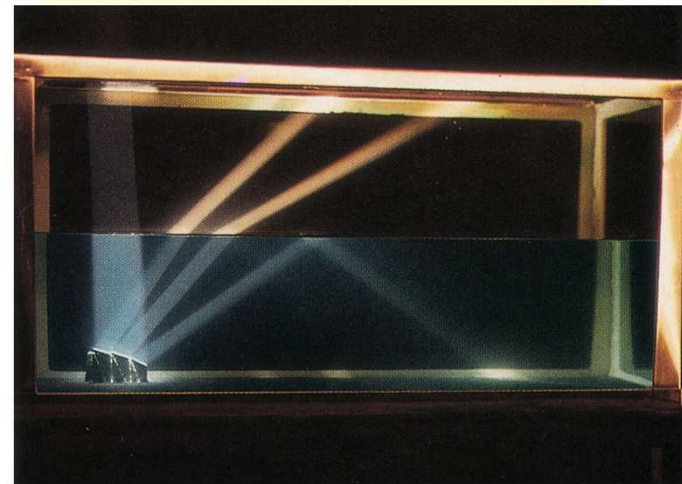




Reflexão interna total (RIT)



$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}$$

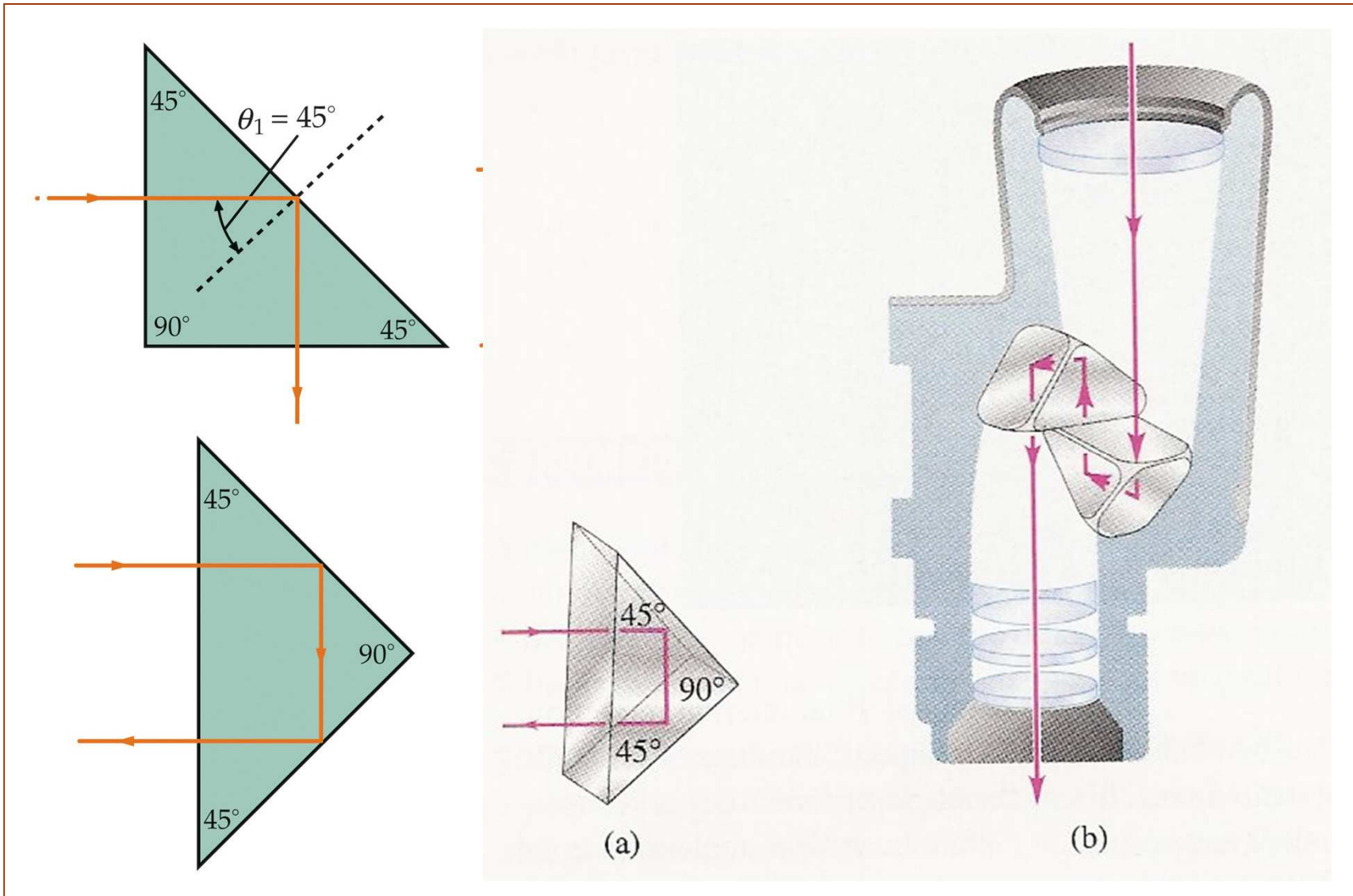


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Refraction.swf>





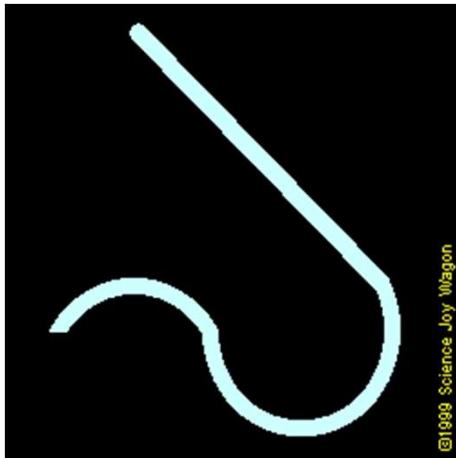
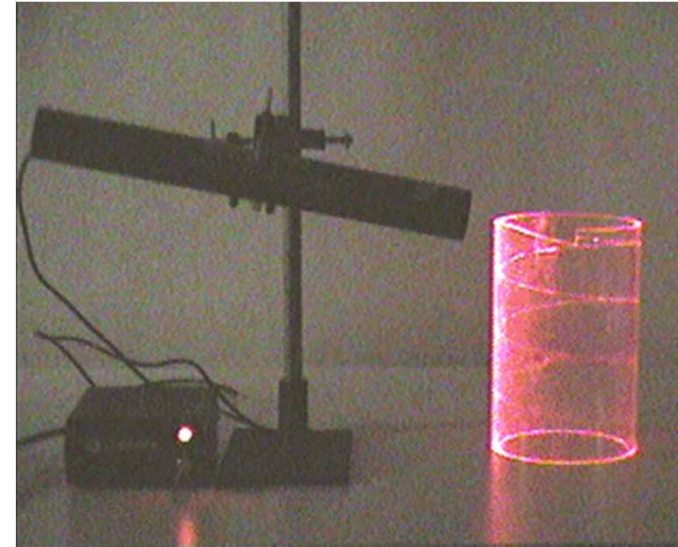
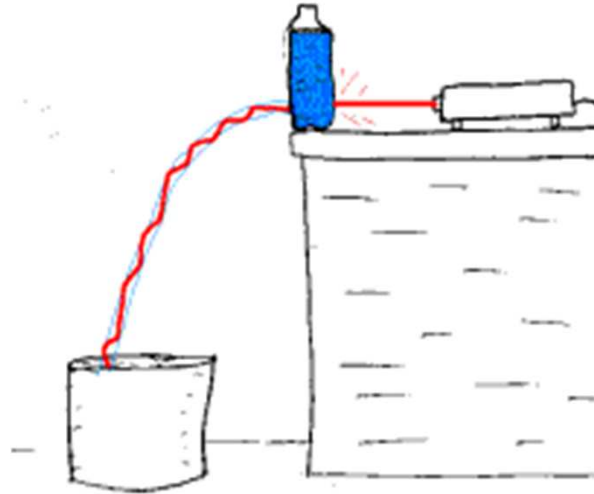
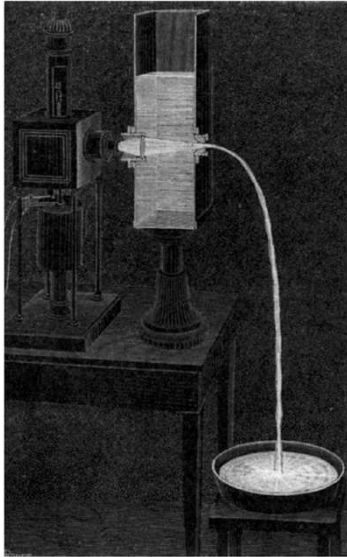
Aplicações da reflexão interna total



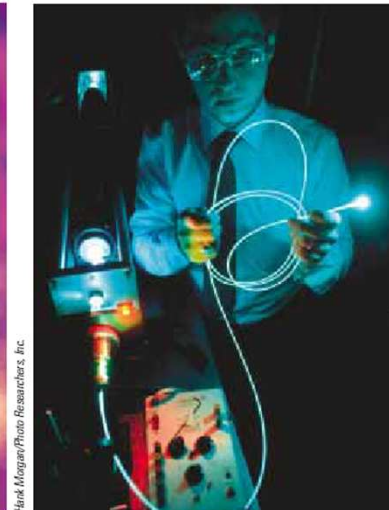


Experiências de Colladen Tyndall: guiagem da luz

1841 (Colladen) e 1870 (Tyndall) «guiam» a luz



©1999 Science Joy Wagon

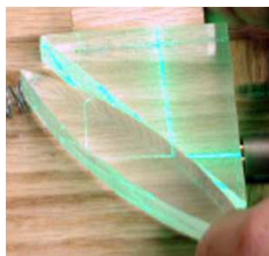
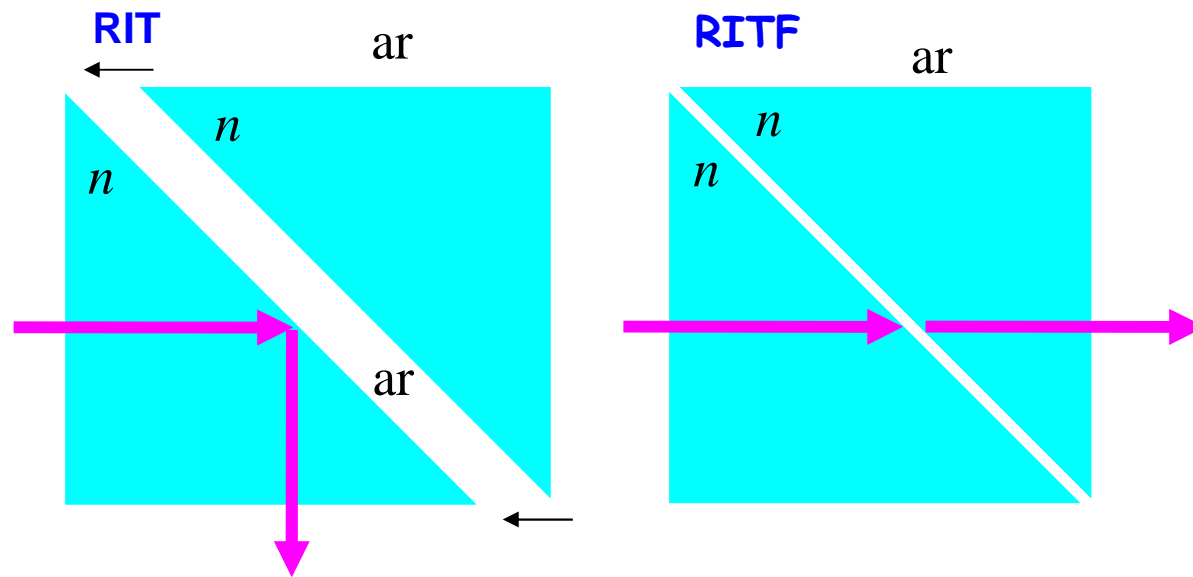
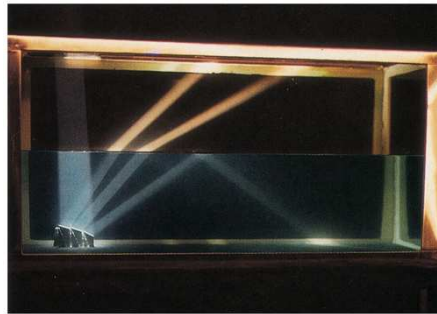


Henk Morgan/Photo Researchers, Inc.

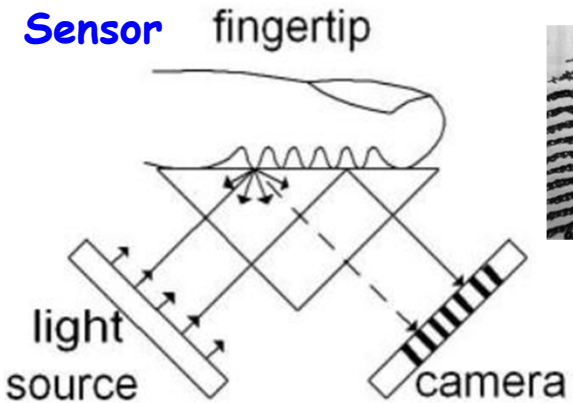
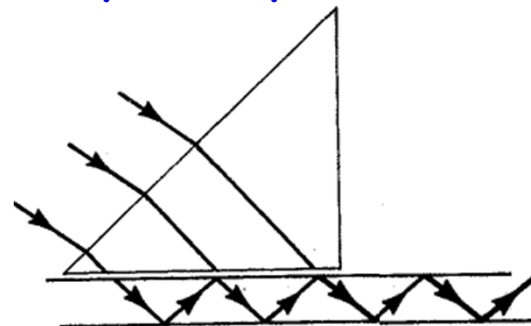




Reflexão interna total frustrada (RITF)



Aplicações Acoplador óptico





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)

Dicróico: adj. diz-se do que apresenta dicróísmo. (Do gr. di, por dis, «duas vezes» + khróa, «cor» + -ico)

Dicróísmo: 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»)

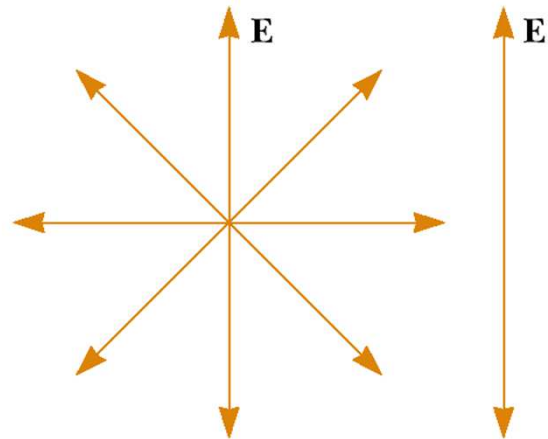
Birrefringente: adj. 2 gén. (fís.) diz-se das substâncias anisotrópicas que têm a propriedade de decompor uma onda luminosa em duas ondas polarizadas de direcções de vibração mutuamente ortogonais. (De bi- + refringente)

Birrefracção: s. f. (fís.) fenómeno óptico de dupla refracção. (De bi- + refracção)





Luz polarizada e luz não polarizada



(a)

(b)

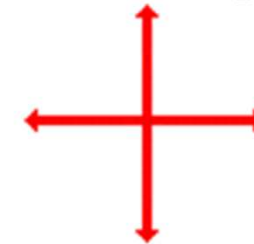
Figure 38.29 (a) A representation of an unpolarized light beam viewed along the direction of propagation (perpendicular to the page). The transverse electric field can vibrate in any direction in the plane of the page with equal probability. (b) A linearly polarized light beam with the electric field vibrating in the vertical direction.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

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.



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/CircPol.swf>

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.

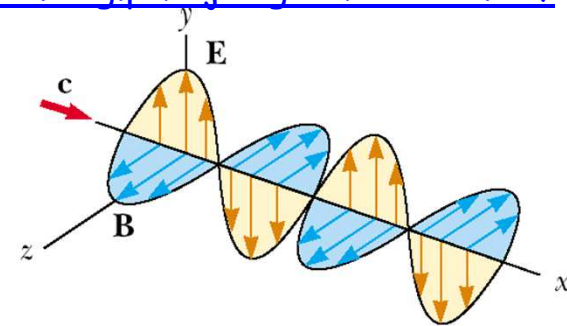


Figure 38.28 Schematic diagram of an electromagnetic wave propagating at velocity c in the x direction. The electric field vibrates in the xy plane, and the magnetic field vibrates in the xz plane.

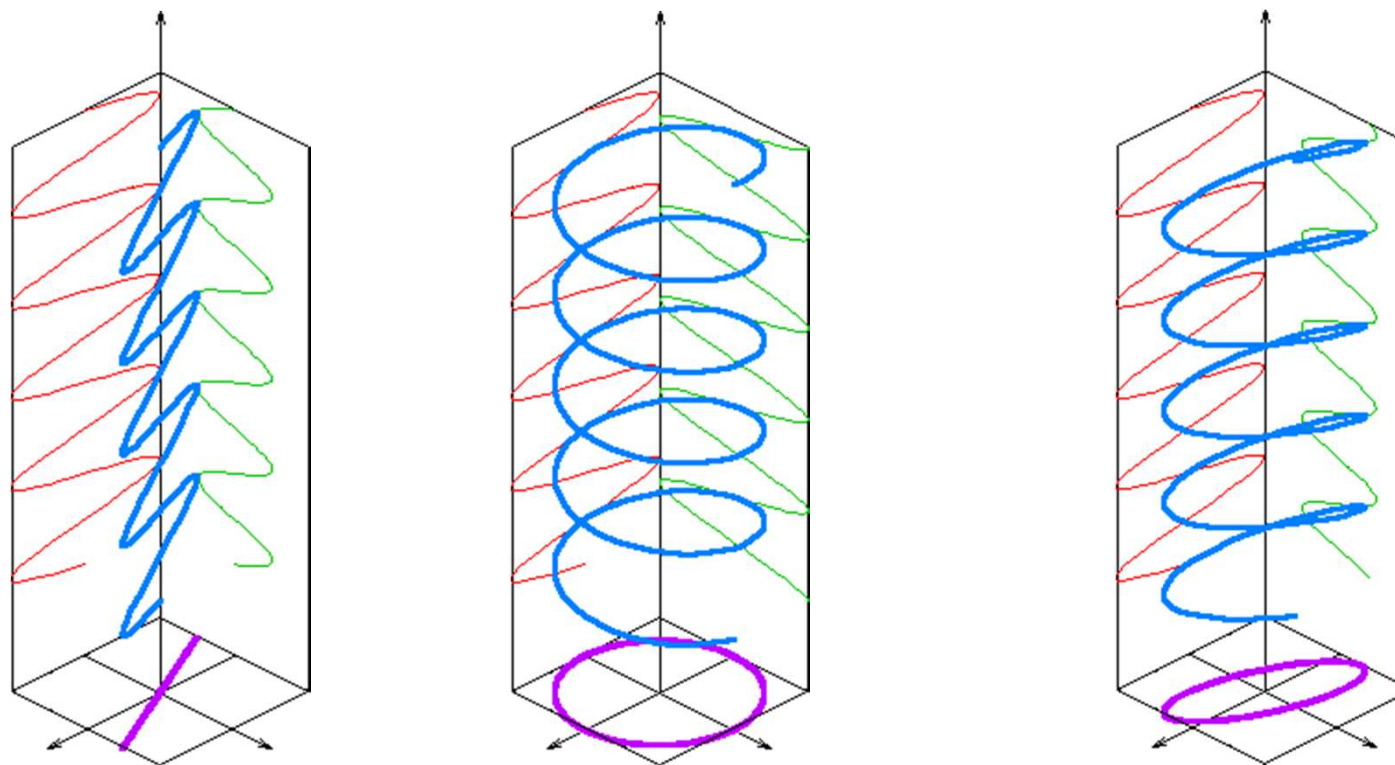




Polarização linear, circular e elíptica

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.

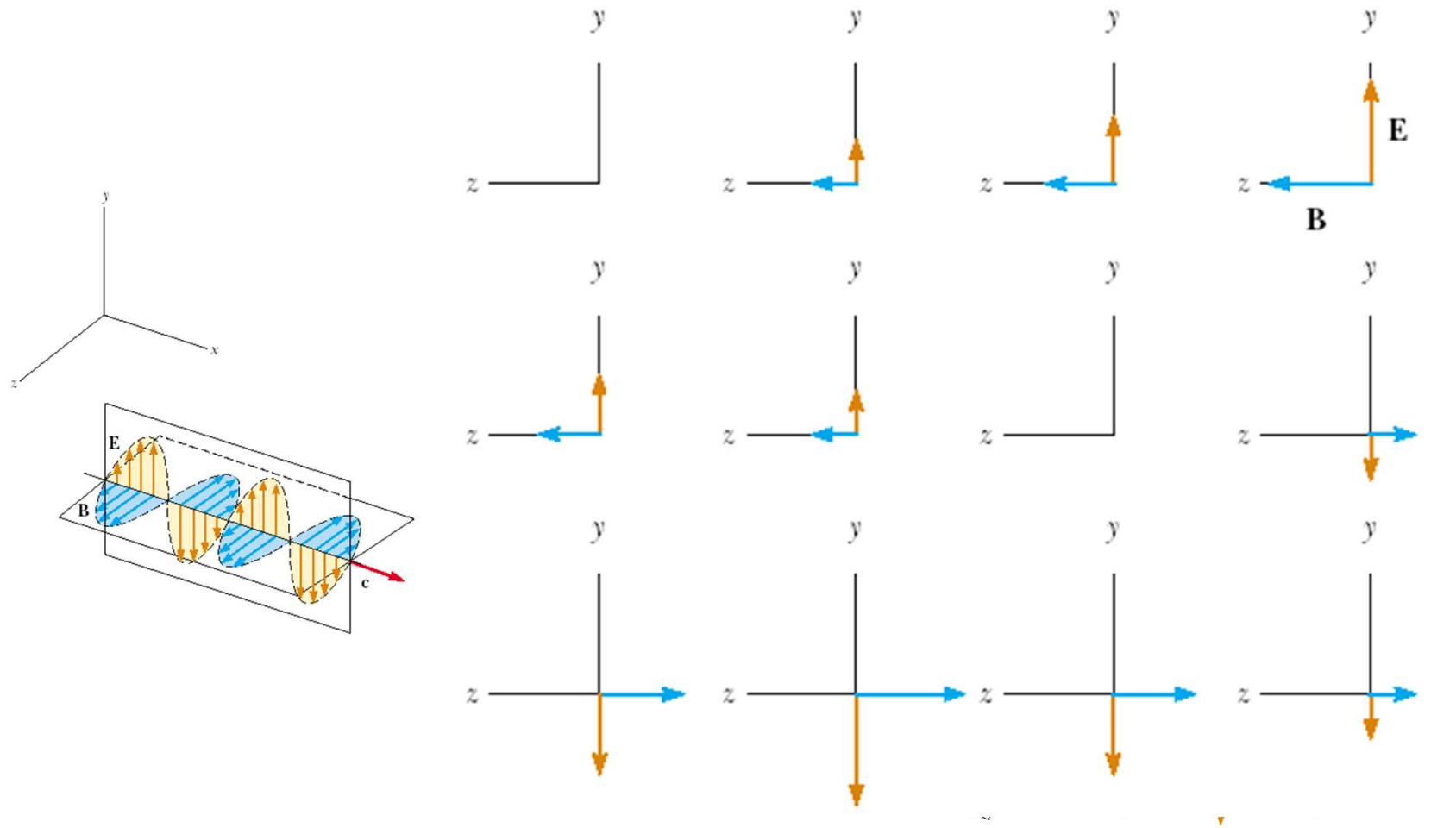
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/CircPol.swf>





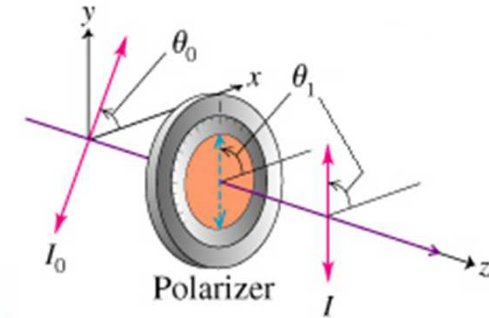
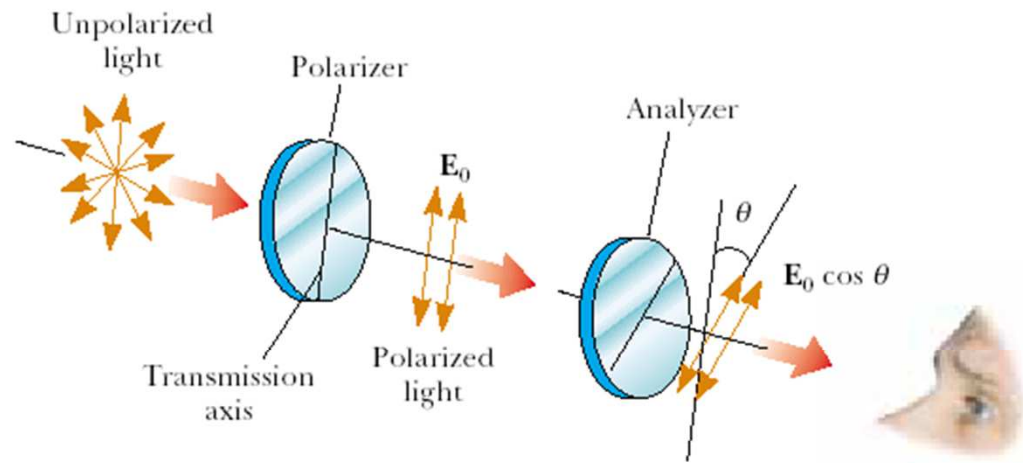
Onda electromagnética plana linearmente polarizada

Diz-se que uma onda está **polarizada** quando a onda não apresenta propriedades idênticas em todas as direcções em torno da direcção da sua propagação.





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.

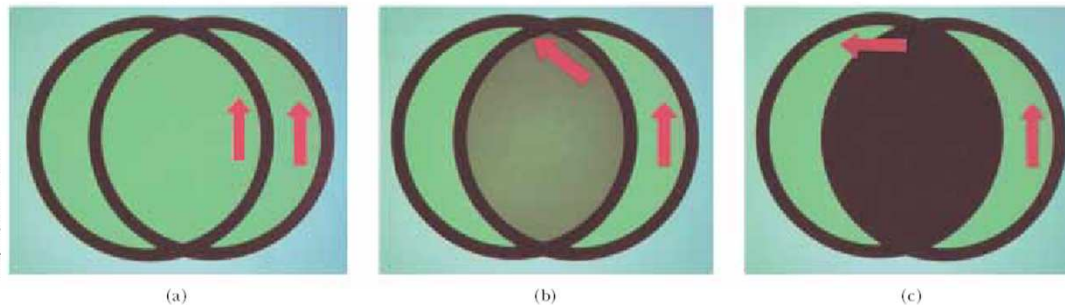
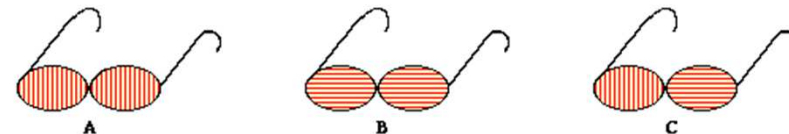


Figure 38.31 The intensity of light transmitted through two polarizers depends on the relative orientation of their transmission axes. (a) The transmitted light has maximum intensity when the transmission axes are aligned with each other. (b) The transmitted light has lesser intensity when the transmission 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.

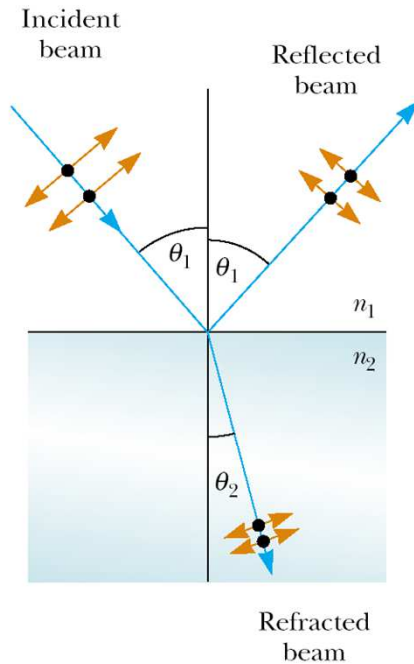


Demonstração: polarização por absorção, lei de Malus - kit de óptica

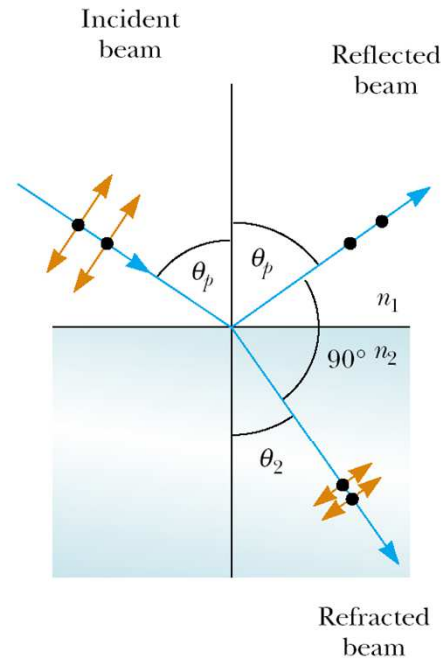




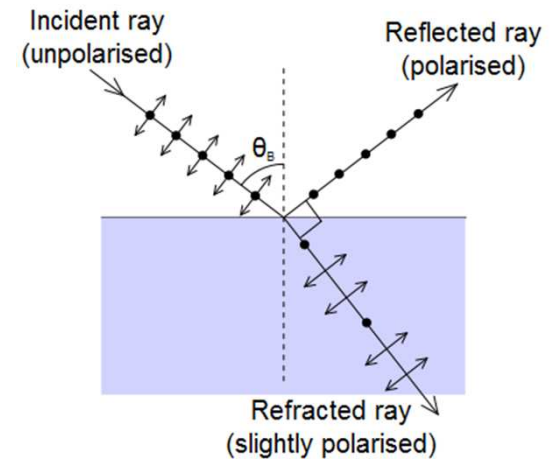
Polarização por reflexão



(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

$$\theta_B = \theta_1: \quad \theta_1 + \theta_2 = 90^\circ, \quad \theta_B = \arctan \left(\frac{n_2}{n_1} \right),$$





Lei da refração*

*Ver adiante, Cap. 10.

$$n_i = \frac{c}{v_i} : \text{índice de refração do meio } i$$

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.

Raio de luz

O raio de luz desvia-se quando deixa o ar e entra na face esquerda do bloco

Bloco de vidro transparente

DOBRÁ
Esta haste de peças, todas em acontece porq do ar para Em cada muda

Rai des água
Olho

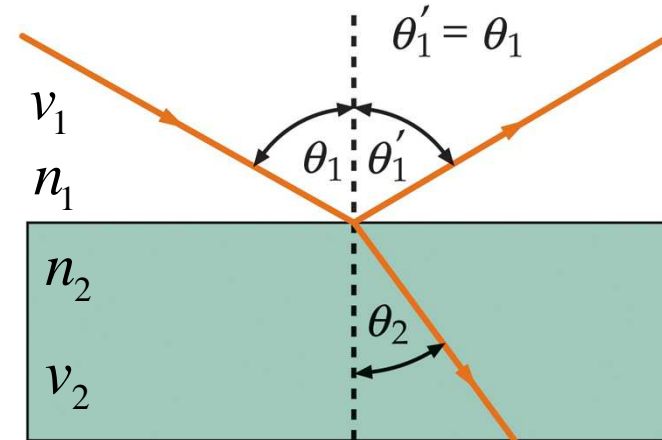
Luz do obj

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 direção 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 astrônomo, 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.



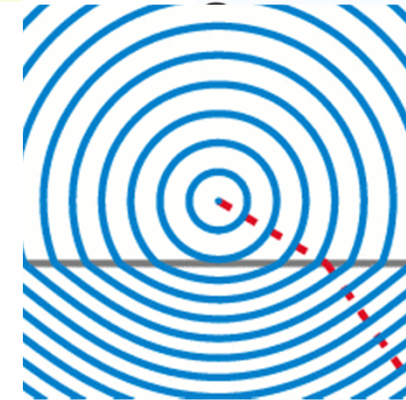
A luz no interior do bloco desvia-se em linha recta

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-](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm)

<http://www.lon-capa.org/~mmp/kap25/Snell/app.htm>

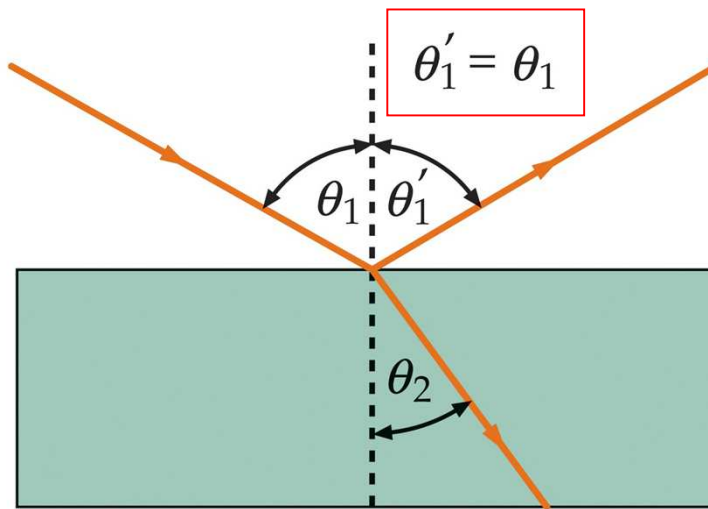
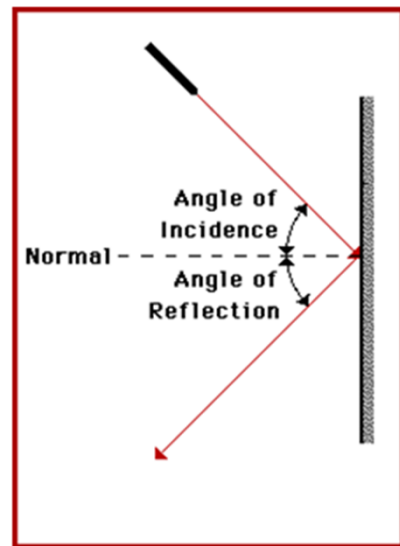
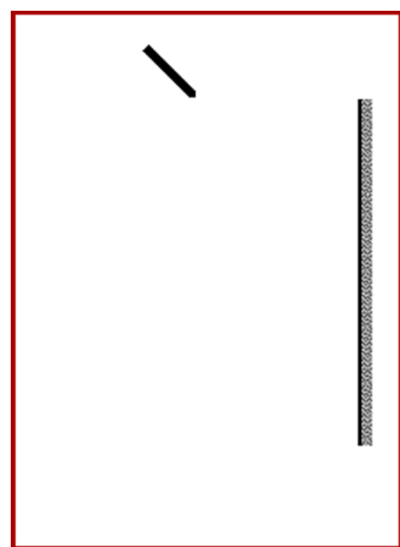
[ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm)



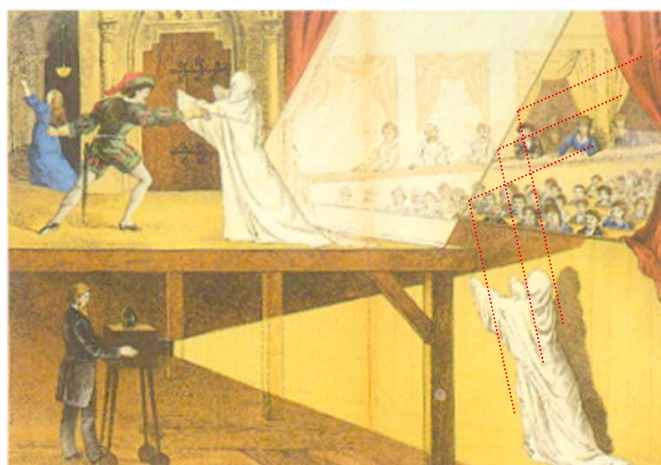


Lei da reflexão*

*Ver adiante, Cap. 10.



<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.



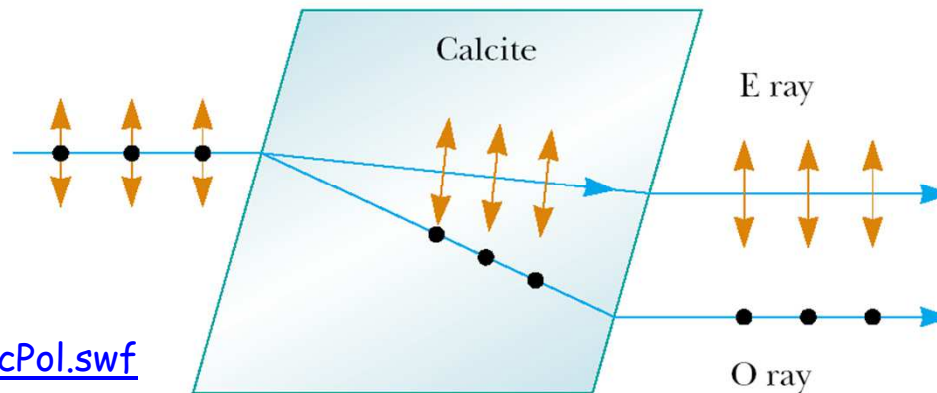
Polarização por dupla refração



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



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/CircPol.swf>

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.)

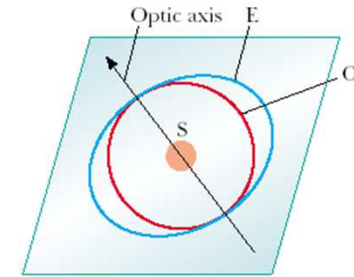


Figure 38.34 A point source S inside a double-refracting crystal produces a spherical wave front corresponding to the ordinary ray and an elliptical wave front corresponding to the extraordinary ray. The two waves propagate with the same velocity along the optic axis.





Polarização por espalhamento

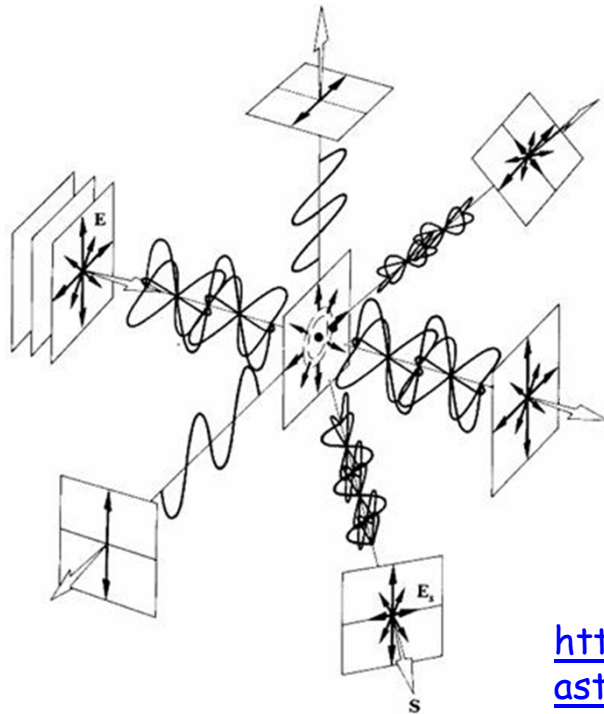
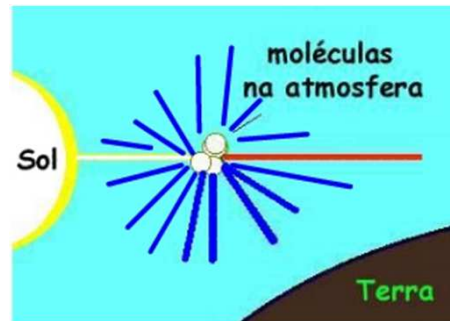


FIGURE 8.36 Scattering of unpolarized light by a molecule.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

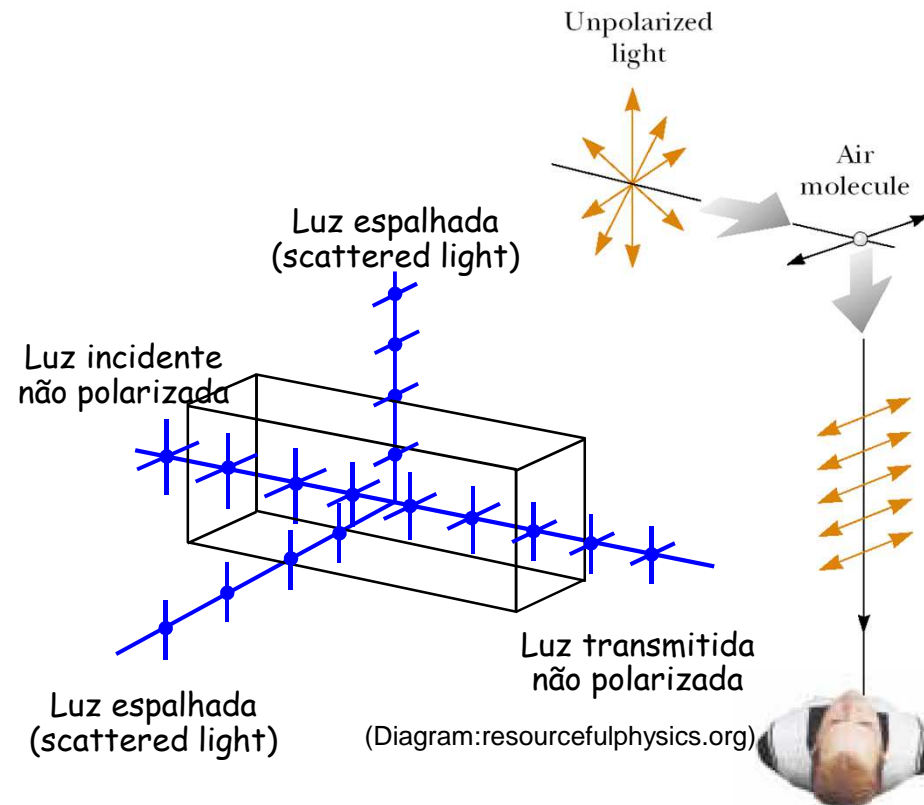


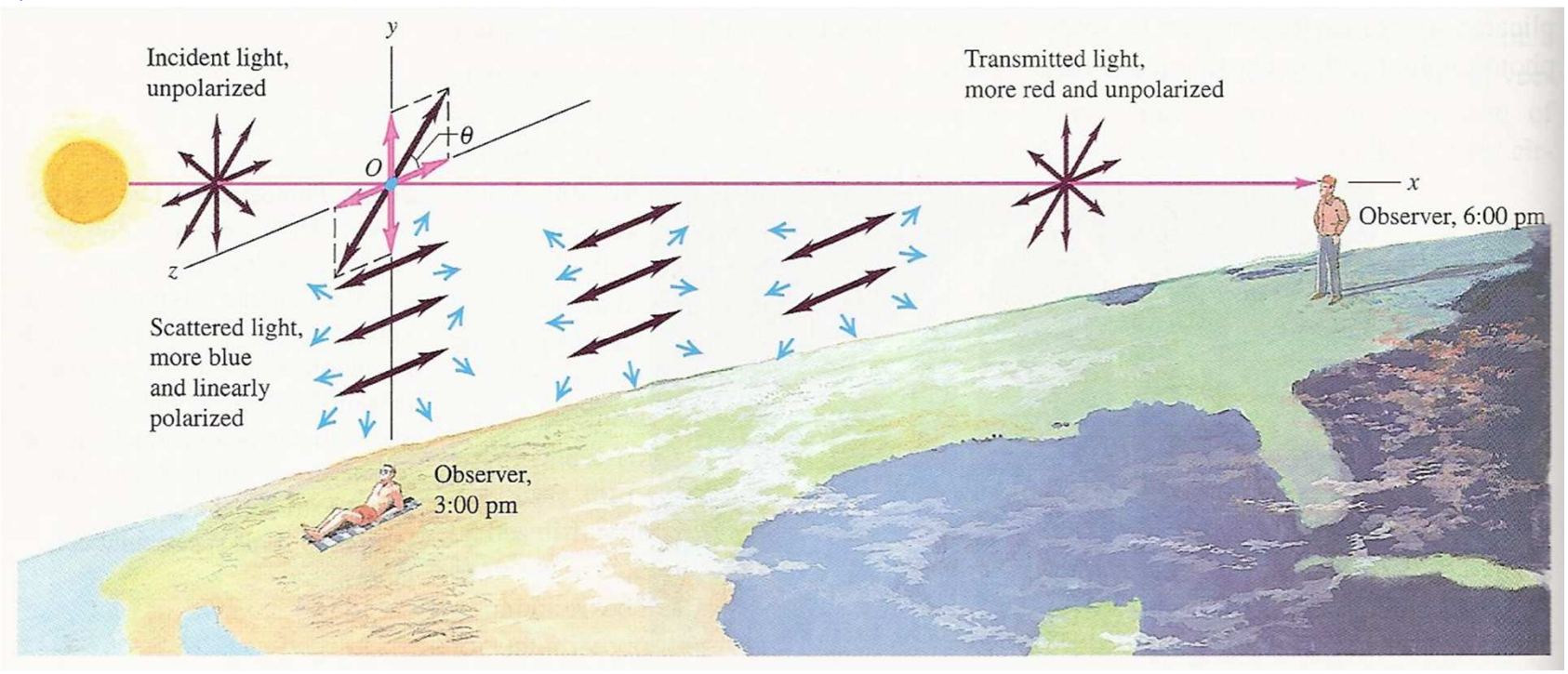
Figure 38.37 The scattering of unpolarized sunlight by air molecules. The scattered light traveling perpendicular to the incident light is plane-polarized because the vertical vibrations of the charges in the air molecule send no light in this direction.





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 oscilam 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.





Polarizadores

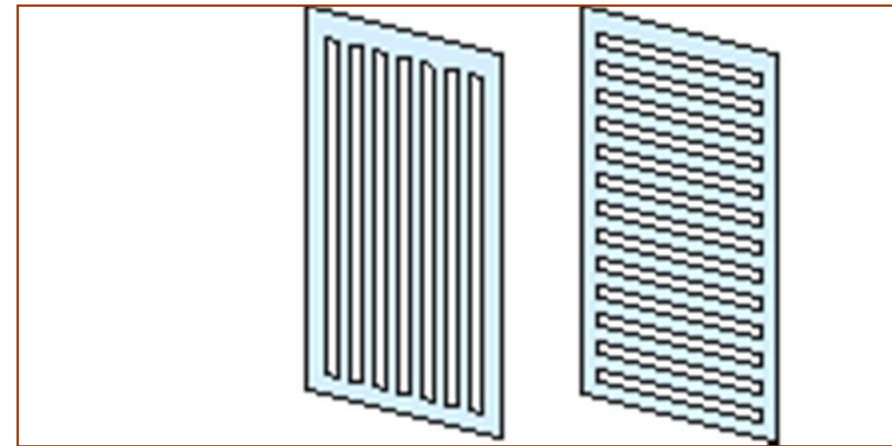
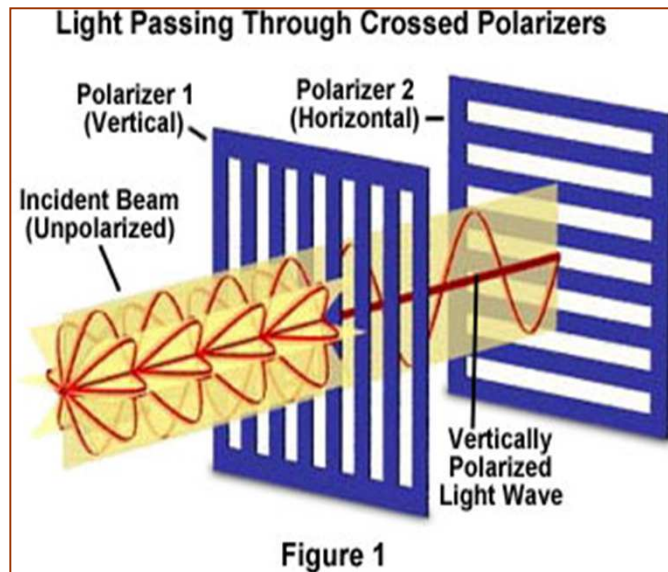
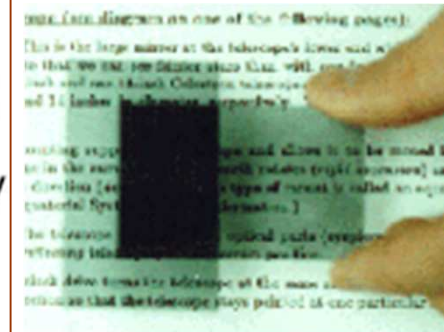
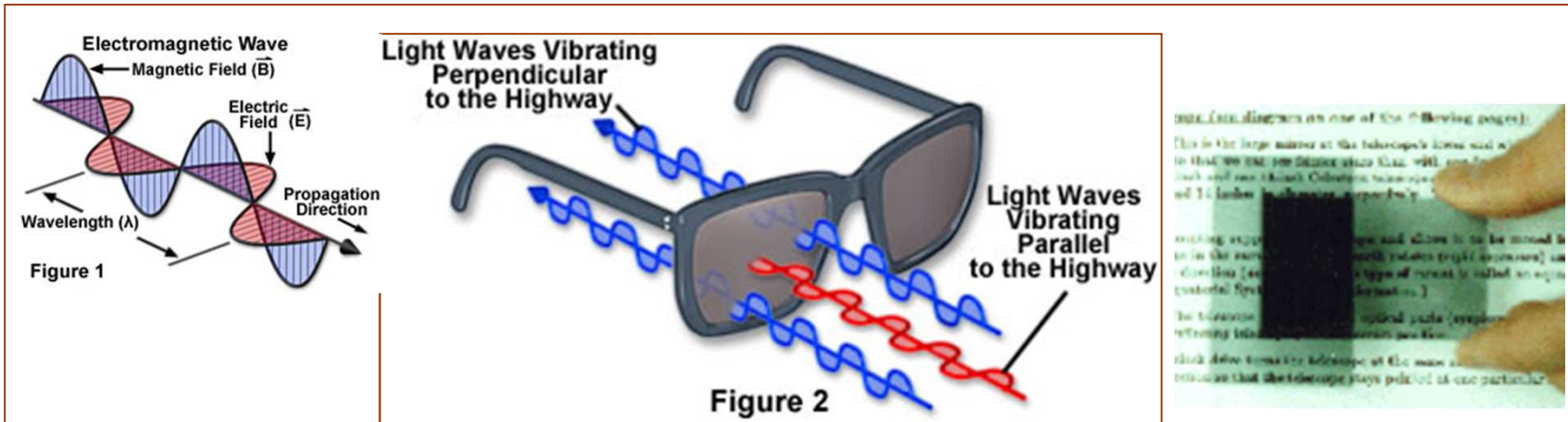
(Diagram: resourcefulphysics.org)

Demonstração: polarização por absorção, lei de Malus - kit de microondas
<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/LDEOC-equipmatdiv.html#cmo>





Polarização e polarizadores



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>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/CircPol.swf>

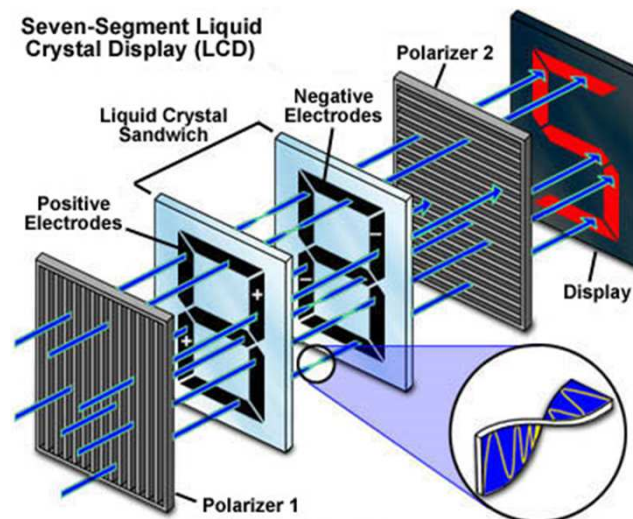
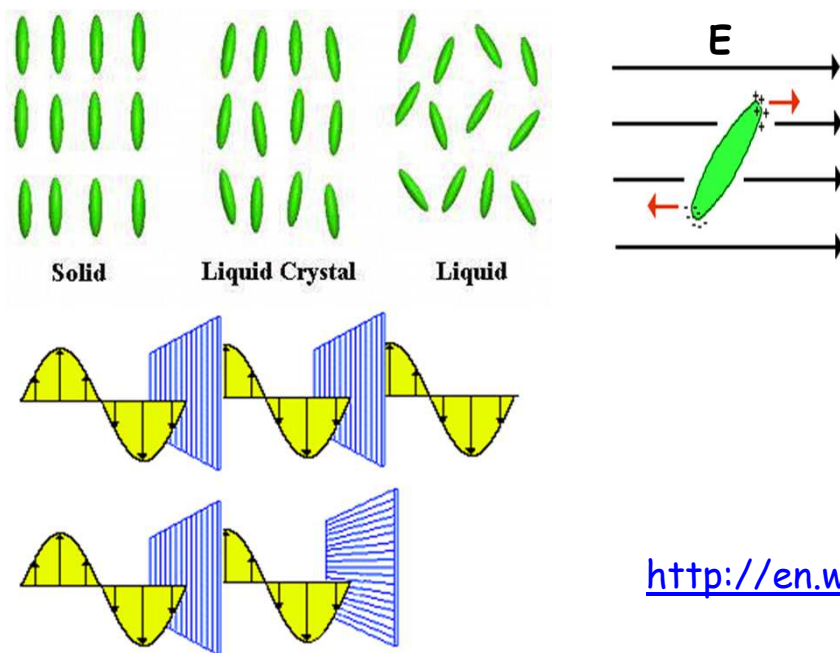


Figure 3

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

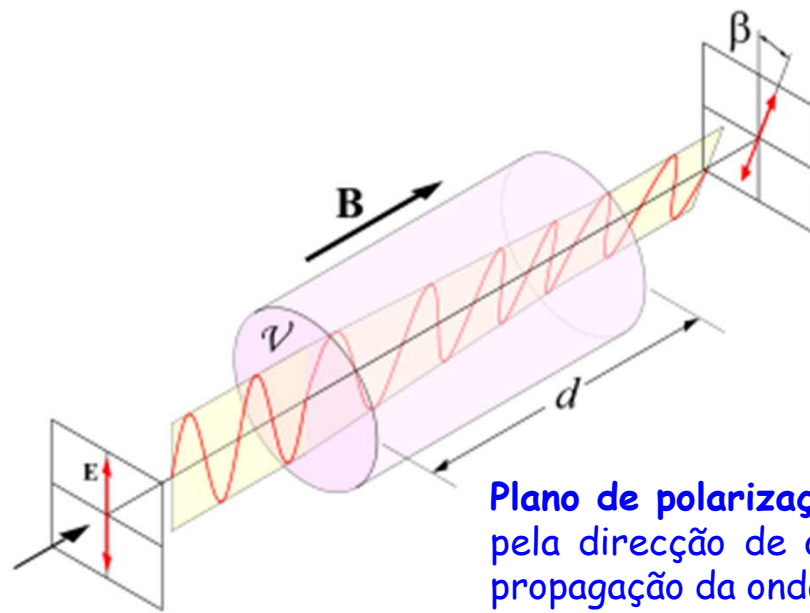
Demonstração usando monitor de portátil





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

$$\beta = \nu B d$$

ν : parâmetro de Verdet do material

Este feito é usado para obter **isoladores ópticos**, componentes muito importantes para os sistema 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)

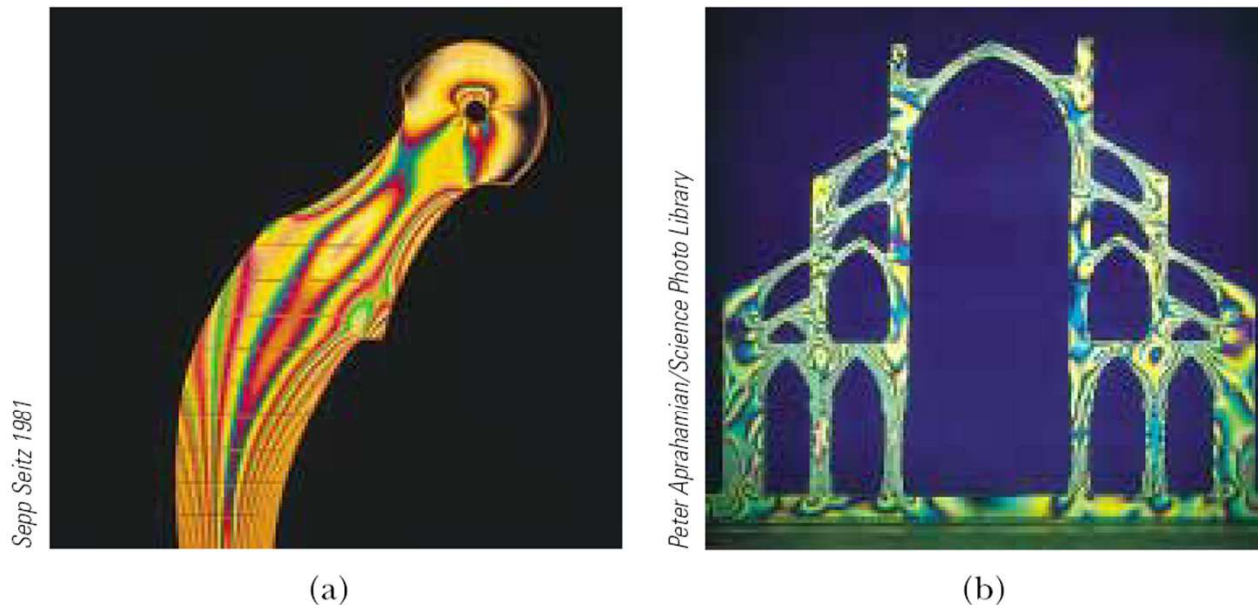


Figure 38.36 (a) Strain distribution in a plastic model of a hip replacement used in a medical research laboratory. The pattern is produced when the plastic model is viewed between a polarizer and analyzer oriented perpendicular to each other. (b) A plastic model of an arch structure under load conditions observed between perpendicular polarizers. Such patterns are useful in the optimal design of architectural components.





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.

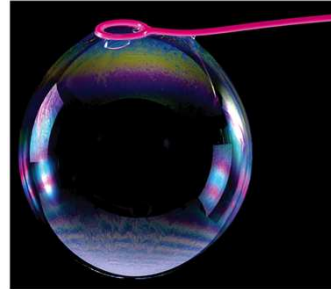
Nos interferómetros por divisão de amplitude, a própria onda primária dá origem a duas ondas com a mesma estrutura que se propagam ao longo de trajectórias distintas e que, uma vez sobrepostas, interferem.

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

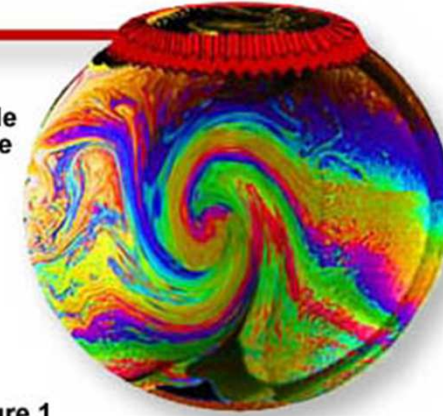


Figure 1



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 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/>

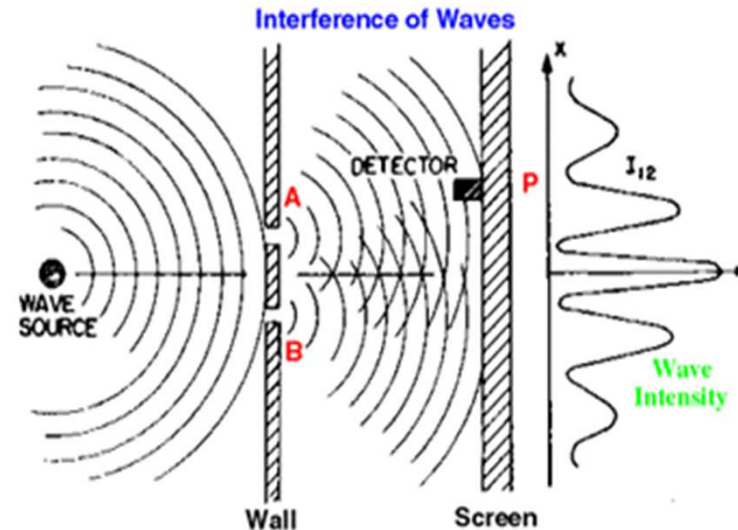
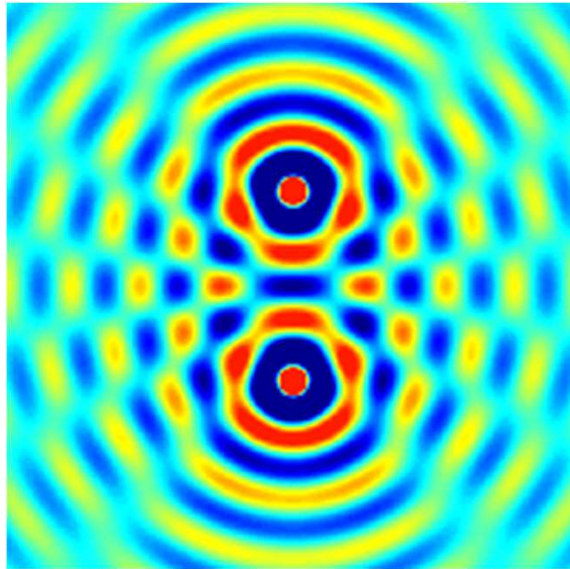
http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_interferometry

<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>

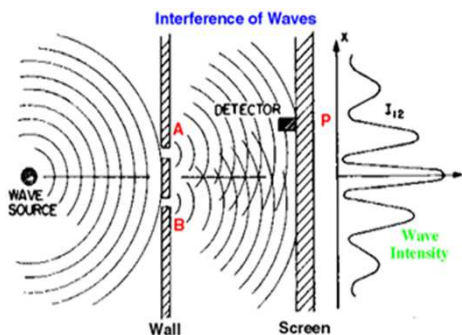
Considerem-se duas fontes pontuais A e B de onda monocromáticas com a mesma frequência, num meio homogéneo. A separação entre as fontes é a , suposta muito maior que o comprimento de onda, λ . As frentes de onda com origem em A e B, E_A e E_B , sobrepõem-se no ponto P do ecrã. O princípio da sobreposição 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: $I_P(\vec{r}) \propto \langle \vec{E}_P^2 \rangle = \langle \vec{E}_1^2 \rangle + \langle \vec{E}_2^2 \rangle + 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$

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:

$$I_P = 2I_0 (1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)$$



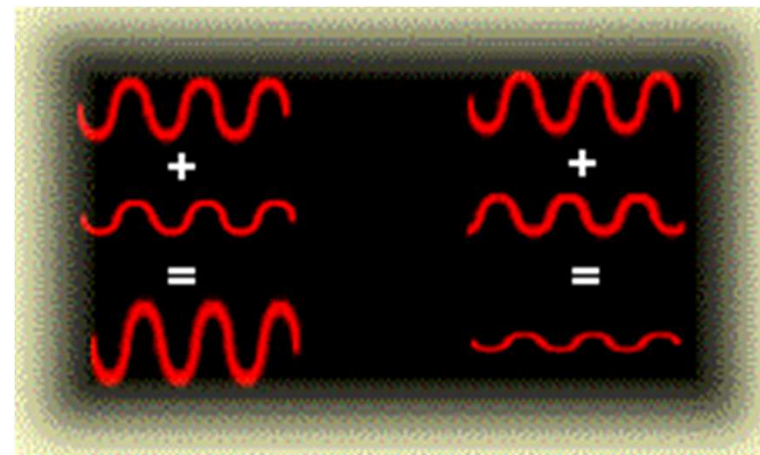
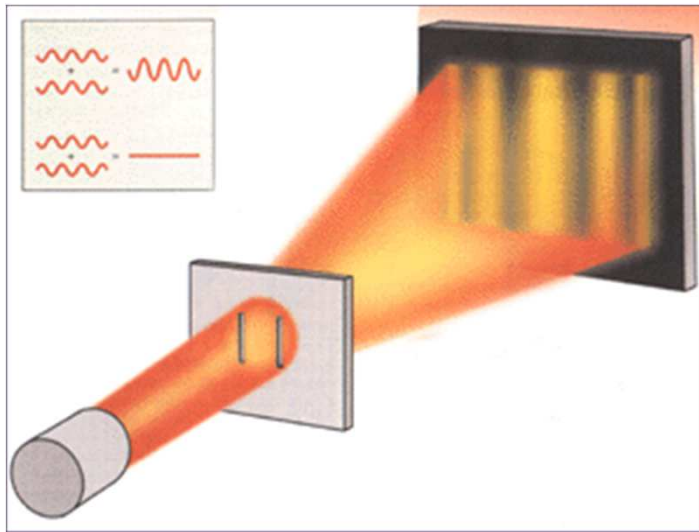


Interferência construtiva e interferência destrutiva

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

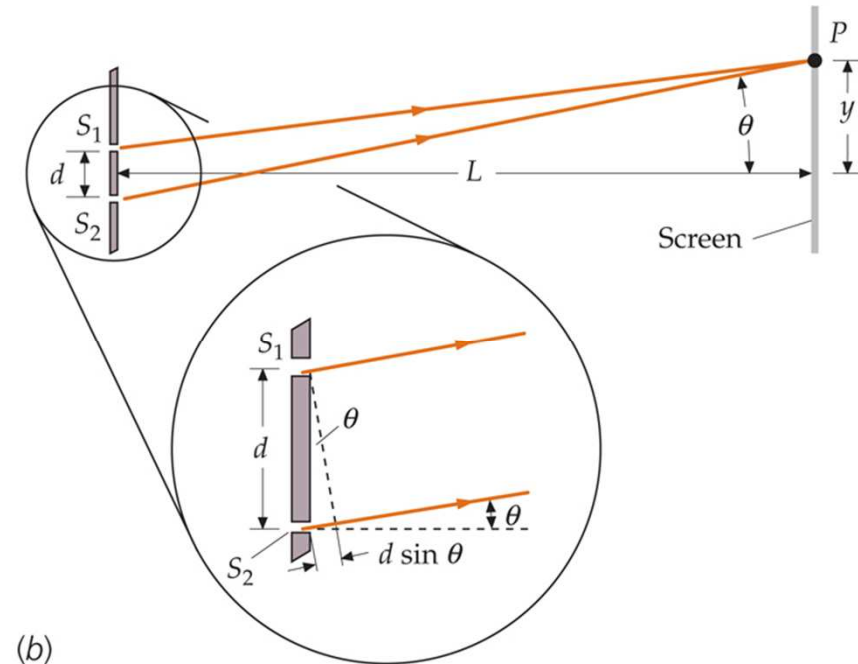
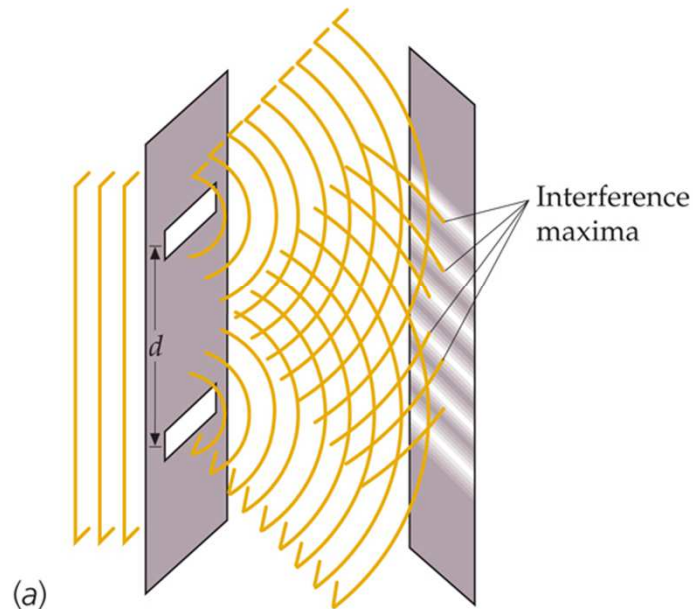
Nas regiões onde $(r_1 - r_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$: luz+luz=escuro!!! - interferência destrutiva





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: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$

$d \sin \theta_m = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$ **Máximo**

$d \sin \theta_m = (m - \frac{1}{2})\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots$ **Mínimo**

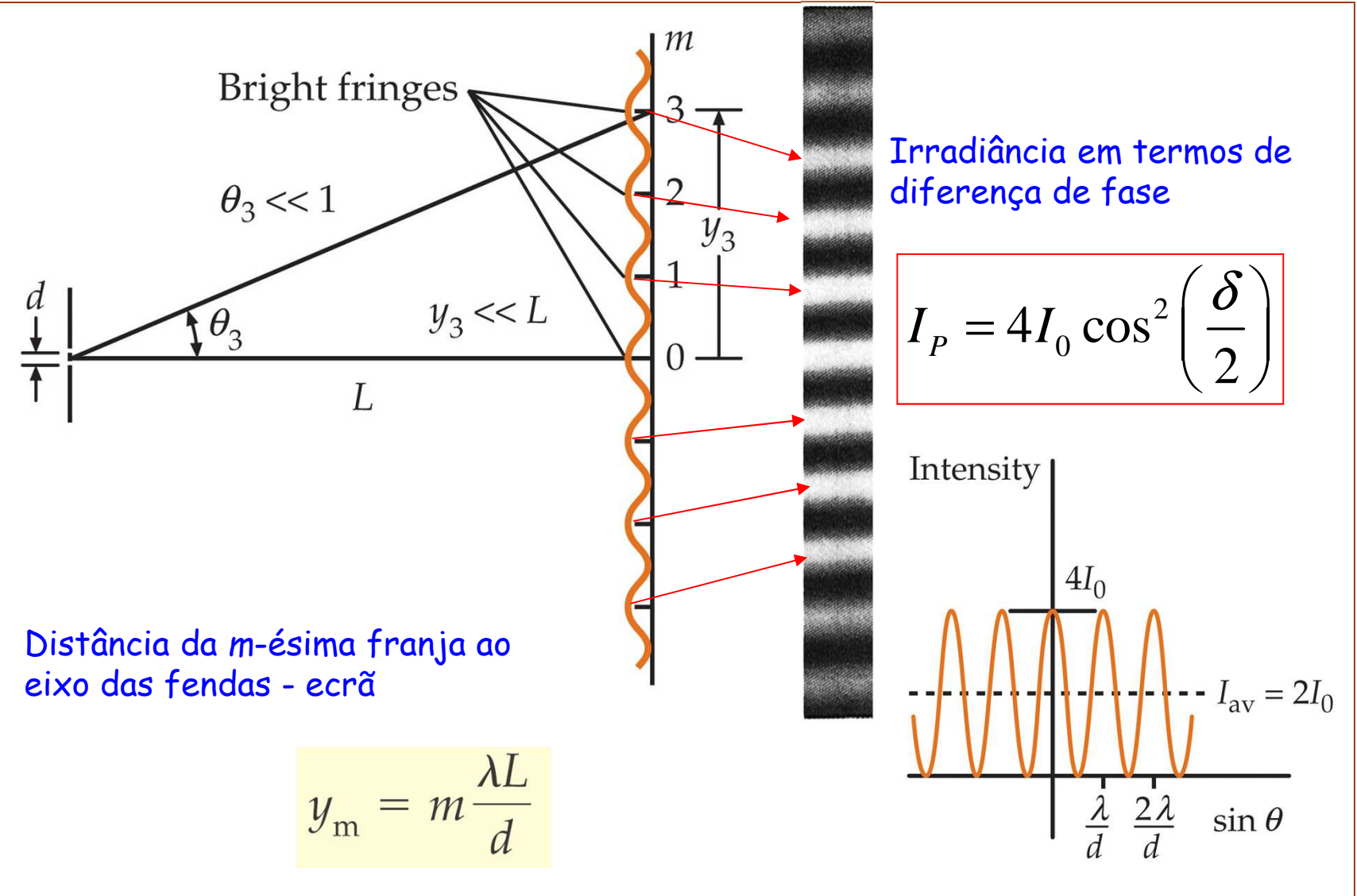
Distância da m -ésima franja ao eixo das fendas-tela

$$y_m = m \frac{\lambda L}{d}$$





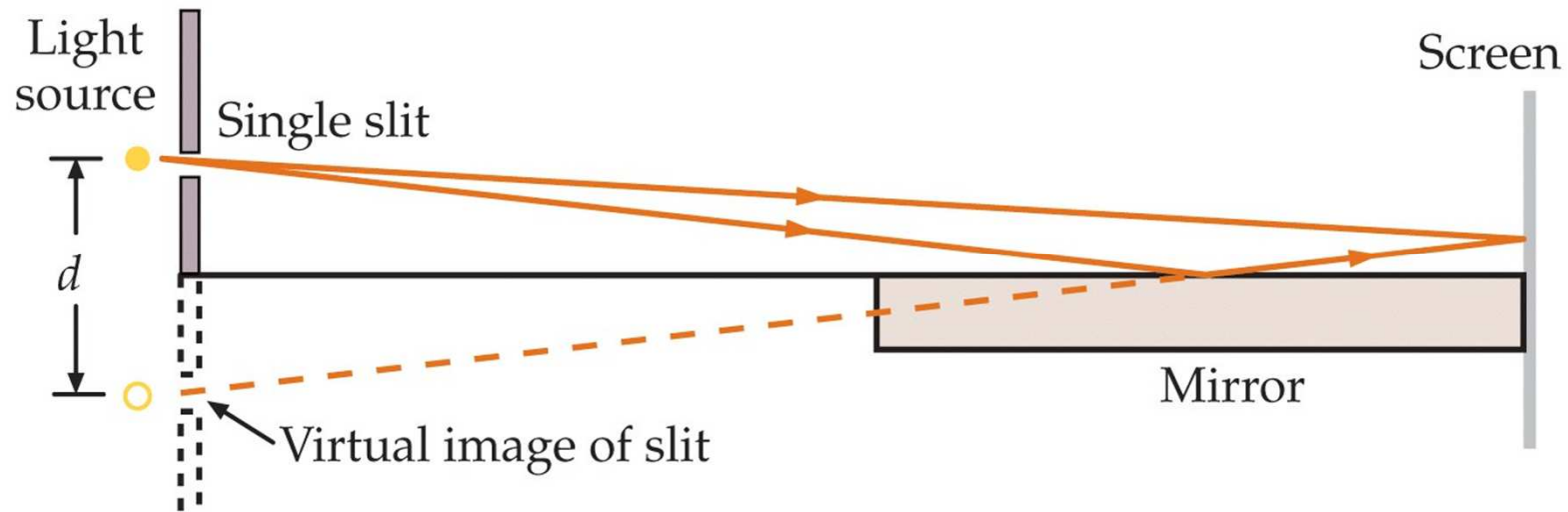
Padrão de interferência





Espelho de Lloyd

Produz um padrão de interferência idêntico ao das duas fendas

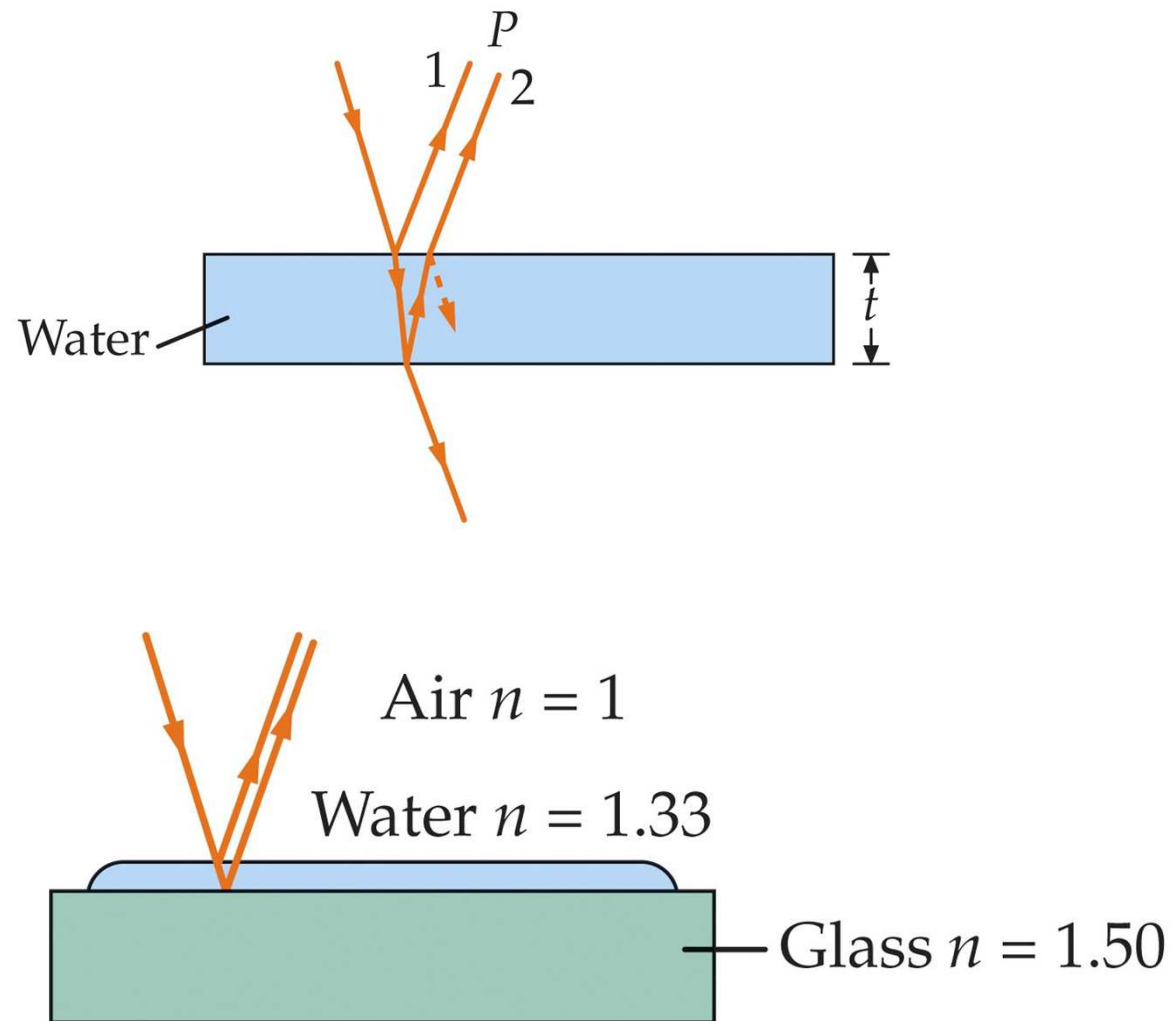


Contudo neste caso, a faixa de interferência central num ponto equidistante das duas fontes é escura (na experiência das duas fendas a faixa central é clara).
Consegue explicar porque?





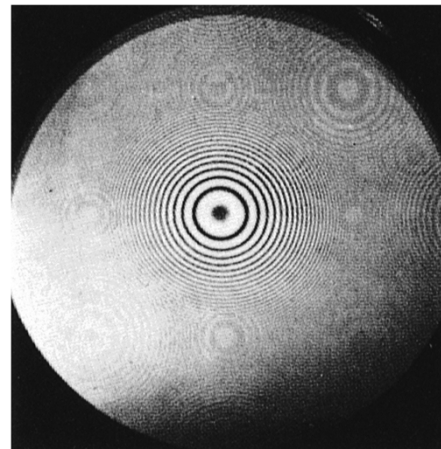
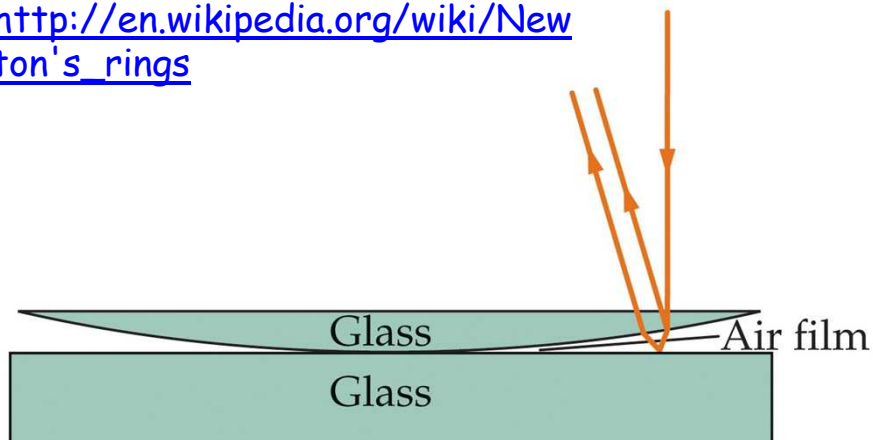
Interferência em filmes finos





Anéis de Newton

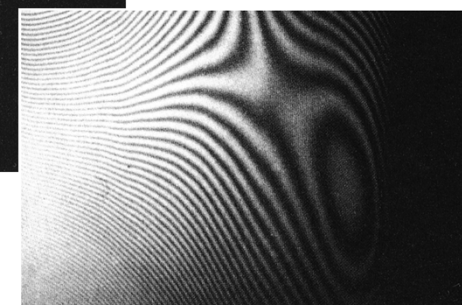
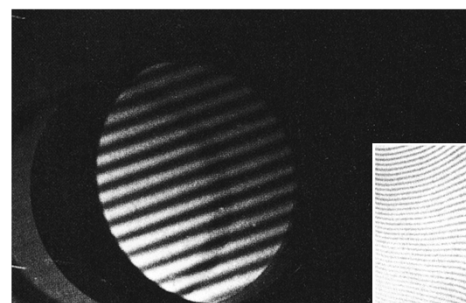
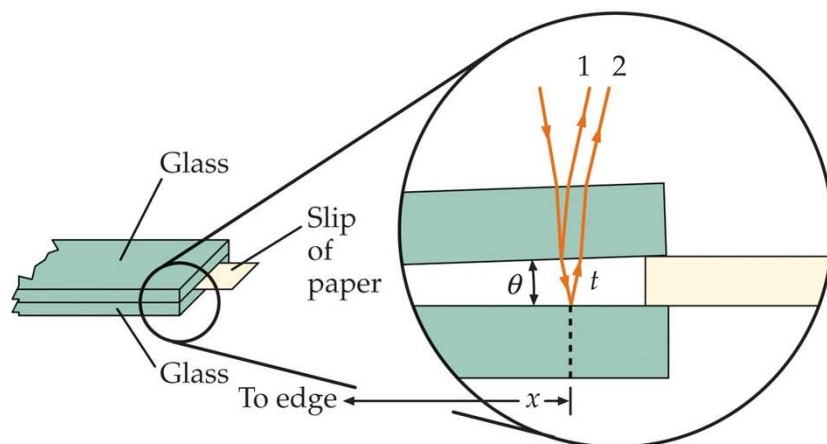
http://en.wikipedia.org/wiki/Newton's_rings



<http://shortwork.net/equip/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.

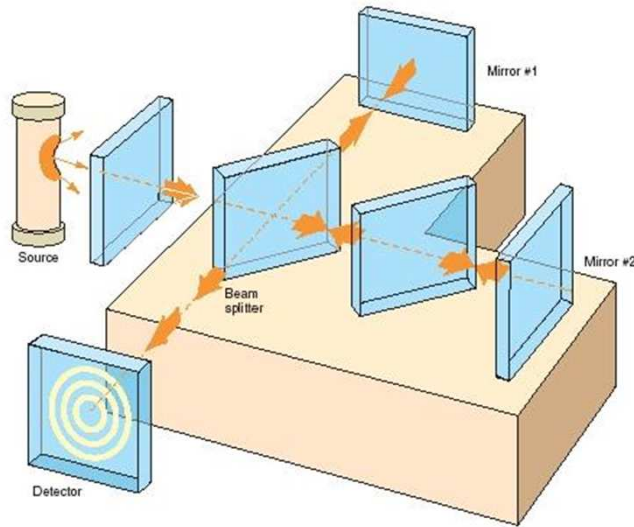
No interferómetro de Mach-Zehnder ...

incompleto



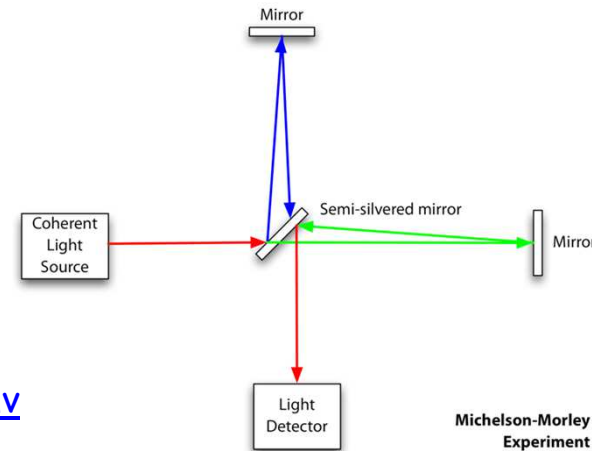


Interferómetro de Michelson

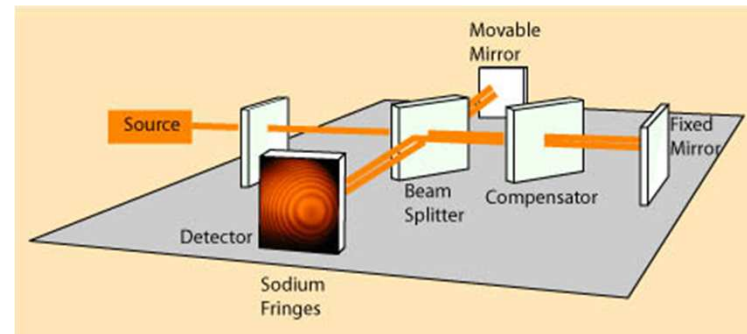
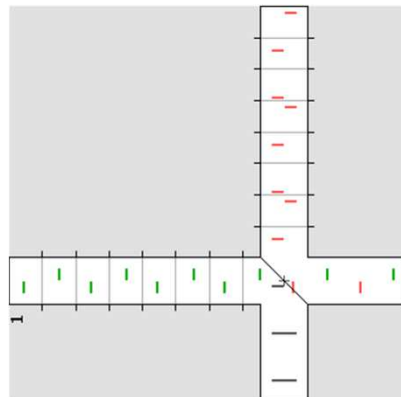


Interferência construtiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = m\lambda$

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_DMIg&feature=related

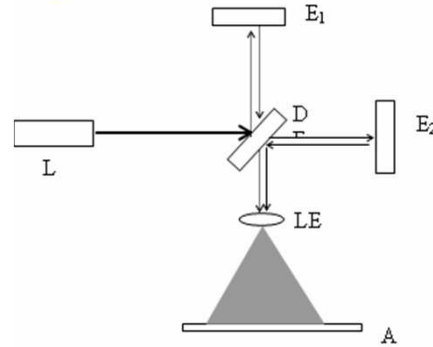
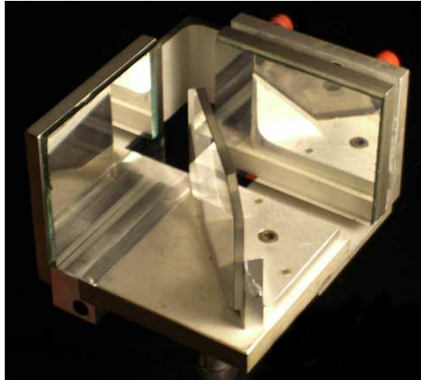
http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment





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.

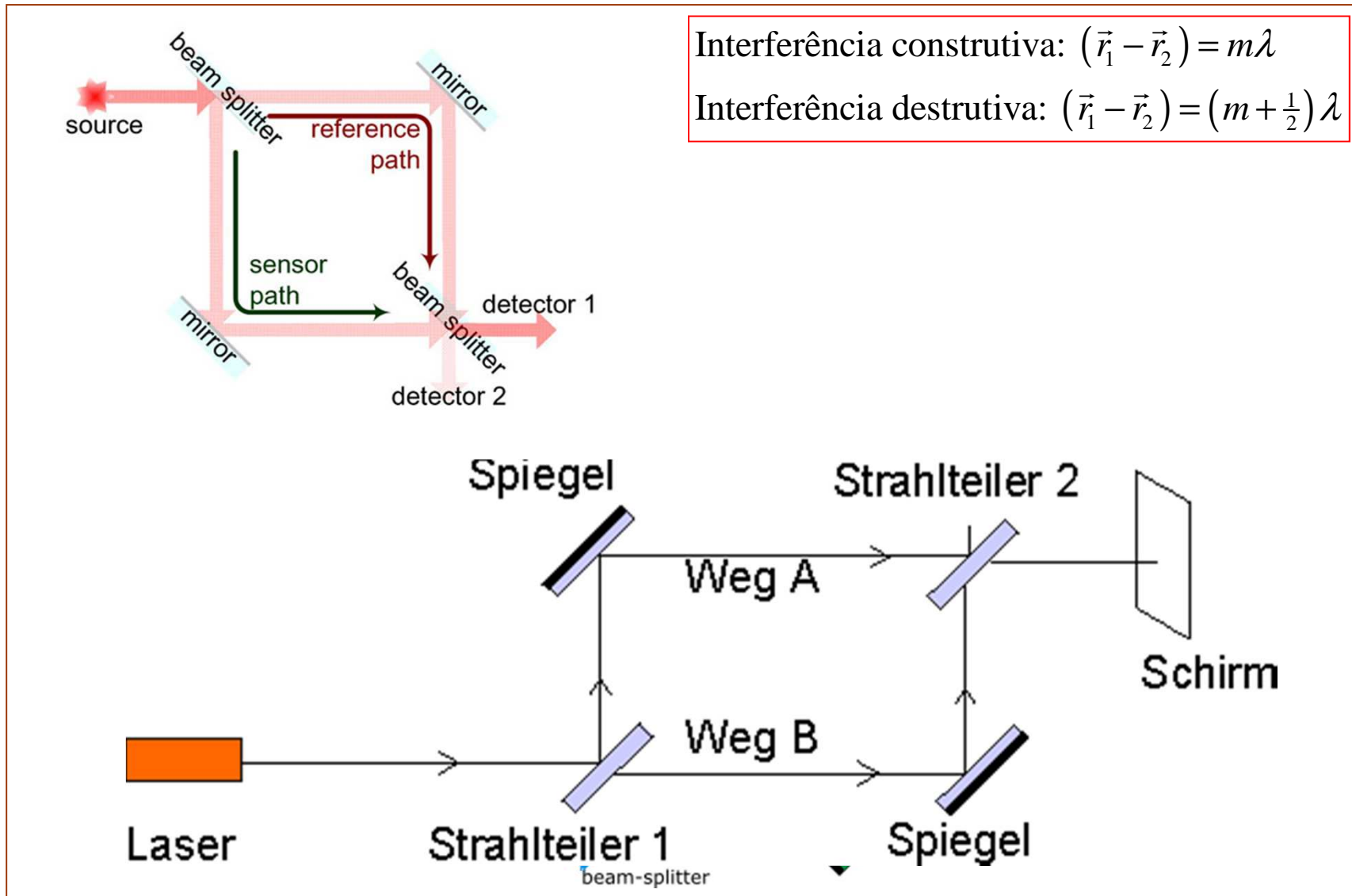
Outras aplicações prendem-se com a implementação de interferómetros de linhas de atraso, como por exemplo em moduladores ópticos DPSK que convertem modulação de fase em modulação de amplitude nas redes DWDM.

http://www.youtube.com/watch?v=Nsa8D5_DMlg&feature=related

http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment



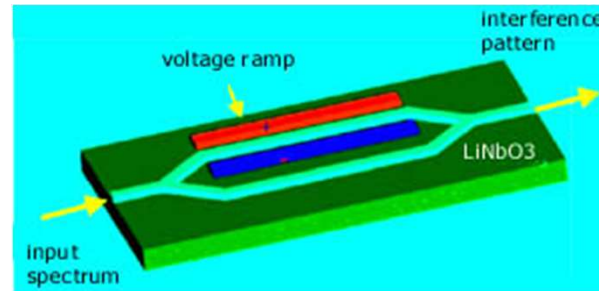
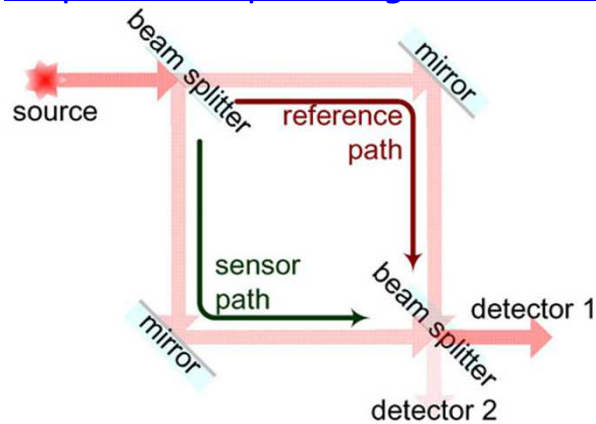
Interferómetro de Mach-Zehnder





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 diffringāre, «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).*

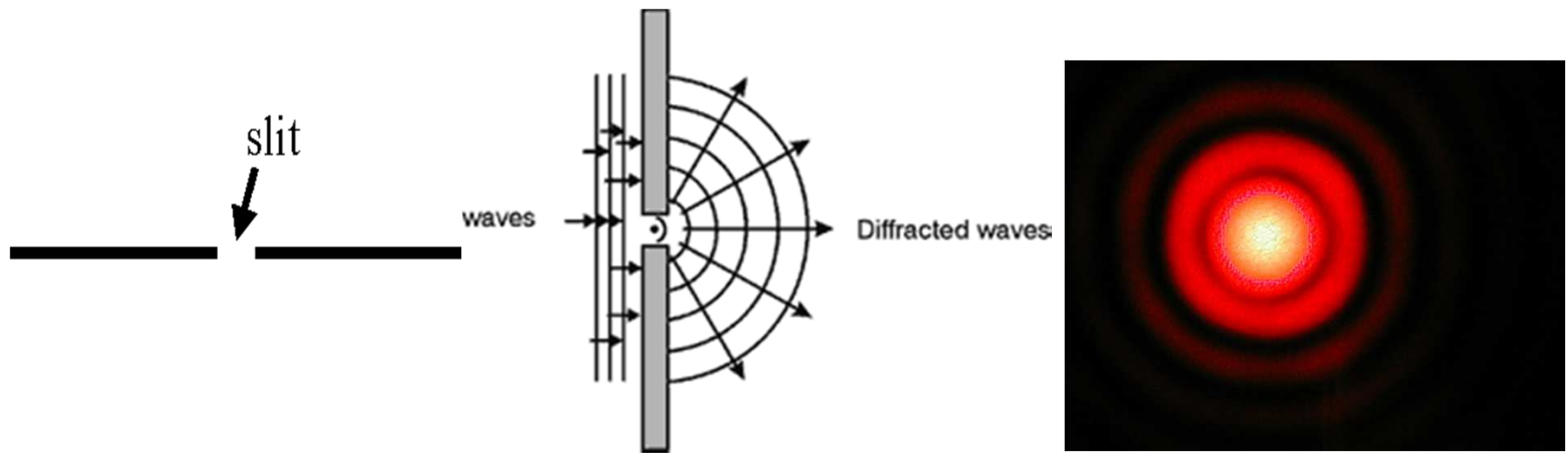
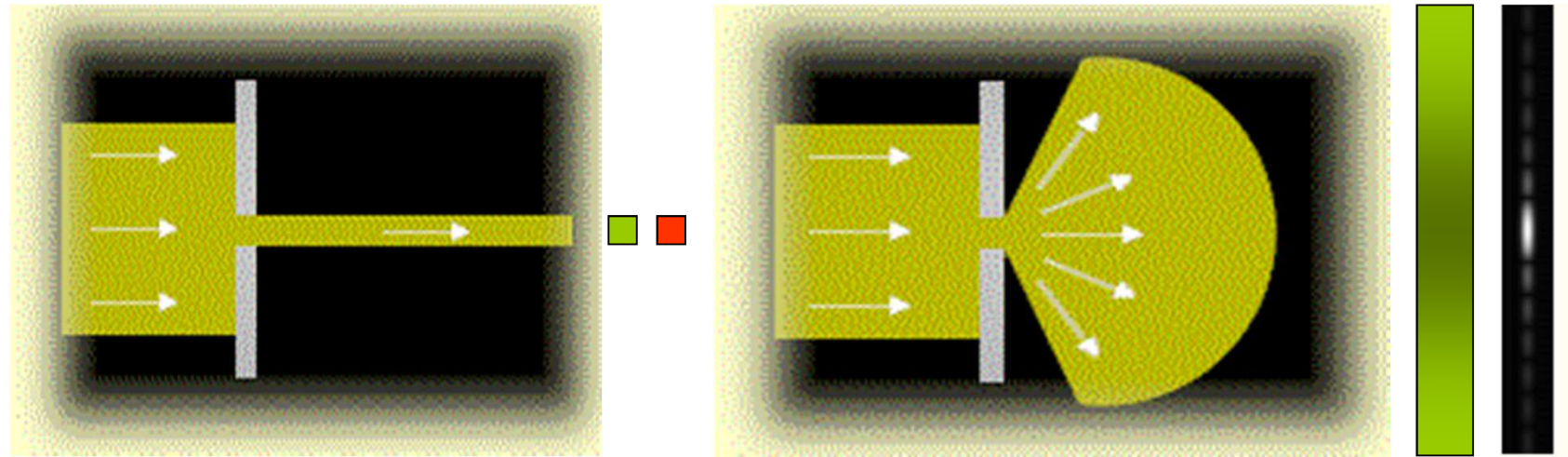
Embora não *complemente exacta*, a teoria de Huygens-Fresnel é satisfatória para a análise da grande maioria dos fenómenos ópticos de difracção, e será usada para descrever os fenómenos aqui tratados.





Exemplos do fenómeno de difracção (vídeos)

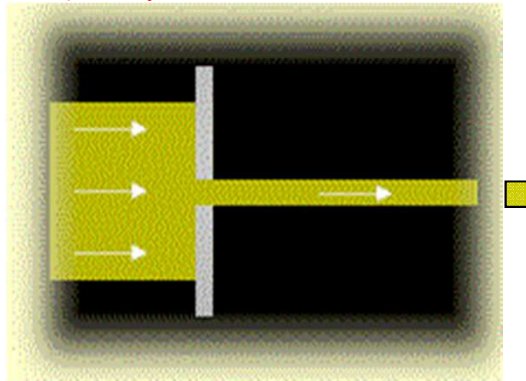
Difracção (Francesco Grimaldi)



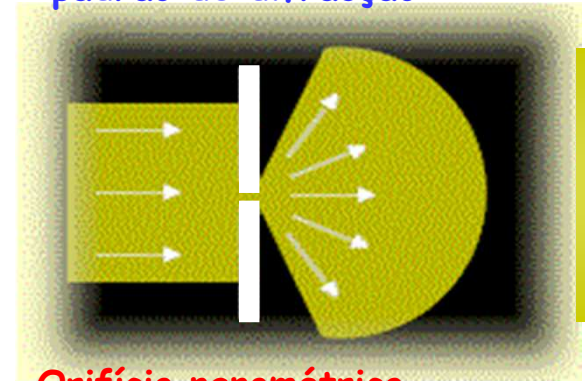


Exemplos do fenómeno de difracção (vídeos)

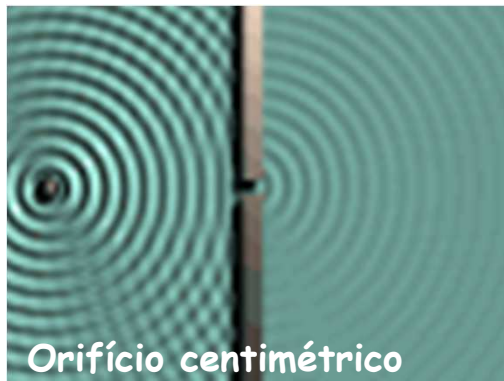
Se o orifício não for muito estreito, temos **um feixe bem definido**



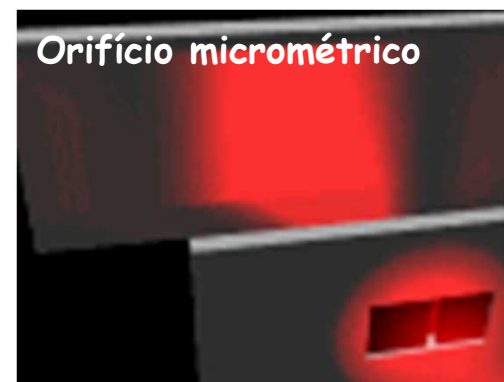
Se o orifício for muito estreito observa-se o **padrão de difracção**



Difracção (água)



Difracção da luz

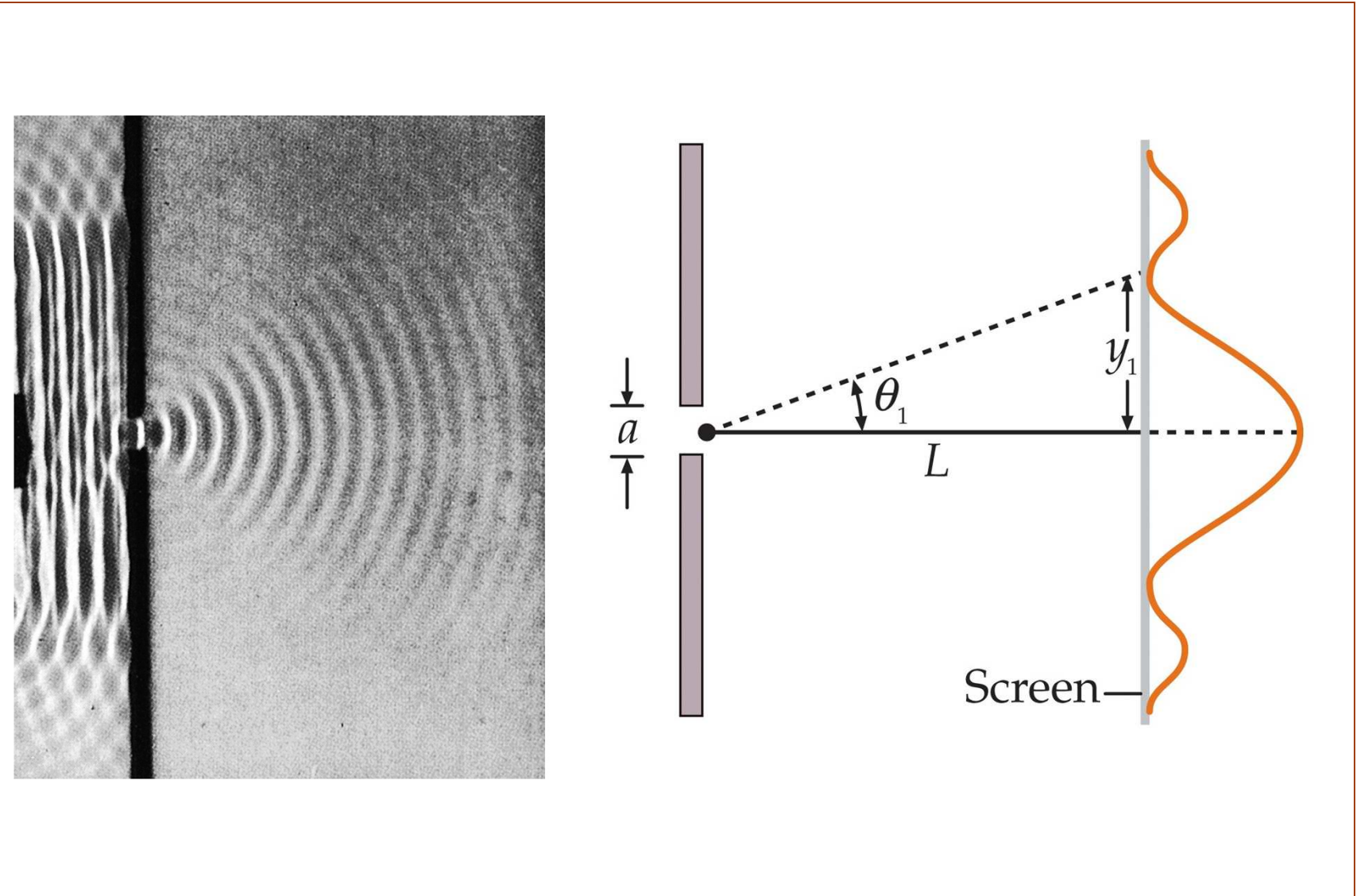


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Difracção%20da%20Luz%20-%201%20fenda.wmv>



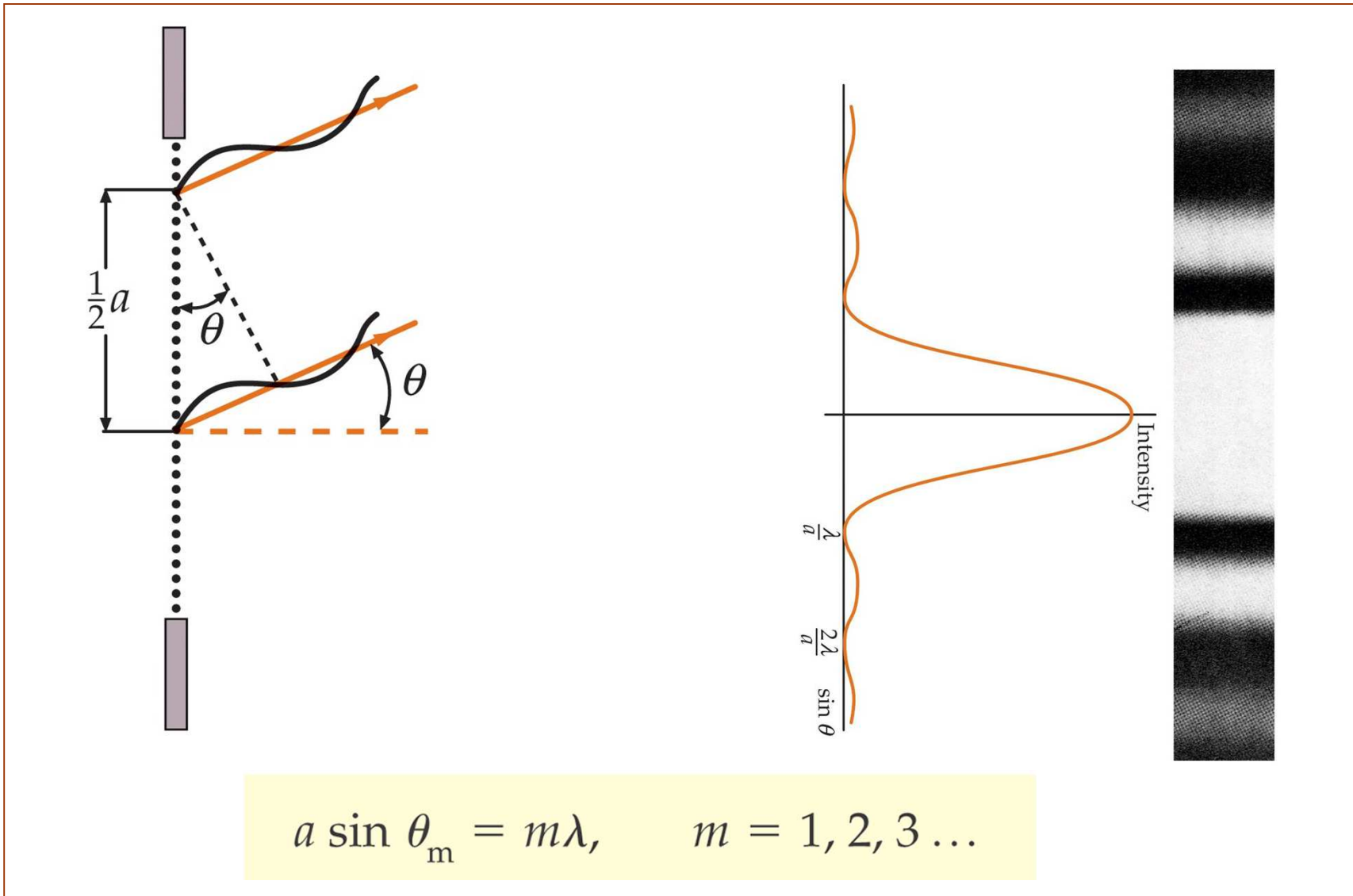


Difracção numa fenda





Pontos de intensidade nula na difracção numa fenda



$$a \sin \theta_m = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3 \dots$$



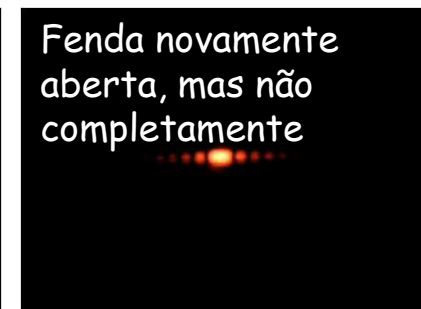
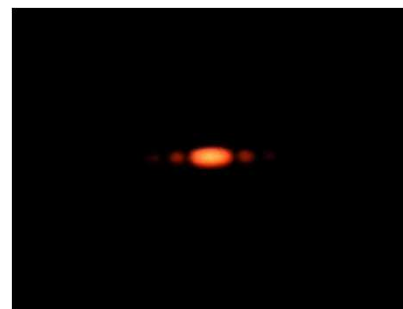
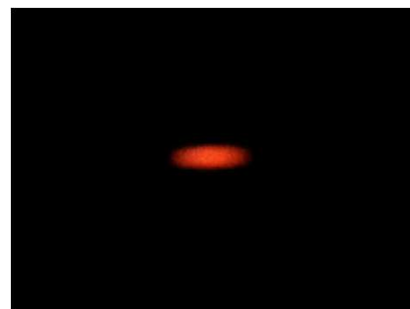
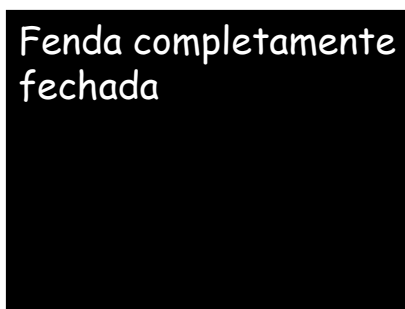
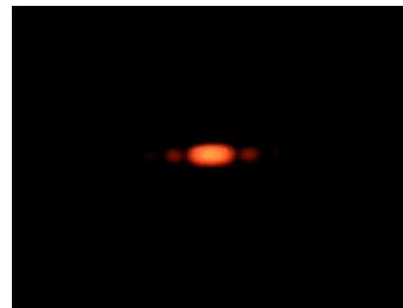
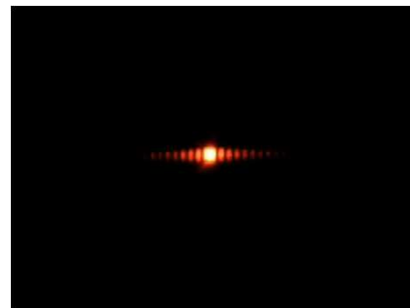


Demonstrações de difracção numa fenda

Montagem; arco-íris, guiagem da luz, efeito fotoelétrico, difracção, ...



Difracção da luz através de uma fenda



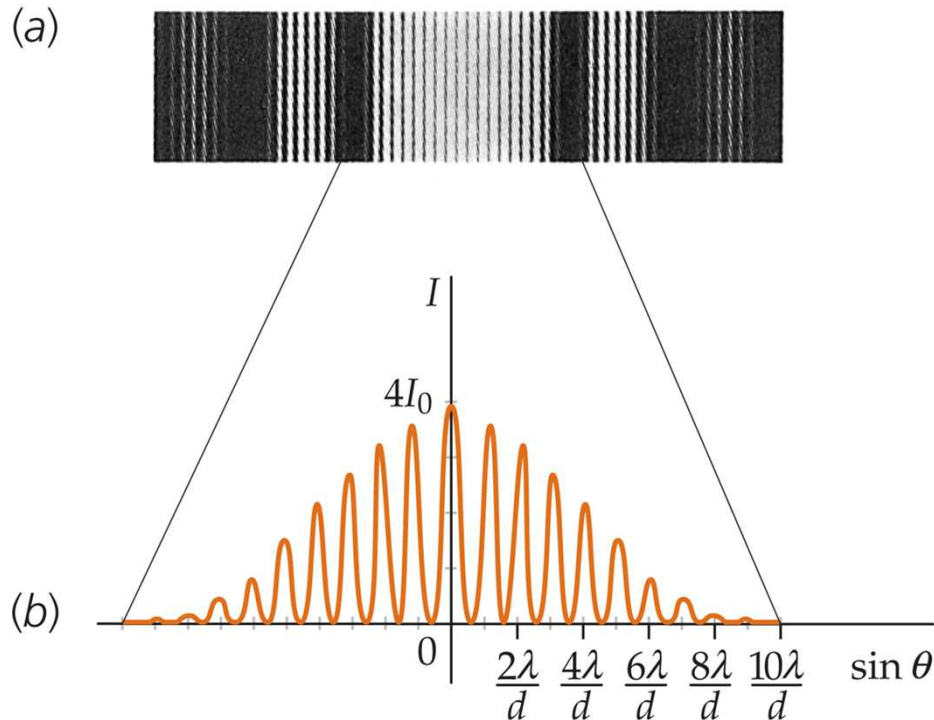
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Difracção%20da%20Luz%20-%201%20fenda.wmv>





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

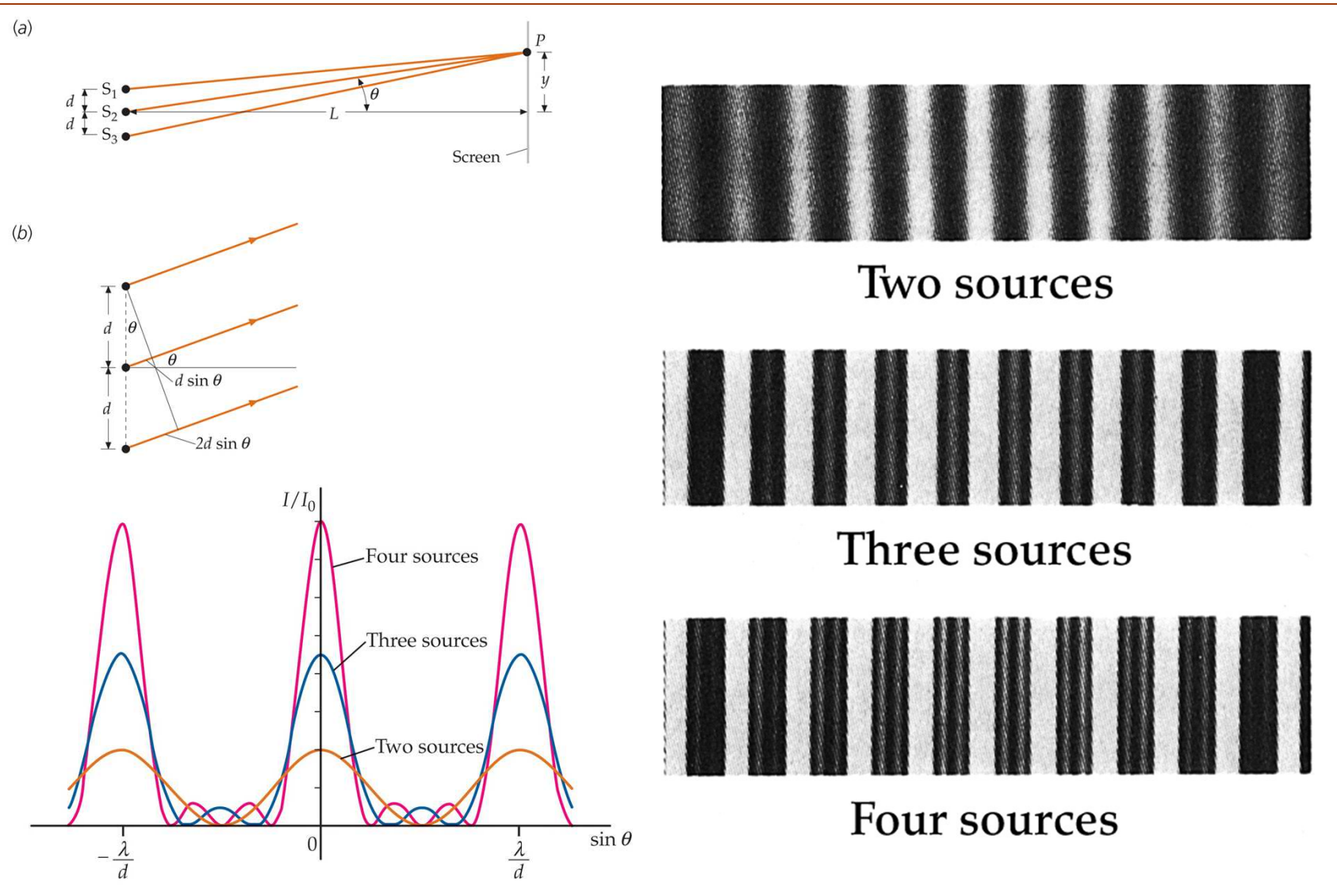
Em geral, se $m=d/a$, o m -ésimo máximo de interferência irá coincidir com o primeiro mínimo de difracção.

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





Cálculo do padrão de difracção de fendas estreitas

The diagram illustrates the experimental setup for calculating the diffraction pattern of narrow slits. On the left, a slit of width a is shown with N sources. Rays are shown at an angle θ . In the center, a vertical line represents the N sources. On the right, a screen is shown with a central maximum of amplitude $A_{\max} = NA_0$ and a smaller amplitude A_0 at an angle.

Uma fenda

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \frac{1}{2} \phi}{\frac{1}{2} \phi} \right)^2$$

Duas fendas

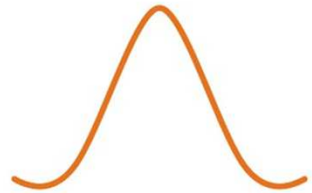
$$I = 4I_0 \left(\frac{\sin \frac{1}{2} \phi}{\frac{1}{2} \phi} \right)^2 \cos^2 \frac{1}{2} \delta$$



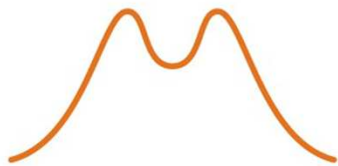
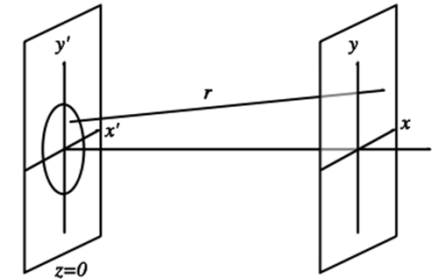

Difracção de Fraunhofer e Fresnel

As the screen is moved closer,

Fresnel: a fonte, o obstáculo e o ecrã estão próximos uns dos outros

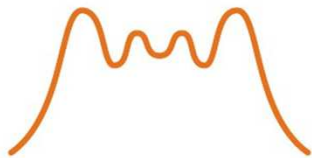


the Fraunhofer pattern observed far from the slit . . .

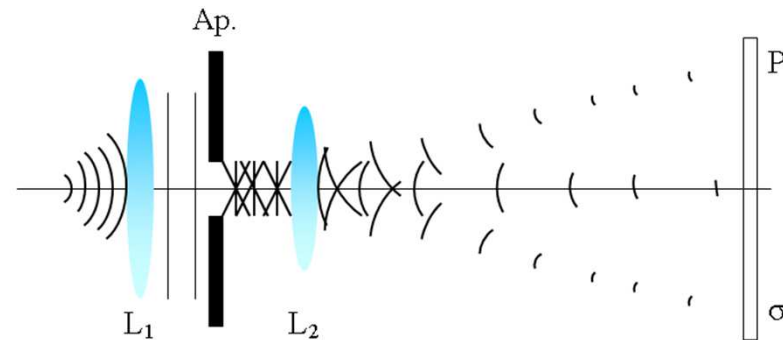


gradually changes into . . .

Fraunhofer: a fonte, o obstáculo e o ecrã comportam-se como se estivessem muito afastados uns dos outros



the Fresnel pattern observed near the slit.



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

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

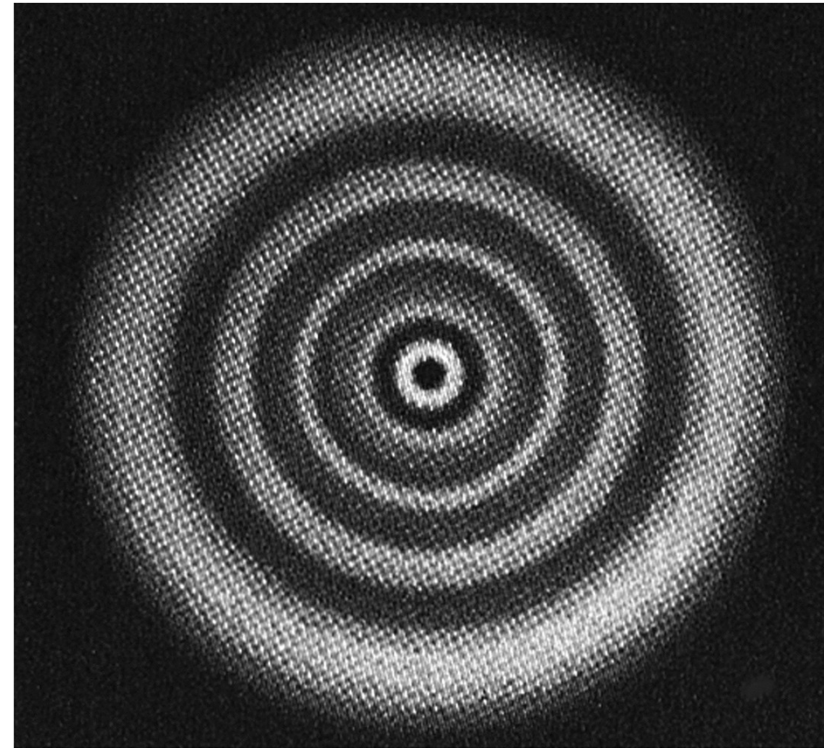
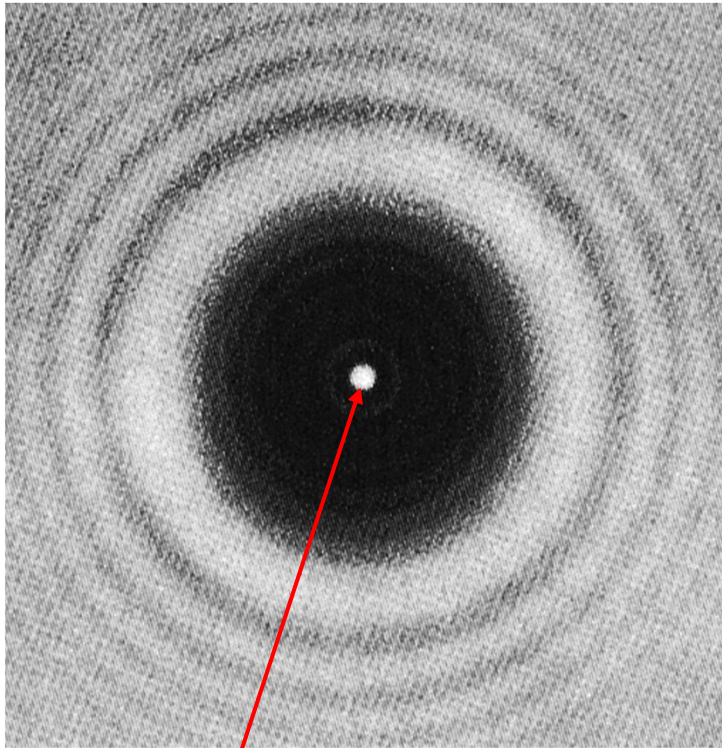
<http://www.rodenburg.org/theory/y1200.html>





Padrões de difracção de Fresnel

Padrões de difracção de Fresnel de um disco opaco e de uma abertura circular

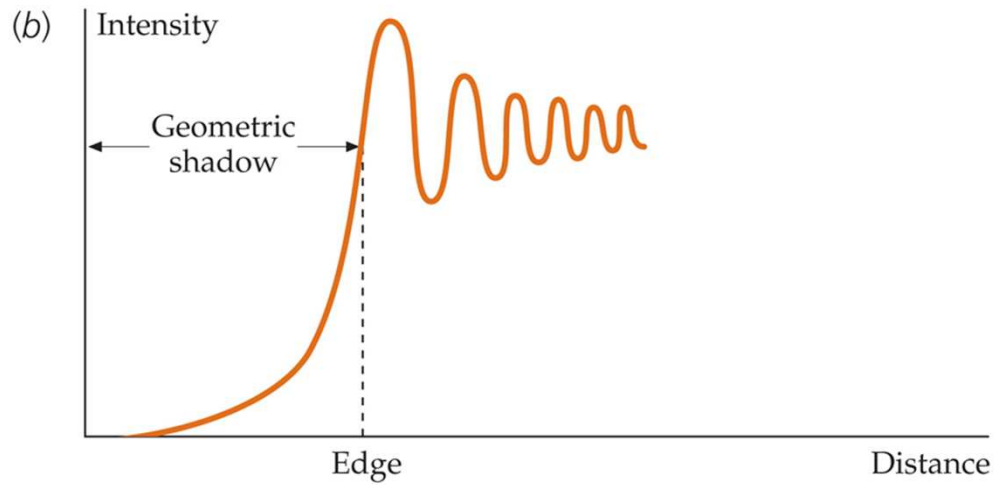
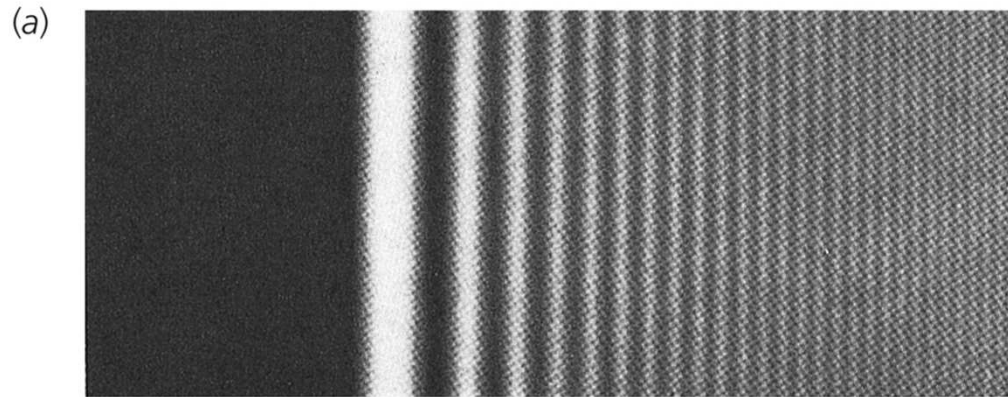


Ponto de Poisson



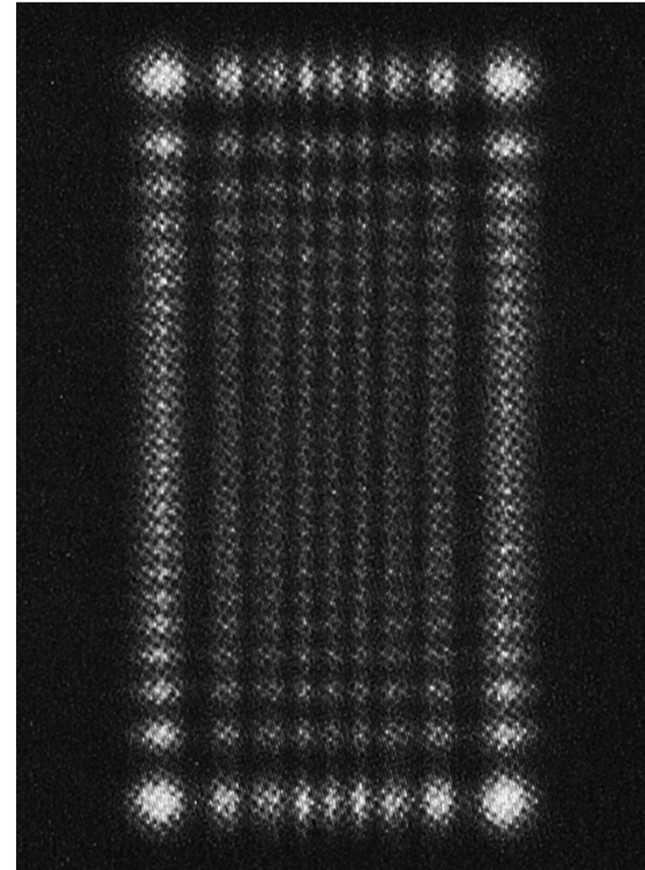
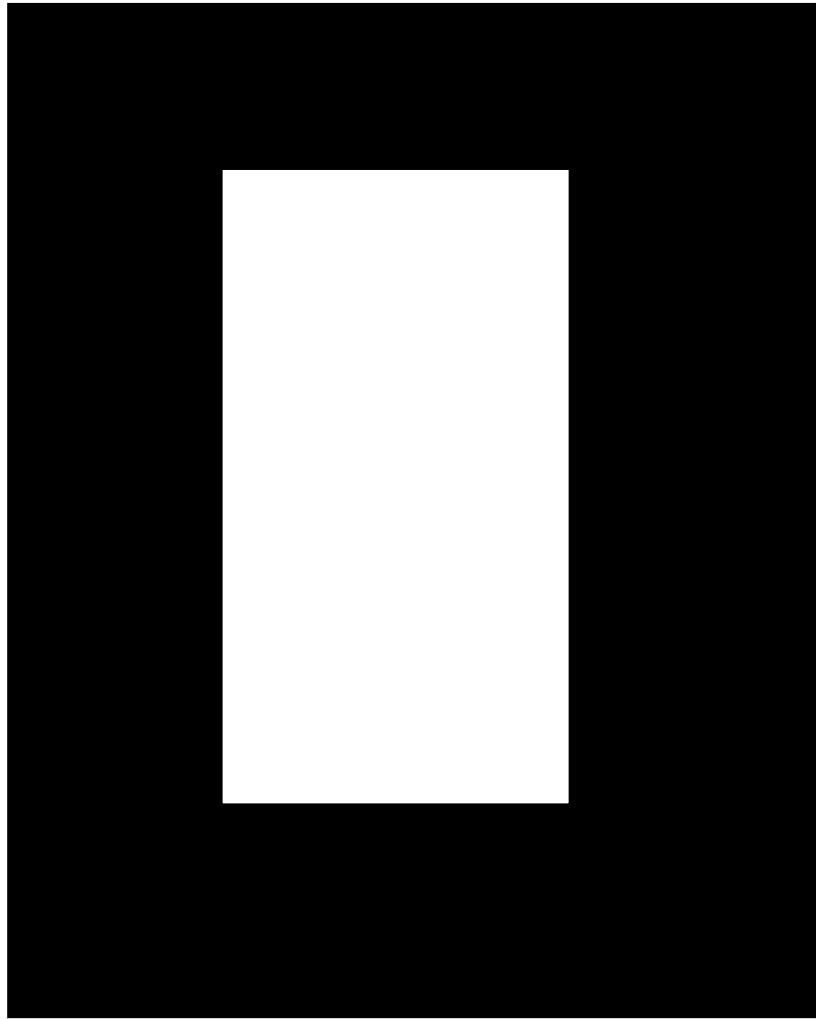


Padrões de difracção de Fresnel de uma interface plana





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

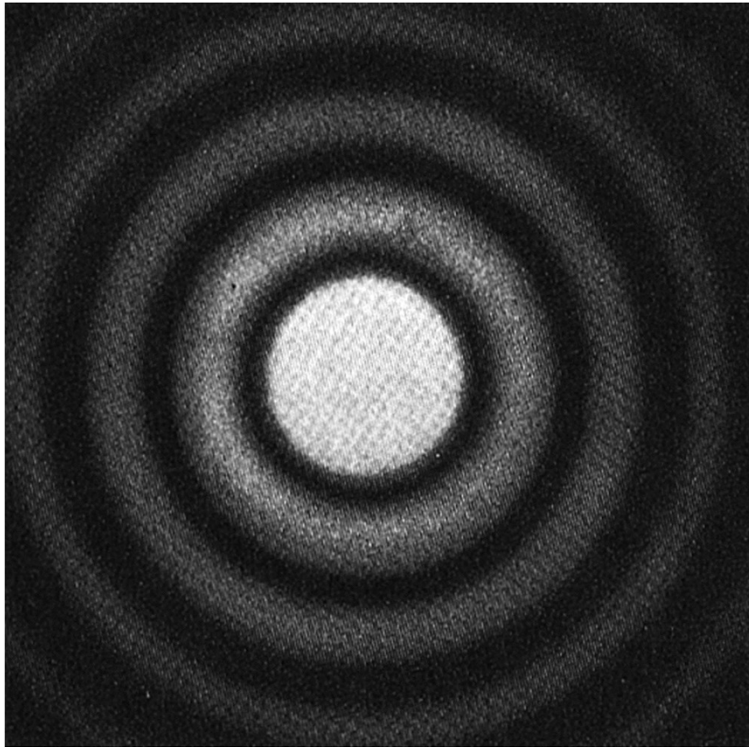
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/raylei.html#c1>



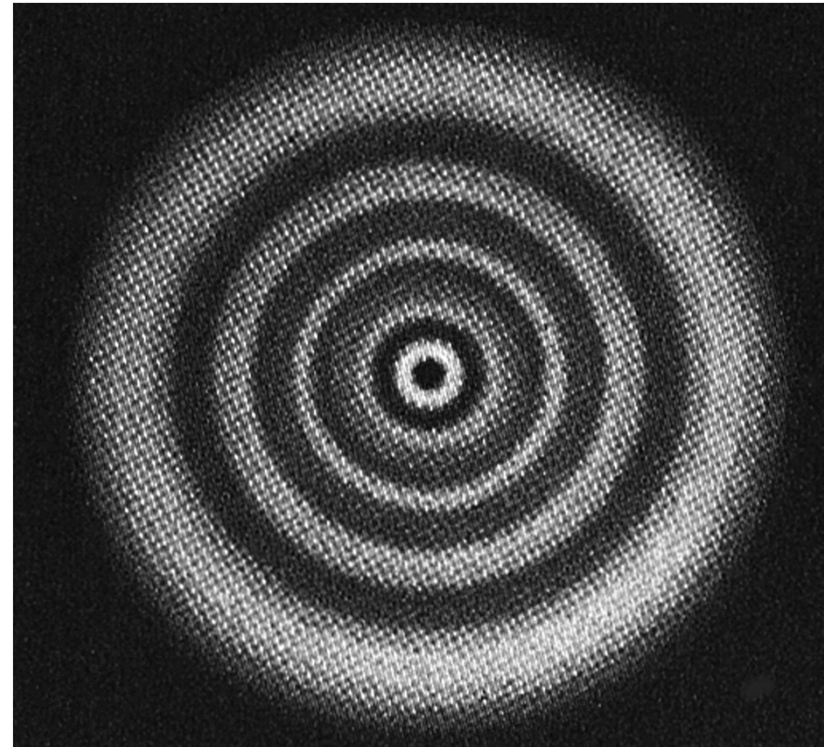


Difracção de Fraunhofer de uma abertura circular

Fraunhofer



Fresnel



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

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

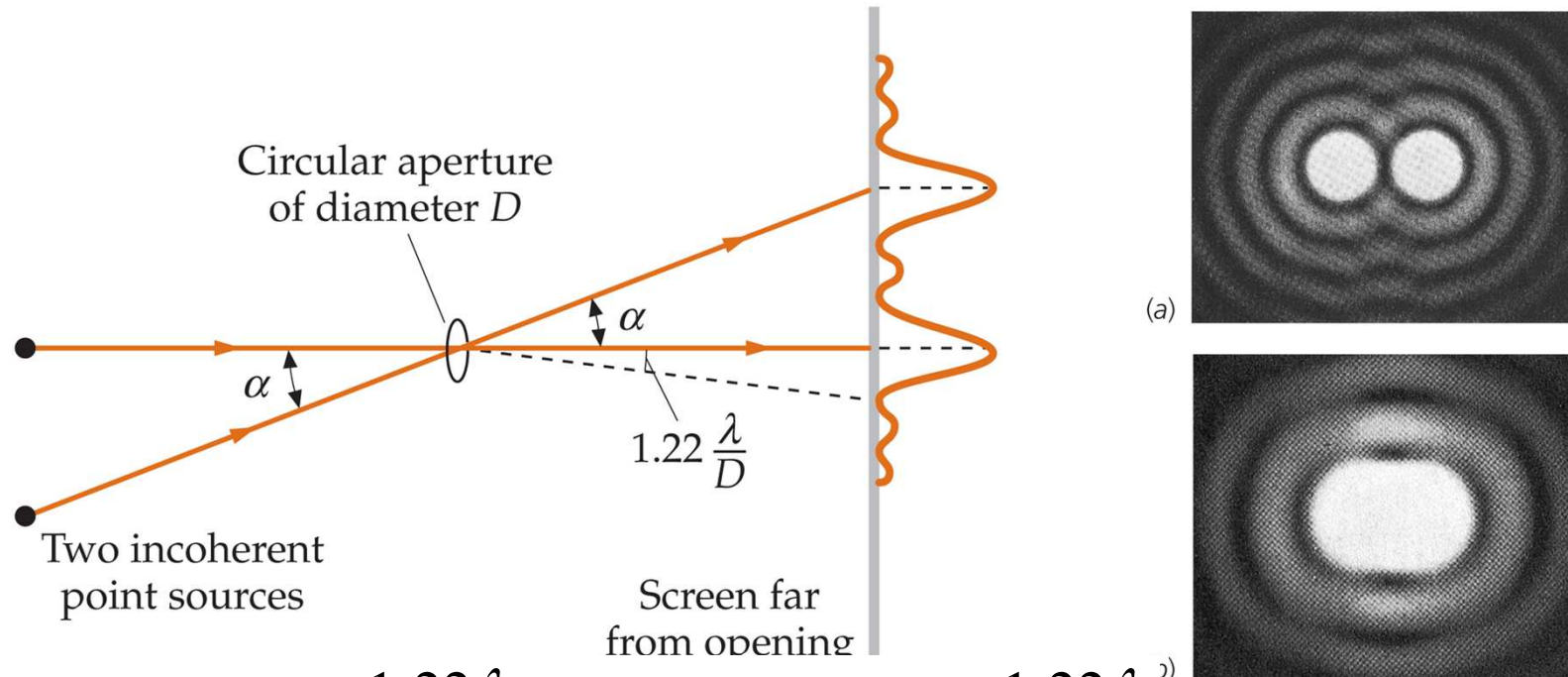
<http://www.rodenburg.org/theory/y1200.html>





Critério de resolução de Rayleigh

Difracção de Fraunhofer de duas fontes incoerentes



$$(a) \quad \alpha \approx \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (b) \quad \alpha = \alpha_{IR} = \frac{1,22\lambda}{D}$$

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

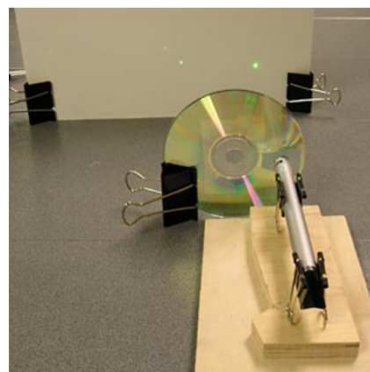
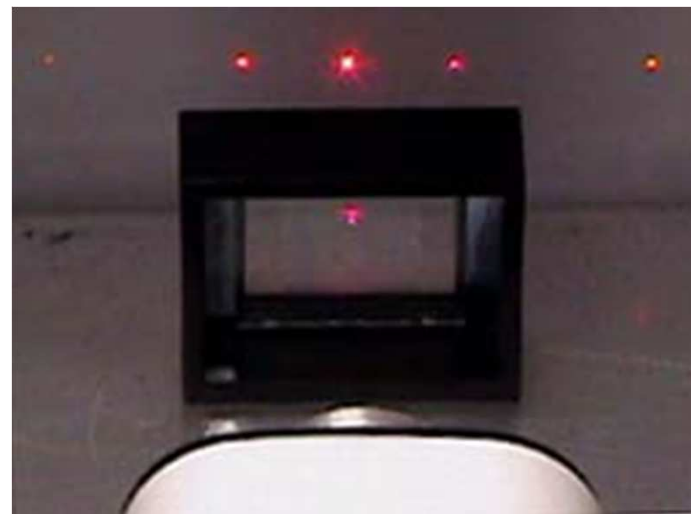
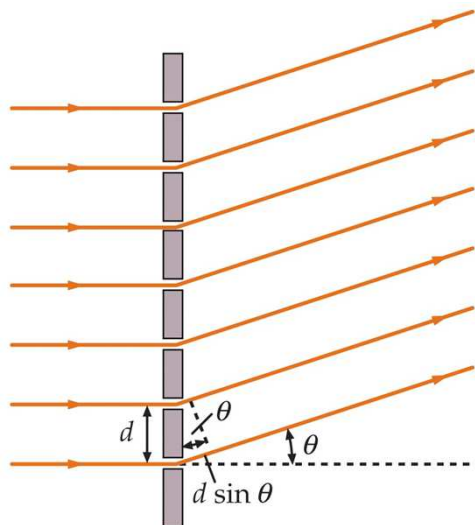
Rede de difracção: qualquer arranjo periódico de objectos difractivos, como um cristal (rede tridimensional), apropriado para a difracção de raios X, ou uma série de riscas paralelas efectuadas por diamante numa superfície de vidro, ou uma reprodução de tais riscas em plástico (rede óptica a uma dimensão).

(Do lat. cient. diffractiōne-, «id.», de diffringâre, «quebrar em pedaços»)





Rede de difracção



http://www.jobinyvon.com/SiteResources/Data/Templates/1custom_breadcumb.asp?DocID=555&v1ID=&lang=1&gclid=COrNlrS4v5MCFQ9pQgodzyF7CQ

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

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

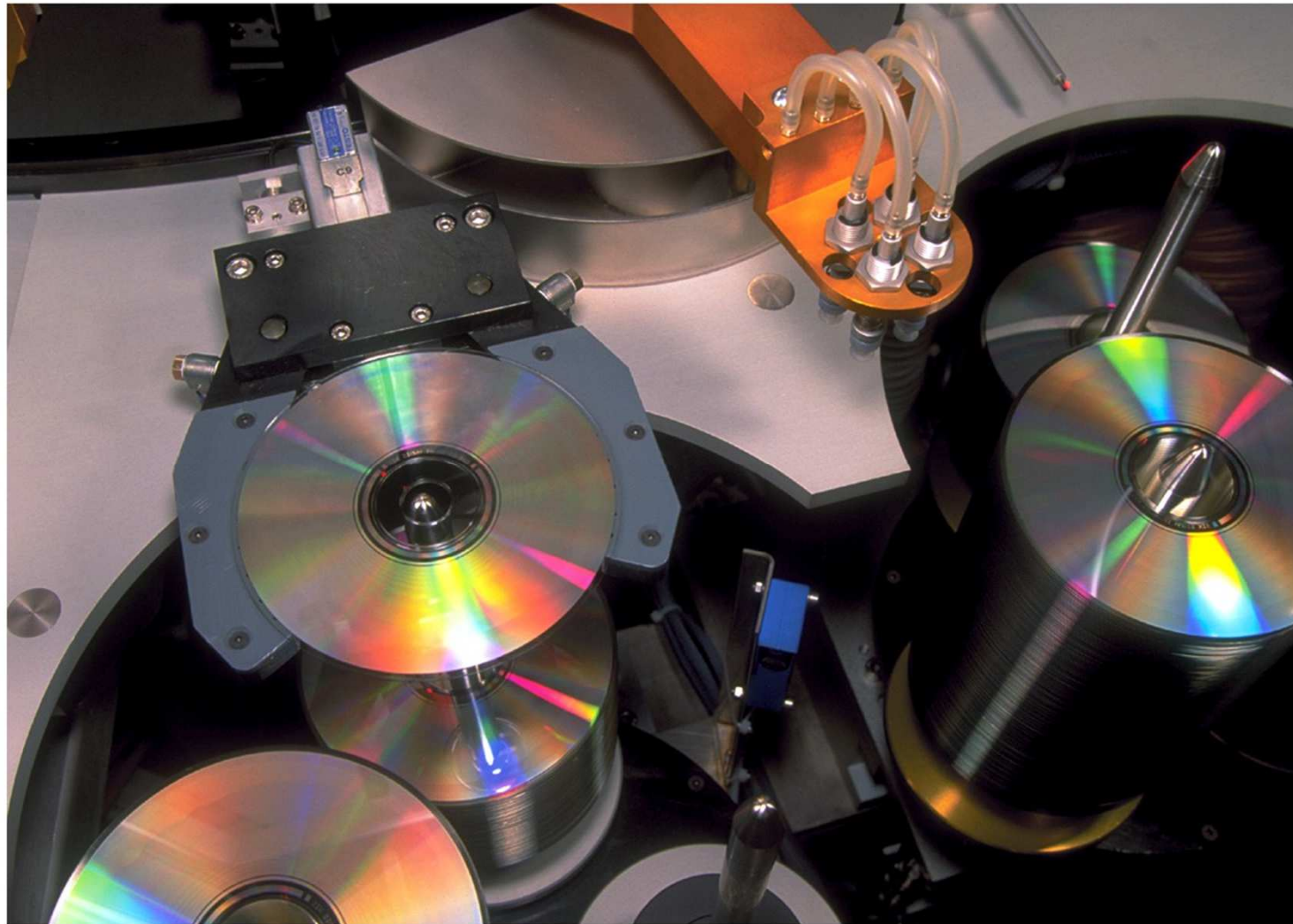
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/gratingcon.html#c1>

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





CDs e DVDs actuam como redes de difracção



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





Espectroscópio





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»)

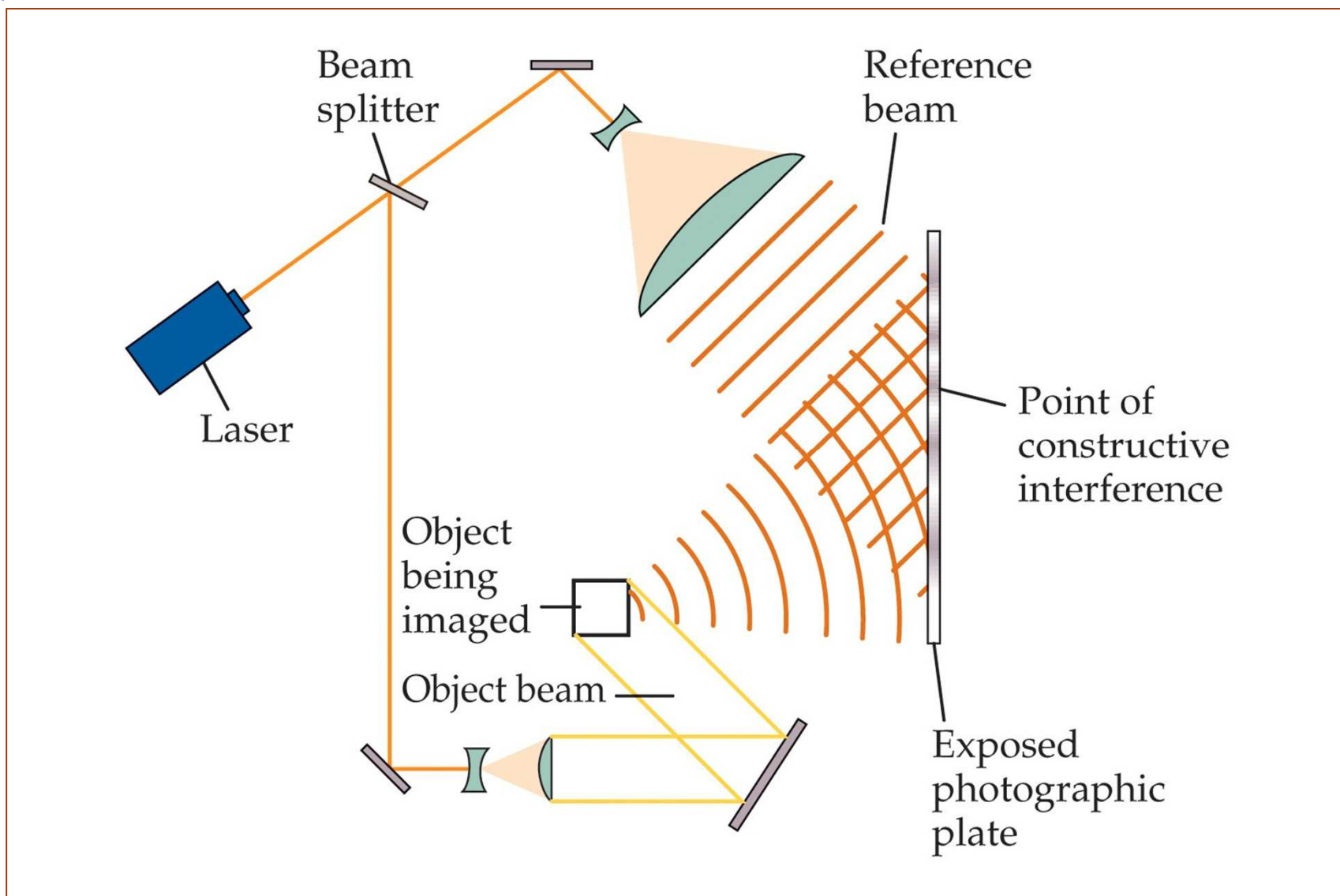
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/optmod/holog.html>

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

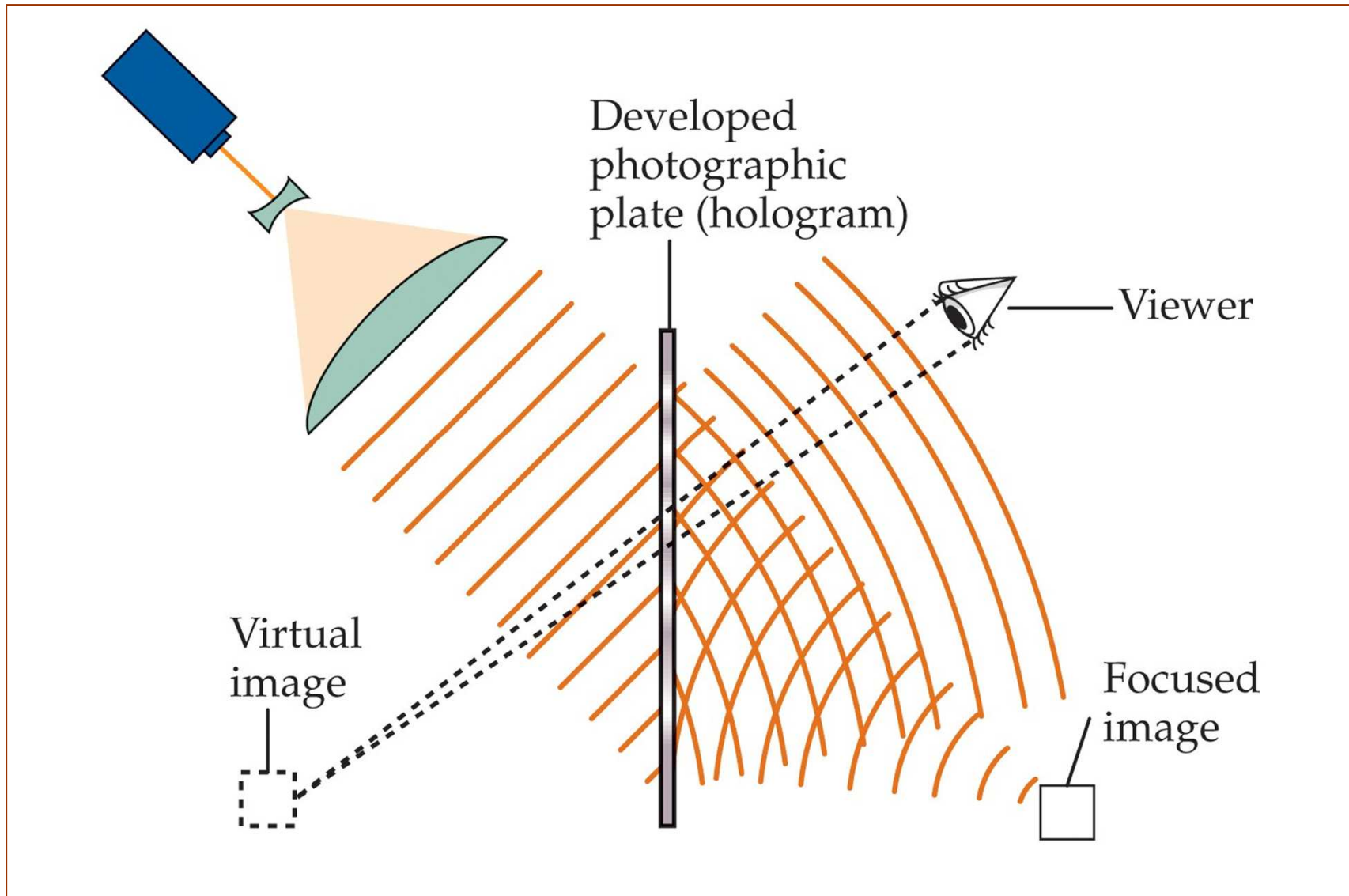
<http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>



Registrar (fazer) um holograma



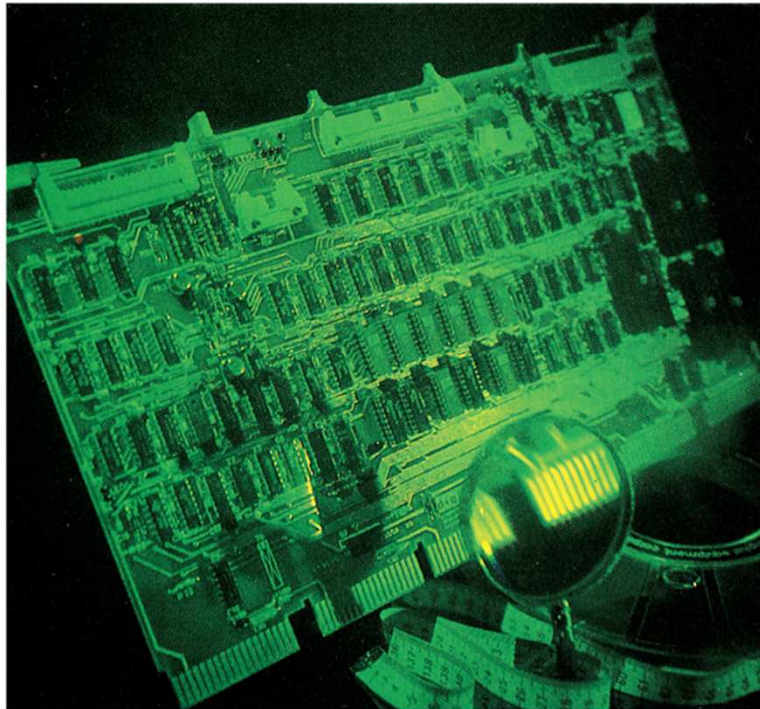
Observar (ler) um holograma



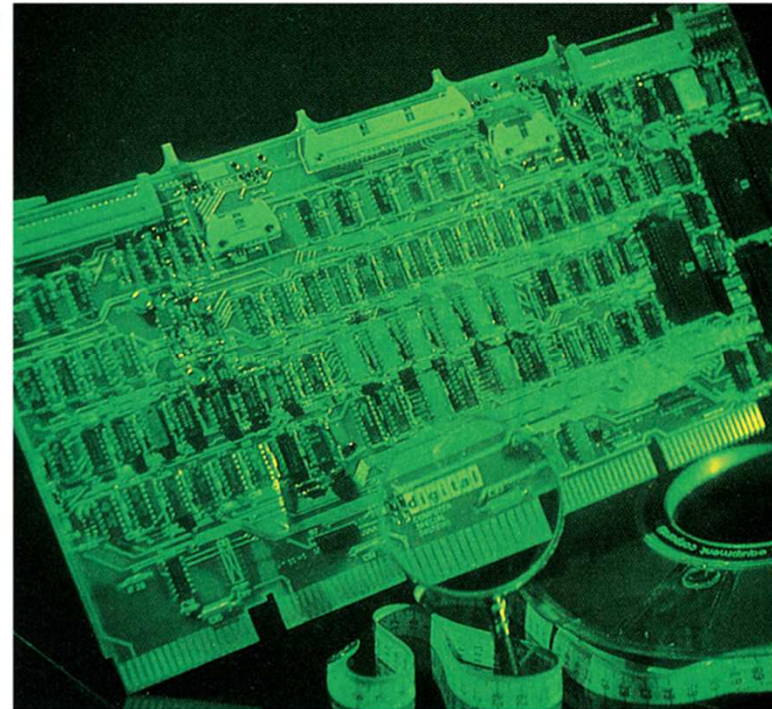


Holograma visto de dois ângulos diferentes

(a)



(b)



<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

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.[...]*

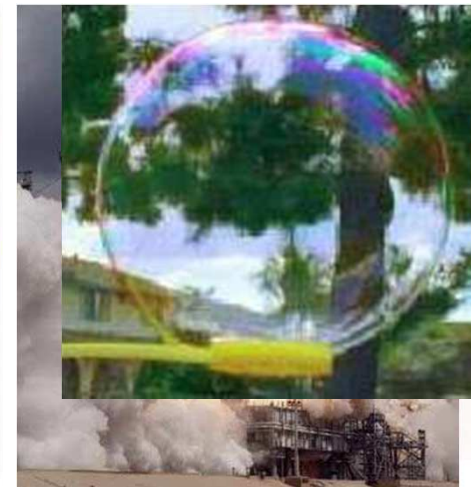
<http://socialissimo.blogspot.com/2008/05/o-telectroscopio.html>

Bom trabalho e boa sorte para o exame
José Figueiredo





Diferentes manifestações da radiação EM





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.

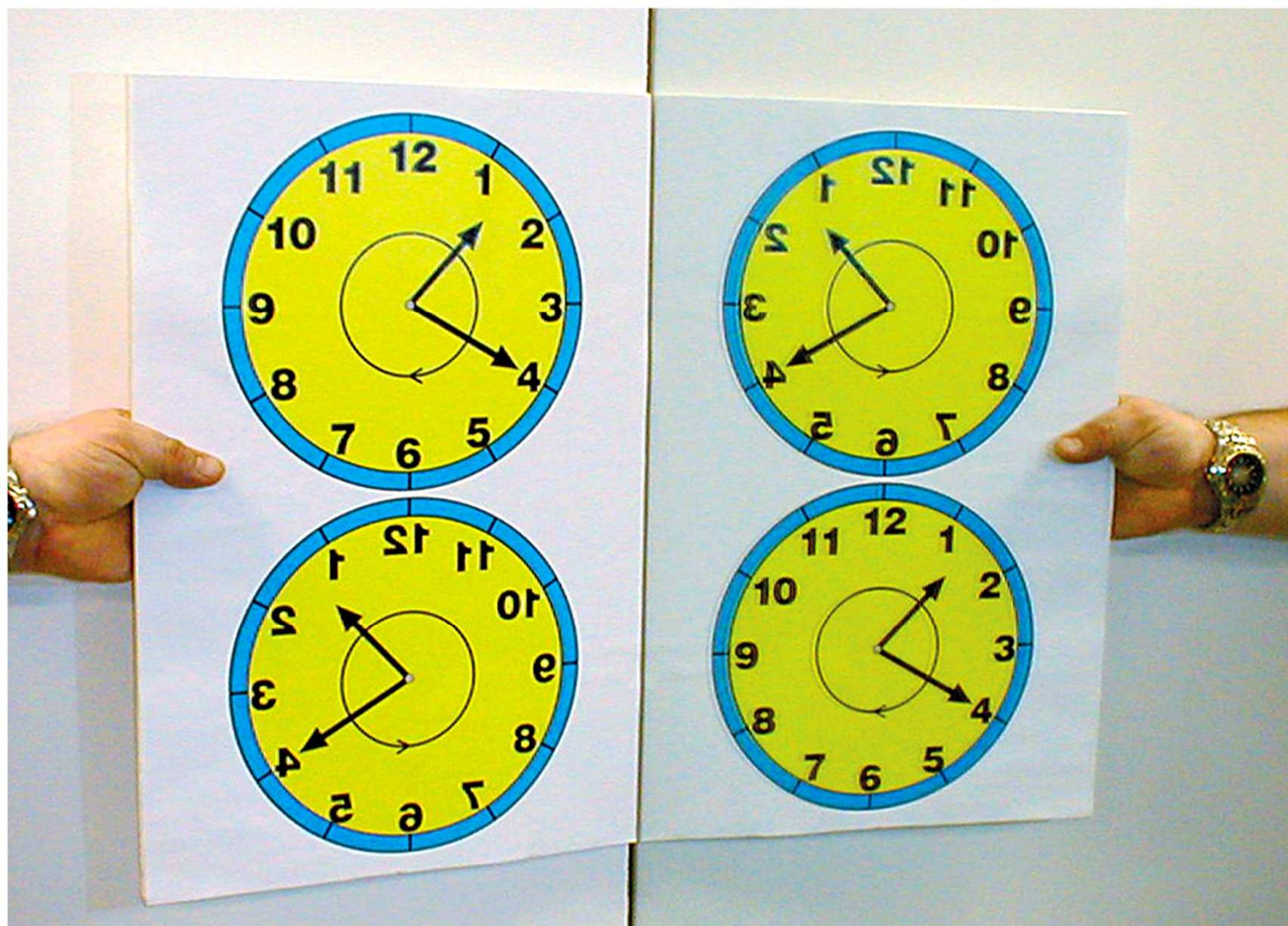
Espelho [e]: superfície altamente polida para produzir reflexão regular dos raios luminosos e das imagens dos objectos; lâmina de vidro ou cristal, prateada, geralmente na parte posterior, utilizada como reflector da luz ou para observação de imagens; (Do lat. specûlu-, «id.»)

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





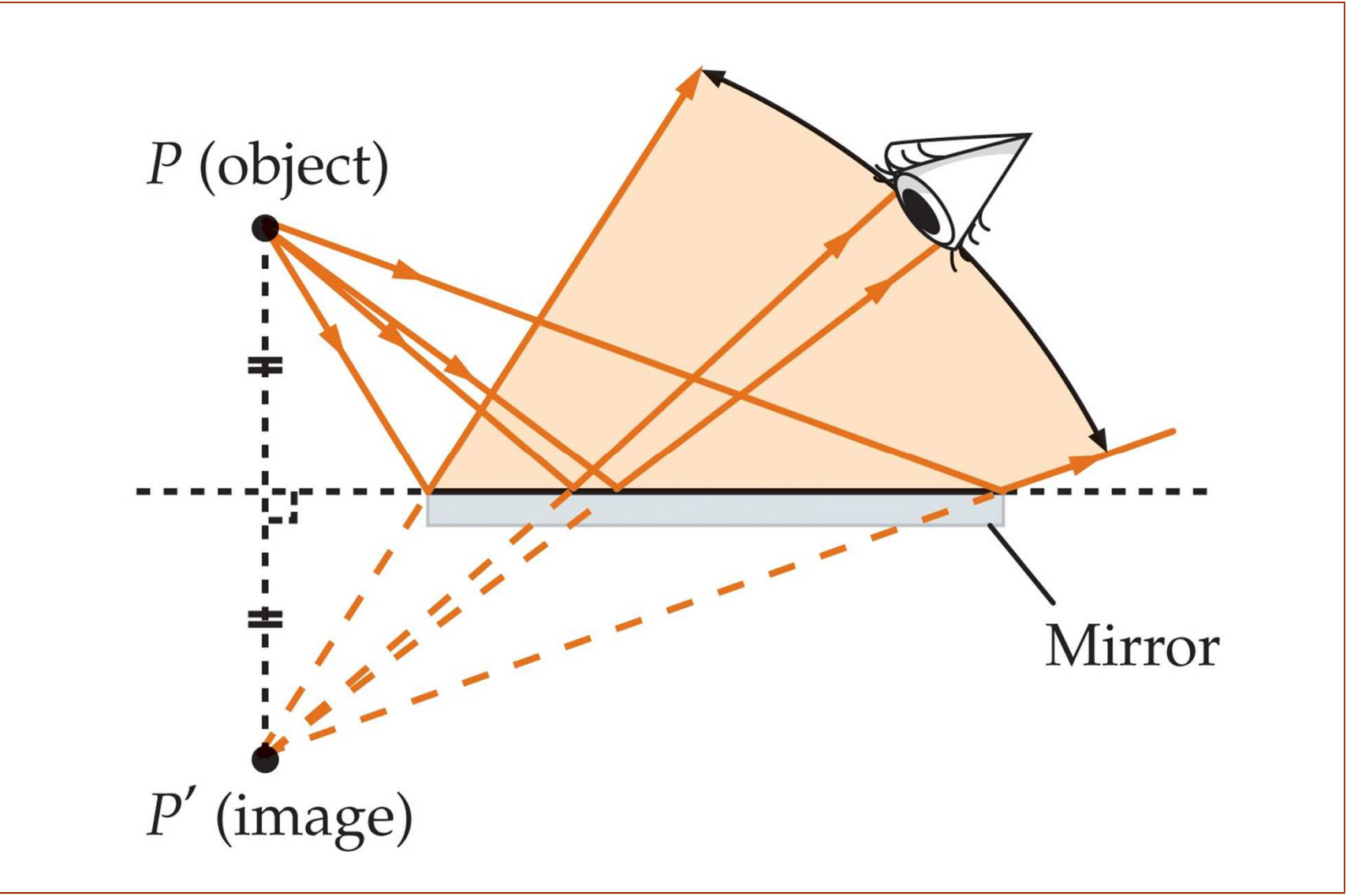
Espelhos planos

•
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

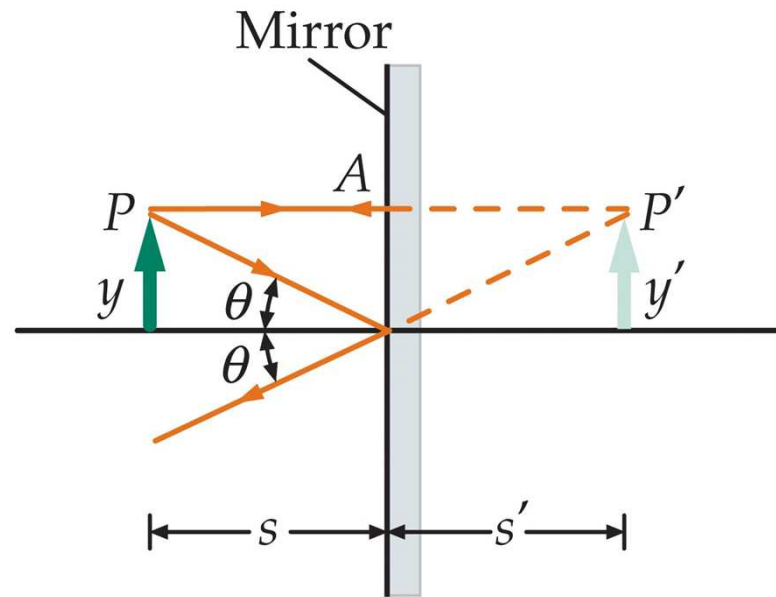
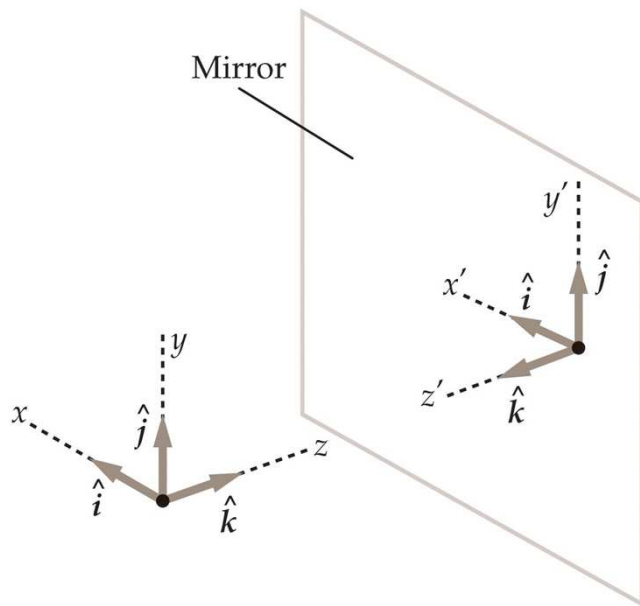
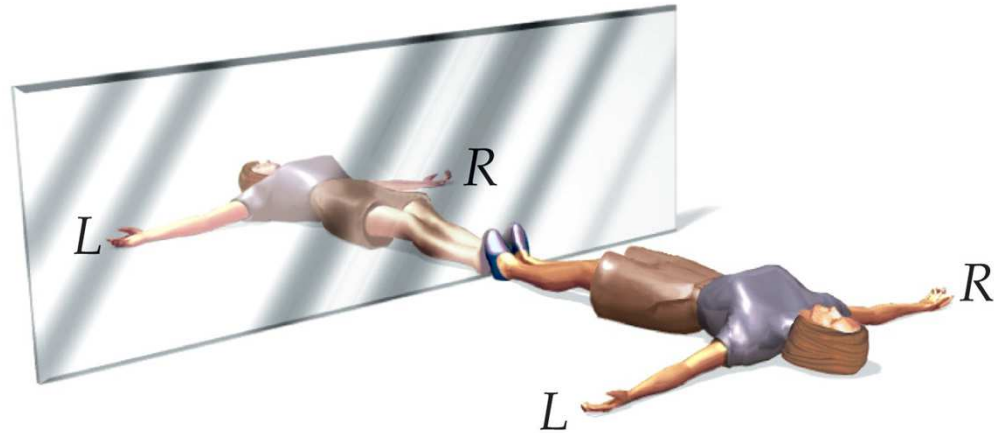




Diagrama de raios num espelho plano

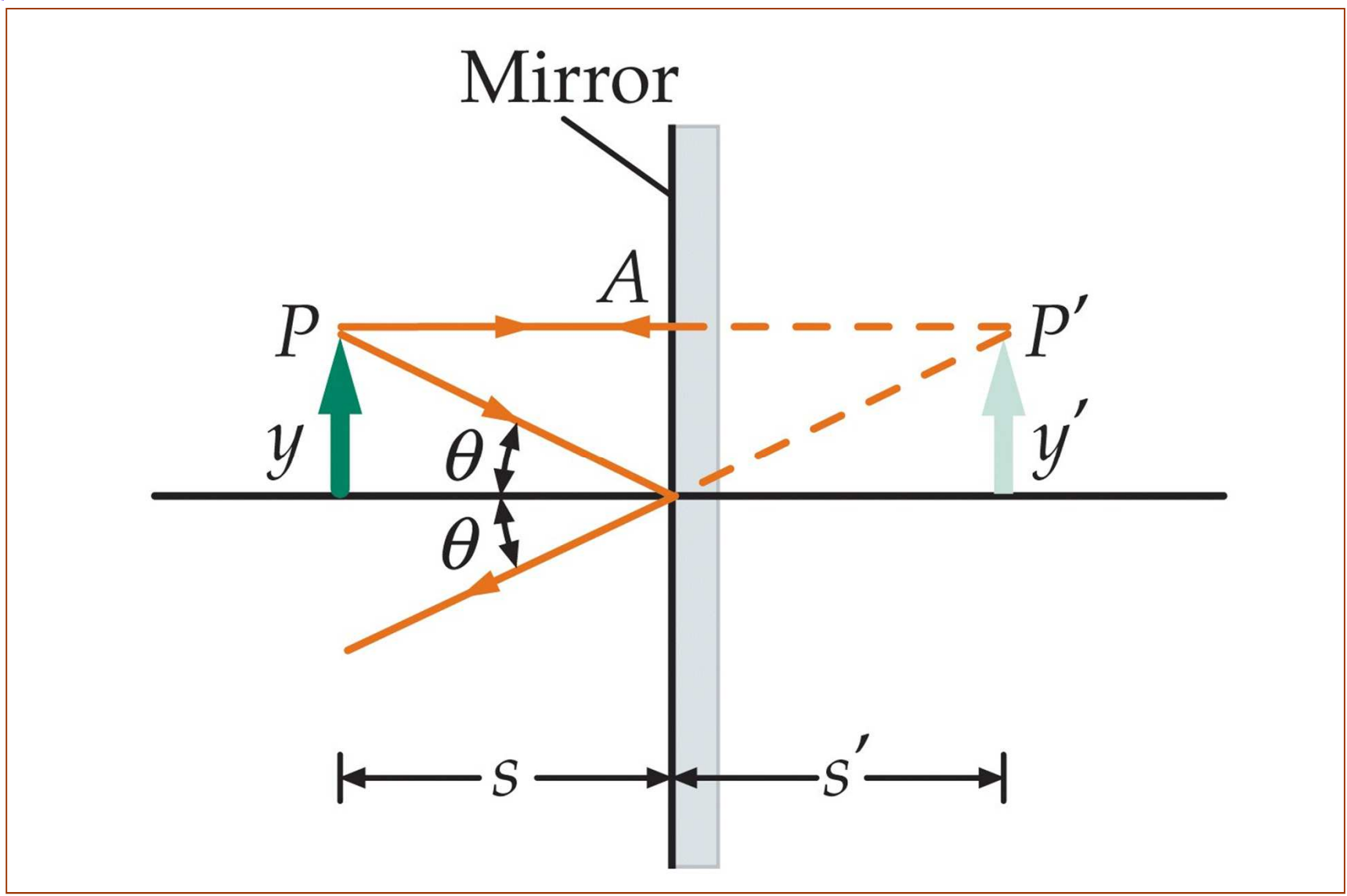




Imagem formada por dois espelhos planos

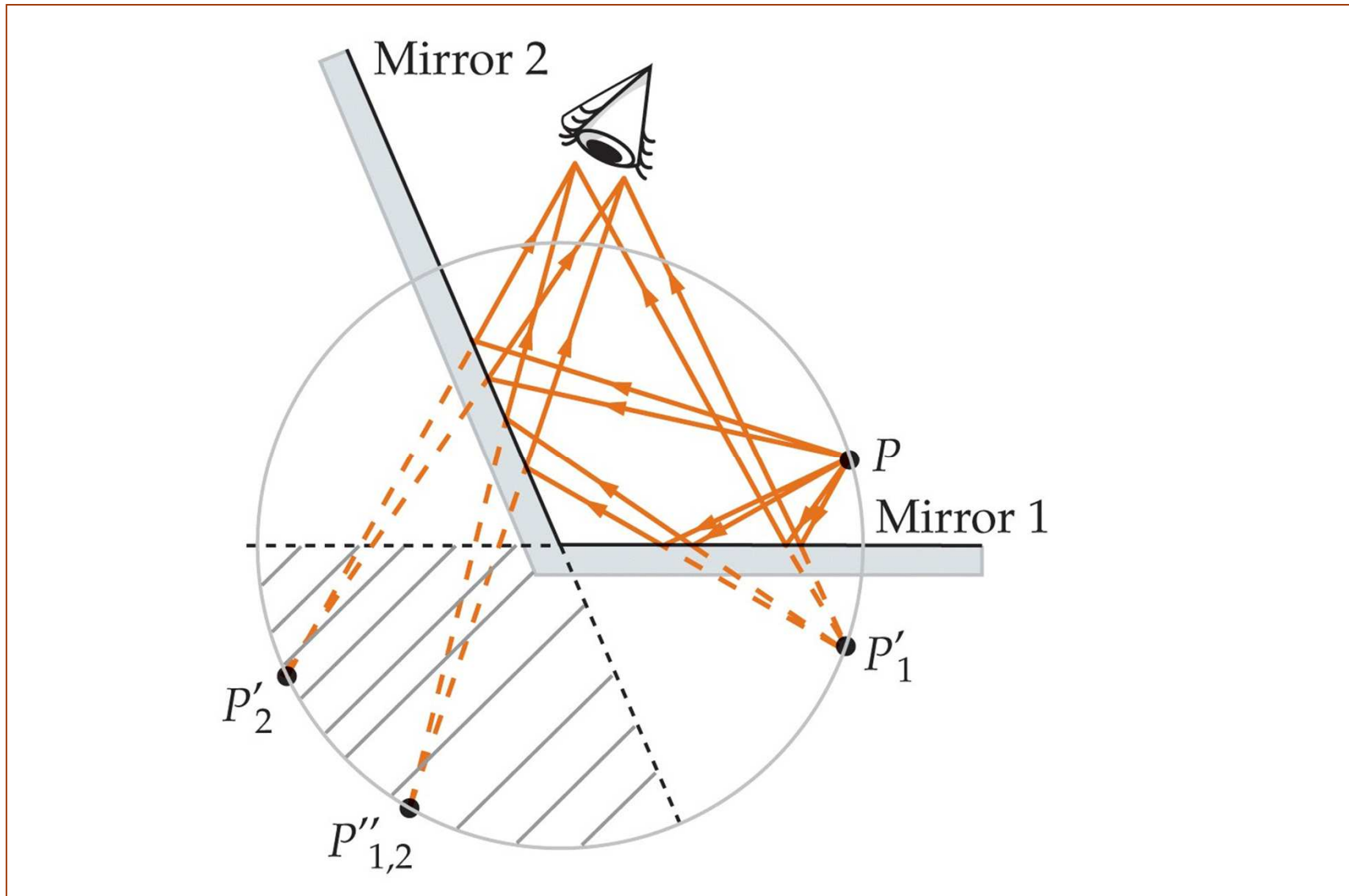
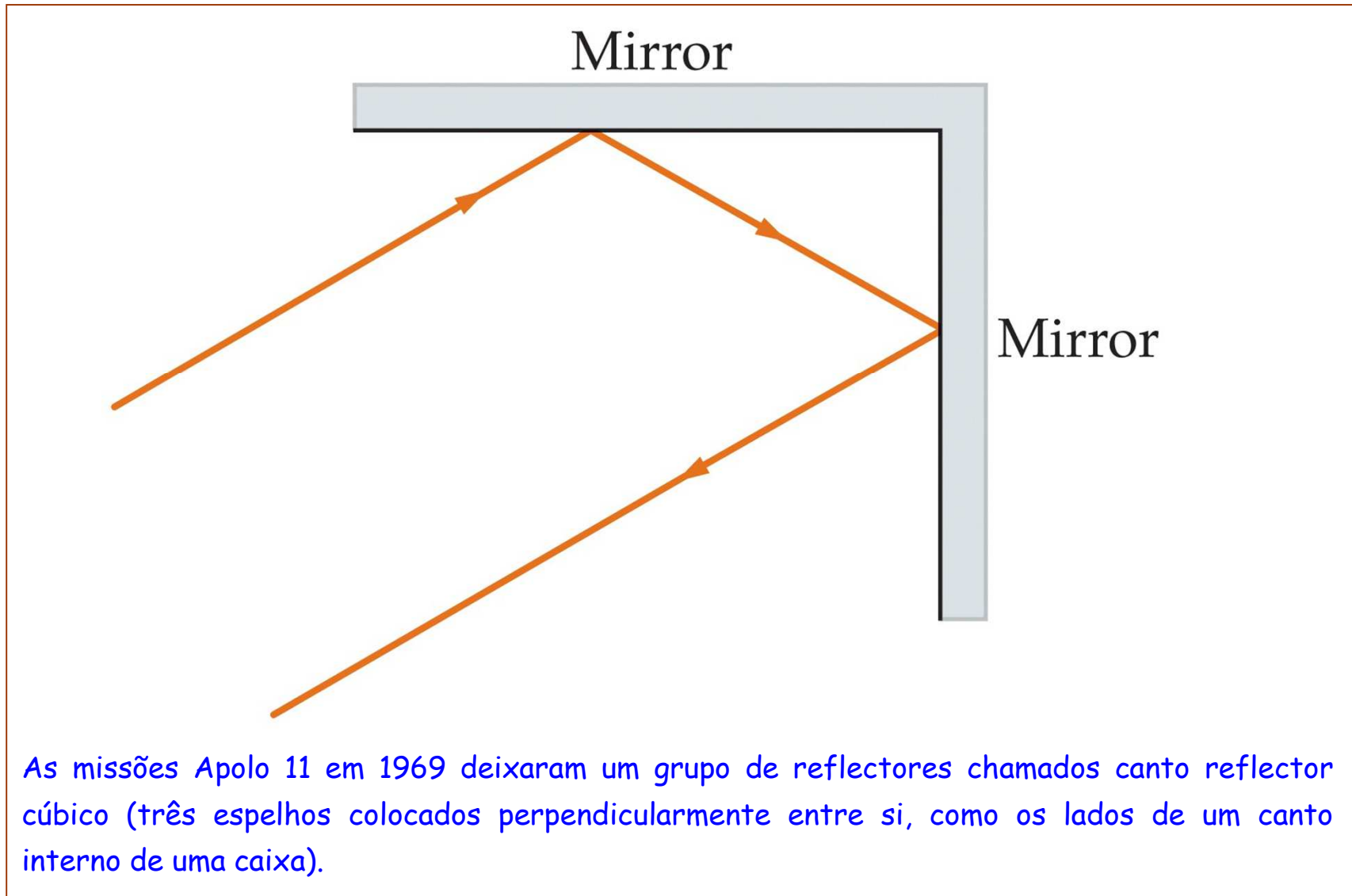




Imagem formada por dois espelhos planos





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

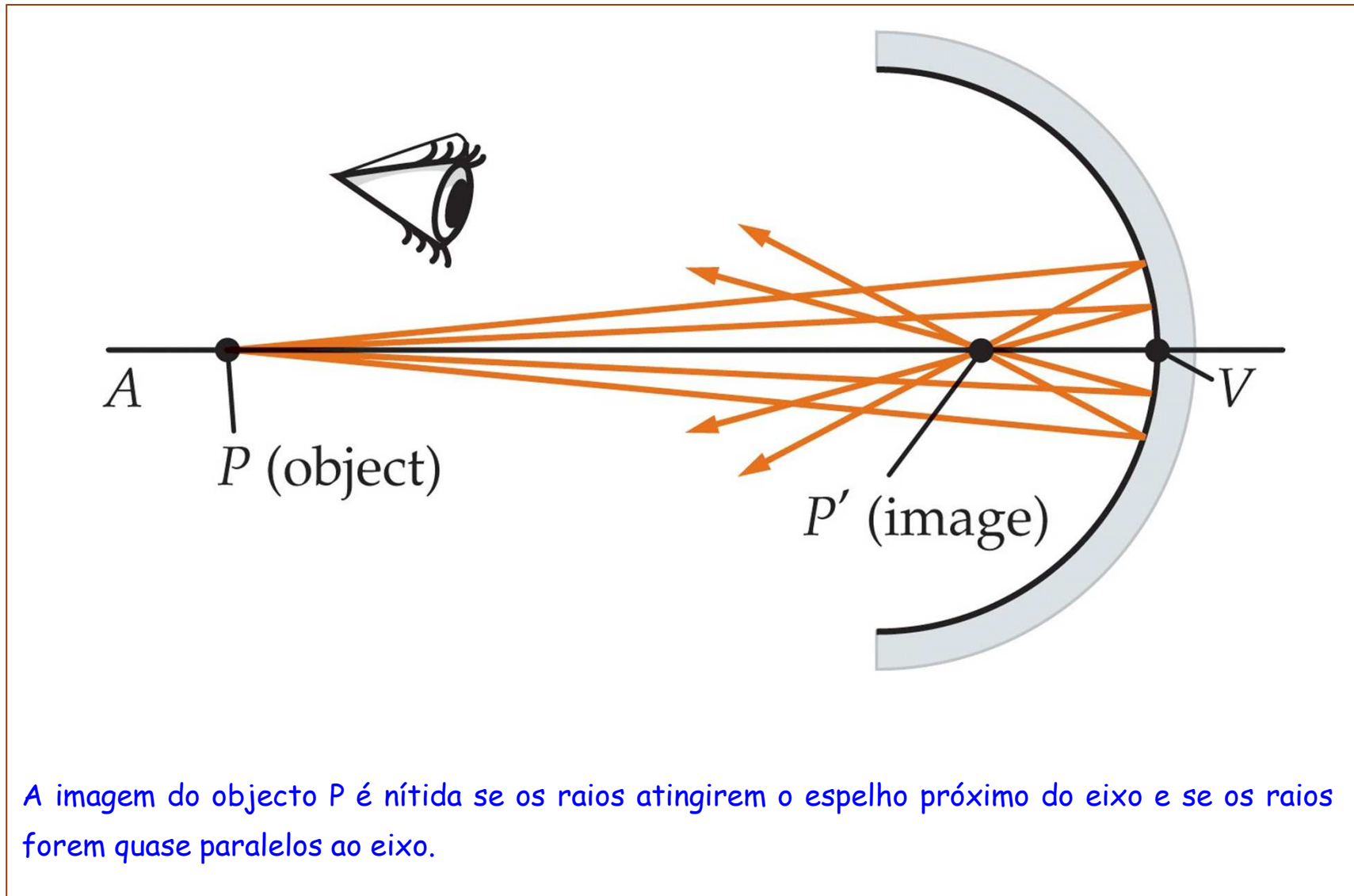
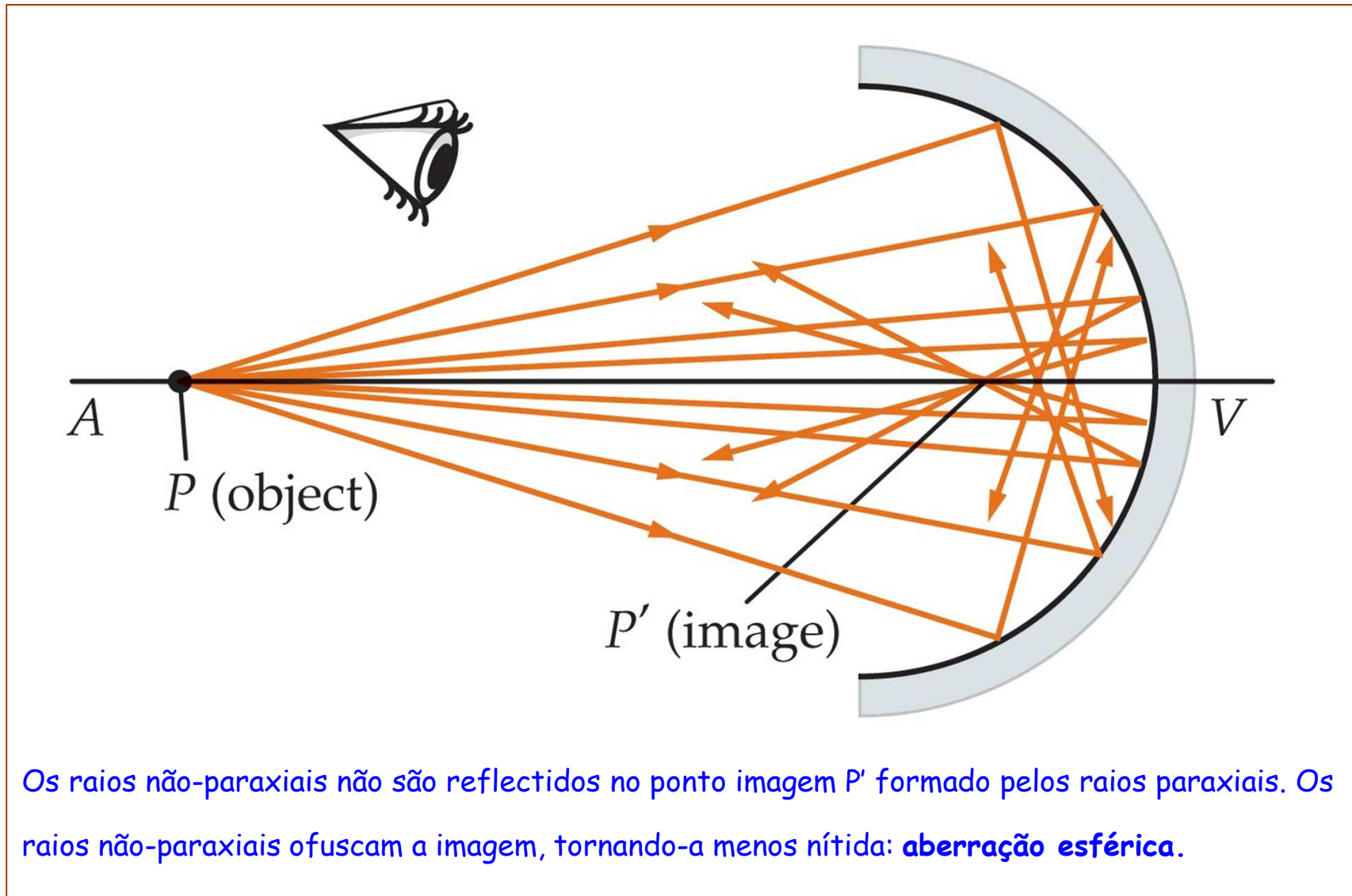


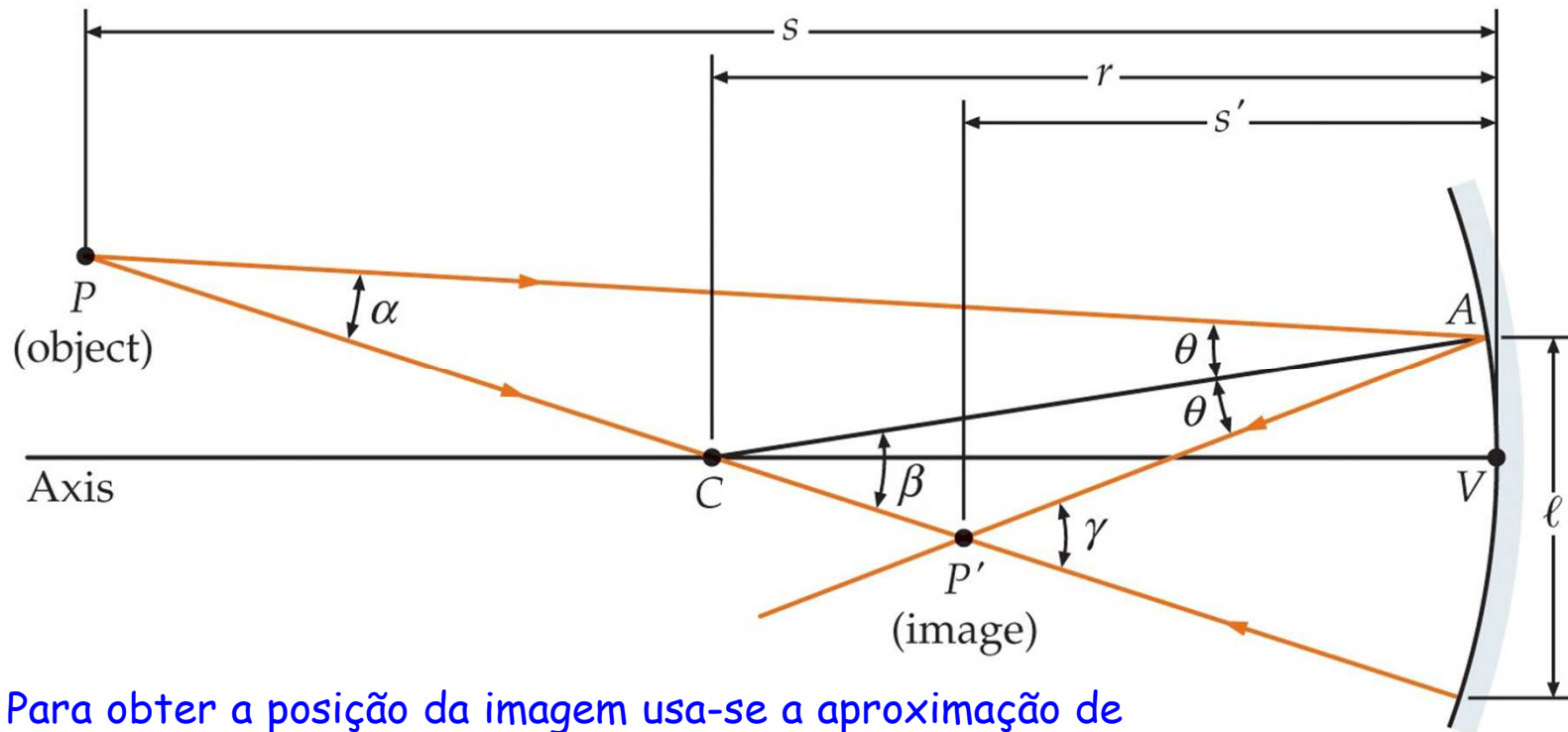


Imagem formada por espelhos esférico côncavo (2)





Posição da imagem relativamente ao espelho



Para obter a posição da imagem usa-se a aproximação de pequenos ângulos: $\alpha \sim \ell/s$; $\beta \sim \ell/r$; $\gamma \sim \ell/s'$:

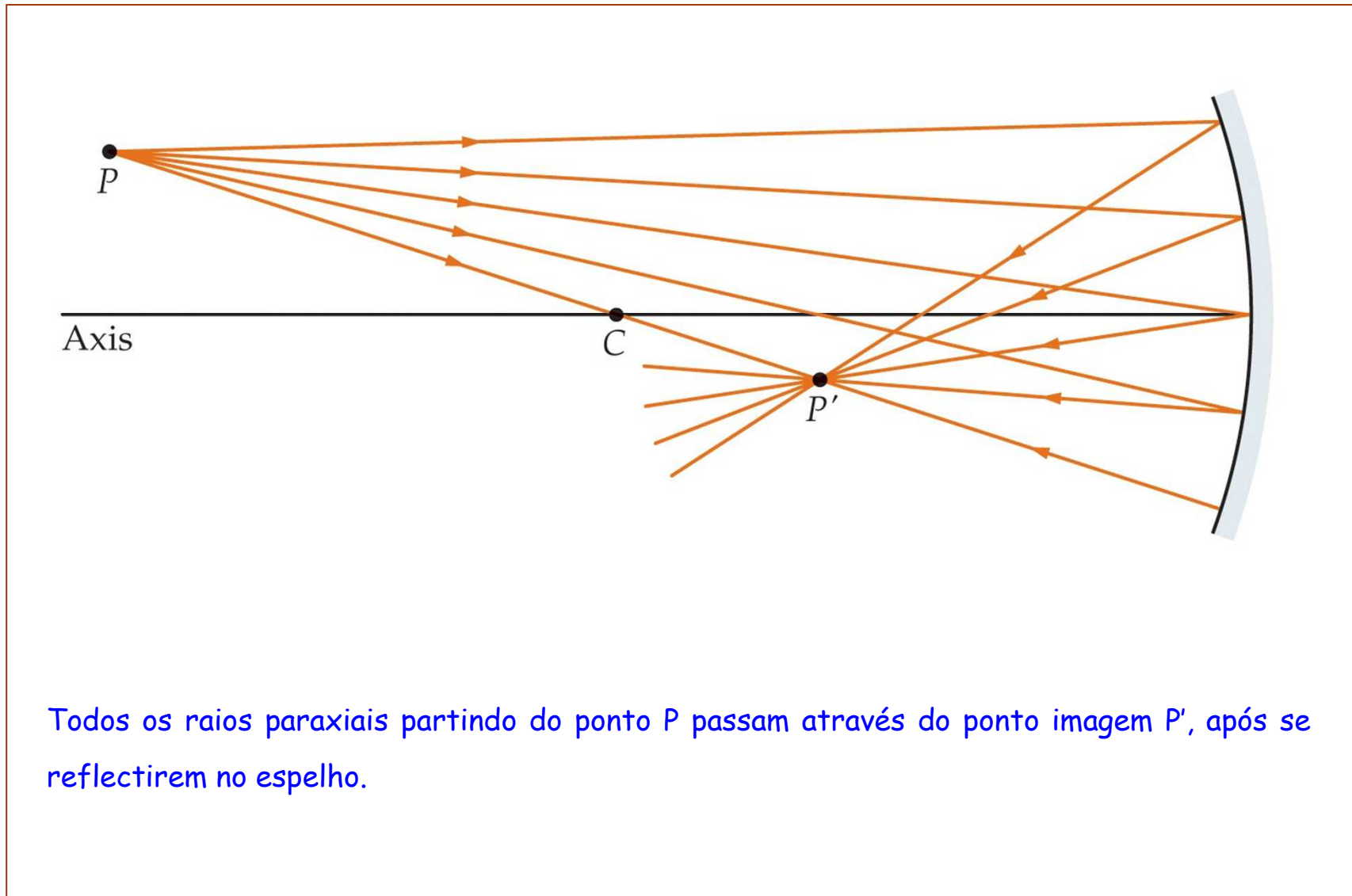
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}$$

Todos os raios paraxiais partindo do ponto P passam através do ponto imagem P' , após se reflectirem no espelho.



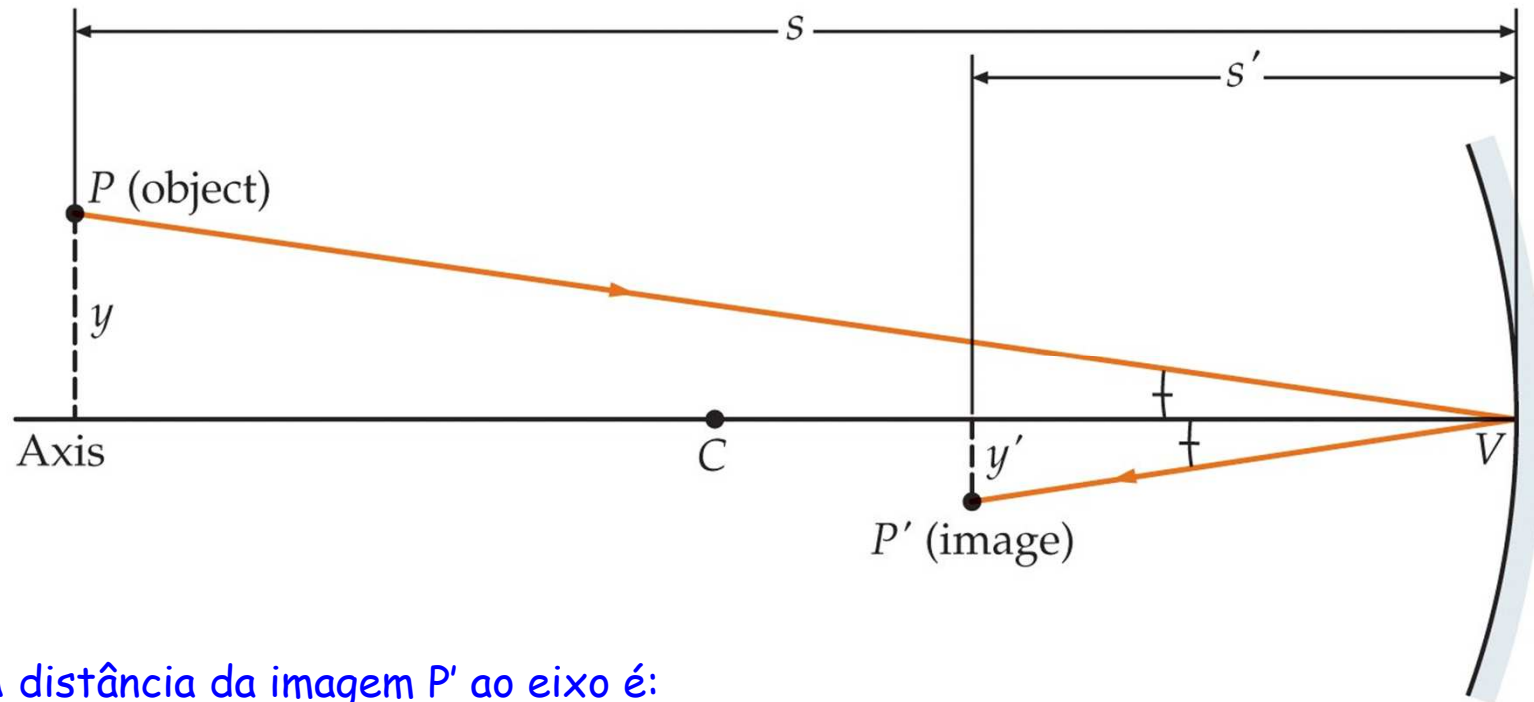


Posição da imagem relativamente ao espelho (2)





Posição da imagem relativamente ao eixo



A distância da imagem P' ao eixo é:

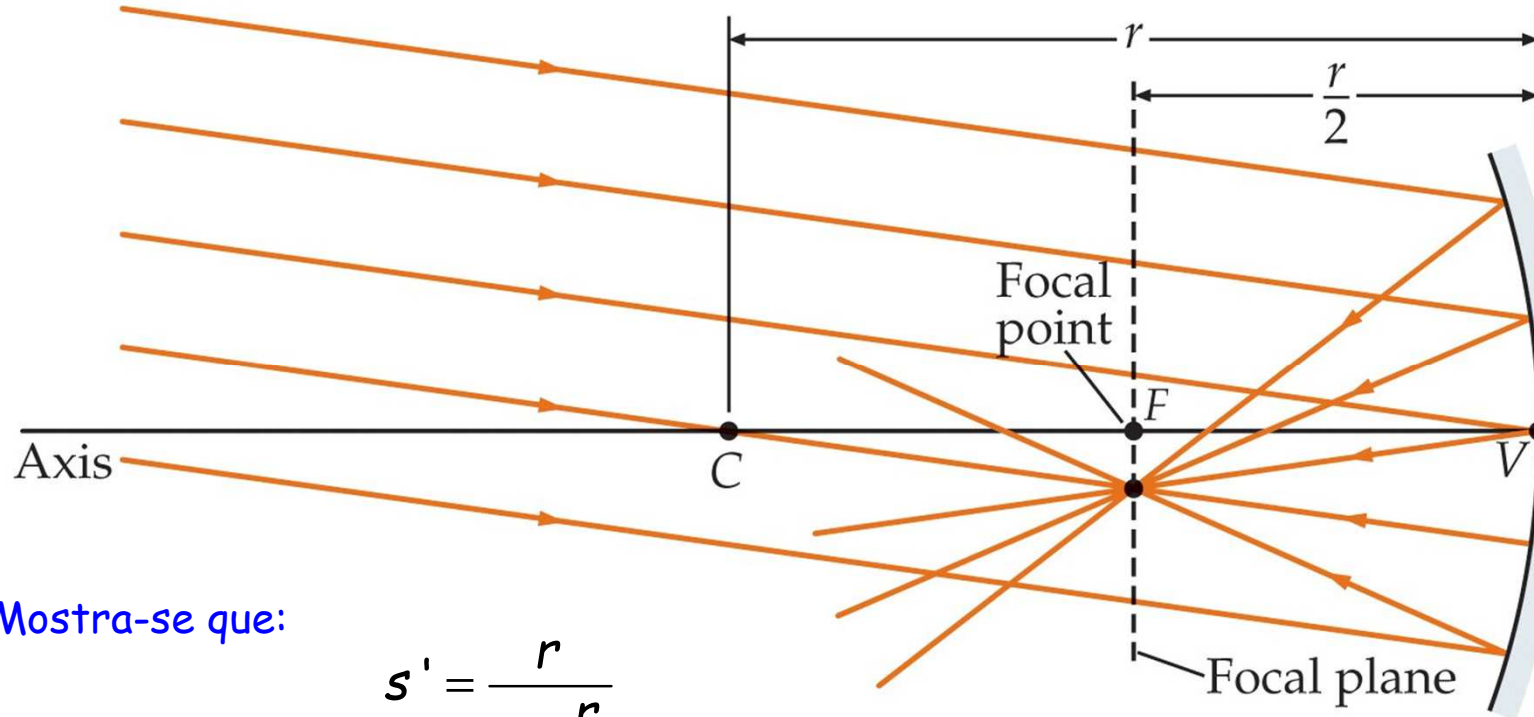
$$\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} = -\frac{r/2}{s - r/2}$$

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:

$$s' = \frac{r}{2 - \frac{r}{s}}$$

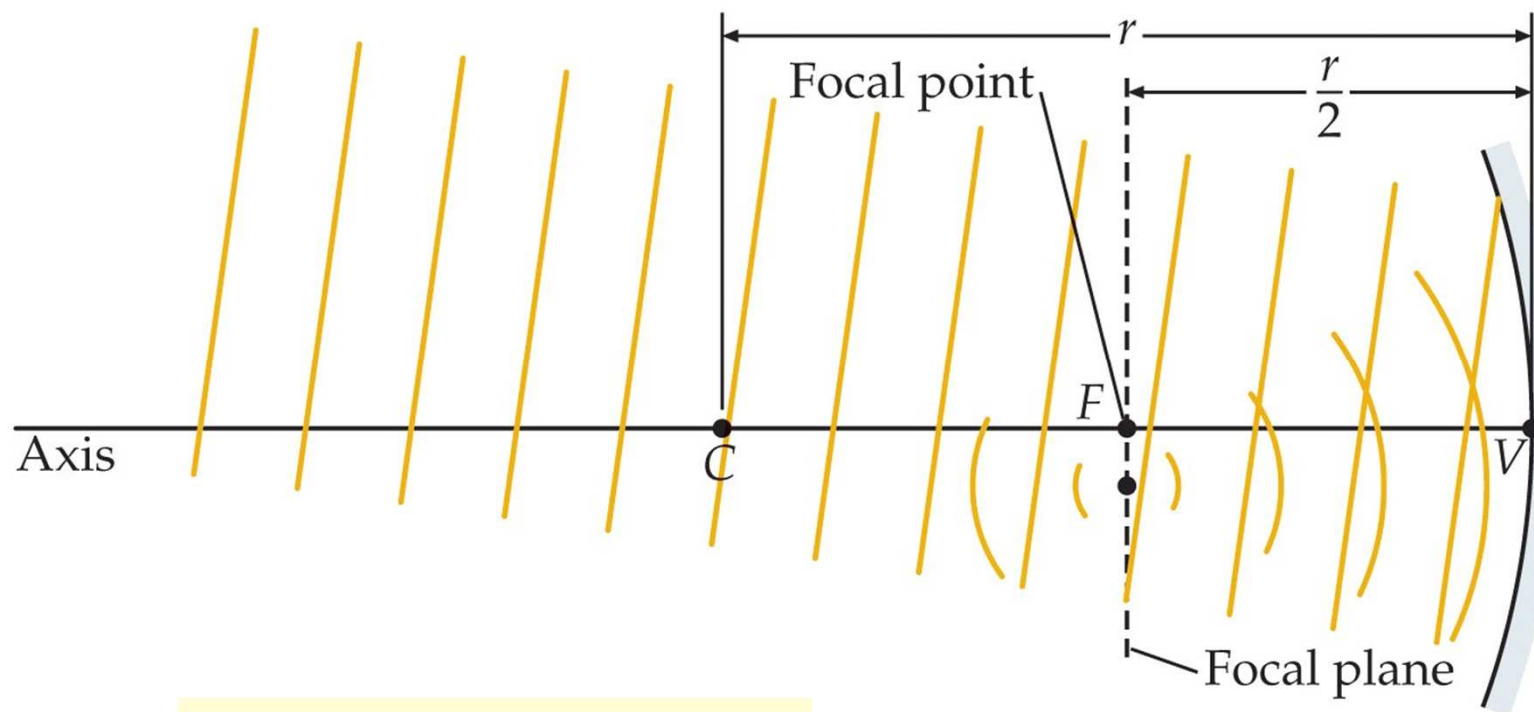
Quando $s \rightarrow \infty$: $s' \rightarrow \frac{1}{2}r \equiv f$

$$f = \frac{1}{2}r$$





Equação dos espelhos

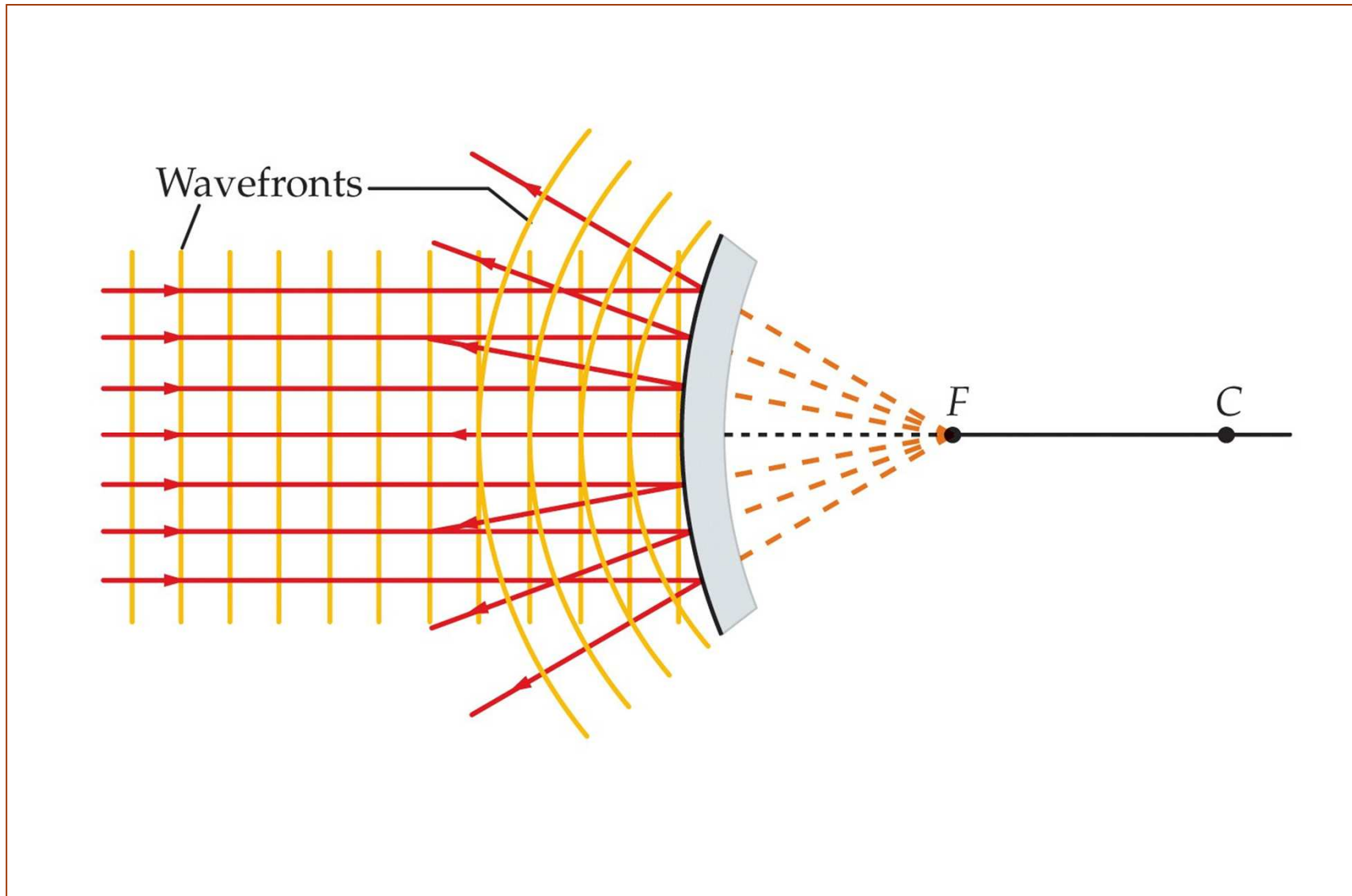


$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$



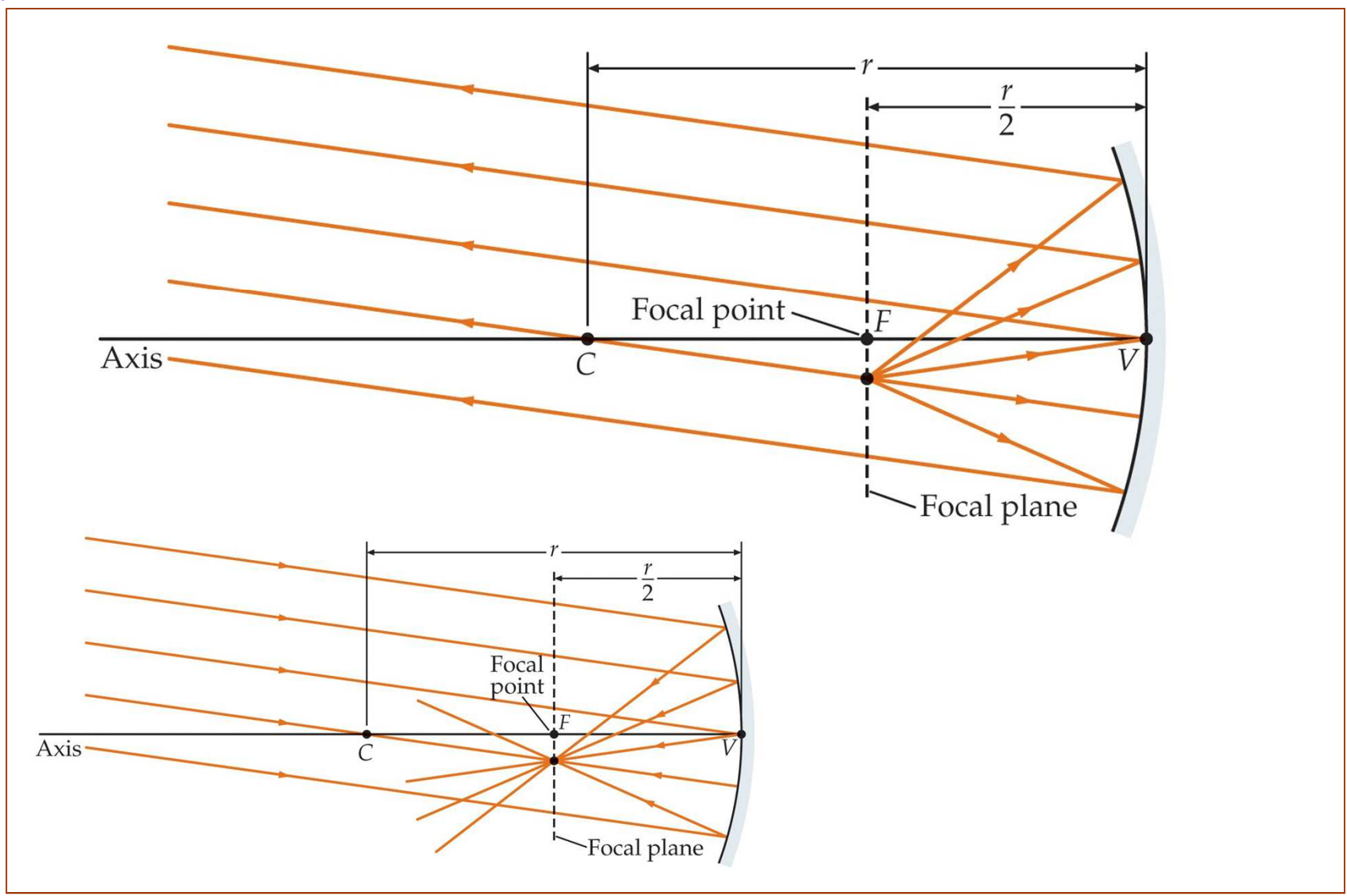


Reflexão de ondas planas num espelho convexo



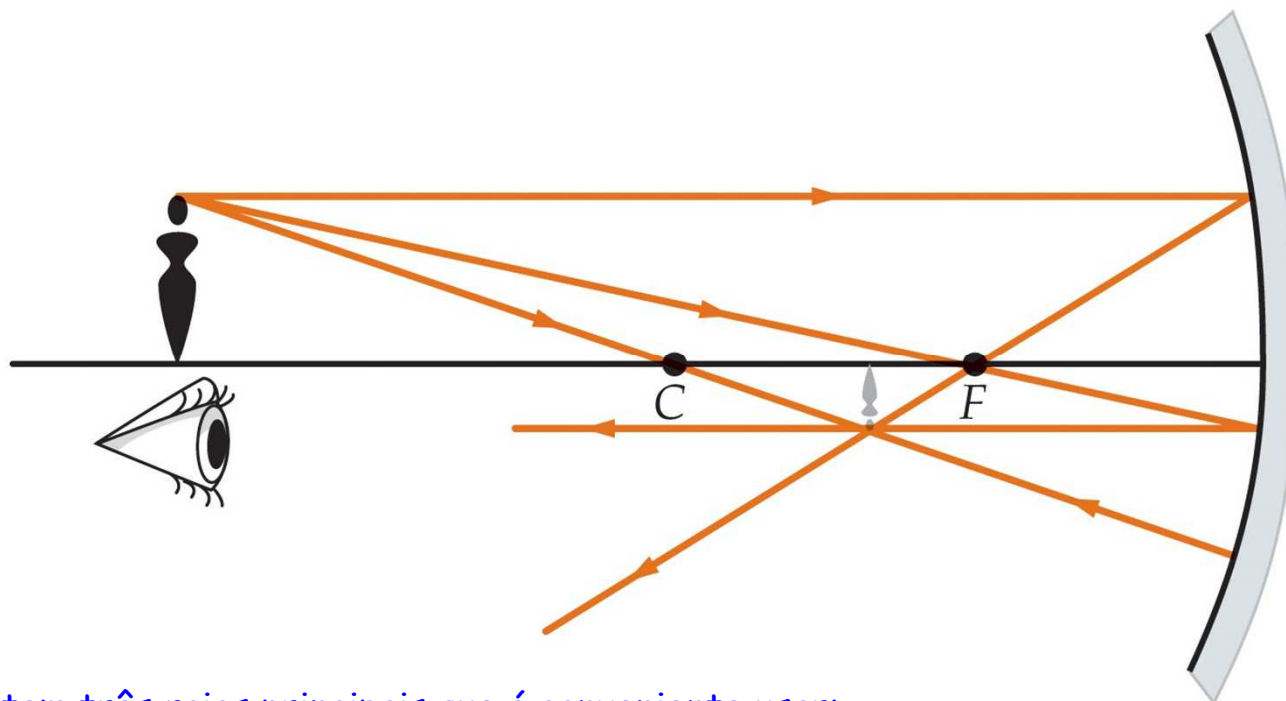


Reversibilidade dos raios





Diagramas de raios para espelhos

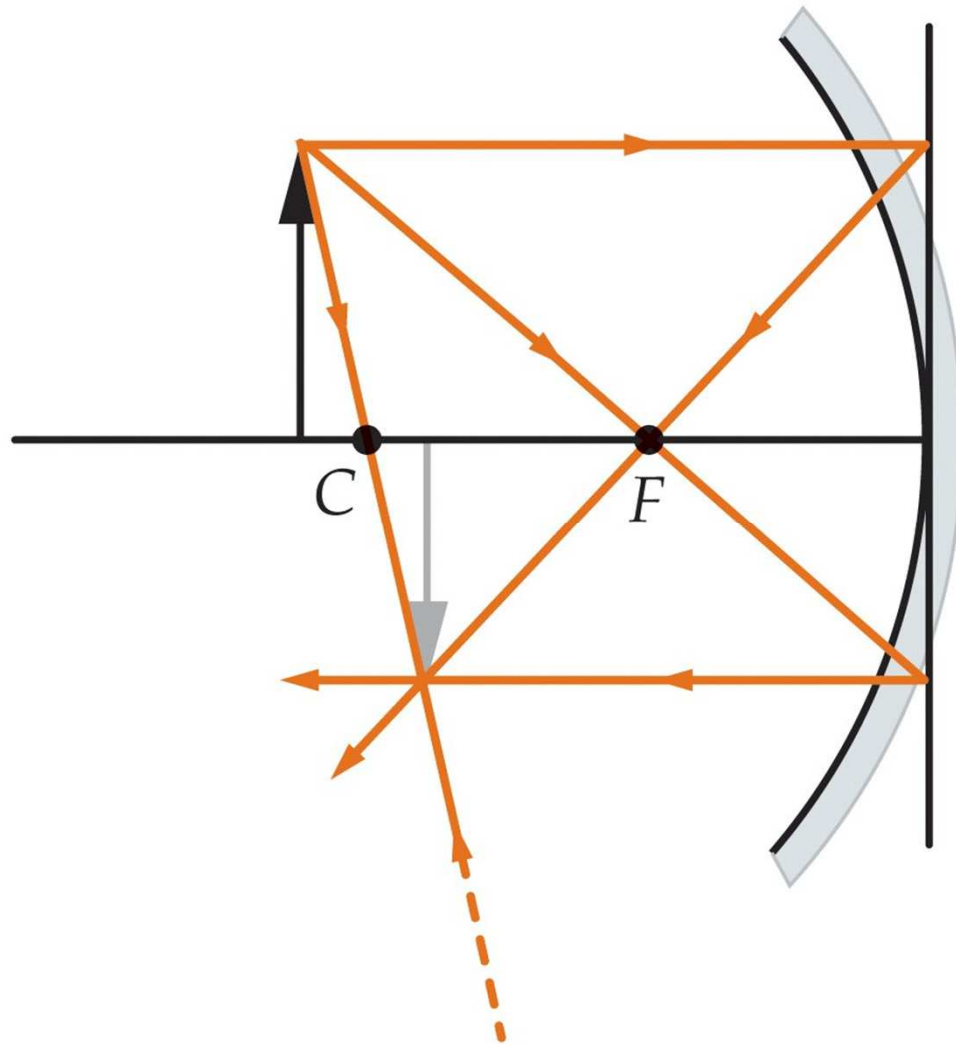


Existem três raios principais que é conveniente usar:

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.

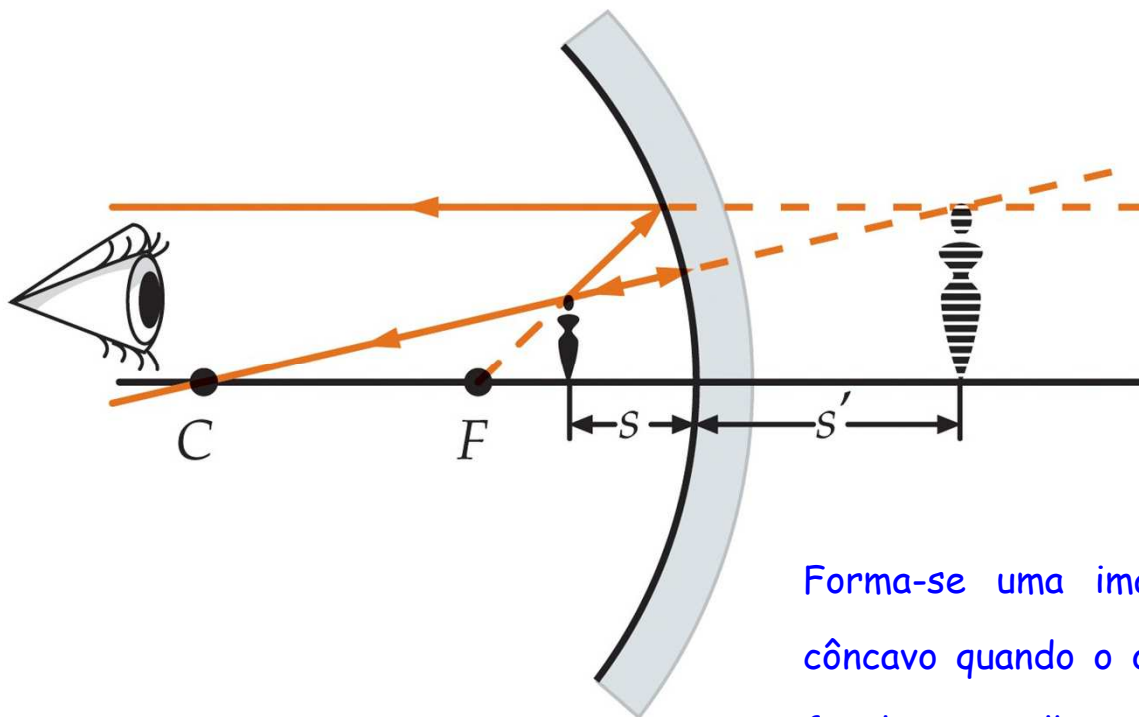


Diagramas de raios para espelhos (2)





Convenção de sinais para a reflexão

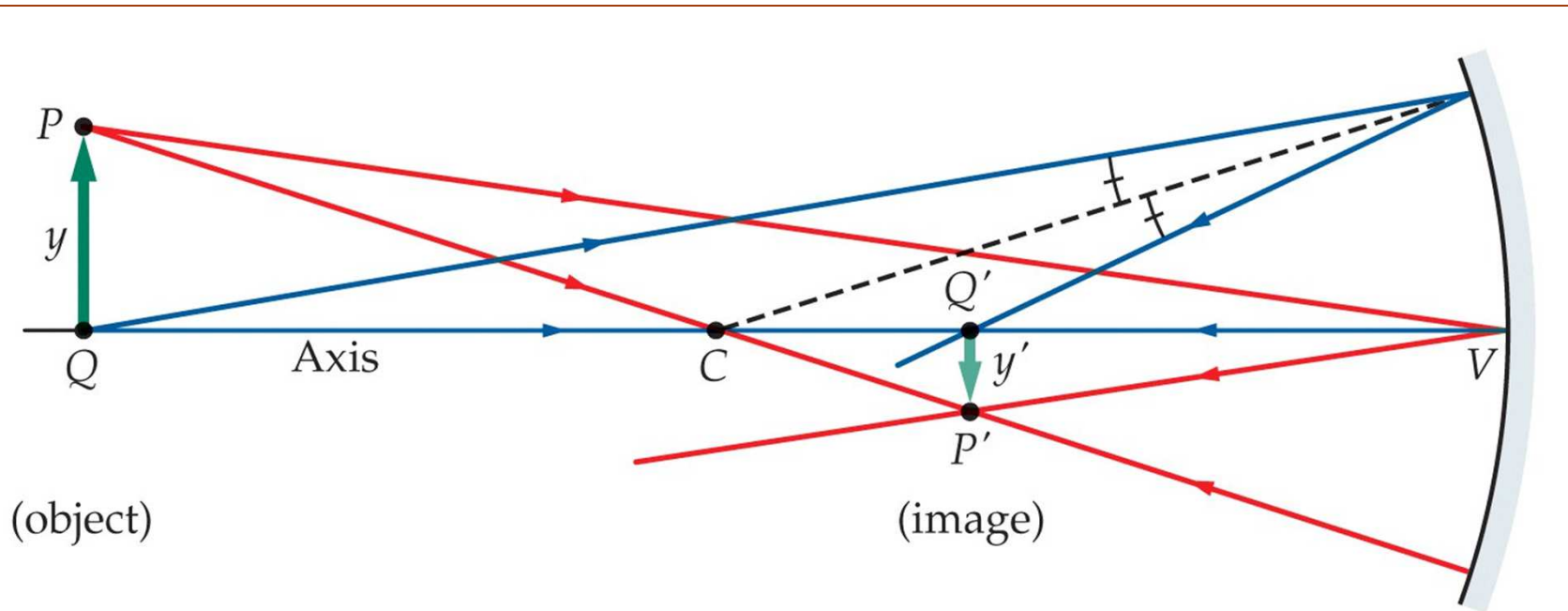


Forma-se uma imagem virtual num espelho côncavo quando o objecto está entre o ponto focal e o espelho.

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.



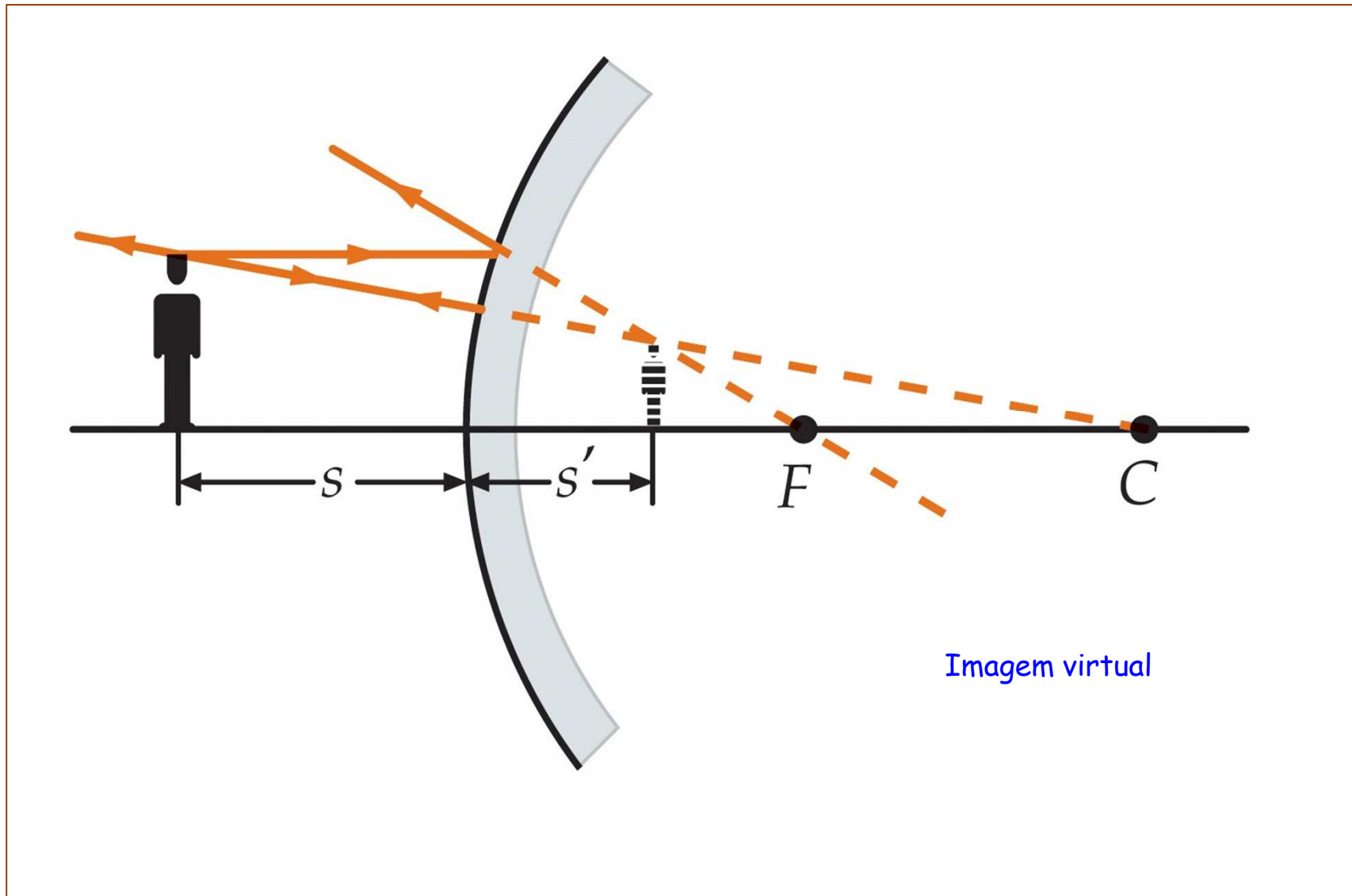
Ampliação lateral



$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

m : ampliação lateral. O sinal negativo significa que a imagem é invertida.

Espelhos convexos





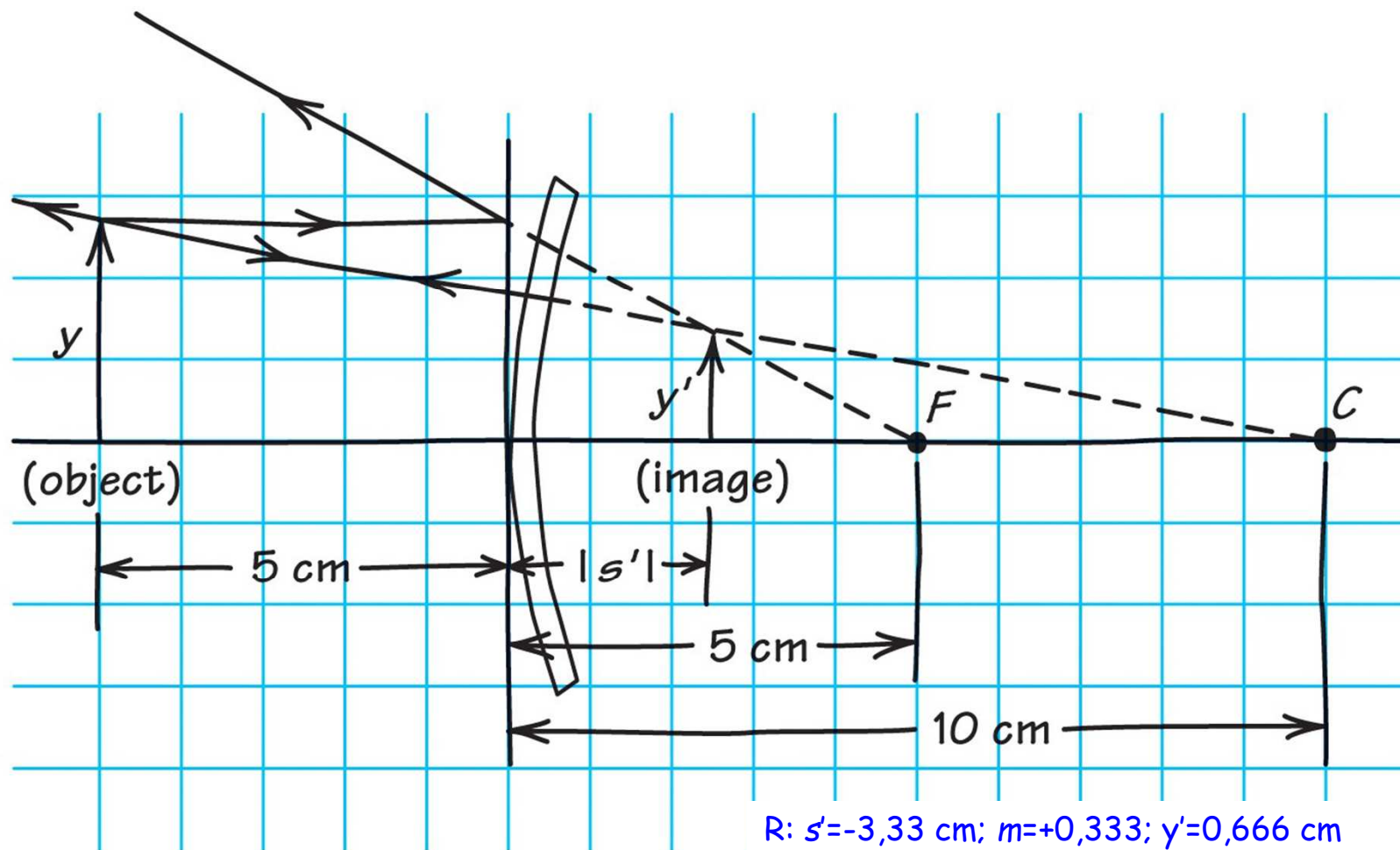
Espelhos convexos (2)





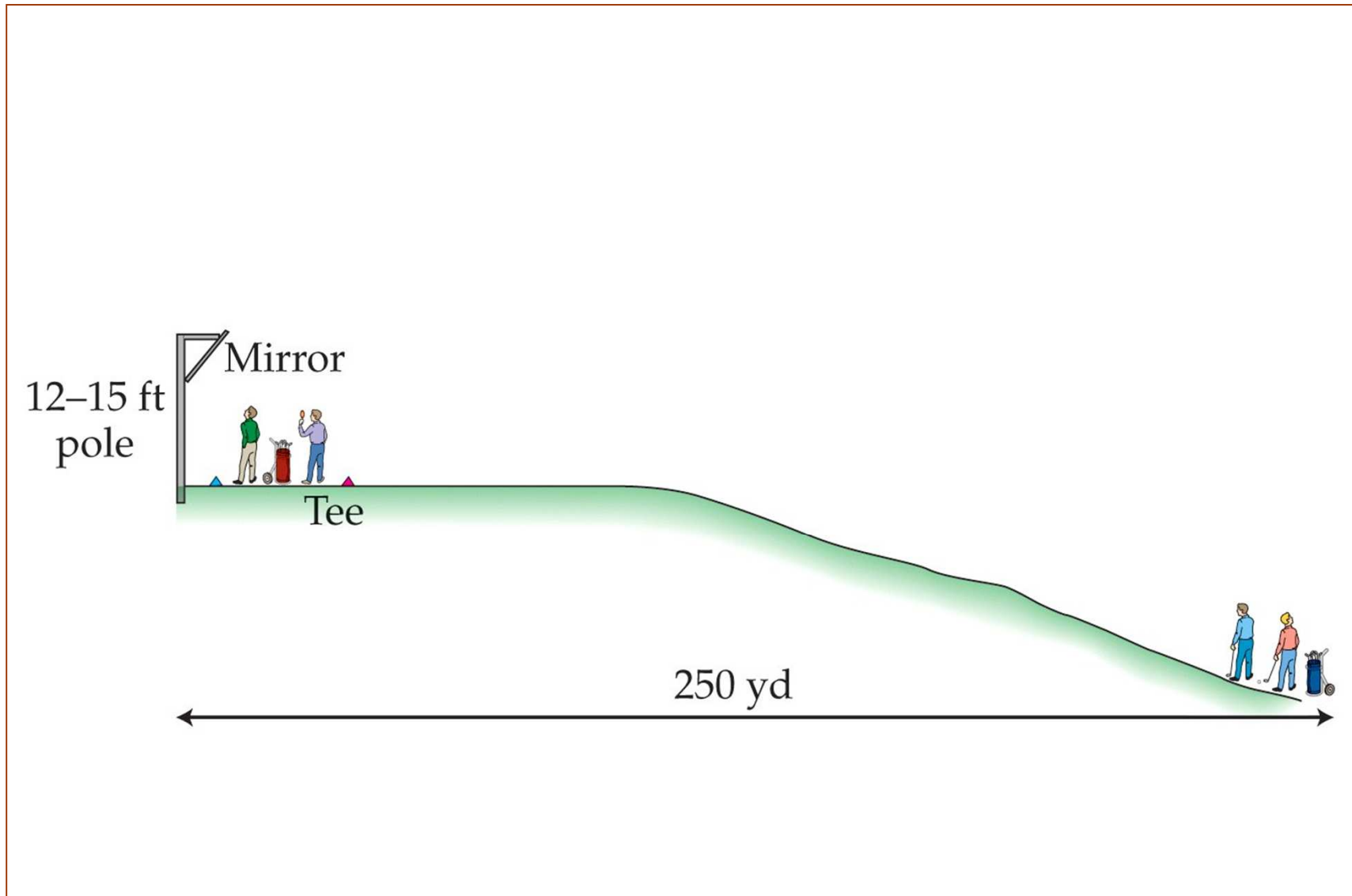
Exercício

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.





Exercício (2)





Óptica Geométrica

•

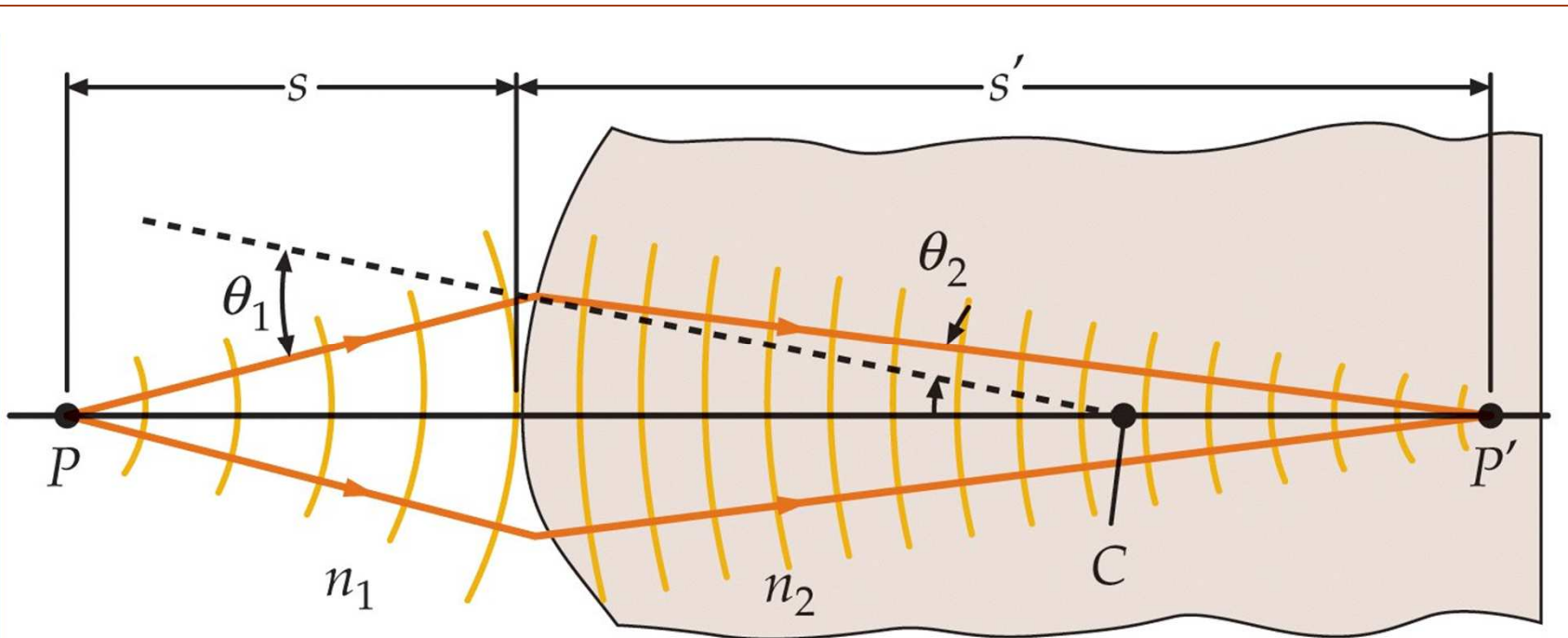
Lentes

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



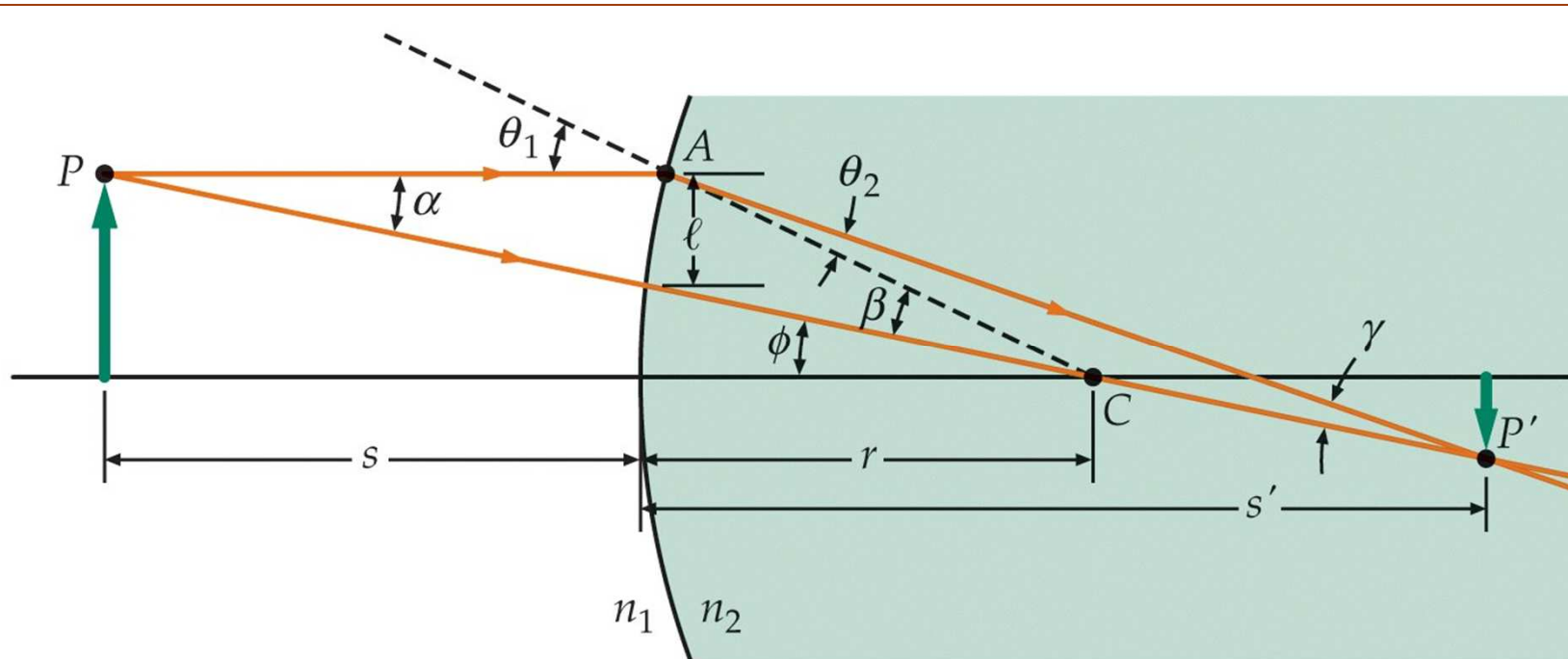
Refração numa superfície esférica

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$





Convenção de sinais para a refração

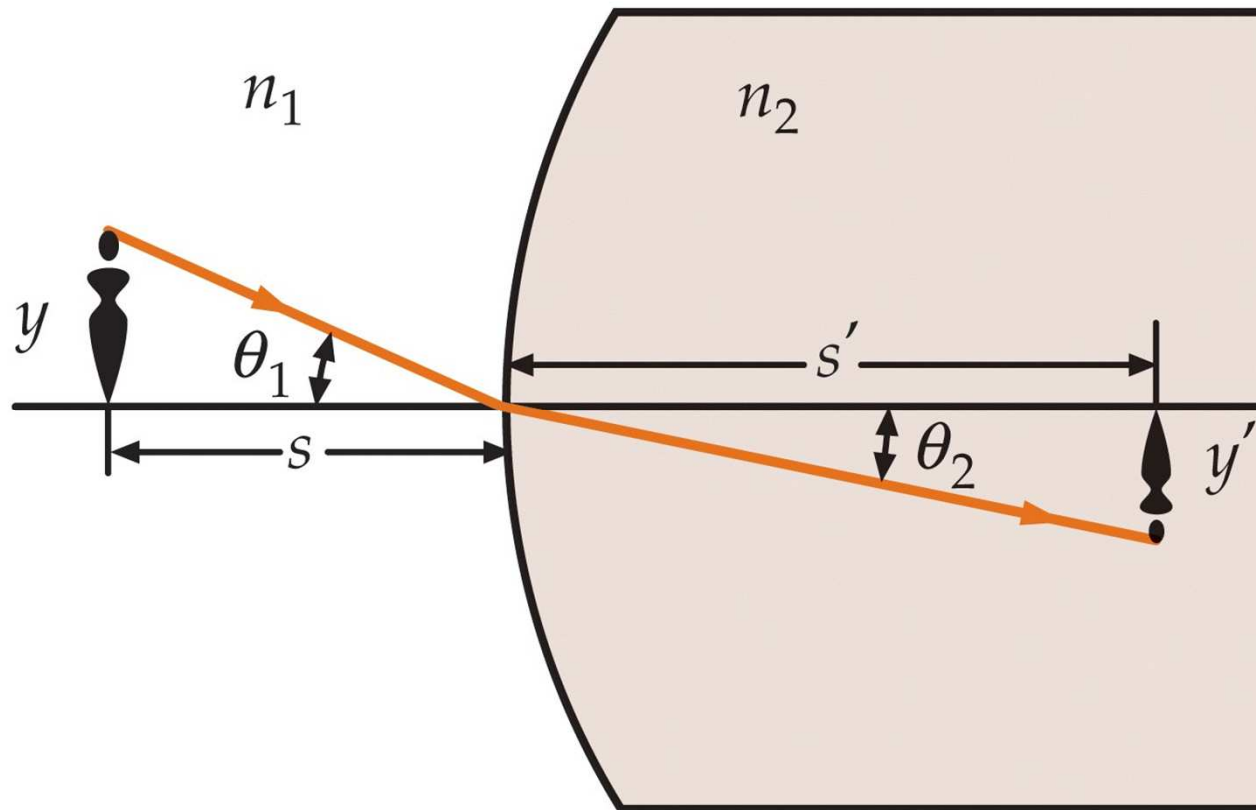


1. s é positiva se o objecto está no lado da luz incidente.
2. s' é positiva se a imagem está no lado da luz refractada
3. r é positivo se o centro de curvatura está no lado da superfície da luz refractada.





Ampliação para uma superfície refractora



$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{n_1 s'}{n_2 s}$$

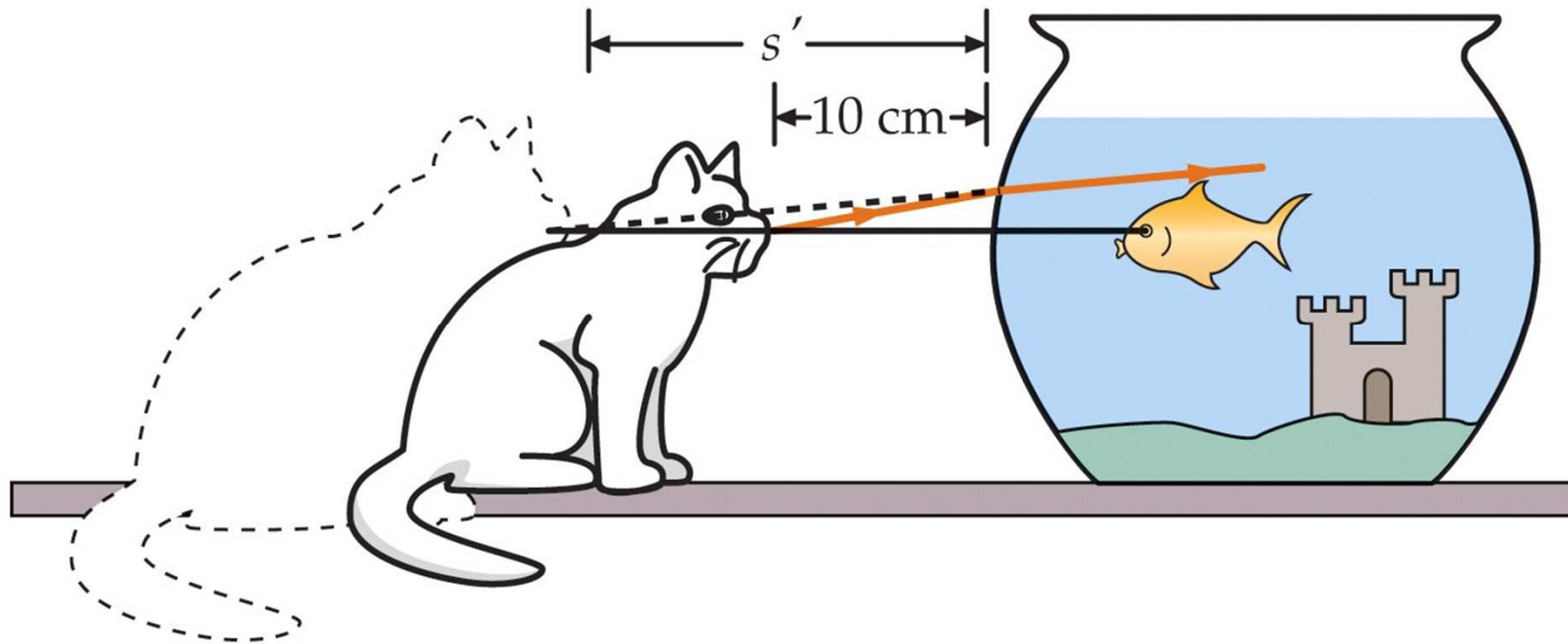
m : ampliação lateral. O sinal negativo significa que a imagem é invertida.





Imagem vista de um aquário de peixe

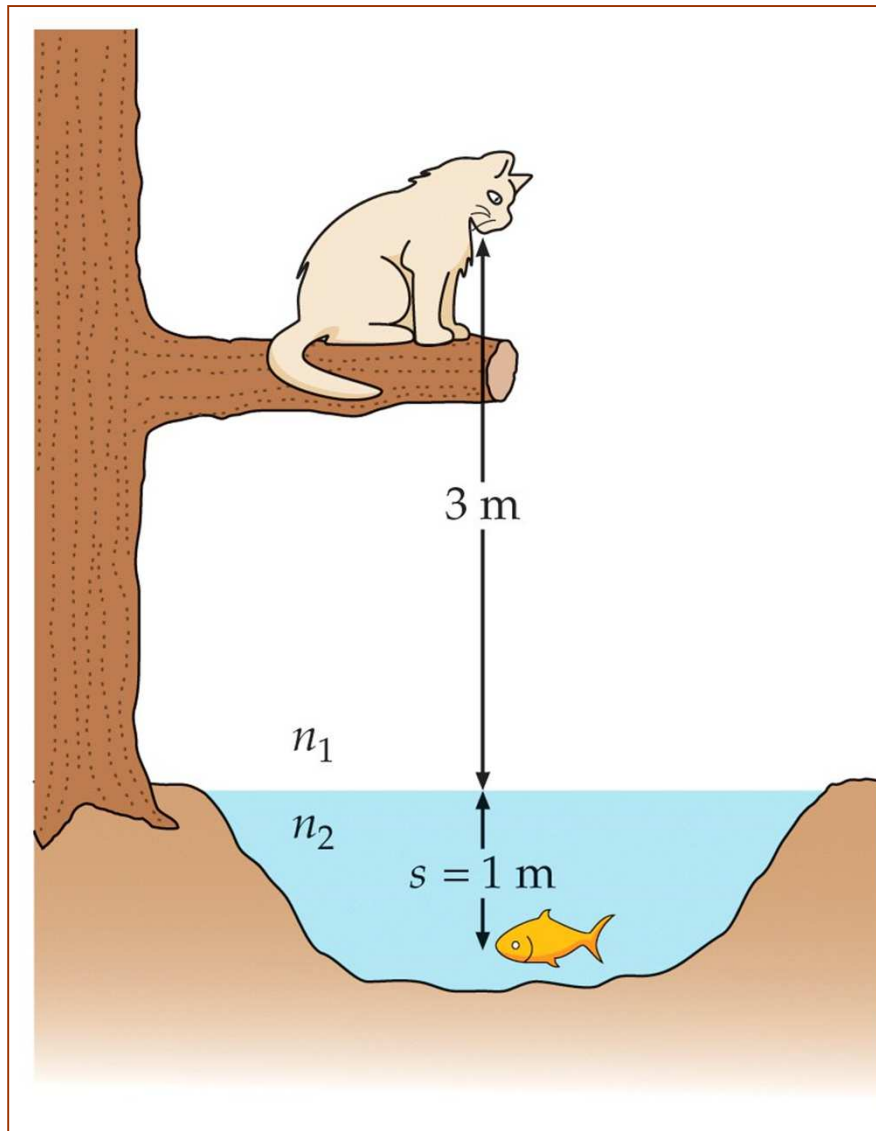
O peixe dourado está num aquário esférico de 15 cm de raio cheio de água, com um índice de refração 1,33. O gato está sentado sobre a mesa com o nariz a 10 cm da superfície do aquário. A luz do nariz do gato é refracta pela fronteira ar-água para formar uma imagem. Determine a) a distancia à imagem; b) a ampliação da imagem do nariz do gato. Despreze qualquer efeito da parede de vidro do aquário.



R: $s' = -17,1$ cm; $m = 1,29$

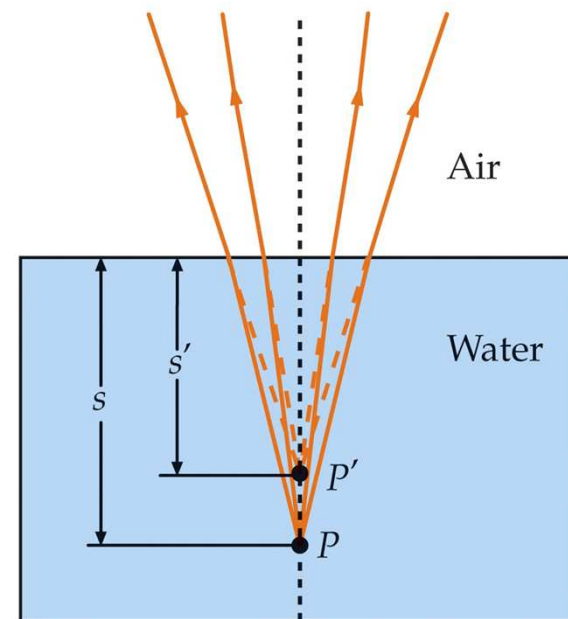


Imagem vista de um galho



A que profundidade está imagem do peixe vista pelo gato.

R: $s' = -0,75 \text{ cm}$.





Óptica Geométrica

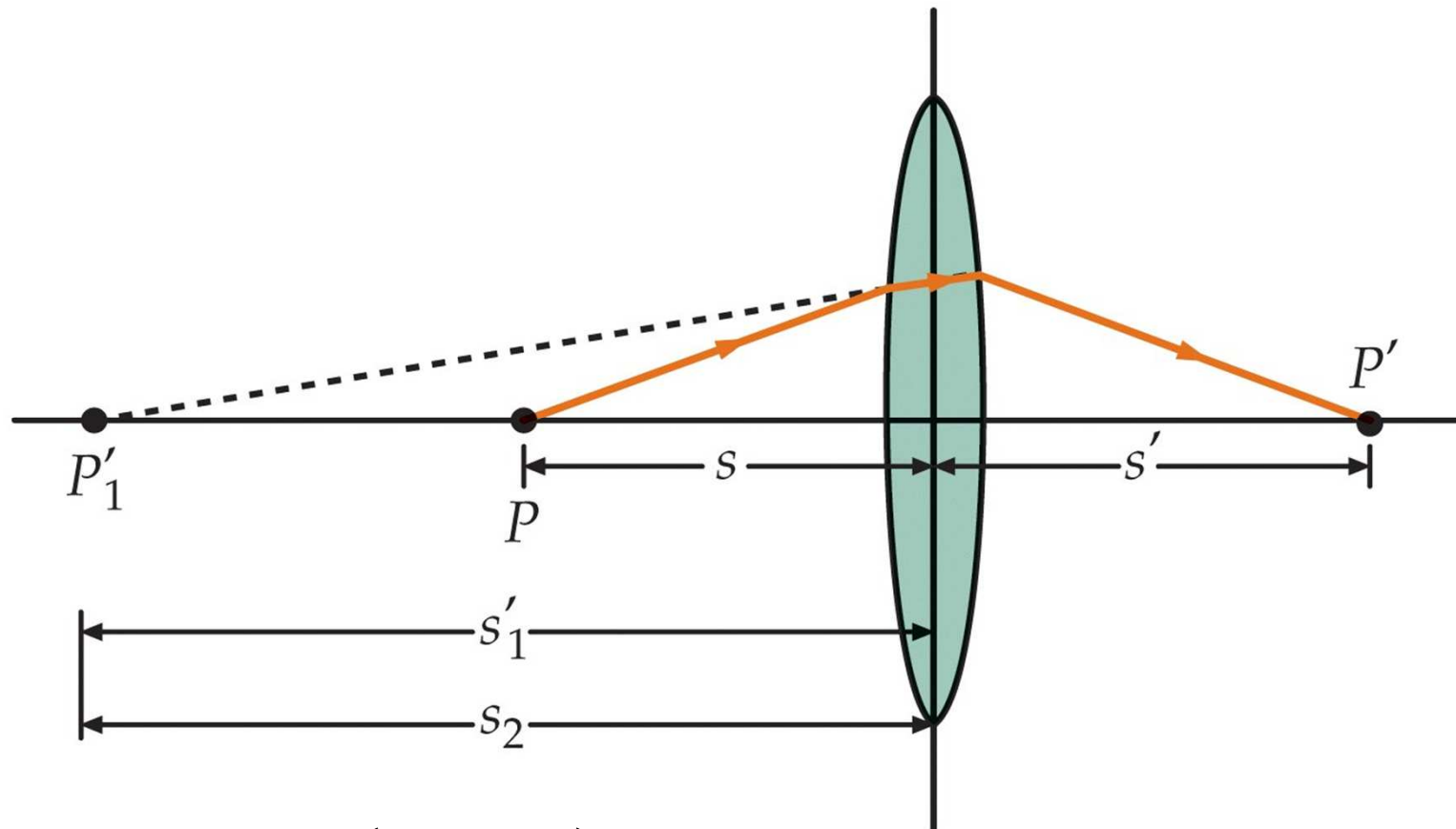


Lentes finas





Equação dos fabricantes de lentes



$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

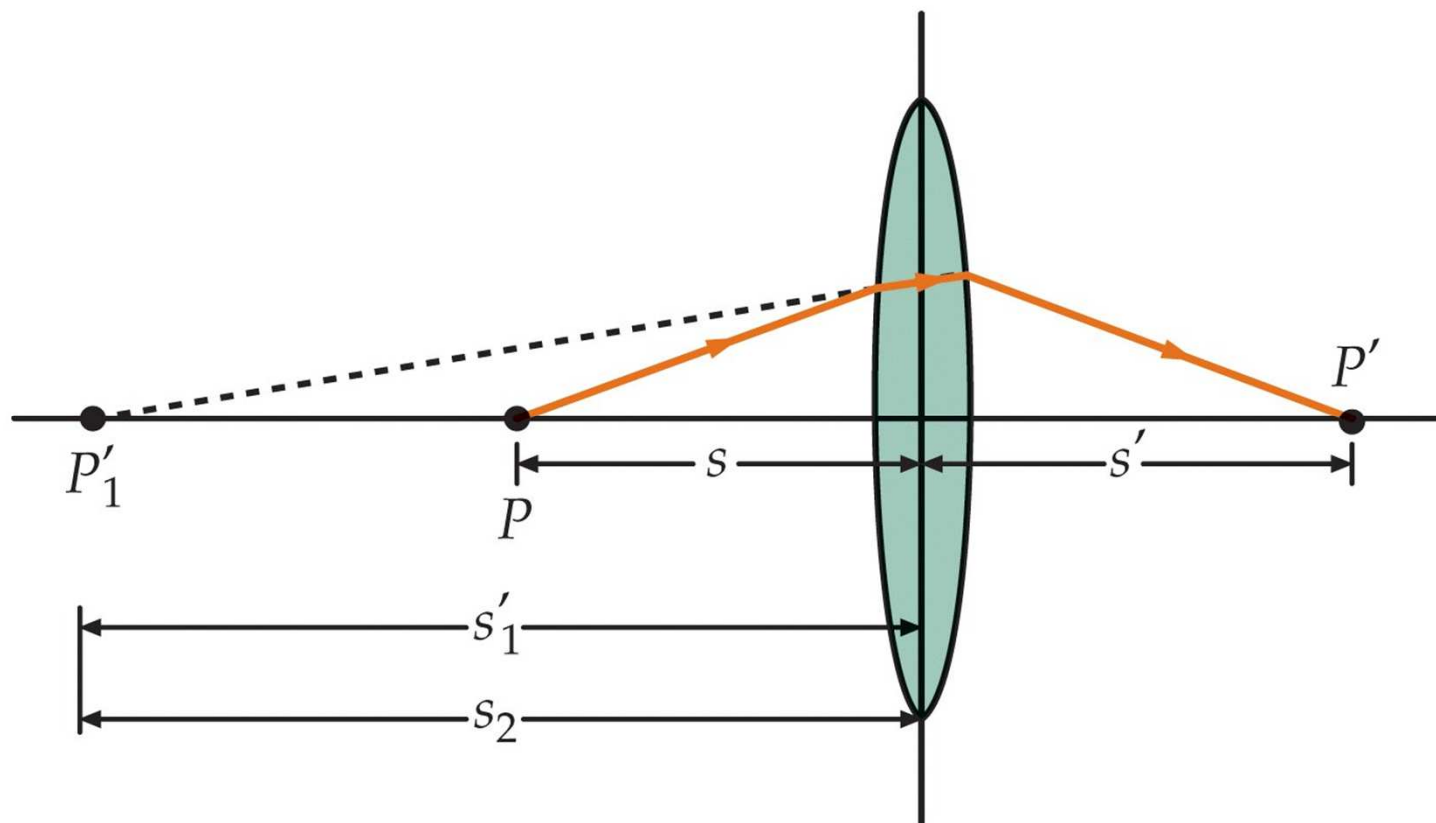
n : índice de refração da lente.

$r_{1,2}$: 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.

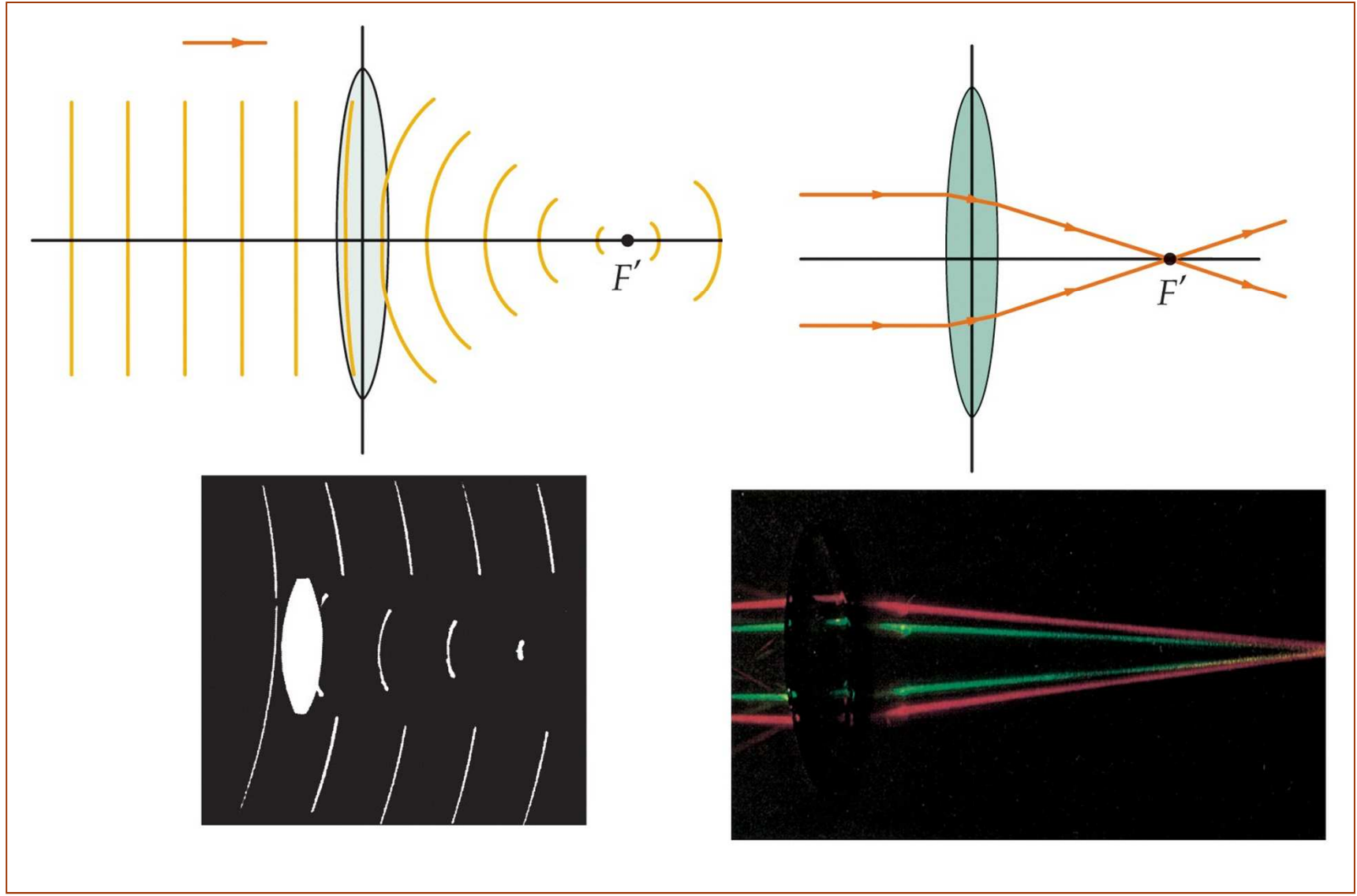
s, s' : distância do objecto e da imagem à lente.

f : distância focal



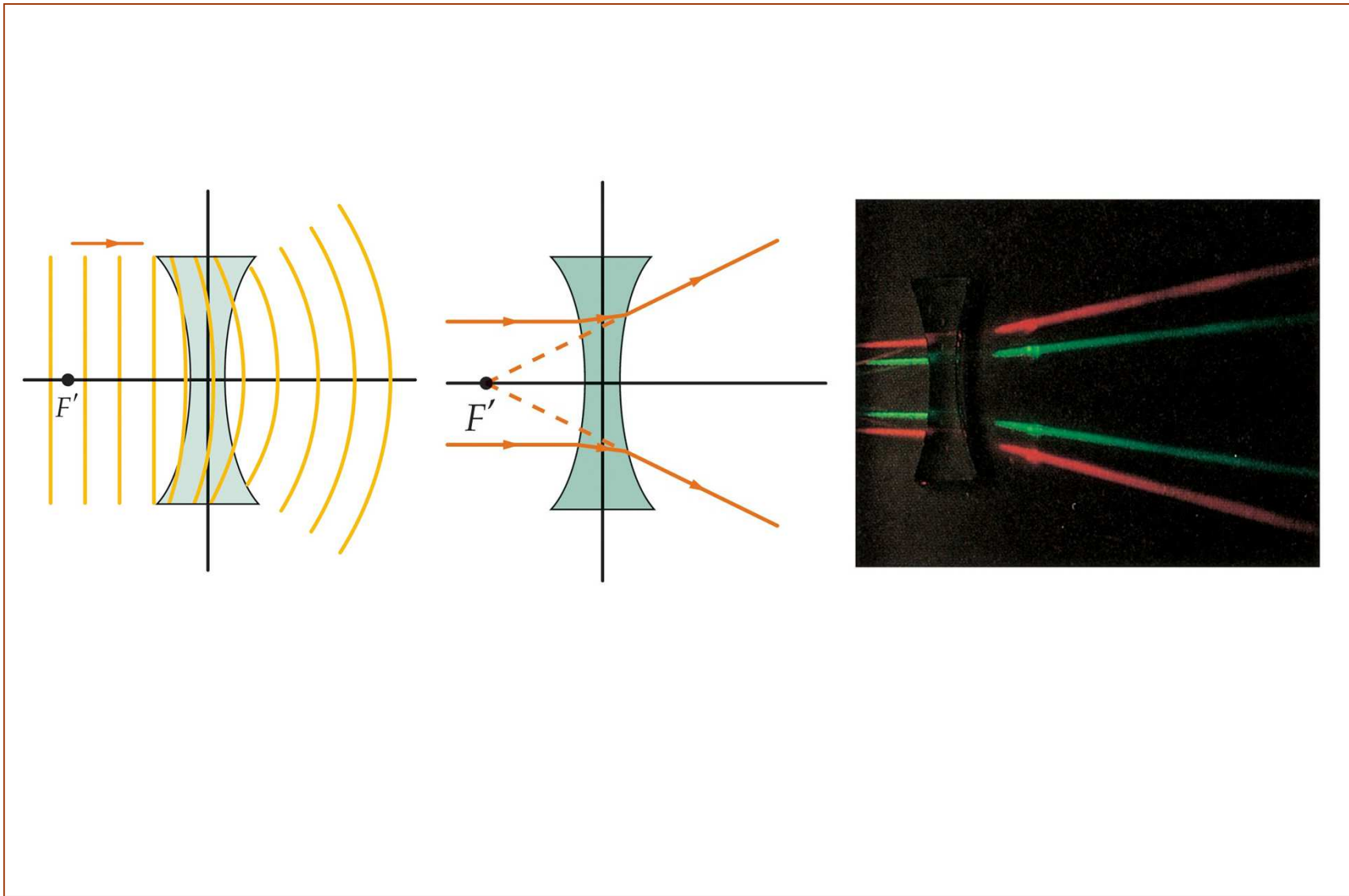


Lente convergente





Lente divergente

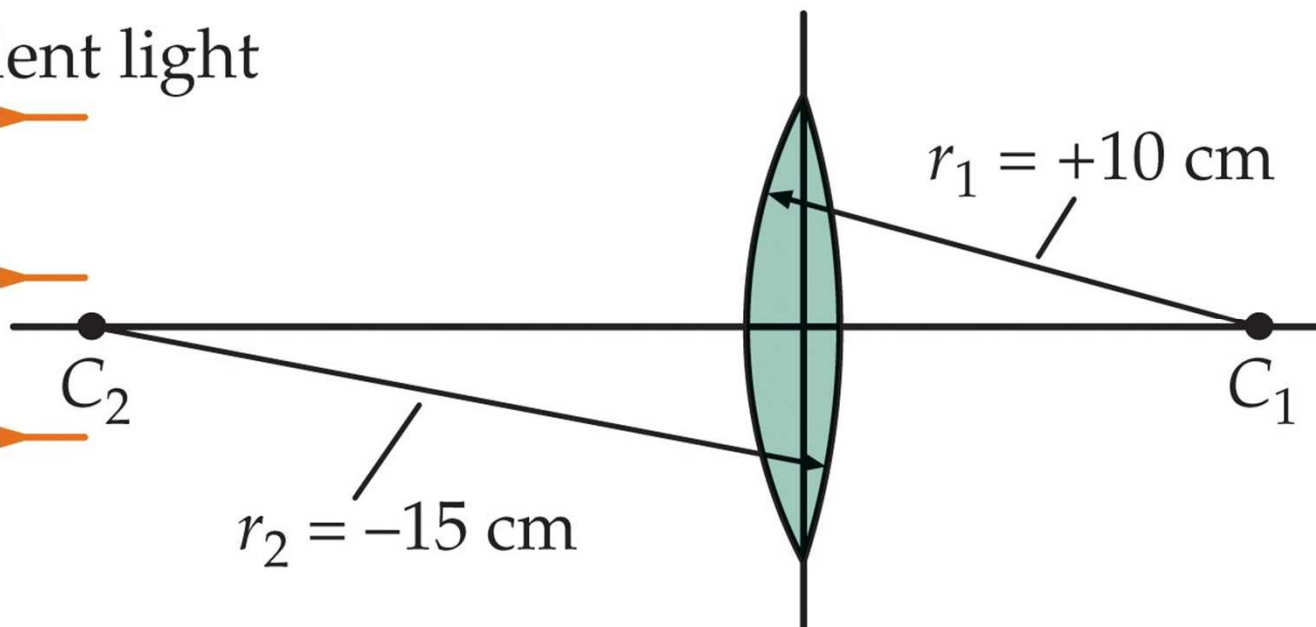




Formula dos fabricantes de lentes

Determine a distância focal.

Incident light



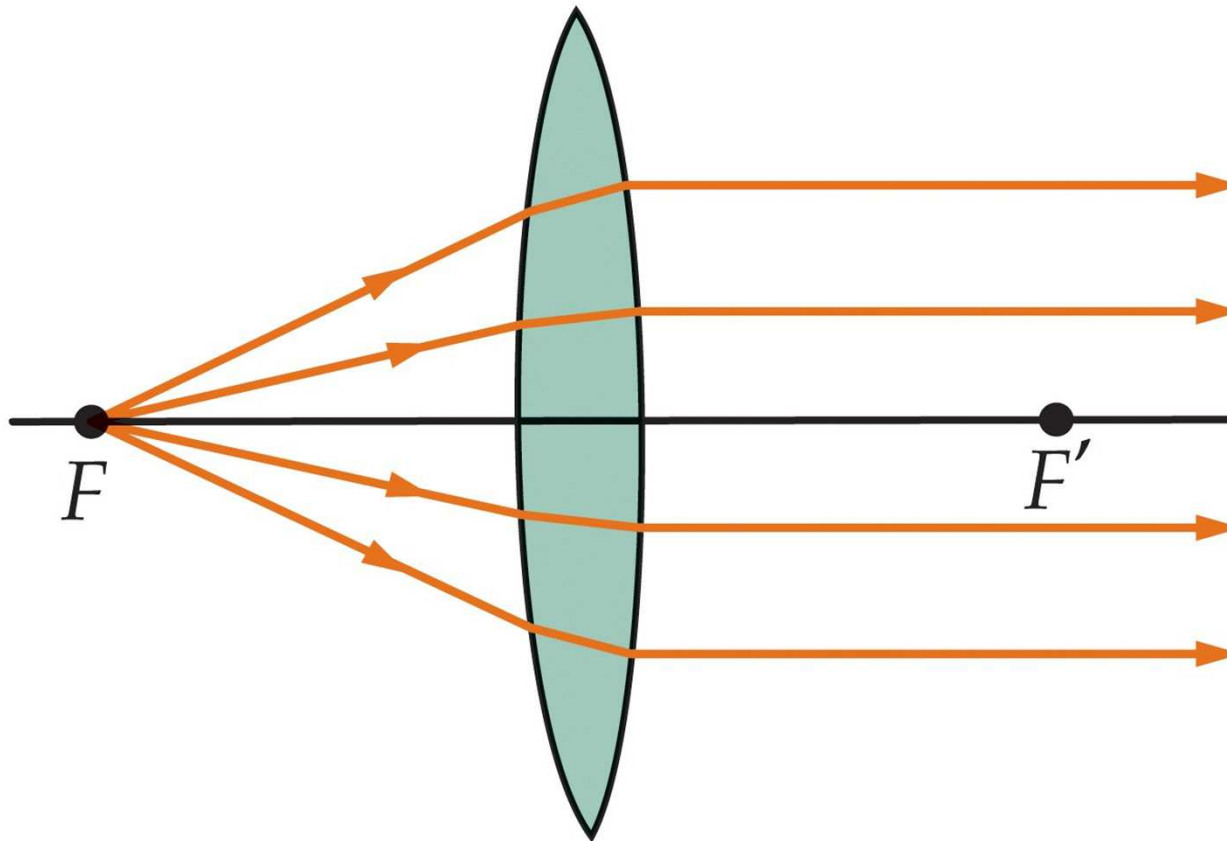
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

R: $f=12$ cm





Foco da lente convergente

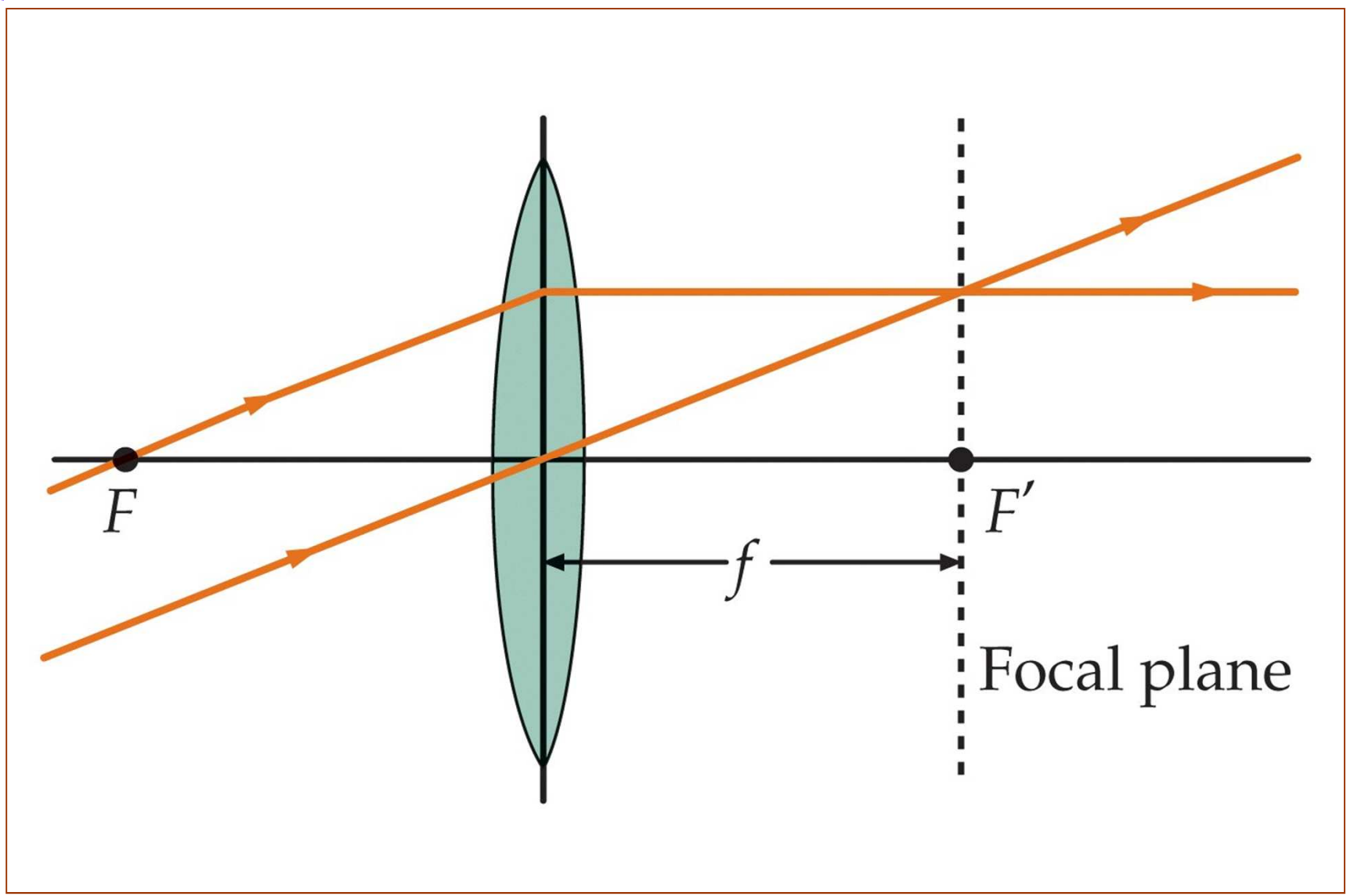


Potência de uma lente: $P=1/f$, exprime-se em dioptrias, o inverso do metro (D):





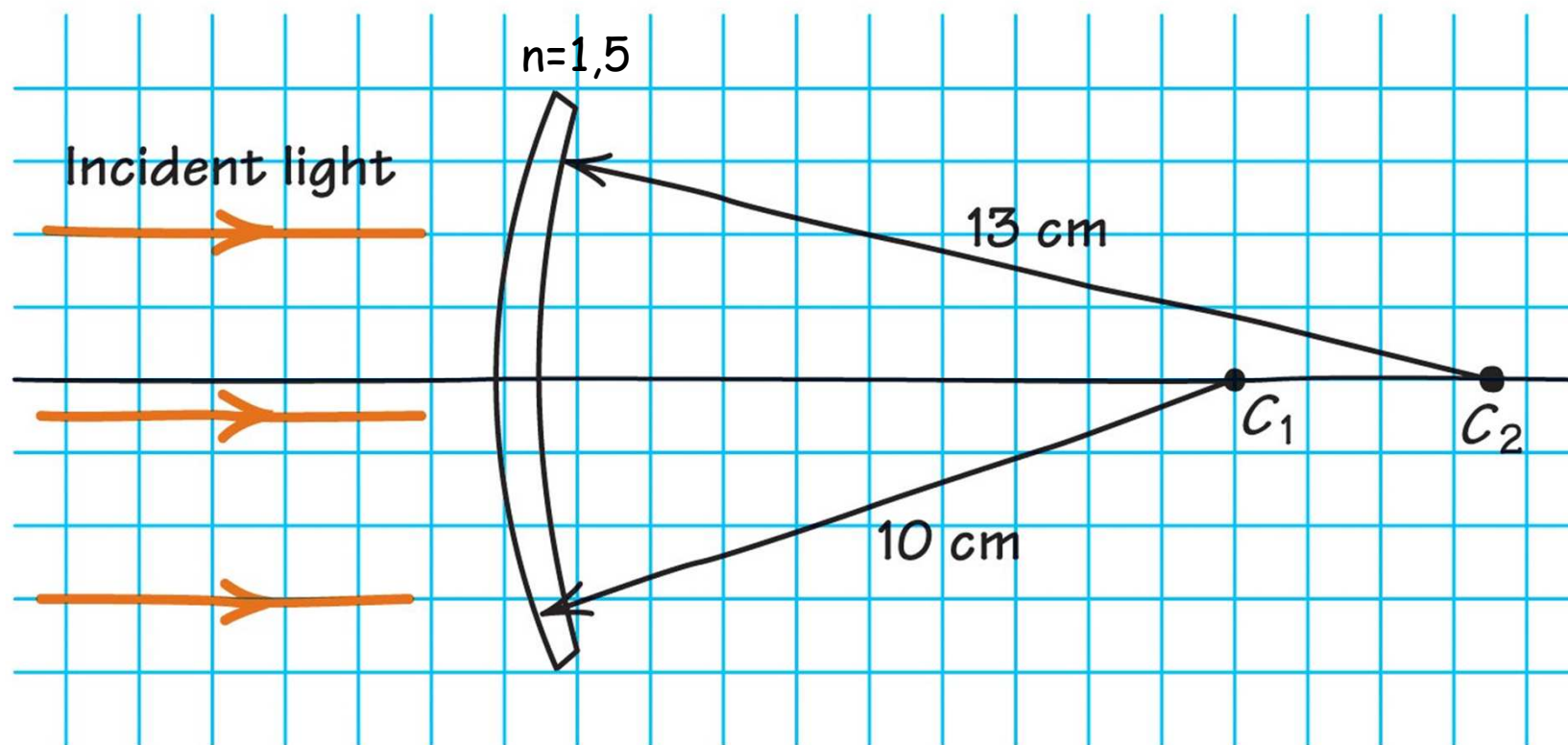
Plano focal





Exercício

Determine a distância focal e a potência da lente



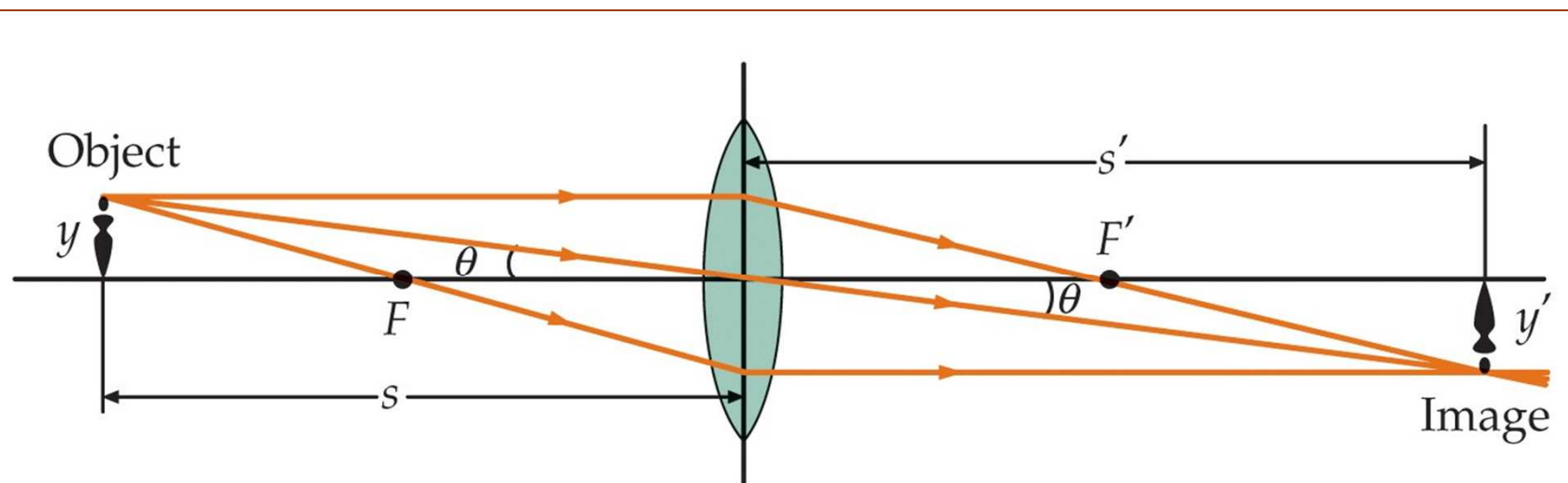
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

R: $f=86,7$ cm; $P=1,15$ 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)

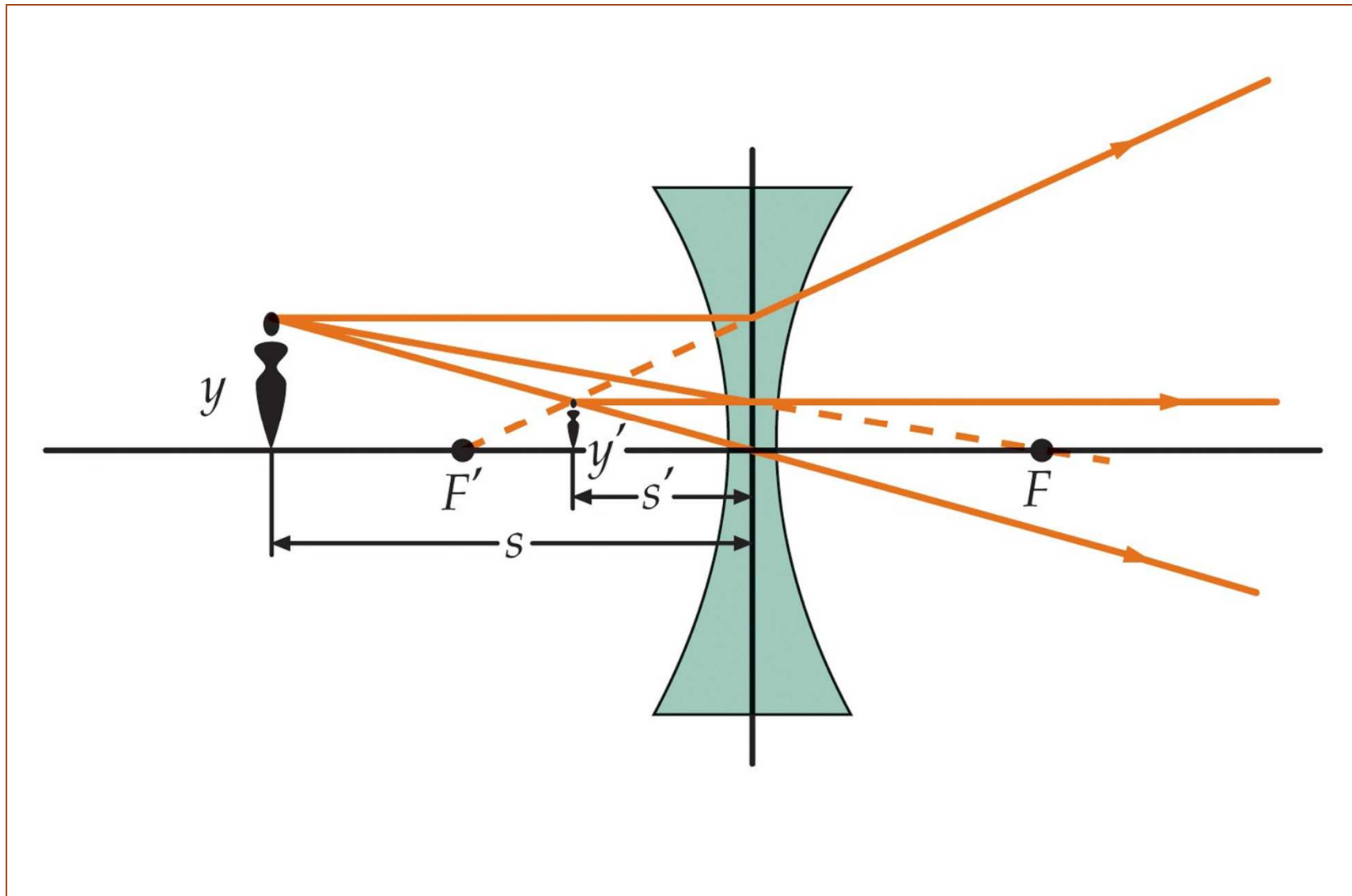
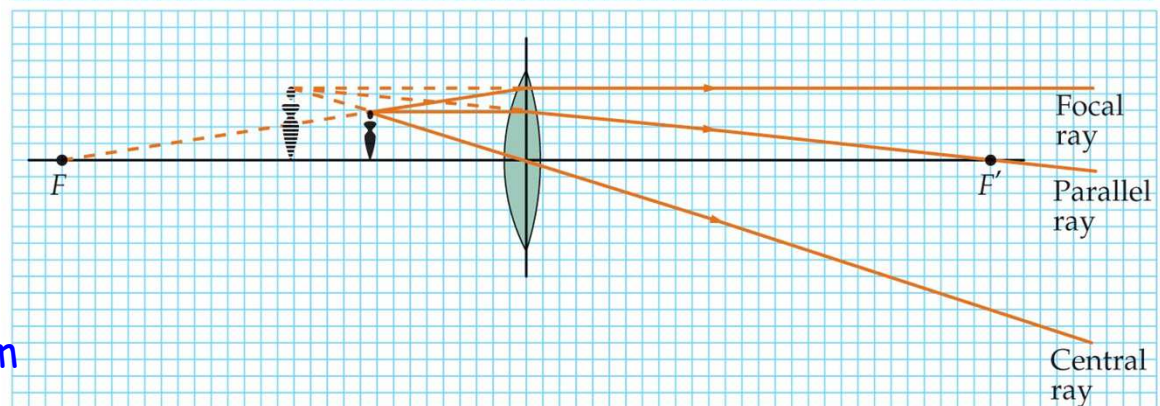
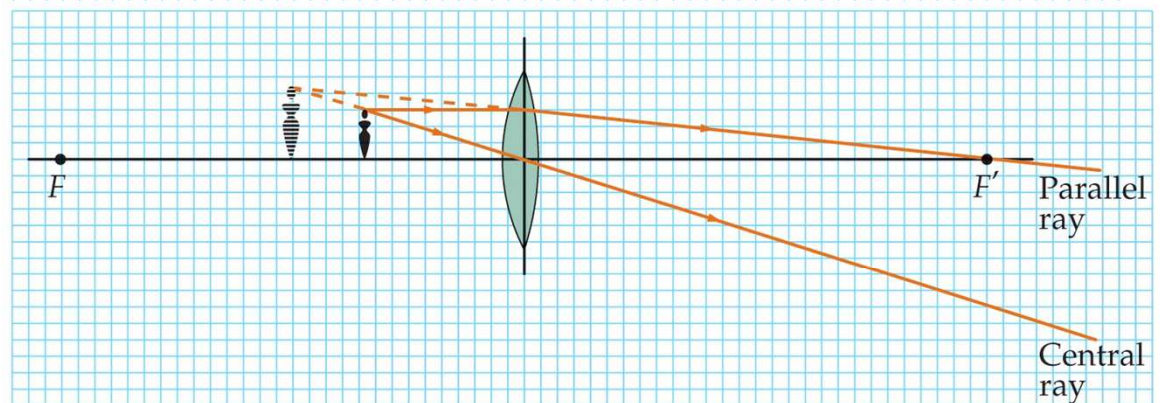
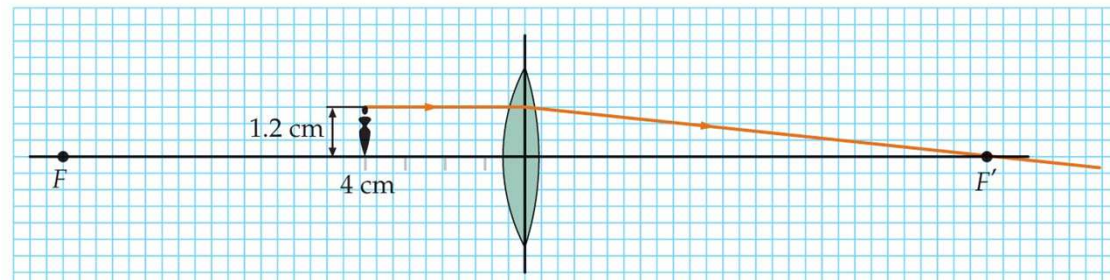




Imagem formada por uma lente

$f=12\text{ cm}$

Localize a imagem tanto graficamente quanto algebricamente; verifique se a imagem é virtual ou real e determine a sua altura.



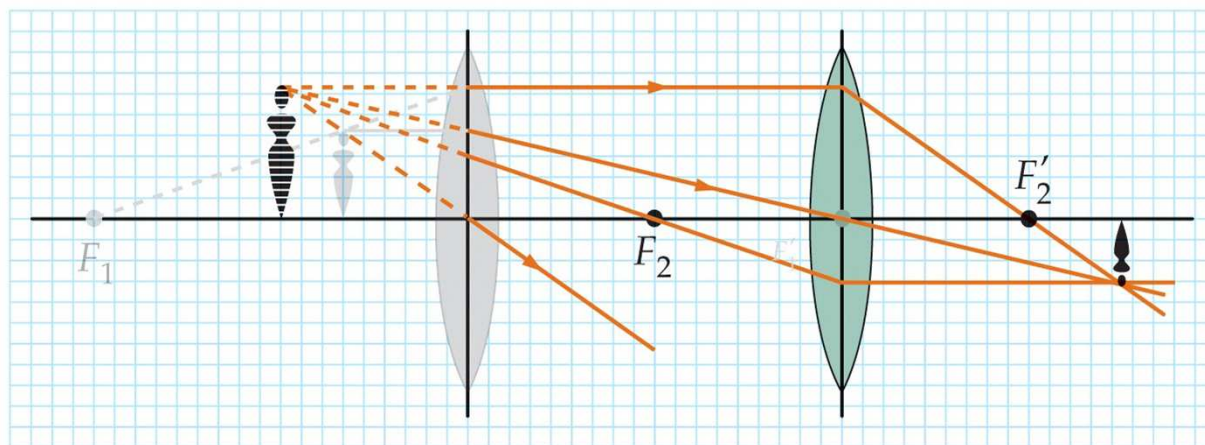
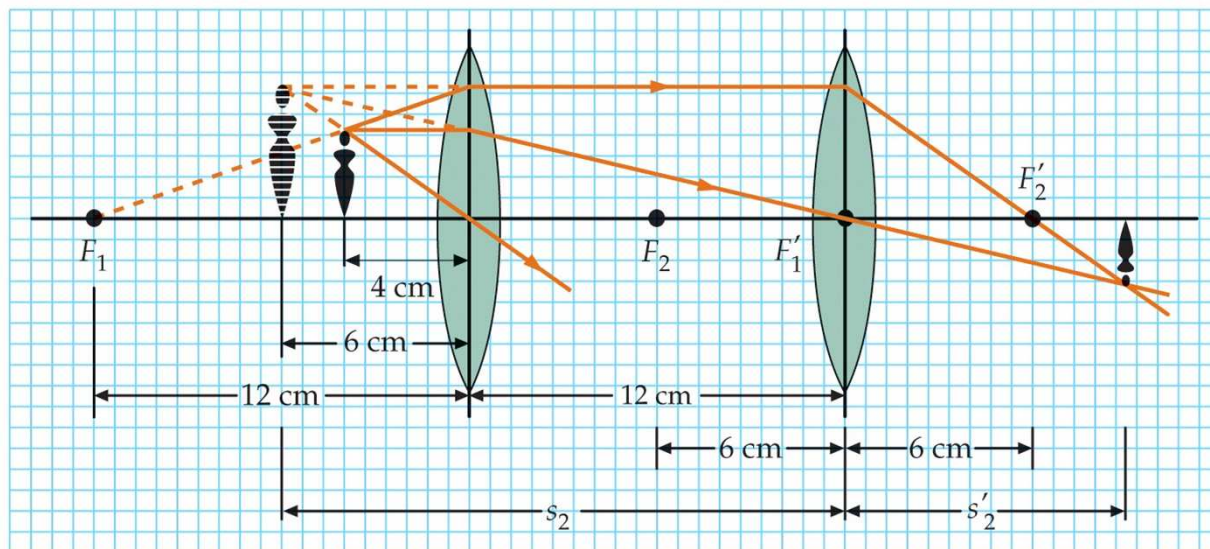
R: $s'=-6\text{ cm}$; $h'=mh=1,8\text{ cm}$





Combinação de lentes

Localize a imagem final.



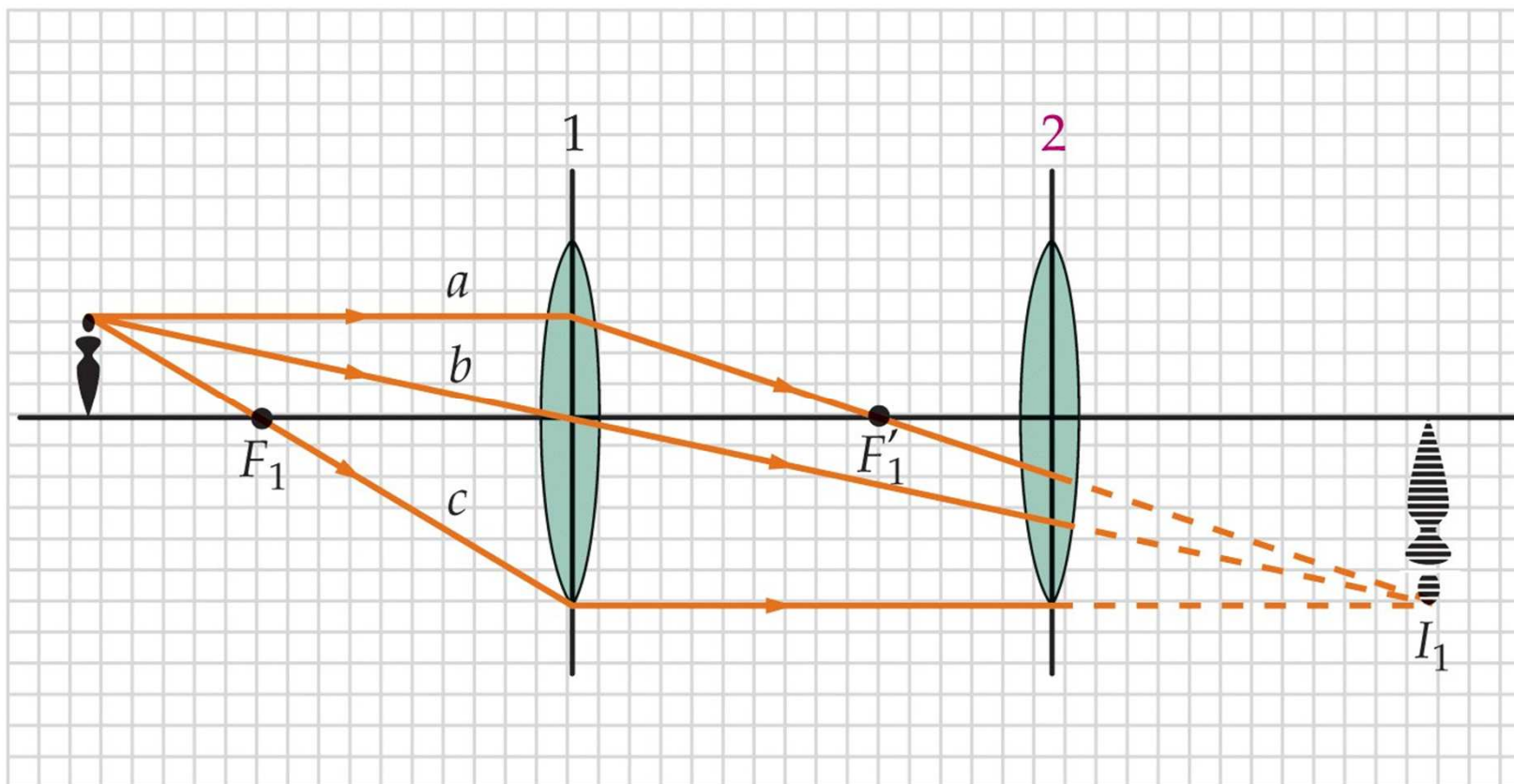
R: $s'_2 = 9 \text{ cm}$





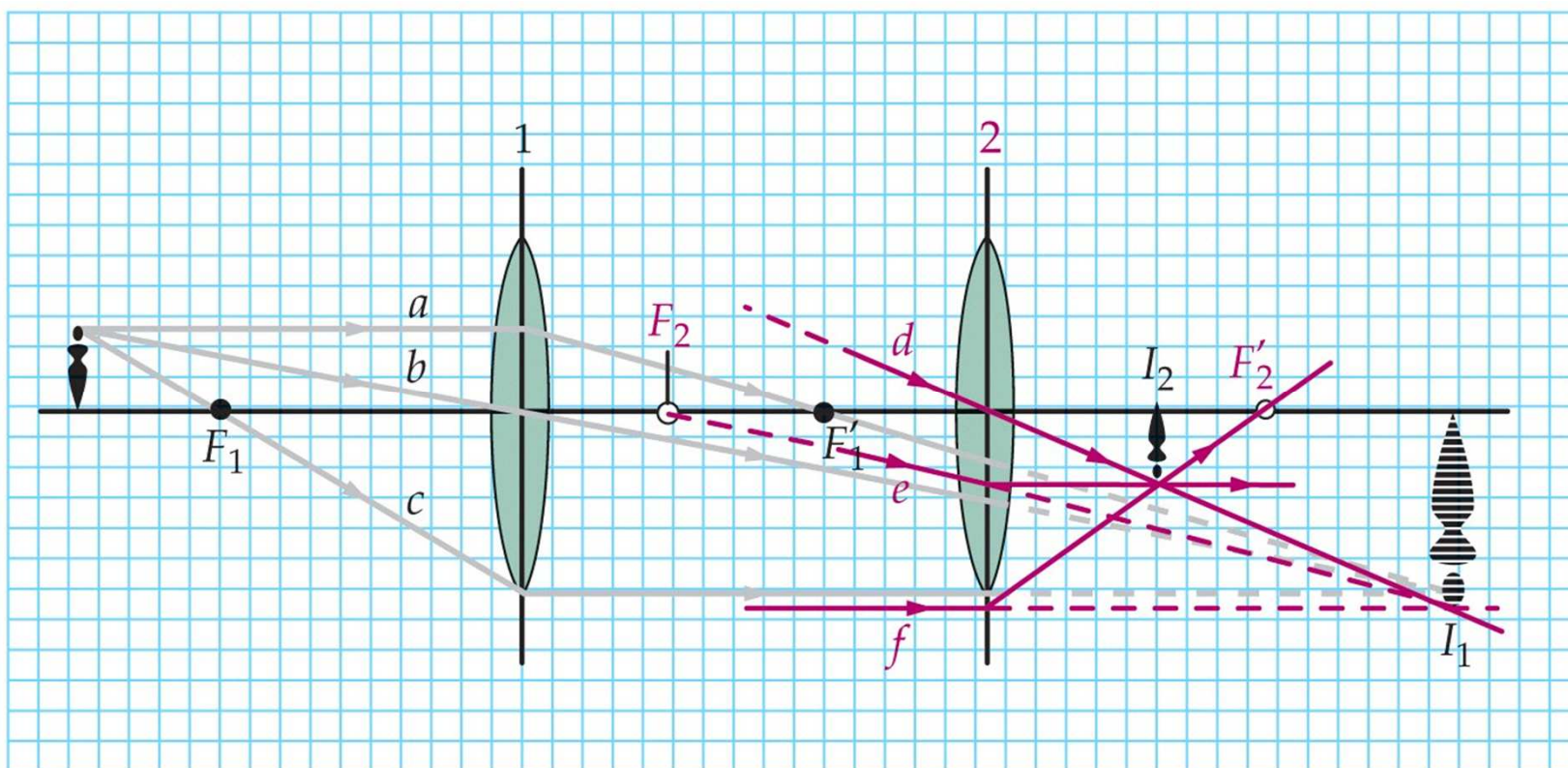
Exercício de combinação de lentes

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;

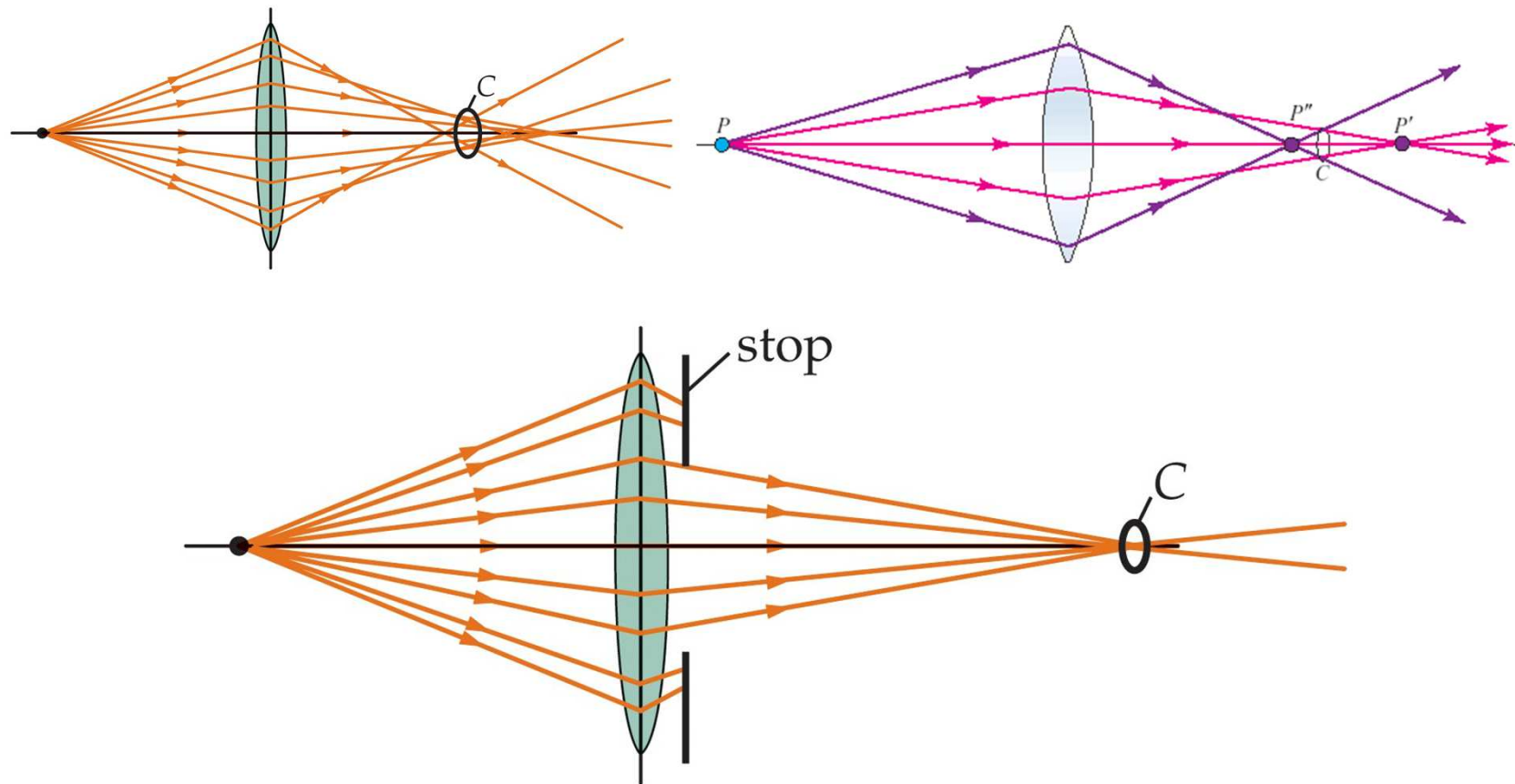
http://en.wikipedia.org/wiki/Aberration_in_optical_systems



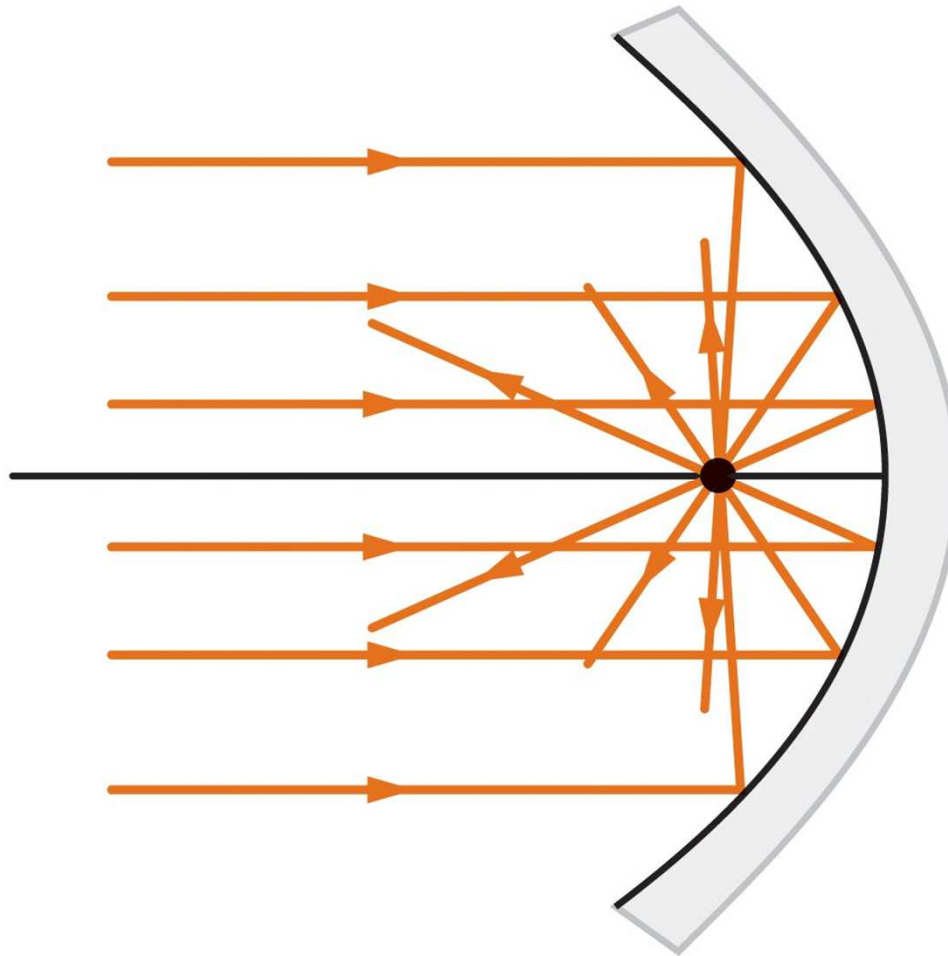


Aberração esférica

Aberração de esfericidade: distorção das imagens dadas pelas lentes ou espelhos esféricos;



Espelho parabólico



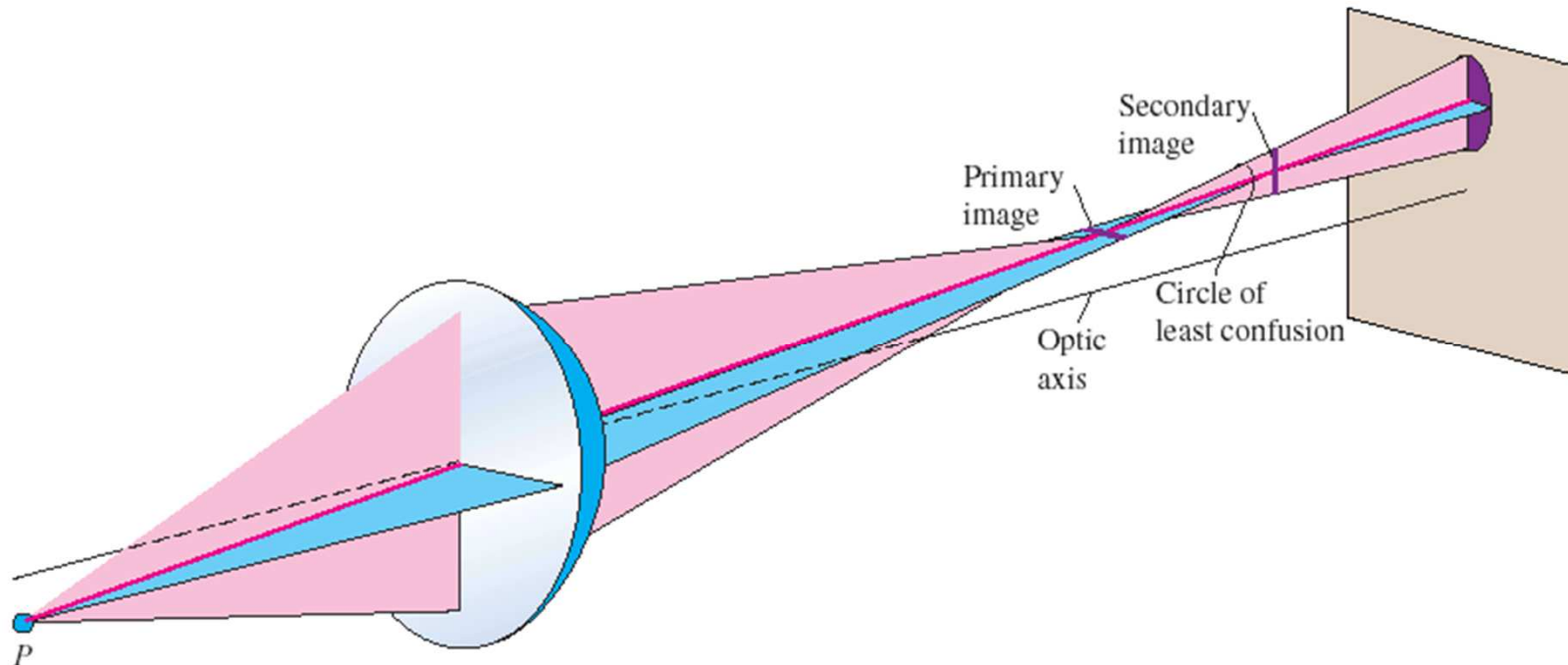
Não produz aberração esférica: todos os raios paralelo passam pelo foco.



Astigmatismo

Astigmatismo: (fís.) ausência de estigmatismo; defeito dos sistemas ópticos que consiste em não existir um só ponto-imagem para cada ponto-objecto, 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)



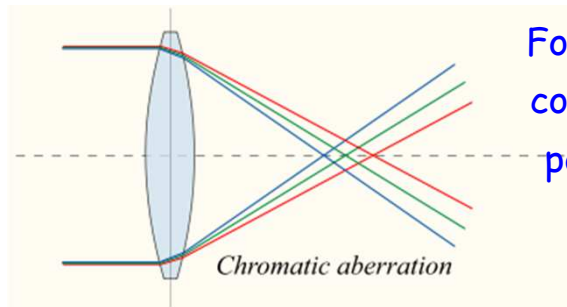
<http://en.wikipedia.org/wiki/Astigmatism>



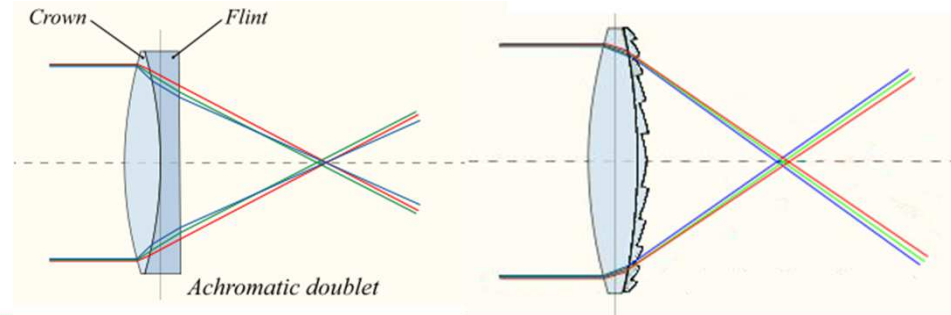


Aberrações cromáticas

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 correcção 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

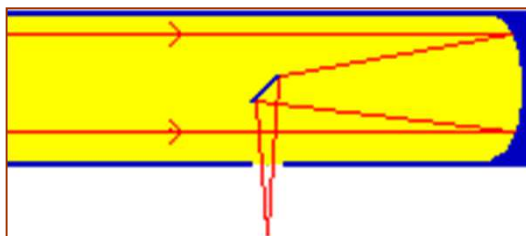
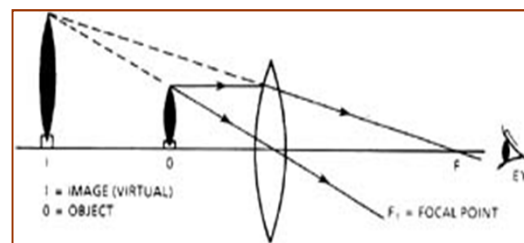
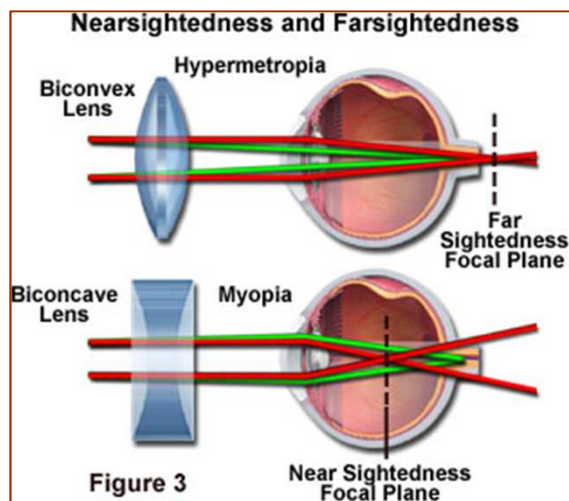
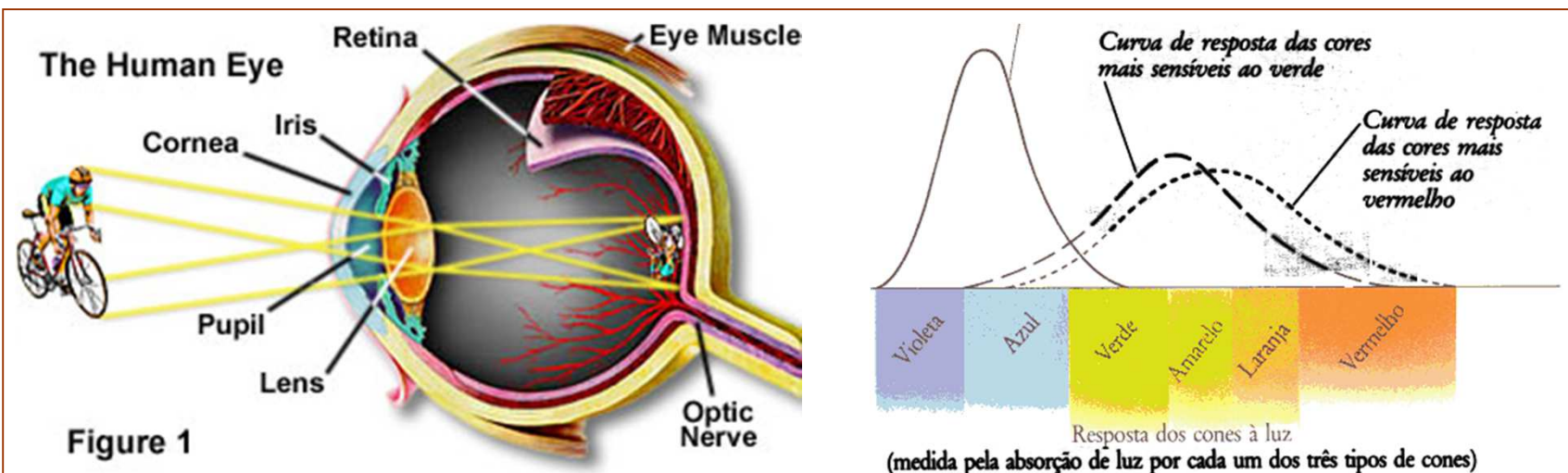


Instrumentos ópticos

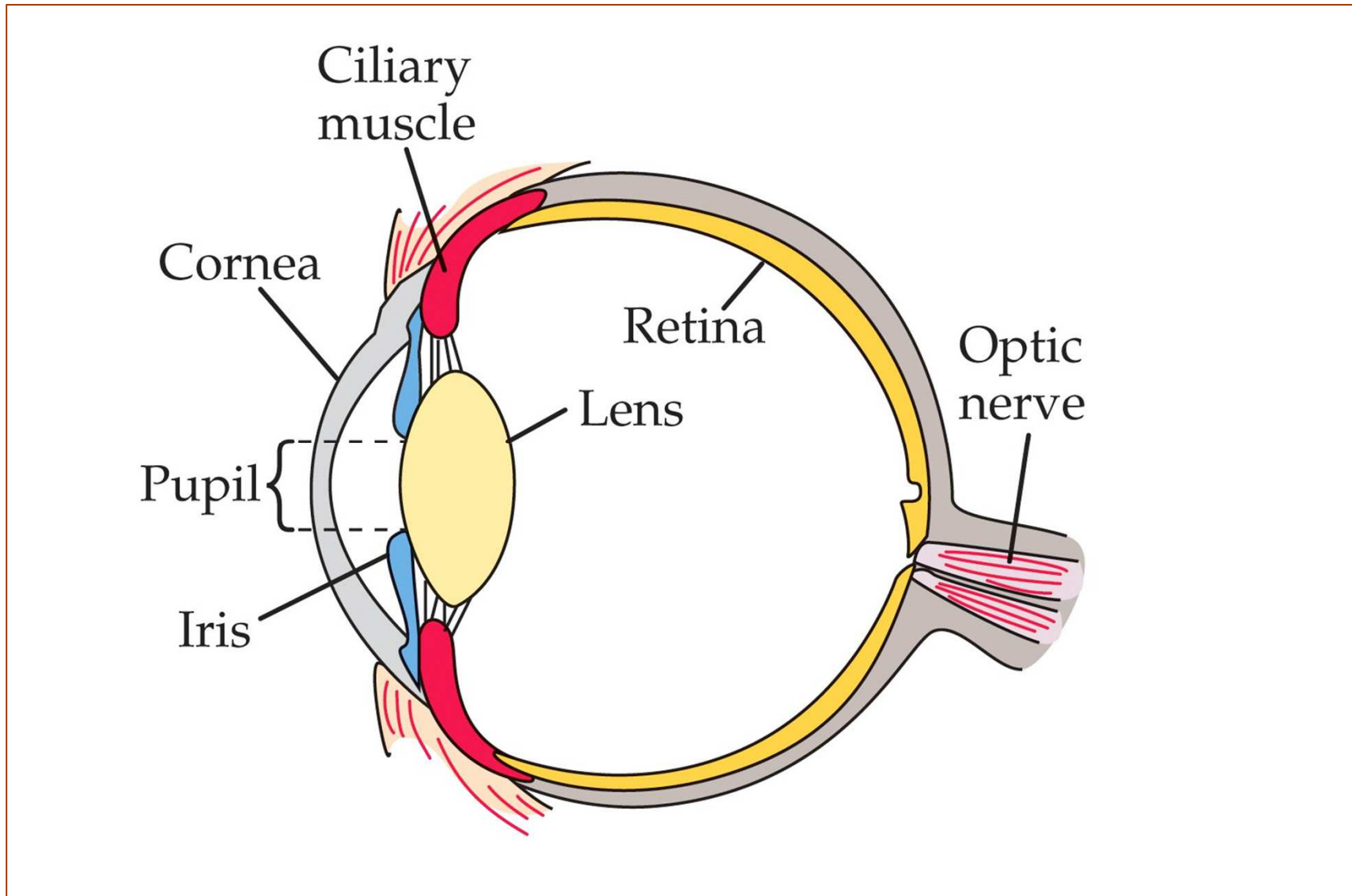




Ver mais e ver melhor

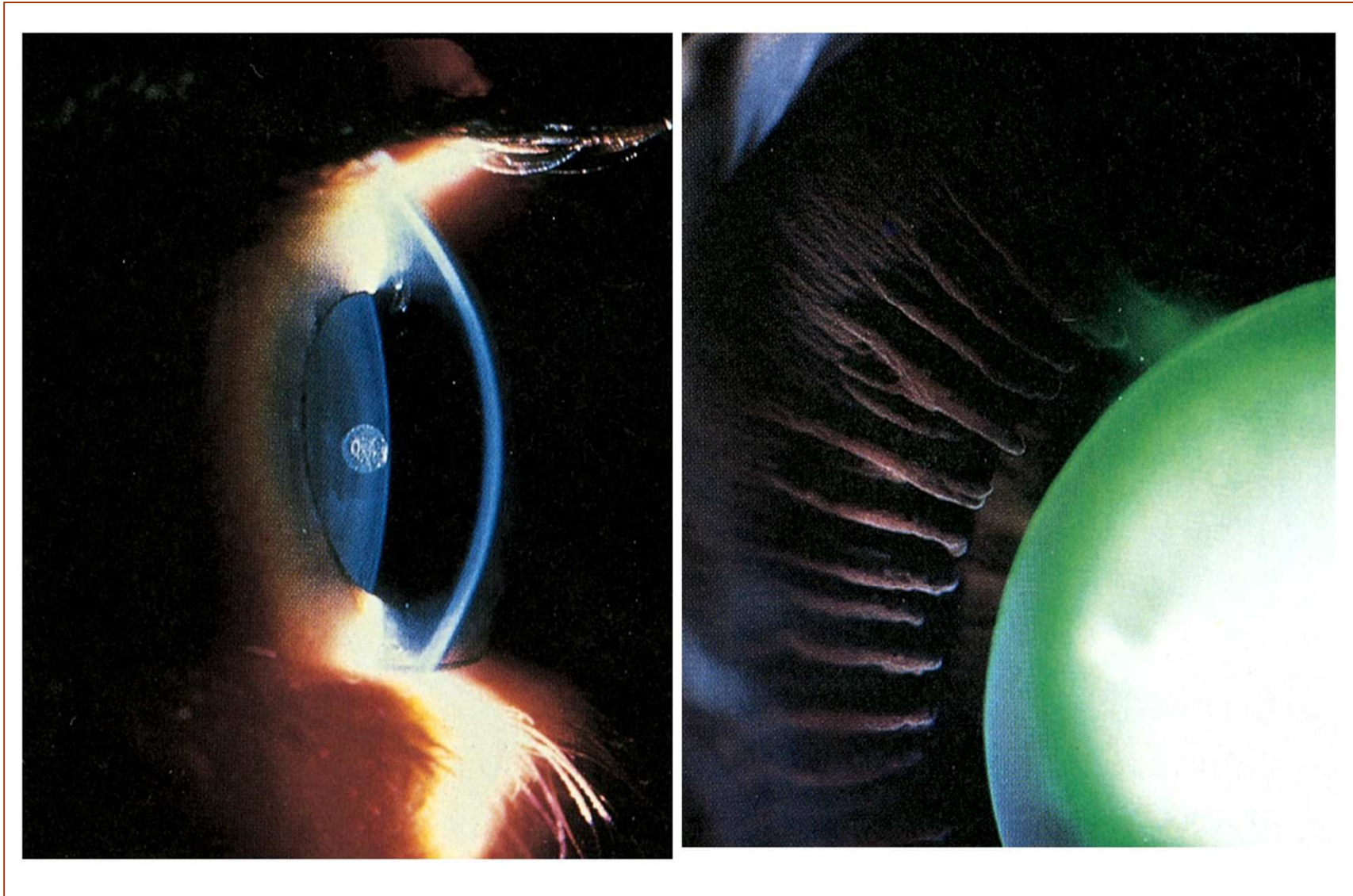


Olho



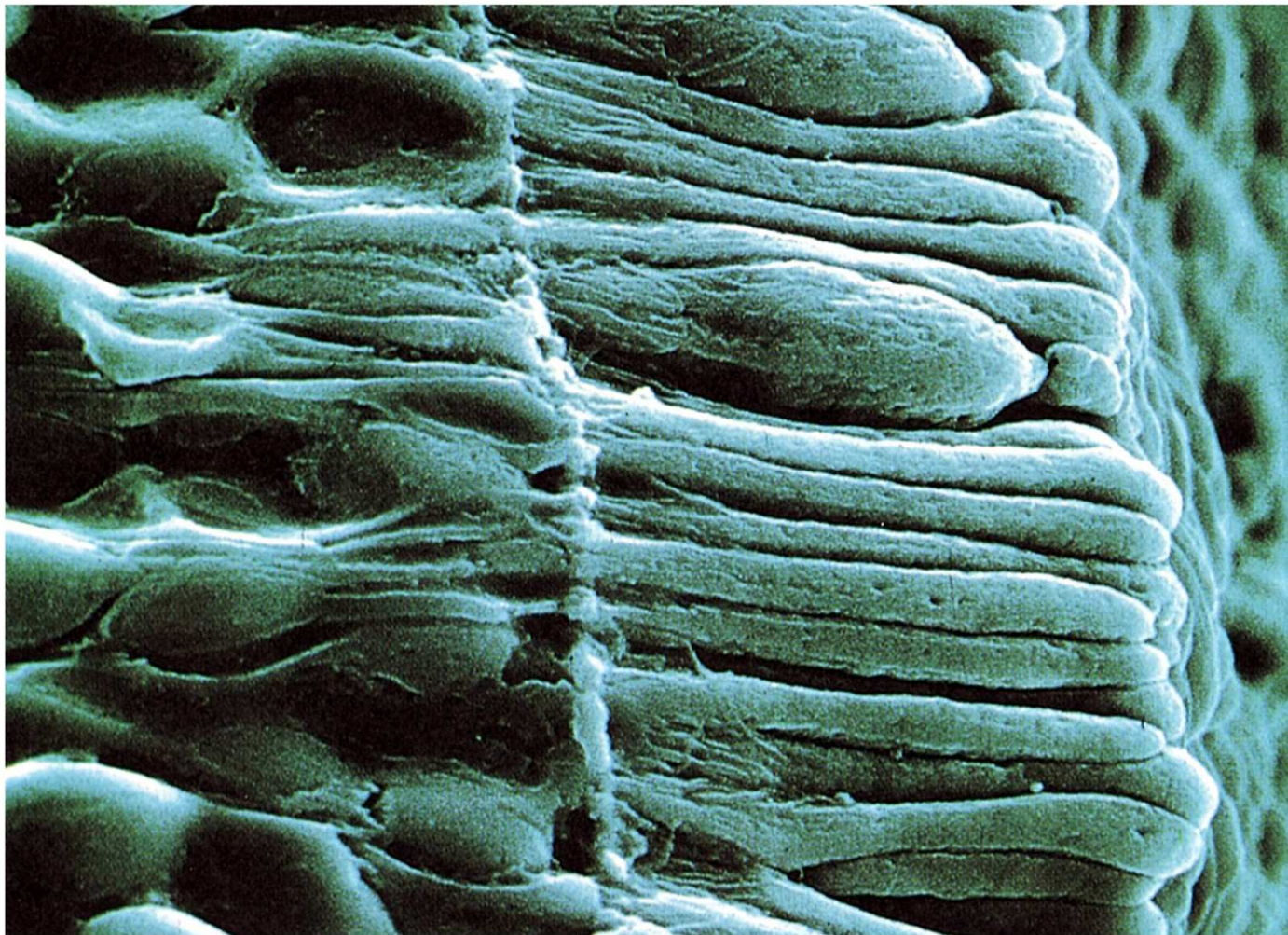


Olho humano de perfil e cristalino





Bastonetes e cones do olho

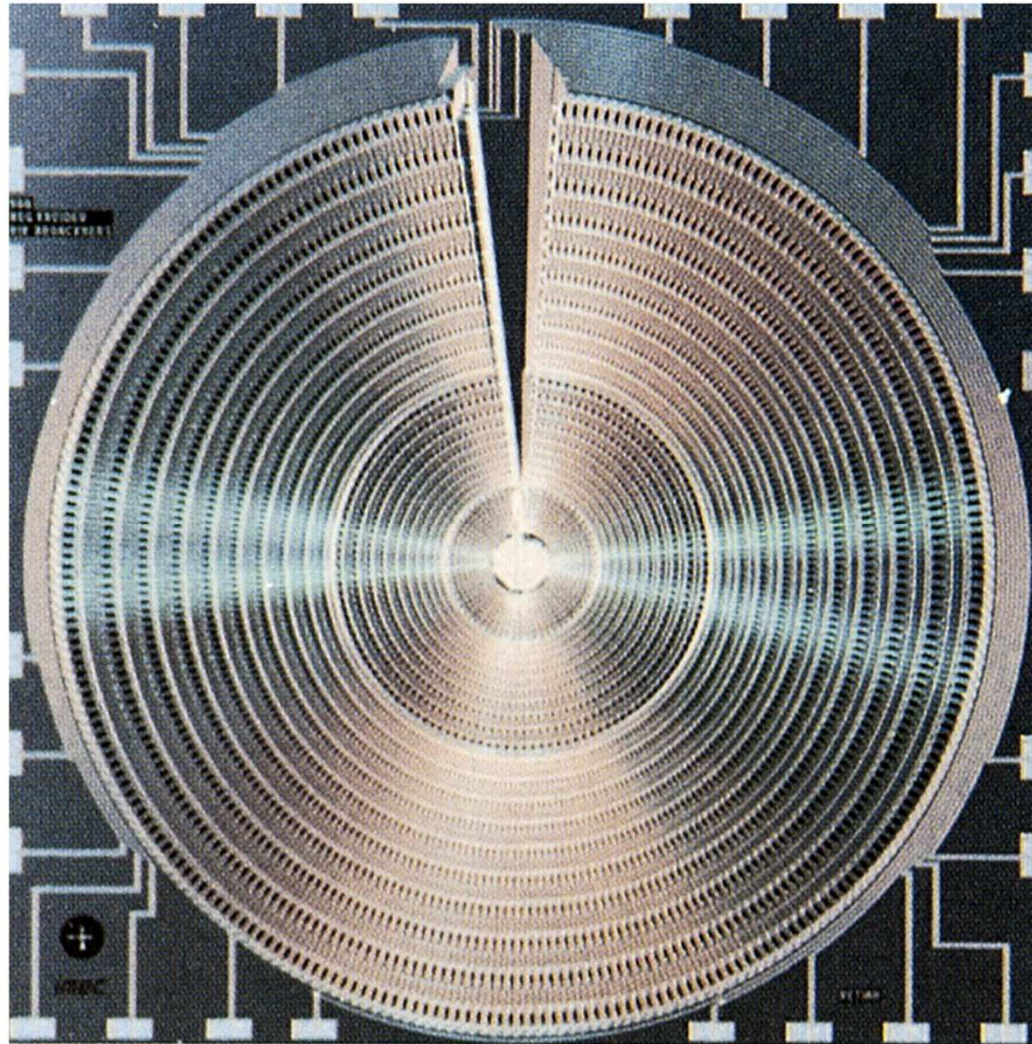


O olho tem cerca de 120 milhões de bastonetes e 7 milhões de cones.





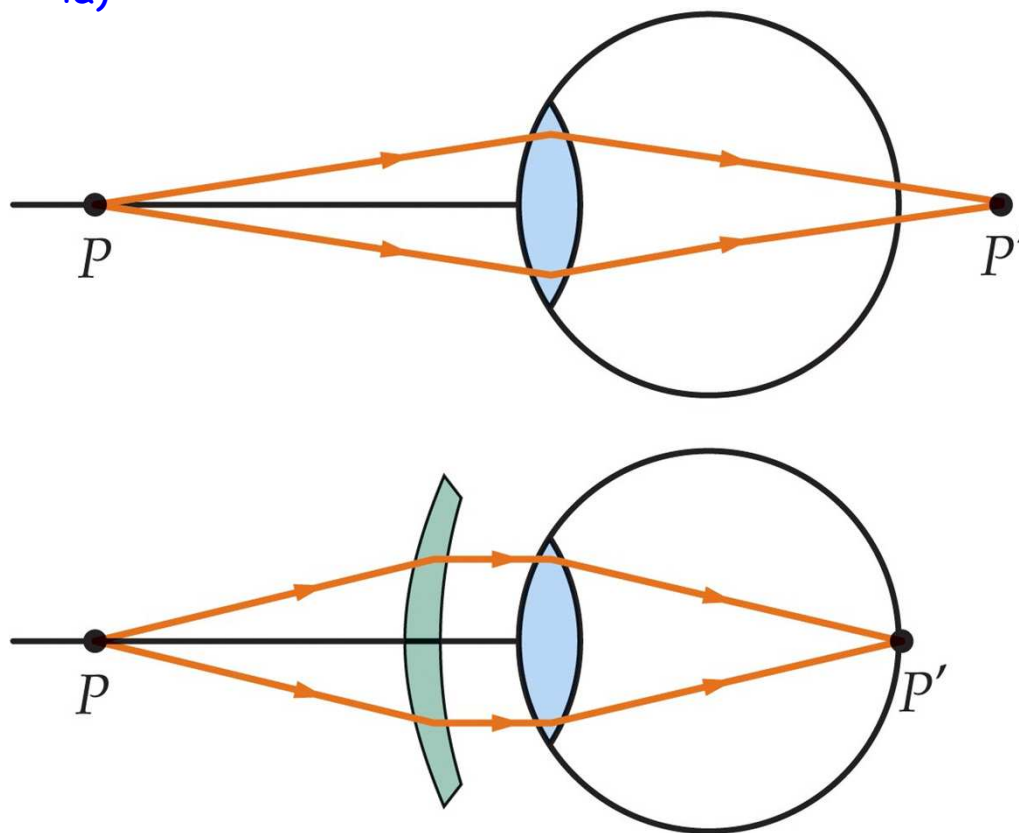
Rede neural para simular o olho humano





Hipermetropia

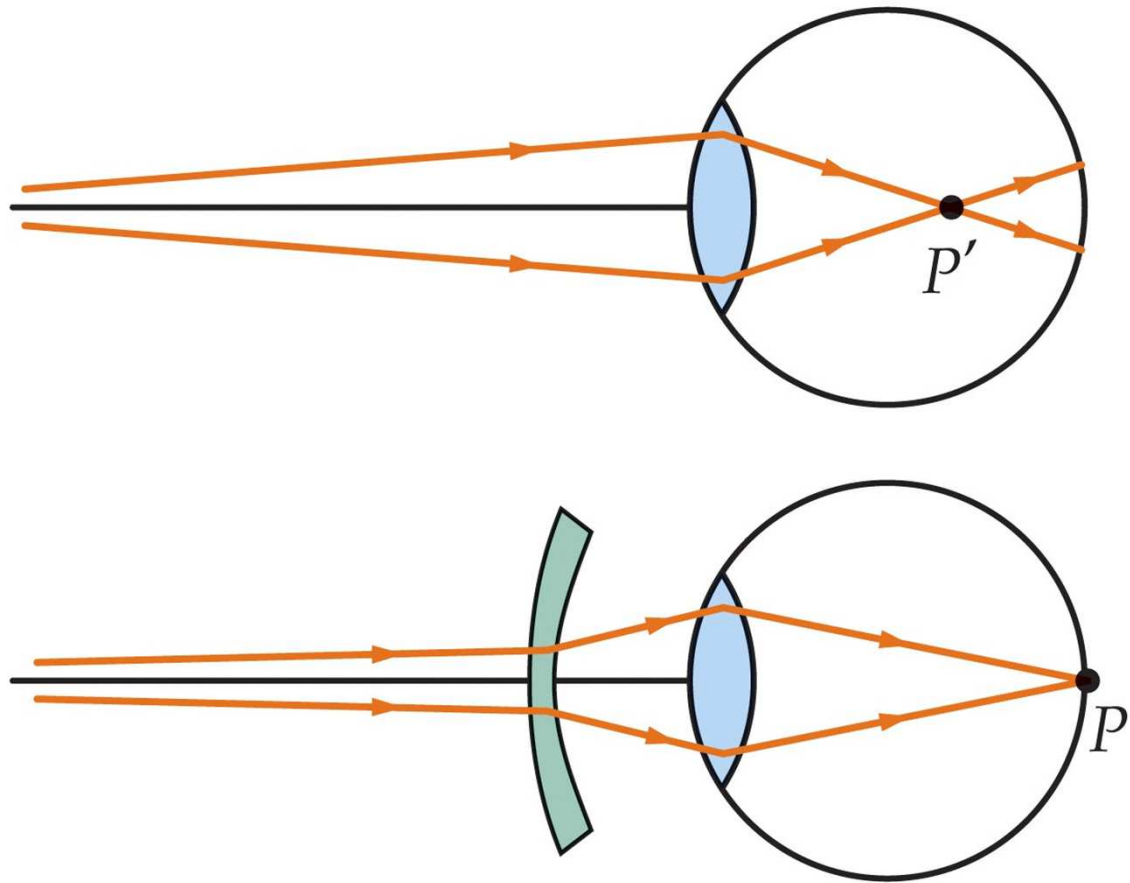
Hipermetropia: s. f. (medic.) defeito da visão, geralmente devido a insuficiente convergência do cristalino, caracterizado pela formação da imagem dos objectos, considerados no infinito (óptico), para além da retina; o m. q. hiperopia. (De hipermetrope + -ia)



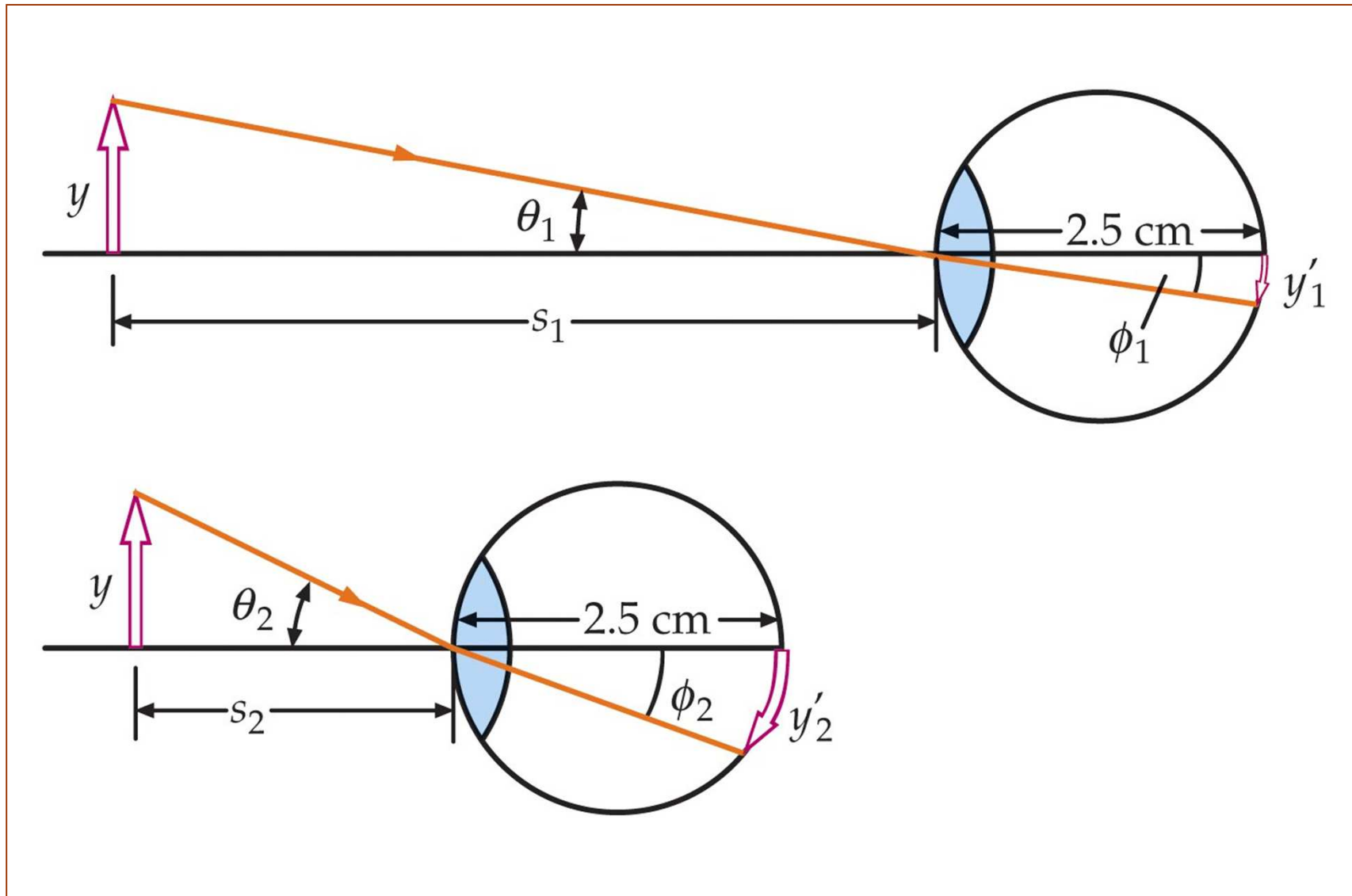


Miopia

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

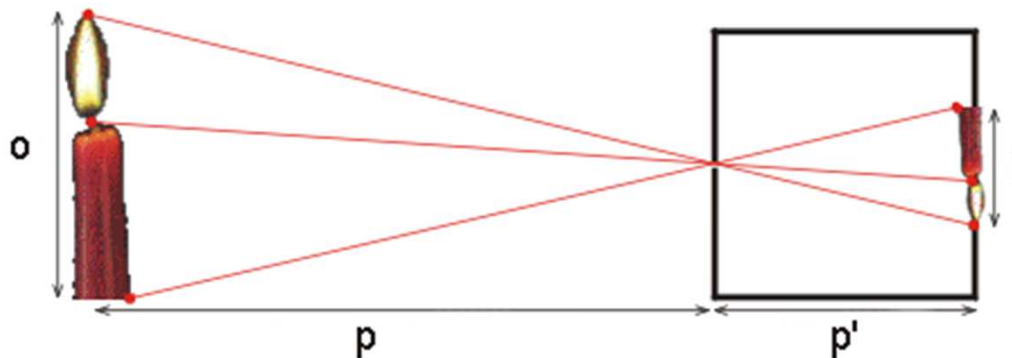
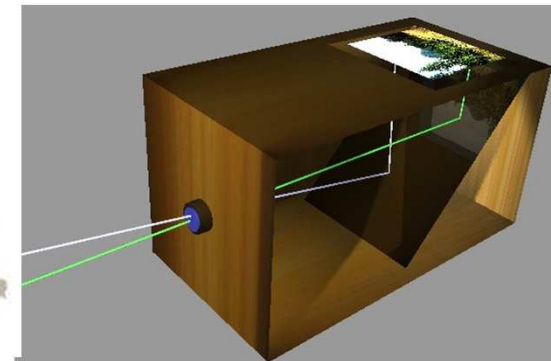
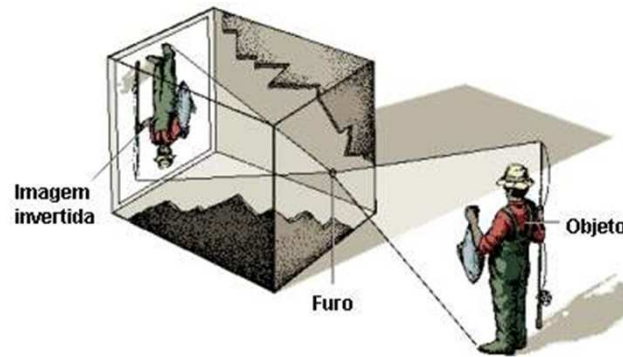
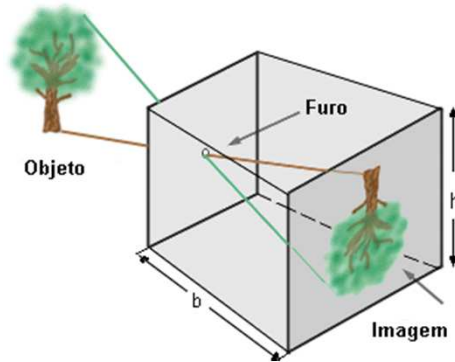




Câmara escura

Câmara escura: (fís.) caixa paralelepédica, 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

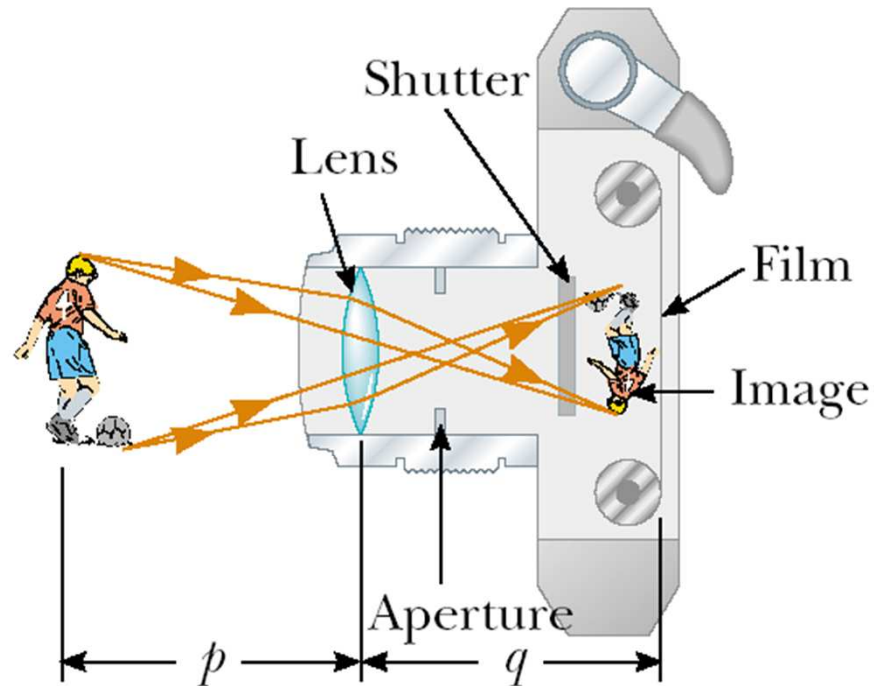


Figure 36.36 Cross-sectional view of a simple camera. Note that in reality, $p \gg q$.

O número- f , $f/\#$, também representado N :

$$f\text{-number} \equiv \frac{f}{D}$$

Intensidade da luz incidente no filme

$$I \propto \frac{1}{(f/D)^2} \propto \frac{1}{(f\text{-number})^2}$$

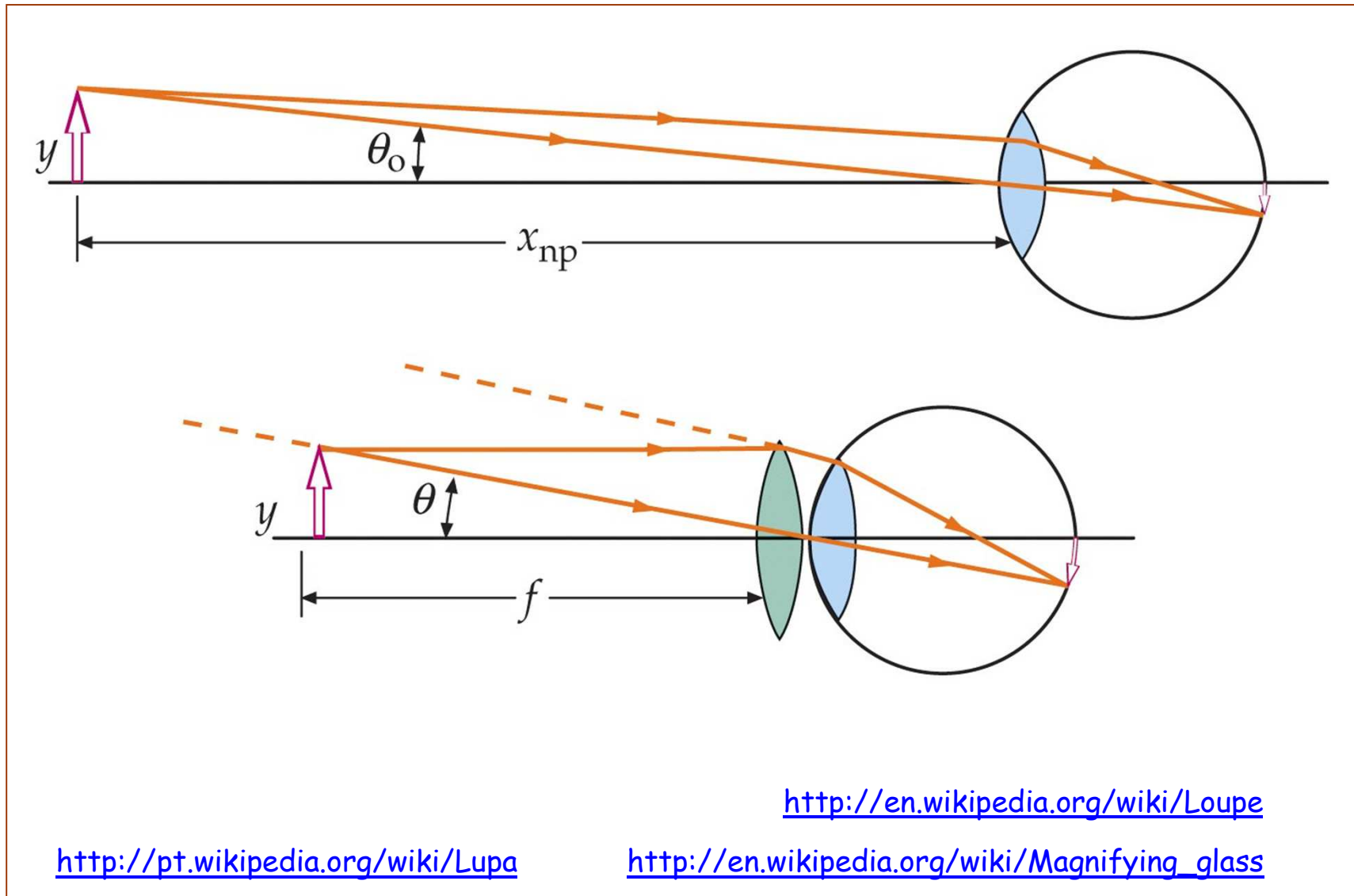
onde f representa a distância focal e D é o diâmetro da pupila de entrada.

<http://en.wikipedia.org/wiki/F-number>





Lupa



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

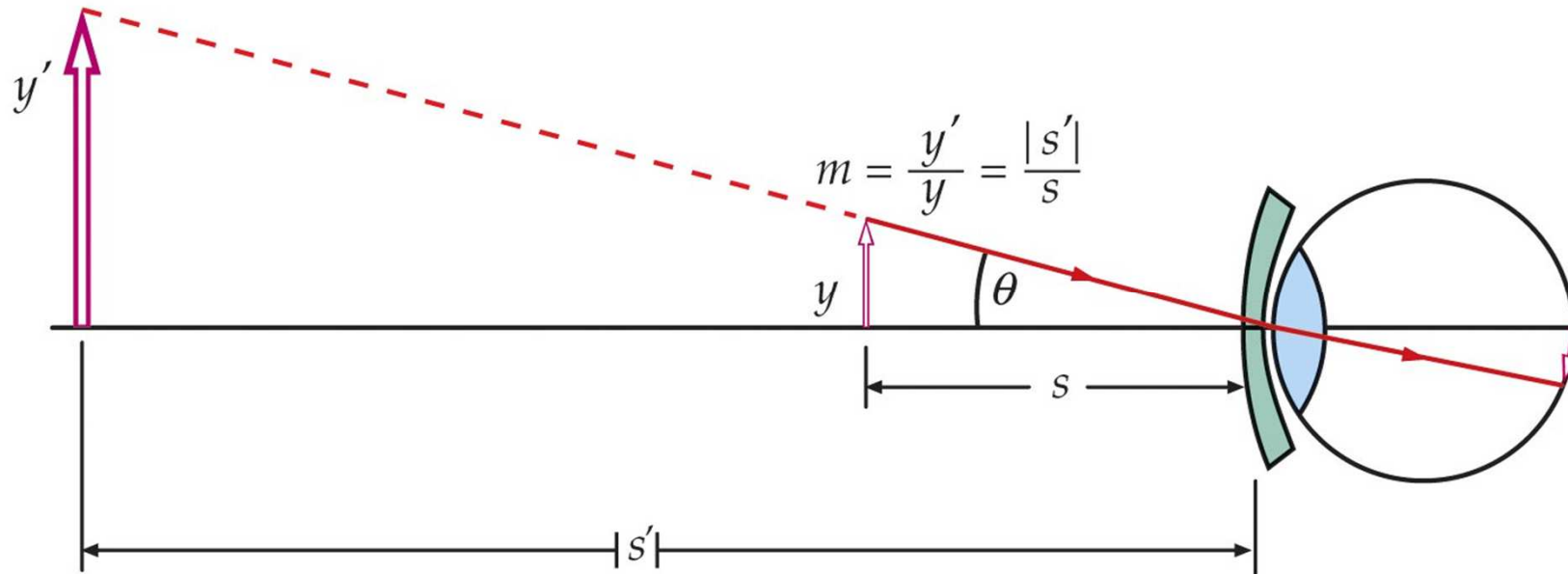
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lupa>

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





Lupa (2)



Poder de ampliação da lupa

$$m_{\min} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{25 \text{ cm}}{f}$$



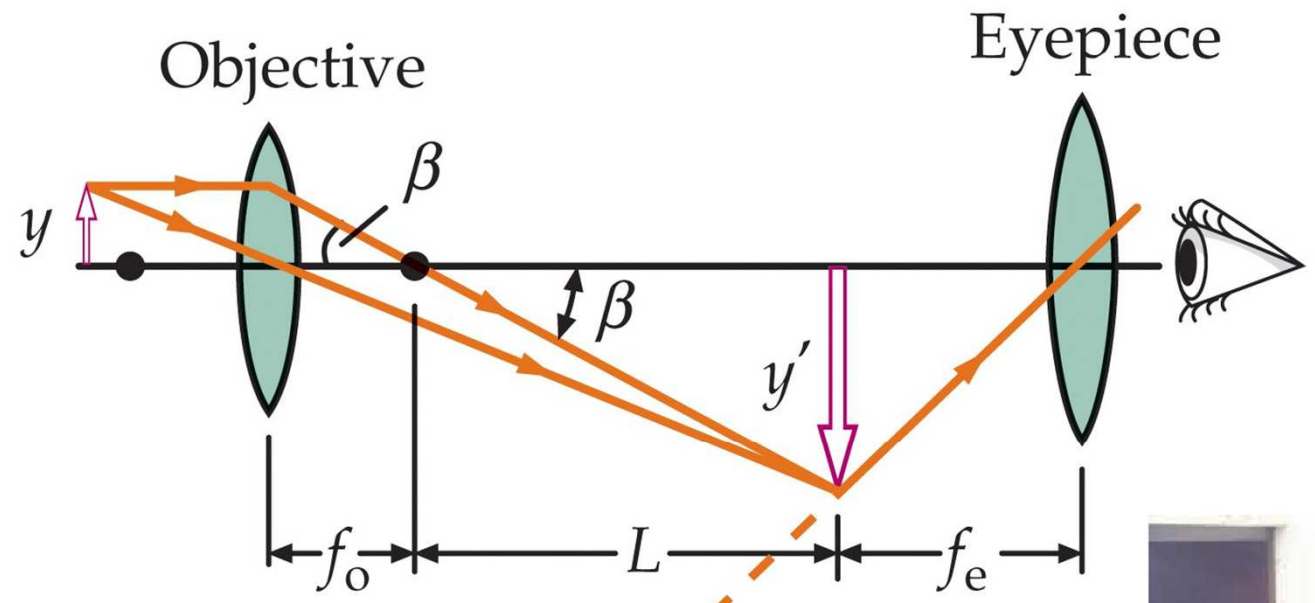
George Semple

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

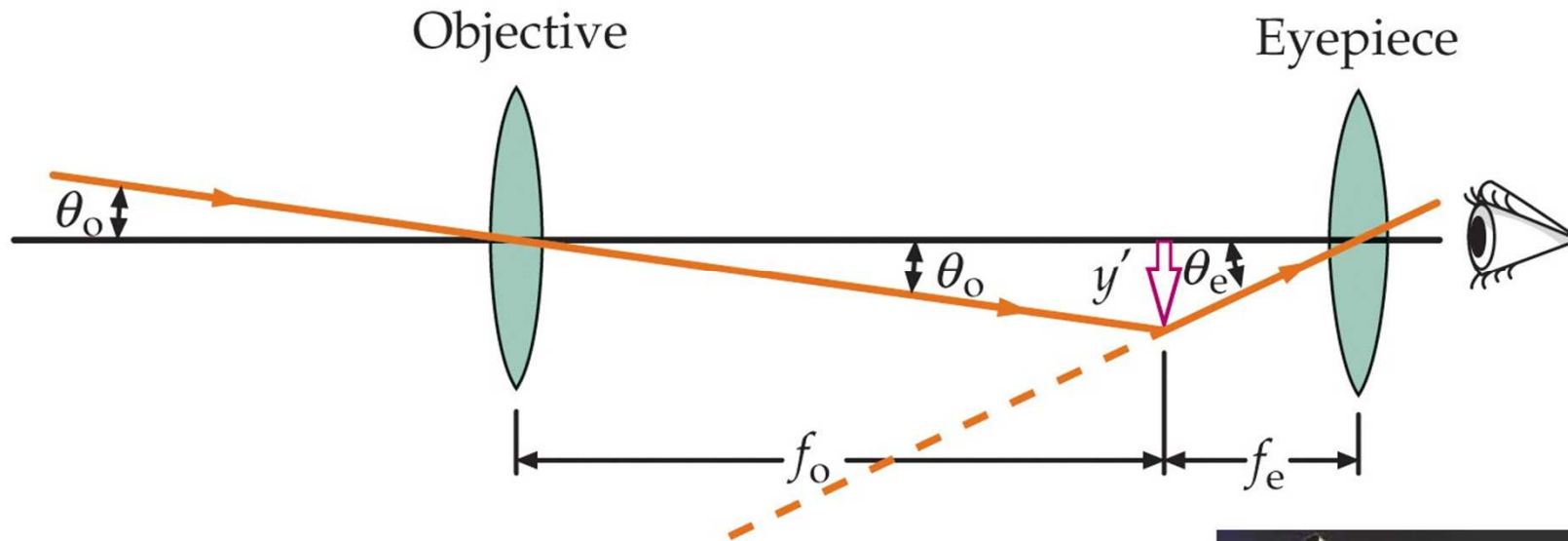
L : comprimento do tubo



© Tony Freeman/Photo Edit



Telescópio



Poder ampliador de um telescópio

$$M = \frac{\theta_e}{\theta_o} = -\frac{f_o}{f_e}$$





Telescópios refractores

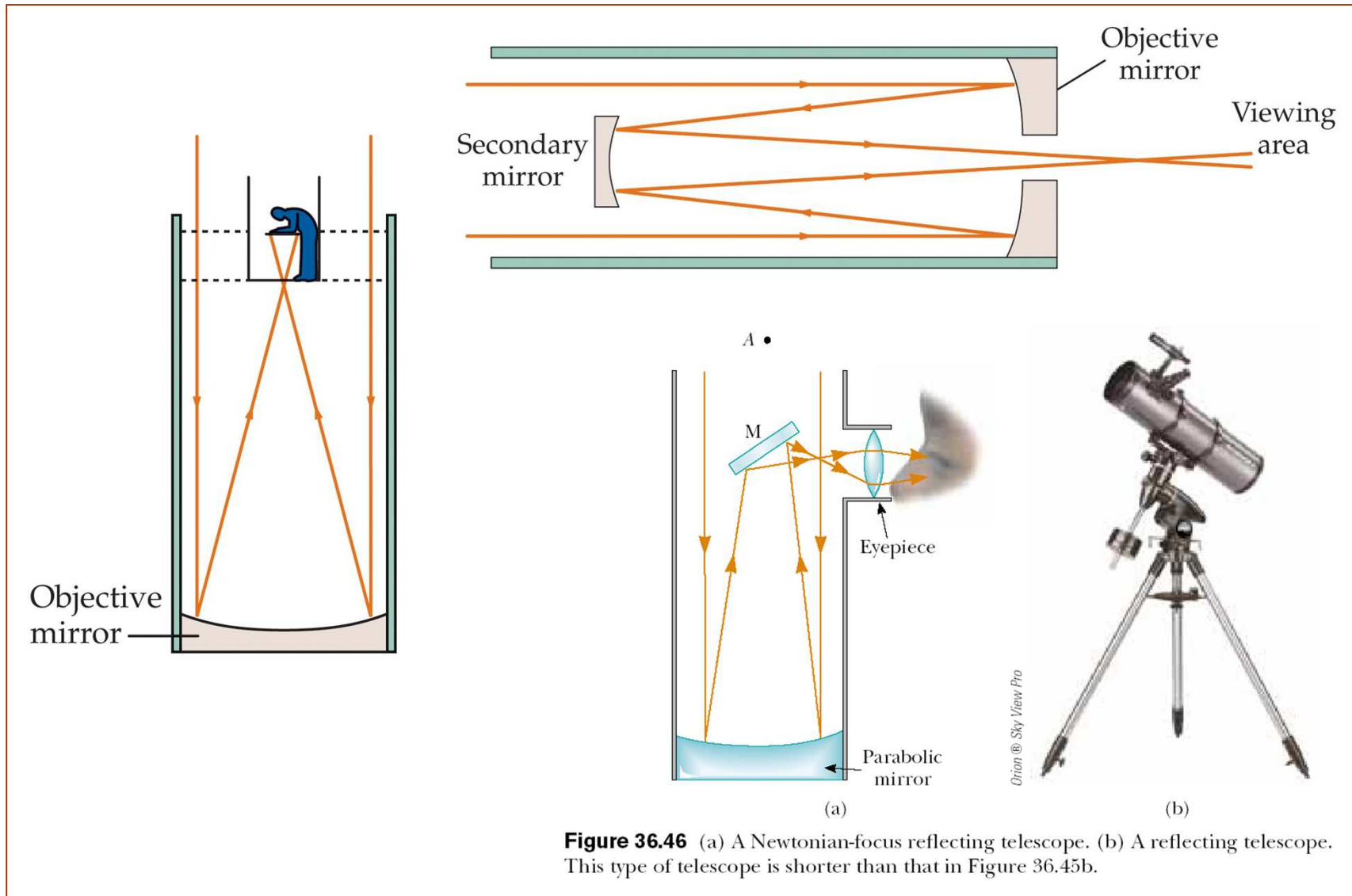
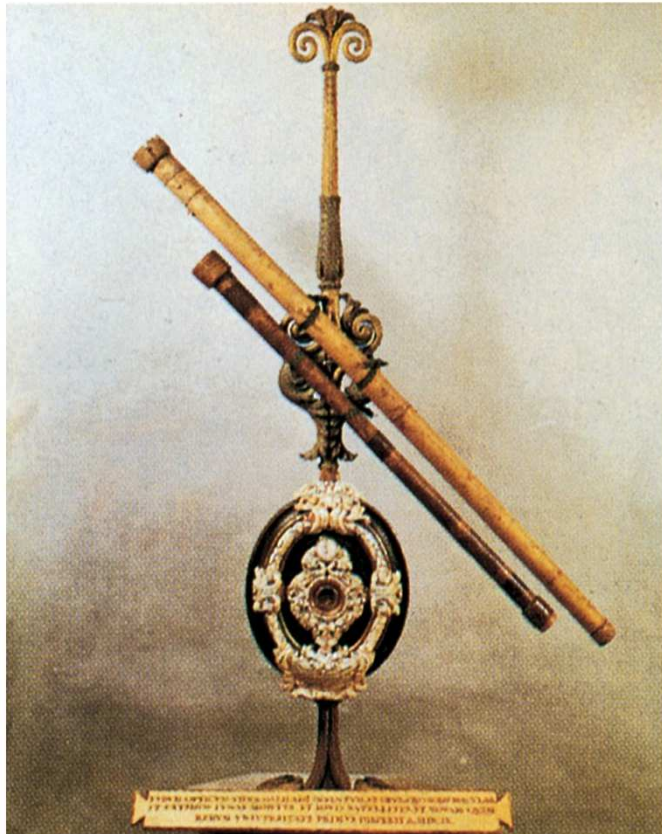


Figure 36.46 (a) A Newtonian-focus reflecting telescope. (b) A reflecting telescope. This type of telescope is shorter than that in Figure 36.45b.



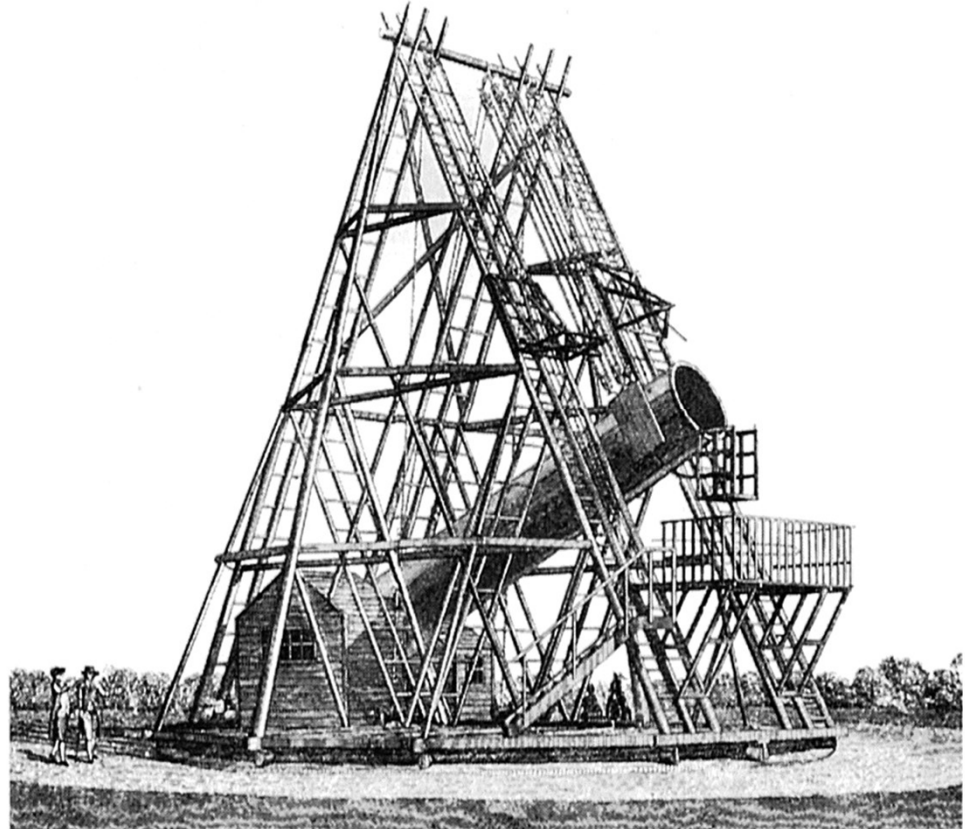


Telescópios históricos



Telescópio usado por Galileu para observar Júpiter e as suas luas, a Lua, etc.

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



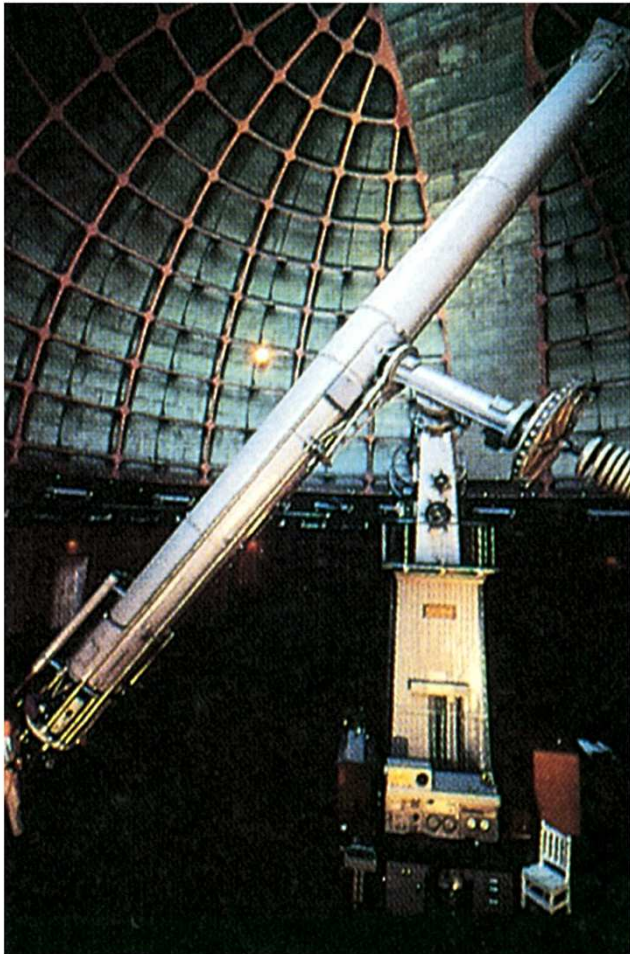
Friedrich Wilhelm Herschel

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

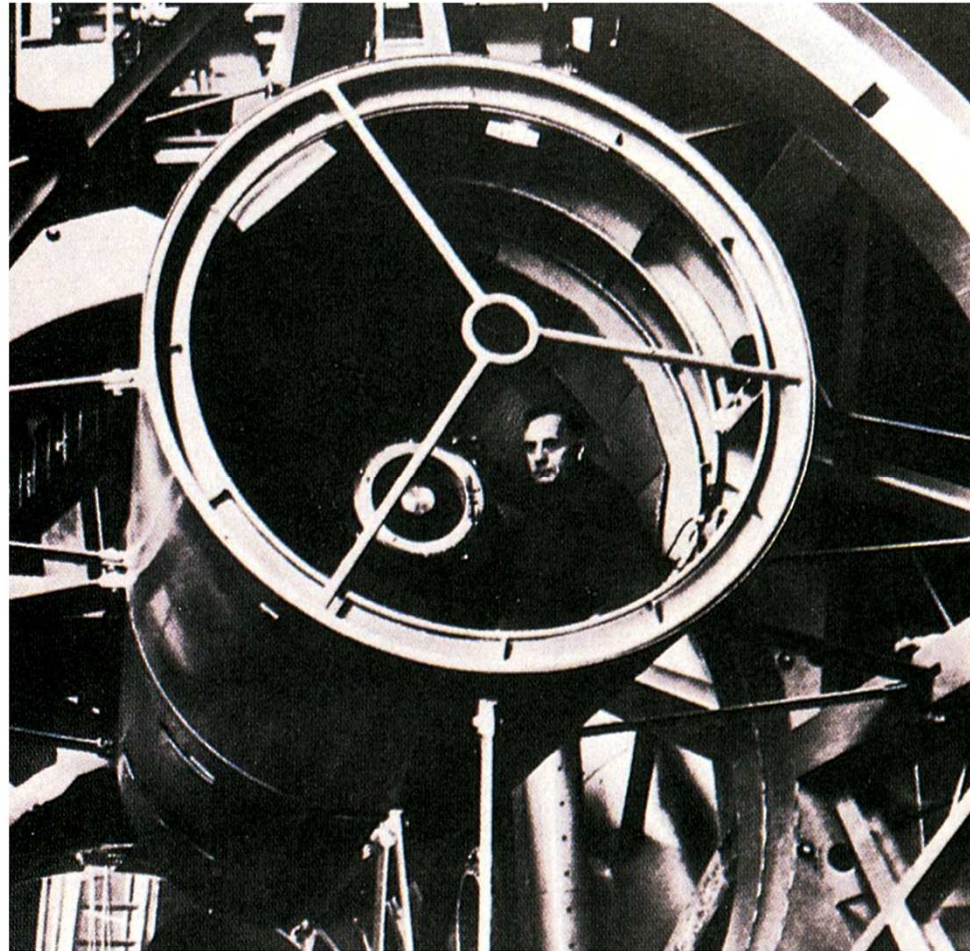




Telescópios históricos (2)



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/Radiotelesc%C3%B3pio_de_Arecibo

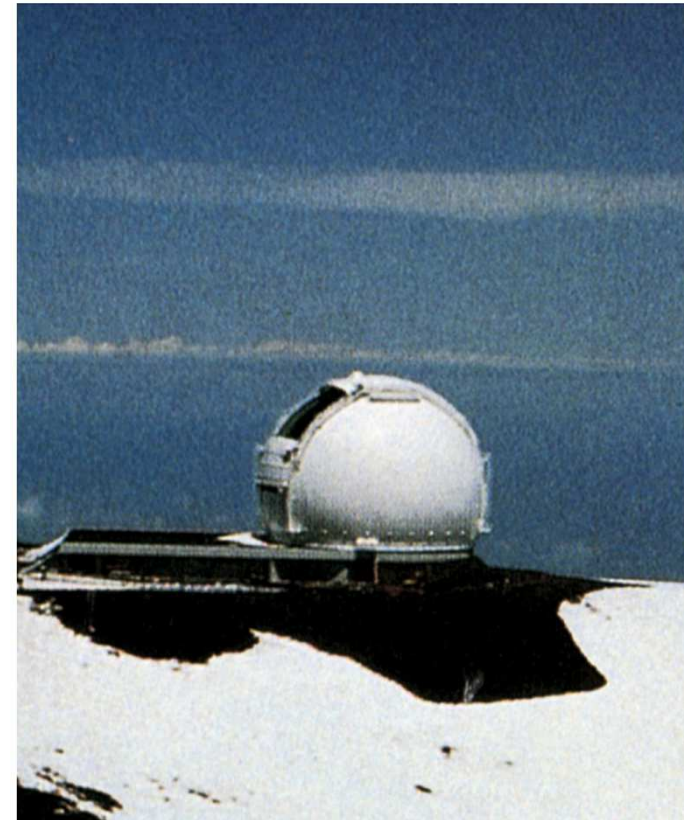




Telescópio modernos



Grande Telescópio das Canárias, com um espelho principal de 10,4 metros, é um dos maiores telescópios do mundo para o visível e infravermelho.



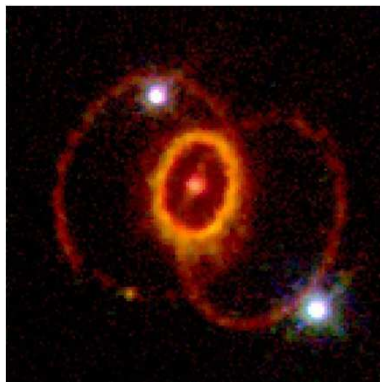
Observatório Keck,
Mauna Kea, Havaí

http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_dos_maiores_tesc%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/>

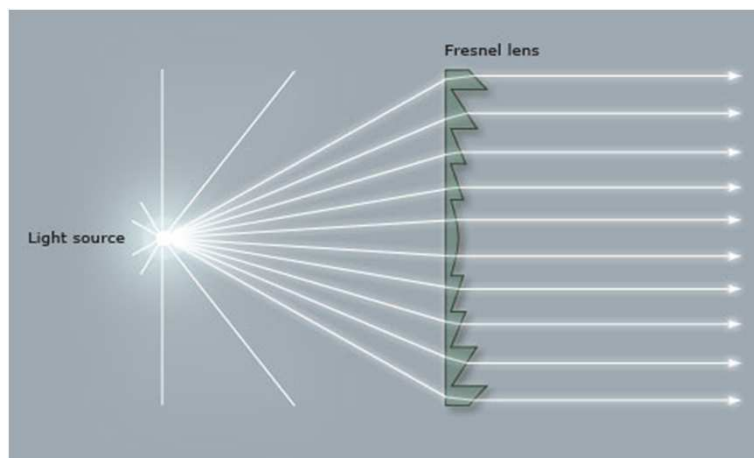
[Telescópio Espacial Hubble](#)

<http://glast.gsfc.nasa.gov/> <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=telescopio-glast-vai-captar-as-maiores-exposoes-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://br.geocities.com/saladefisica5/leituras/fresnel.htm>

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





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)

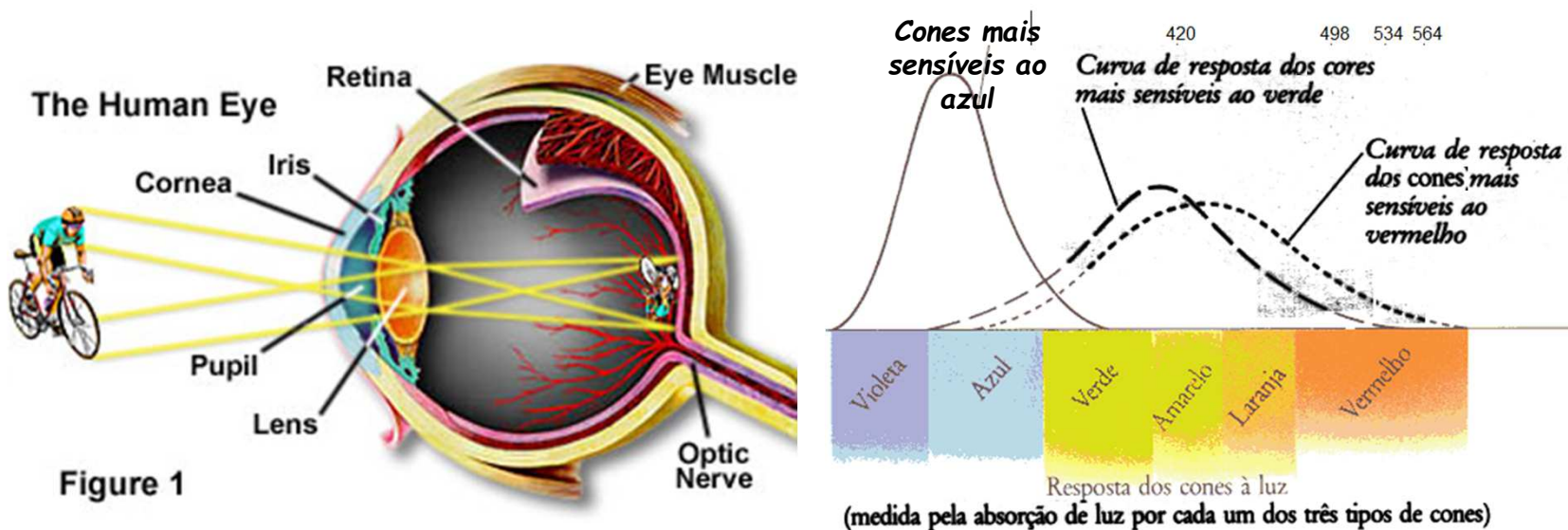




Luz visível e o olho humano

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.

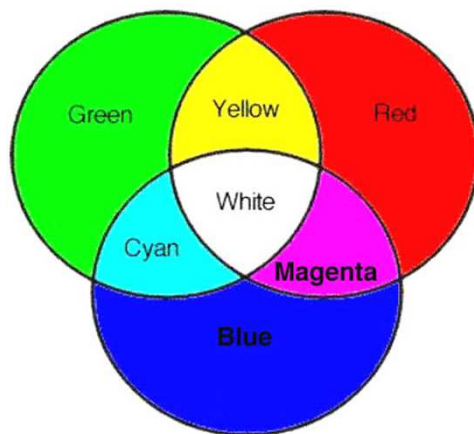
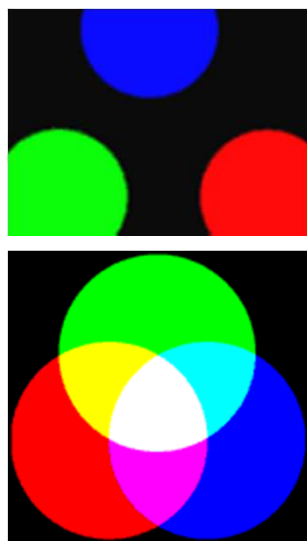
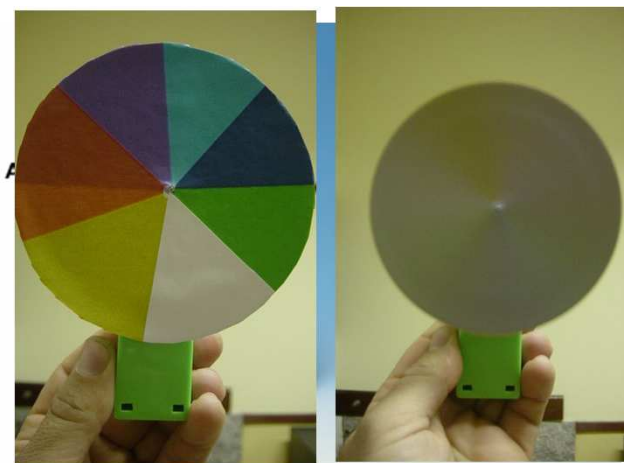


Figure 3. Additive colour mixtures of blue, green and red to produce cyan, magenta, yellow and white.

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



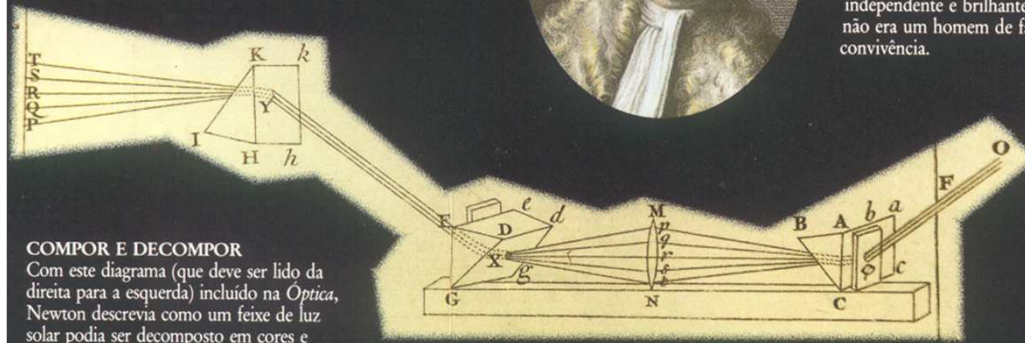
Recomposição da luz branca

prisma, formando um espectro. O espectro é projectado num ecrã 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 trabalhos científicos escritos desde as suas leis de movimento que investigava a luz. Em 1660 fundou a mais antiga associação científica da Grã-Bretanha (fundada em 1660). Newton, um pensador independente e brilhante, não era um homem de fácil convivência.



COMPOR E DECOMPOR
Com este diagrama (que deve ser lido da direita para a esquerda) incluído na *Optica*, Newton descrevia como um feixe de luz solar podia ser decomposto em cores e



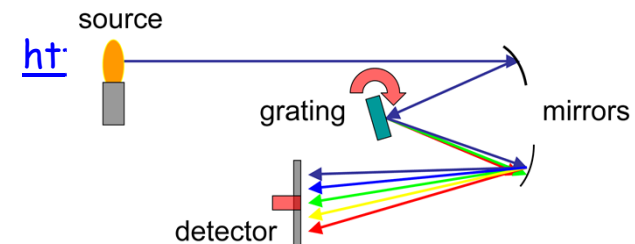
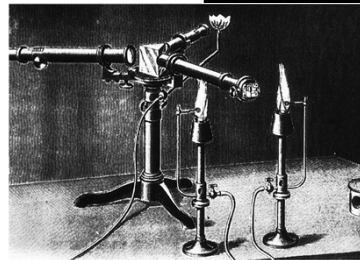
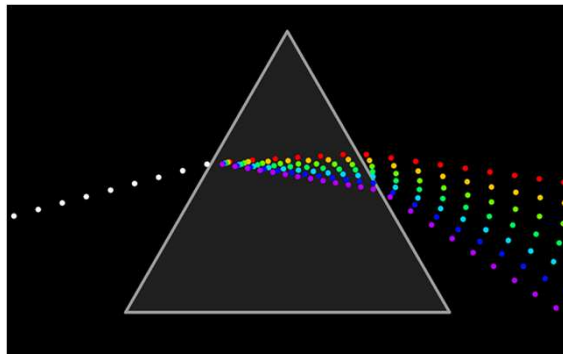
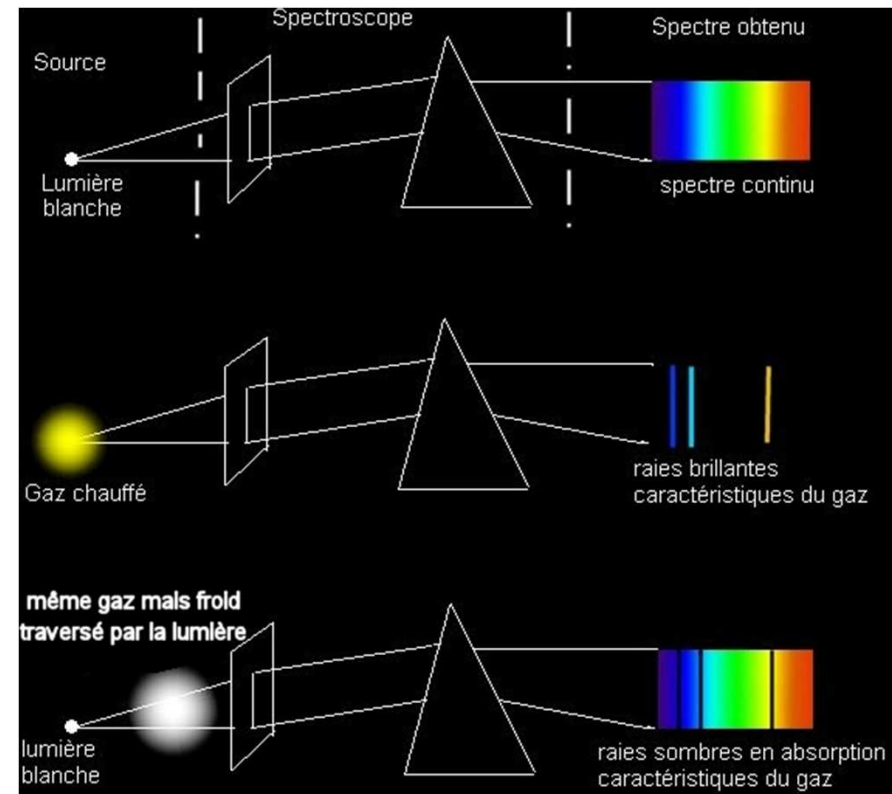


Espectroscopia

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>



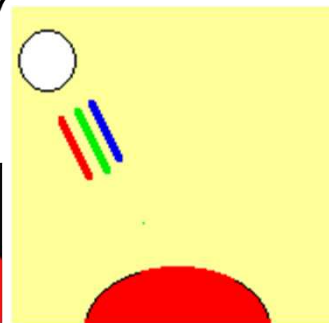
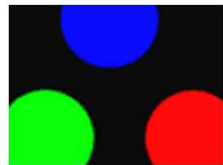
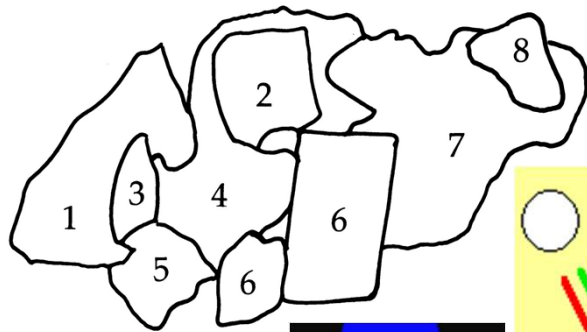
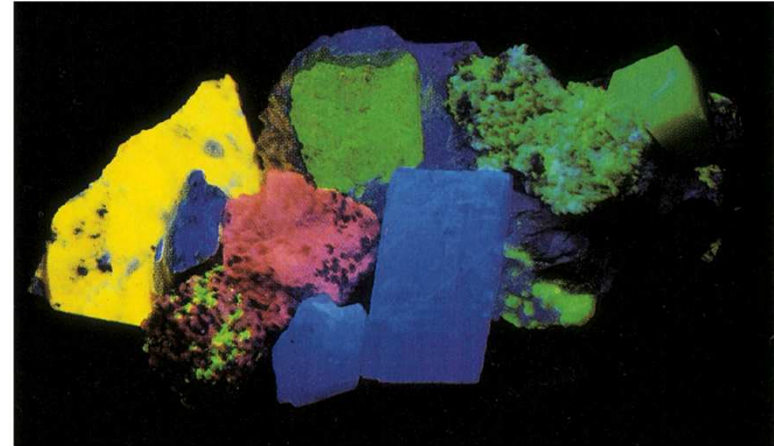


A cor de um corpo depende das condições de iluminação

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 e leis da óptica geométrica

-

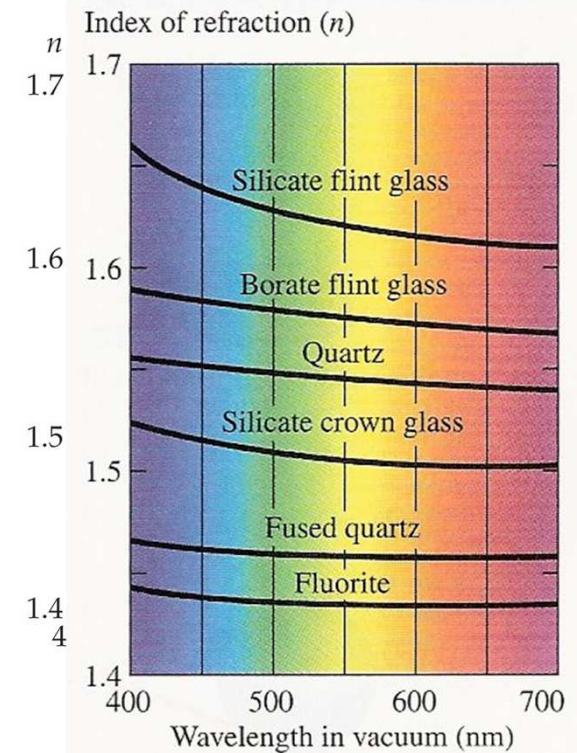
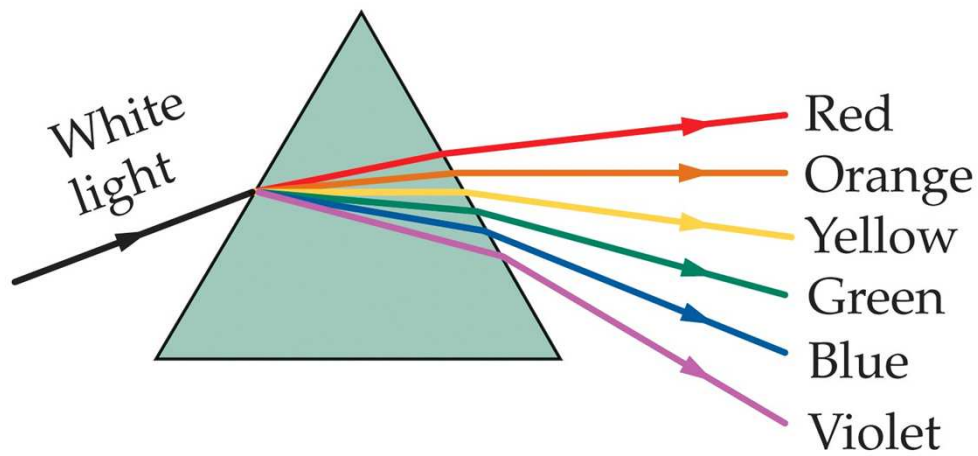
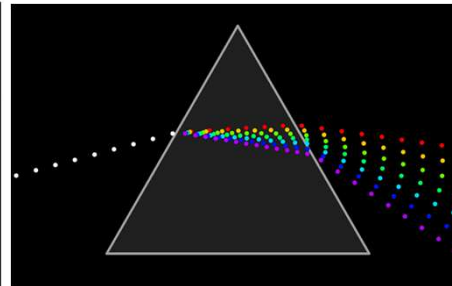
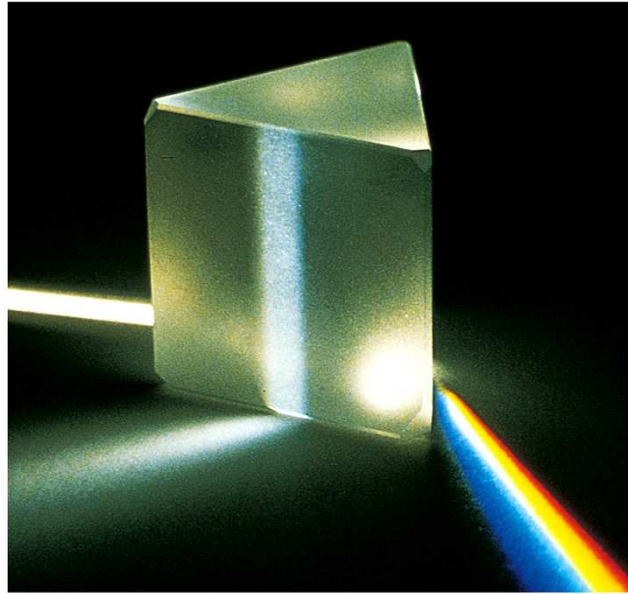
Dispersão da luz

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. *dispersione-*, «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 refacção, 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

The diagram illustrates the formation of a rainbow. On the left, a person in a yellow raincoat holds a blue umbrella. White light rays from the sun enter water droplets. The rays are refracted, dispersed into their constituent colors (Red, Violet), and then reflected back out of the droplet. The diagram shows that light from a higher droplet is seen as red, while light from a lower droplet is seen as violet. Angles of 40° and 42° are marked for the rays. Two circular insets show the internal reflection within a droplet, with labels 'V' for violet and 'R' for red. Text labels include 'White', 'Violet', 'Red', 'This drop looks red', and 'This drop looks violet'.

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, ~42°.

This diagram shows 12 parallel rays entering a spherical water drop from the left. The rays are numbered 1 through 12. They are refracted at the entry point, reflect off the back surface of the drop, and are refracted again as they exit. Ray 7 is shown to emerge at the largest angle, approximately 42 degrees.

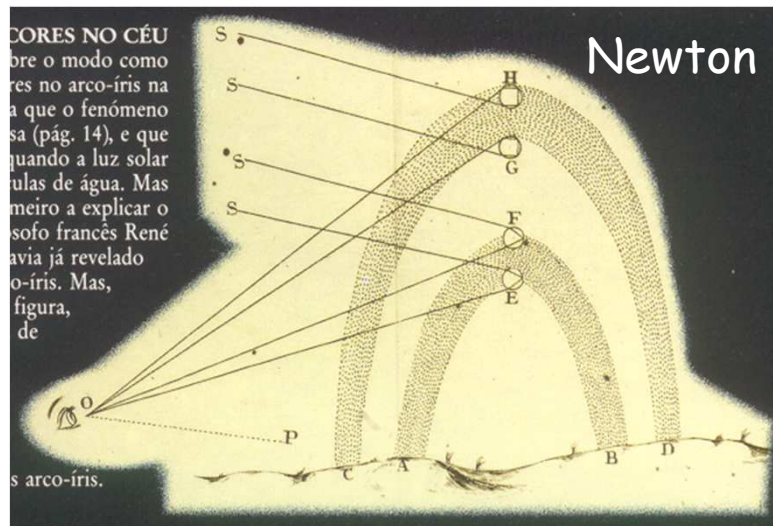
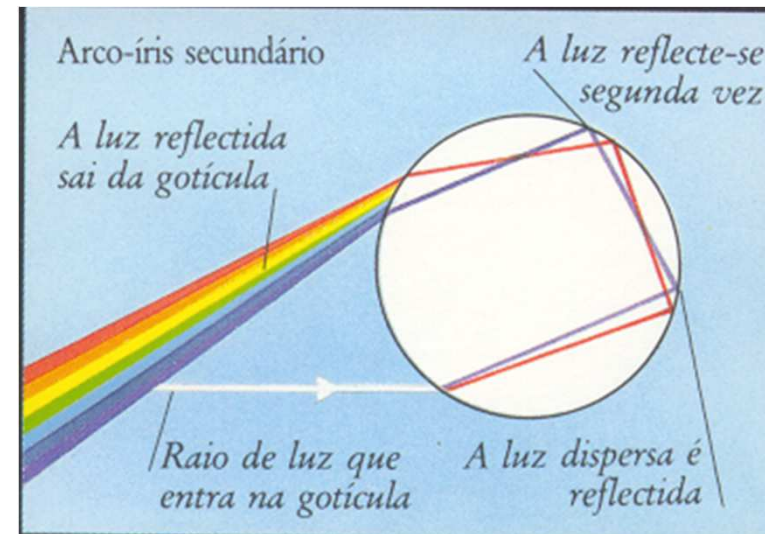
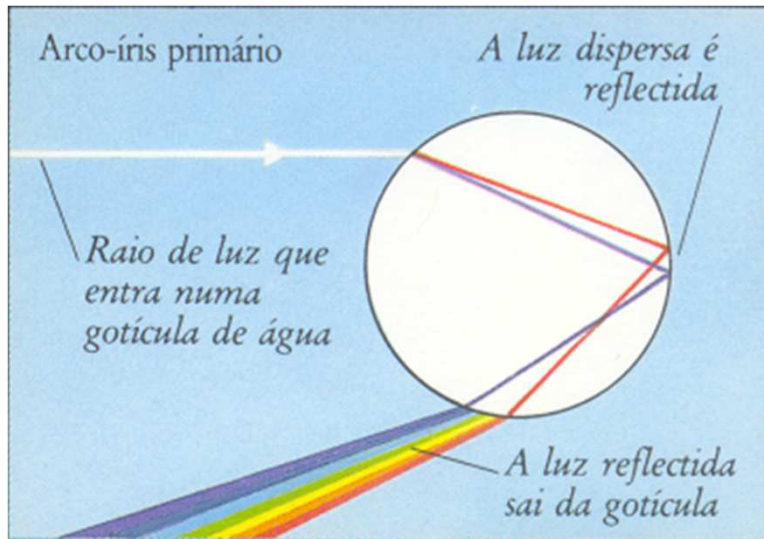
A luz do arco-íris é polarizada linearmente

This diagram shows a circular water droplet with a horizontal white arrow representing the incident light ray. A red line represents the path of the light ray inside the droplet, showing its reflection and refraction. The diagram illustrates how the light becomes linearly polarized.

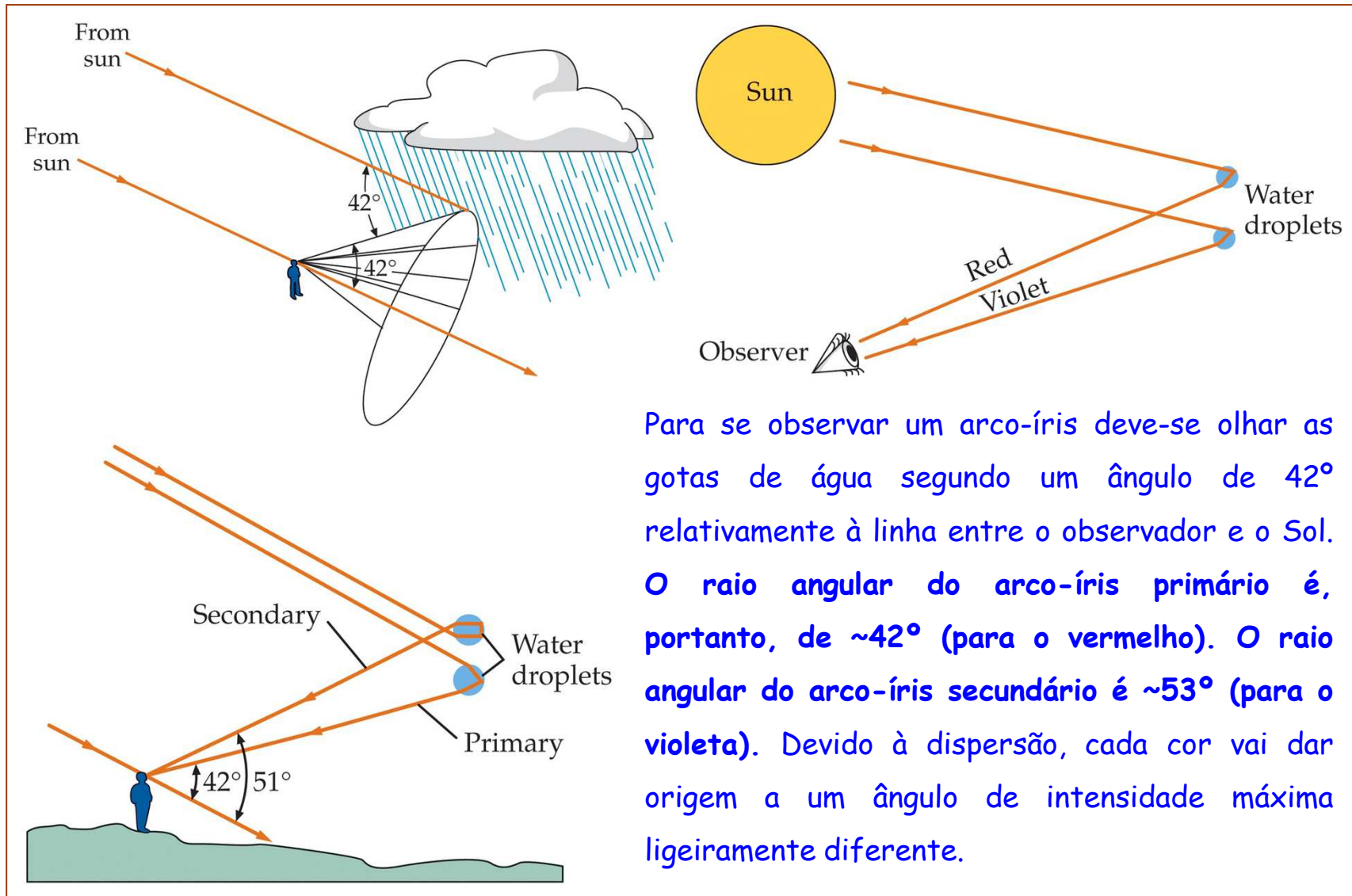




Arco-íris primário e secundário



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

$$\beta = \pi - \theta_1 - \alpha = \pi - \theta_1 - (\pi - 2\theta_2) = 2\theta_2 - \theta_1$$

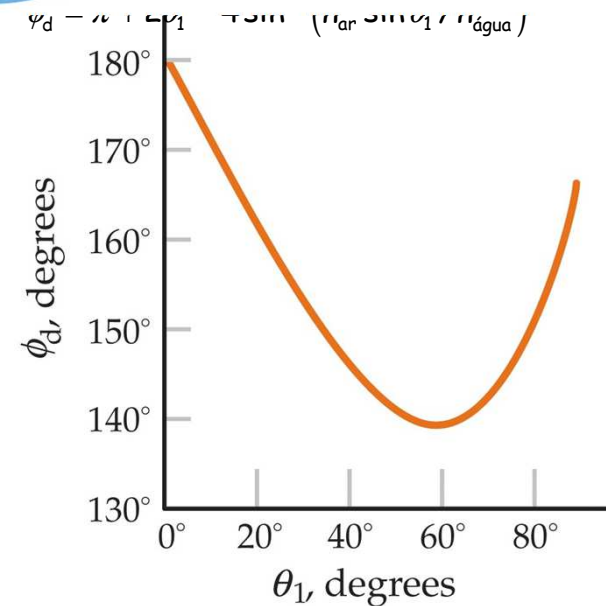
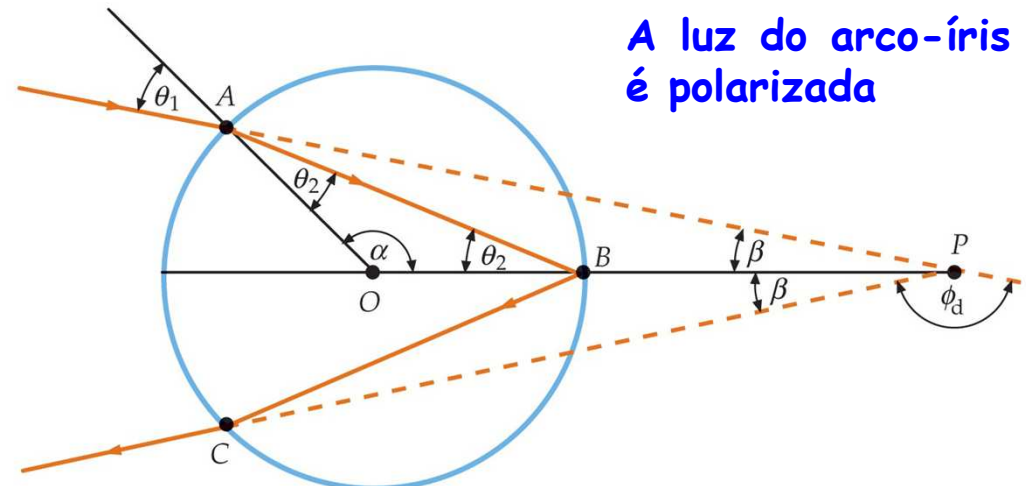
O ângulo de desvio ϕ_d , em termos do ângulo de incidência θ_1 é:

$$\phi_d = \pi - 2\beta = \pi - 4\theta_2 + 2\theta_1$$

$$\phi_d = \pi + 2\theta_1 - 4 \sin^{-1} (n_{\text{ar}} \sin \theta_1 / n_{\text{água}})$$

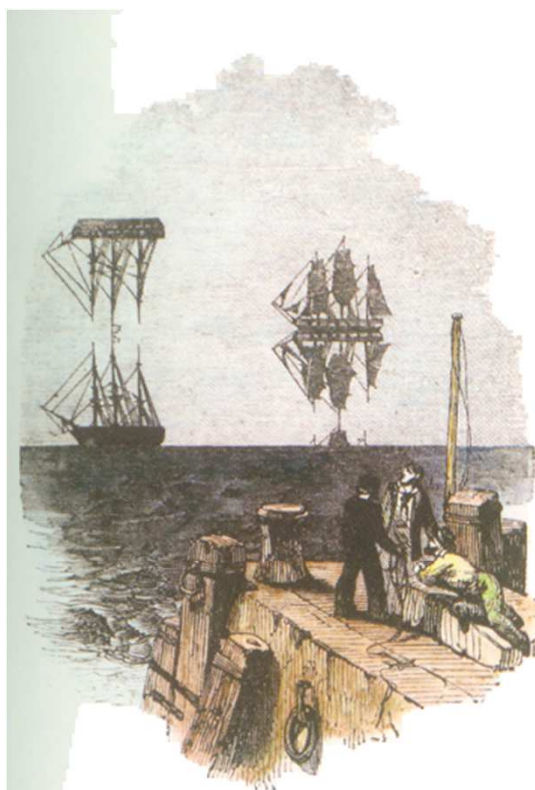
O raio angular da intensidade máxima é:

$$2\beta_{\text{max}} \approx \pi - \phi_{d,\text{min}} = 180^\circ - 138^\circ = 42^\circ$$



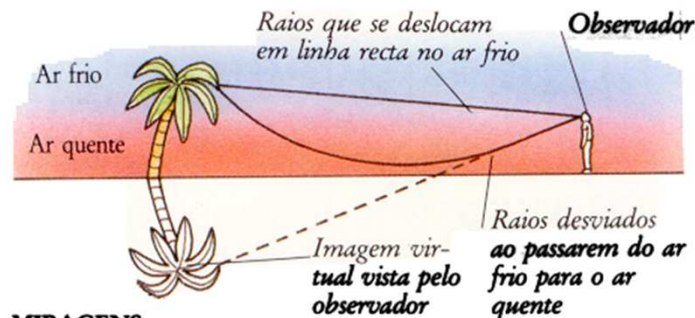


Miragens e aparições



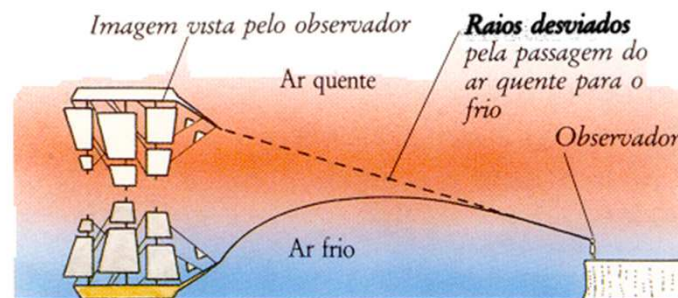
REFRACÇÃO NO AR

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).



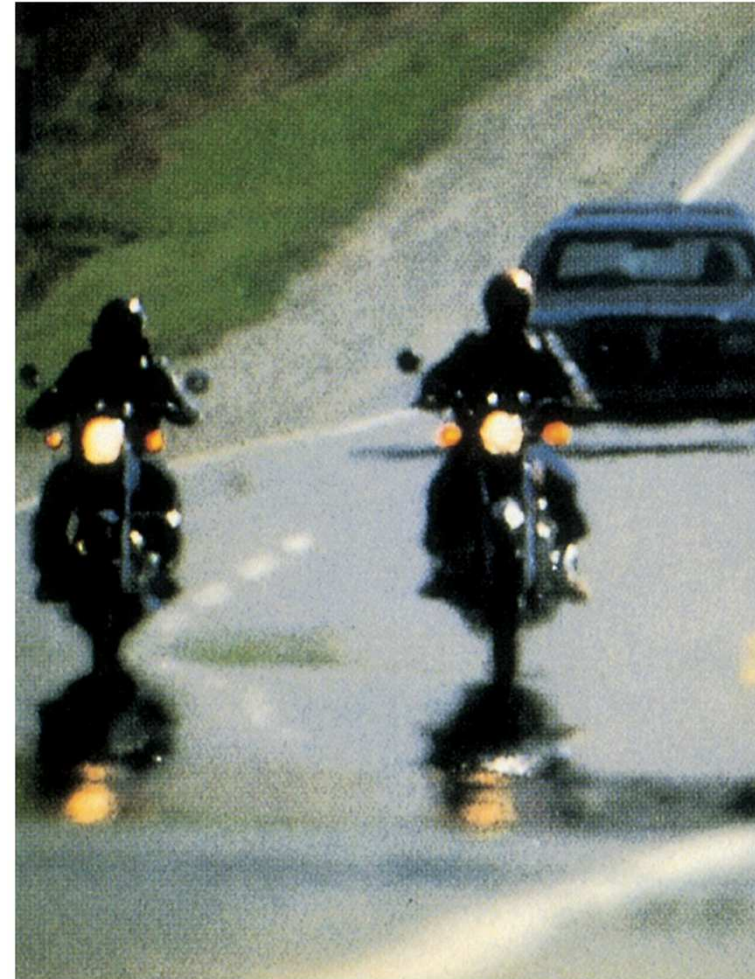
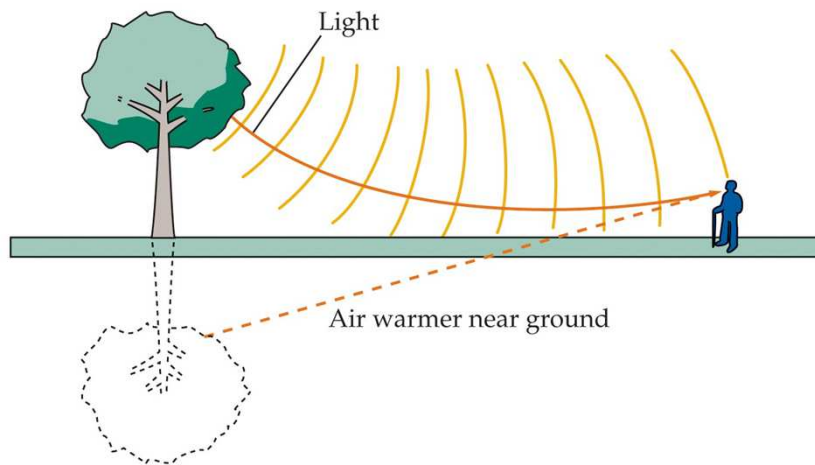
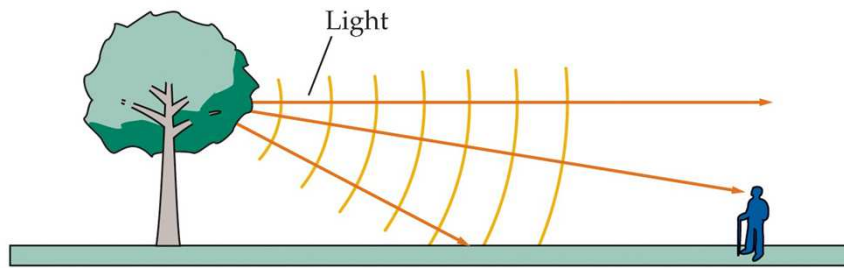
APARIÇÃO

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



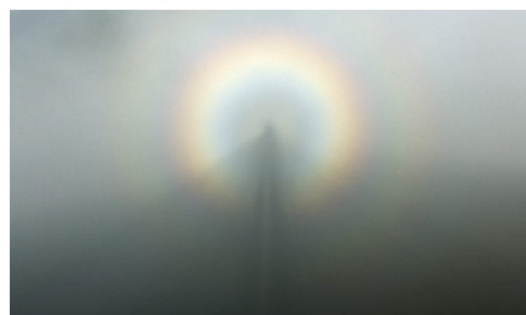
Miragens





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/>

<http://www.atoptics.co.uk/>





Outros fenómenos ópticos na atmosfera (2)



http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Atmospheric_optical_phenomena



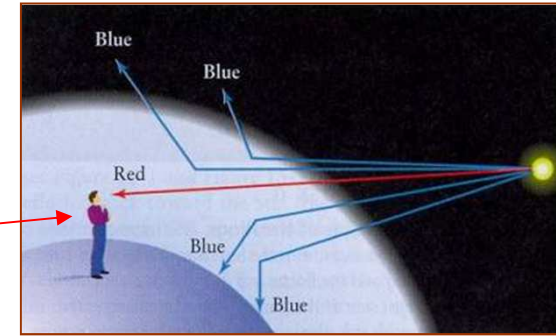
<http://www.atoptics.co.uk/>

<http://www.atoptics.co.uk/halo/pilpic0.htm>





O espalhamento da luz e a cor do céu



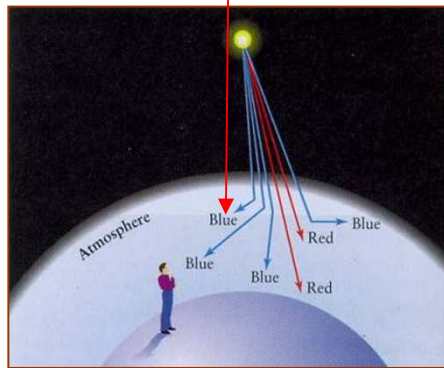
Intensidade da luz não polarizada espalhada por partículas de diâmetro d à distância R :

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6$$

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

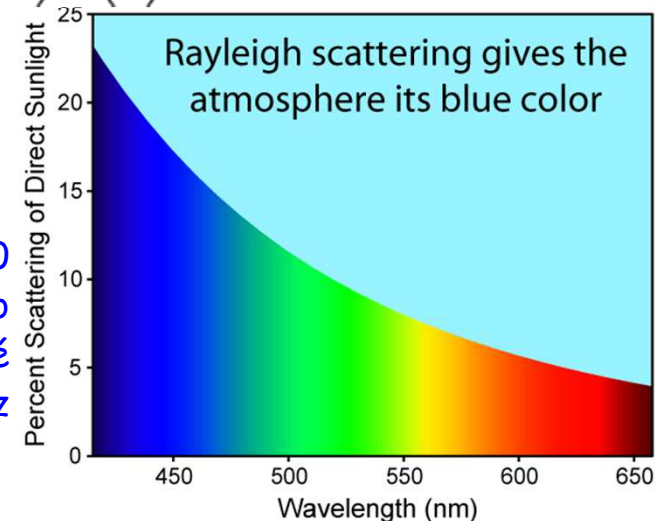
Na atmosfera da Terra:

$$\frac{I(\lambda_{azul})}{I(\lambda_{verm})} = \left(\frac{\lambda_{verm}}{\lambda_{azul}} \right)^4 \approx 10$$



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>





Ondas Electromagnéticas

Transmissão de informação usando sinais electromagnéticos - modulação

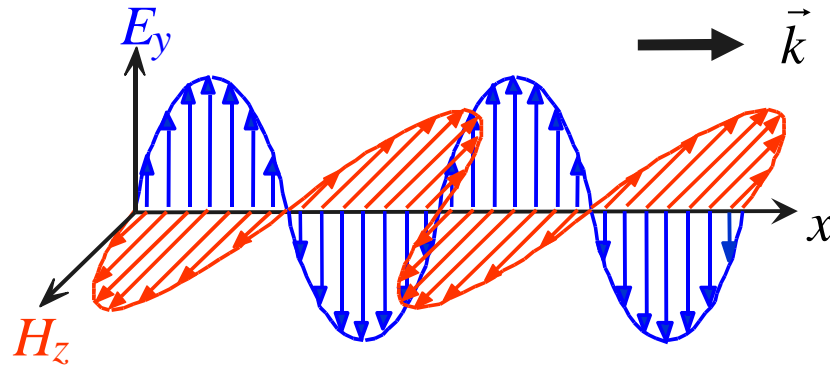
Modulação: alteração provocada, **propositadamente**, nas características de uma oscilação ou de uma onda (amplitude, frequência, etc.) de forma a introduzir informação numa onda sinusoidal (portadora); processo de adicionar «sinais» (**informação**) a uma onda de frequência muito superior (onda **portadora**) 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.

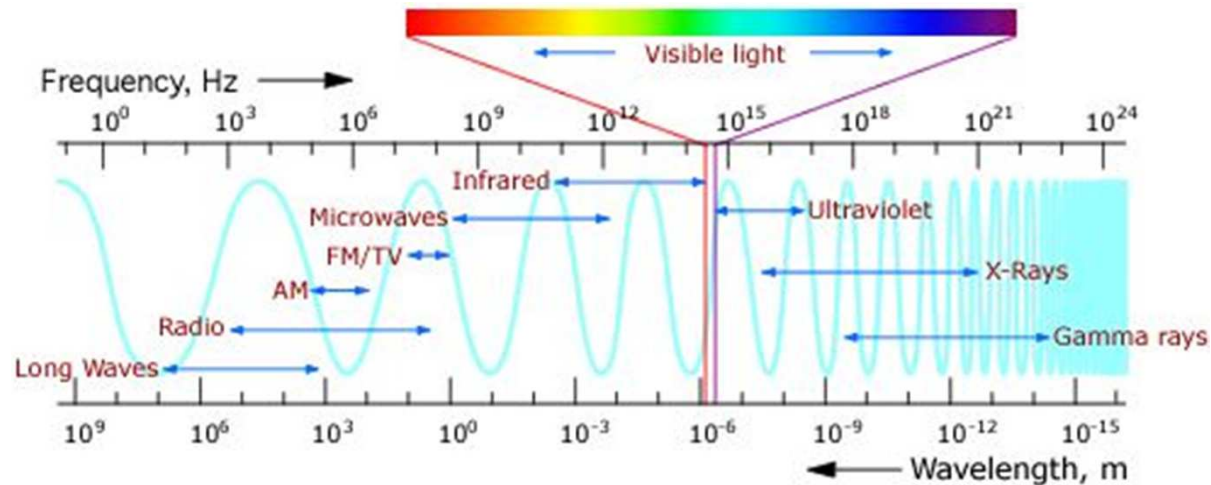
A **modulação** é a alteração provocada, **propositadamente**, nas características de uma oscilação ou de uma onda (amplitude, frequência, etc.) de forma a introduzir informação numa onda sinusoidal (portadora); processo de adicionar «sinais» (**informação**) a uma onda de frequência muito superior (onda **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*

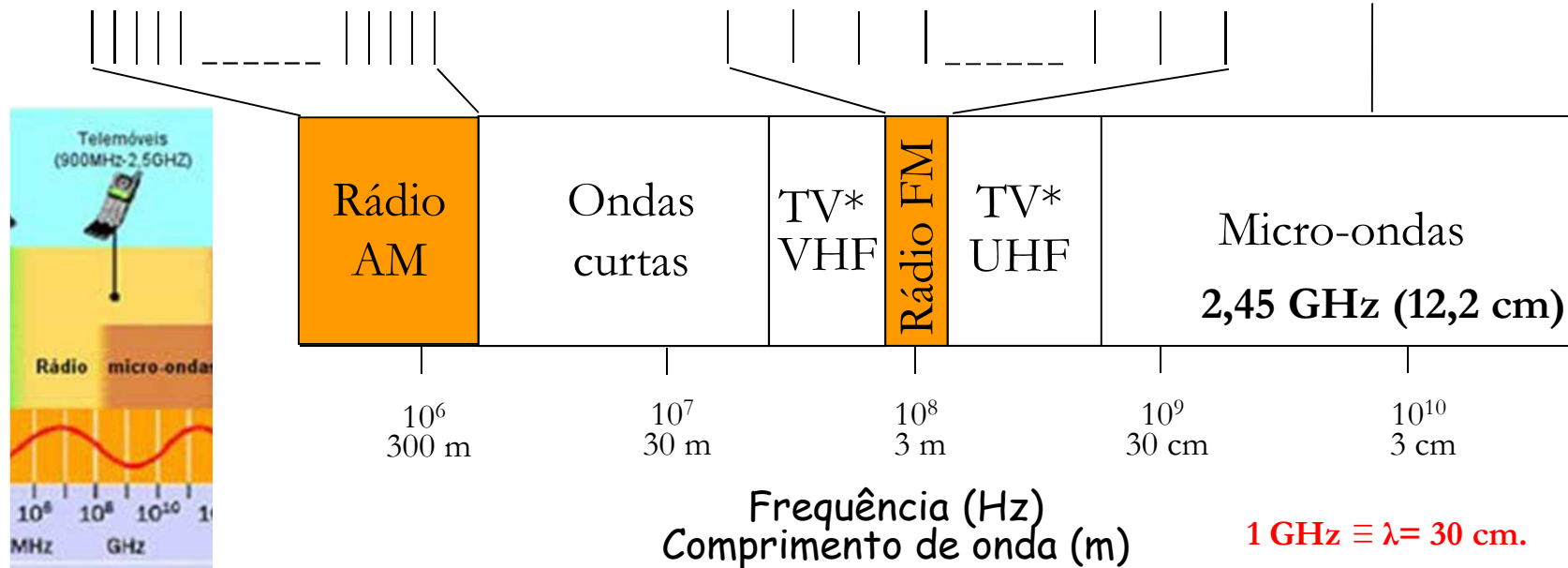
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.

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 ...



Ver p.ex.

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Descobertas%20do%20Electromagnetismo%20e%20a%20Comunica%E7%E3o-2.pdf>,

*6 MHz de largura de banda por canal de TV





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 nocturna, vigilância;

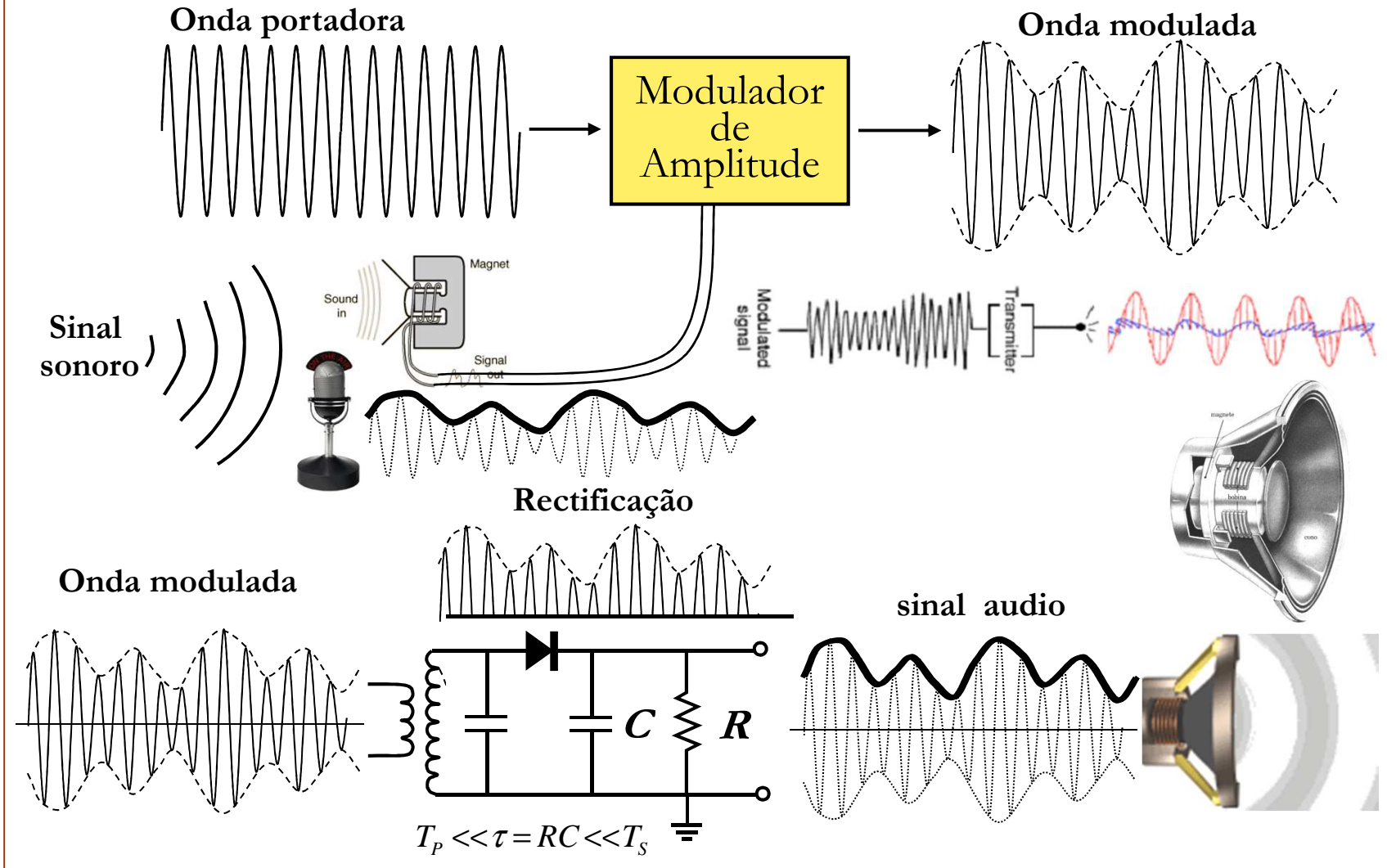
❑ **Visível:** radiação com frequência entre 400 THz (750 nm) e 769 THz (390 nm).

➤ Aplicações: visão, projecção, **comunicação**, vigilância, entretenimento;



Modulação de amplitude (AM)*

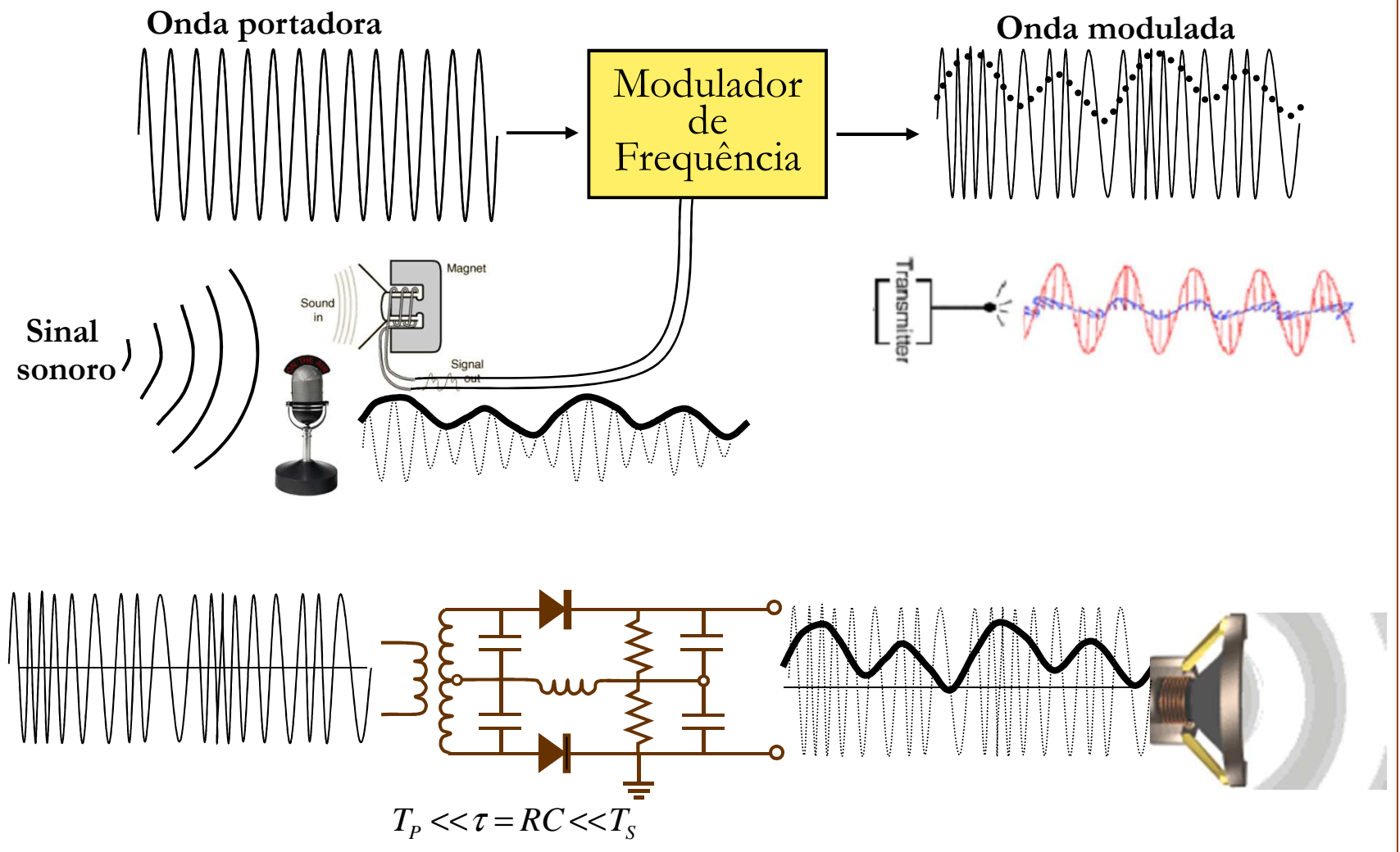
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.





Modulação de frequência (FM)*

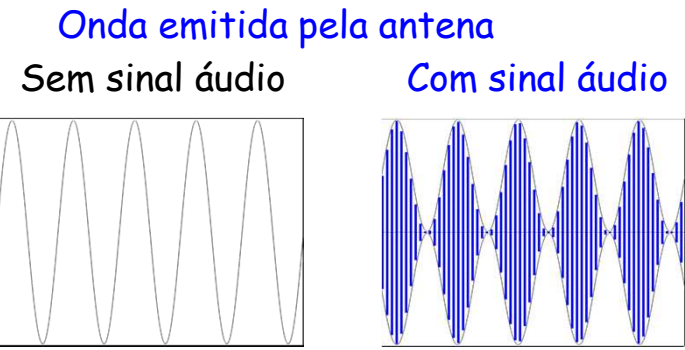
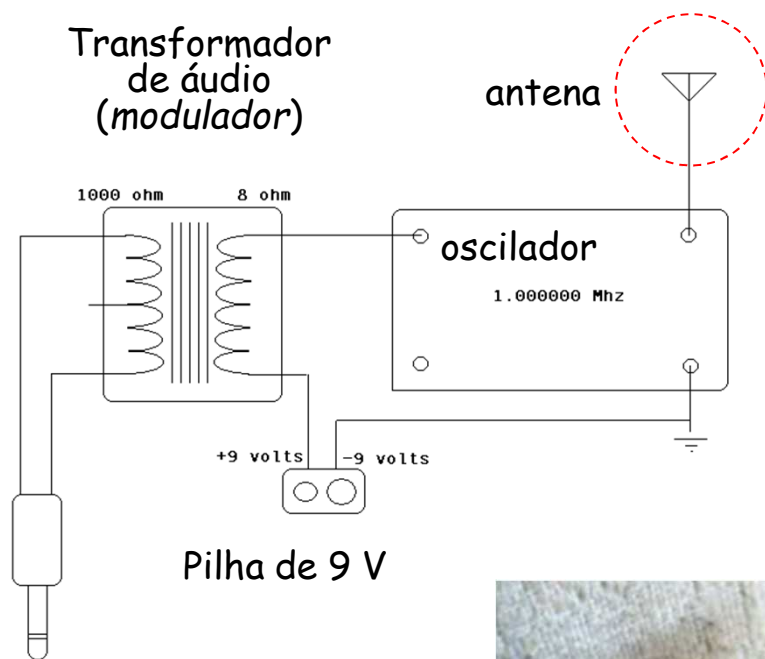
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.





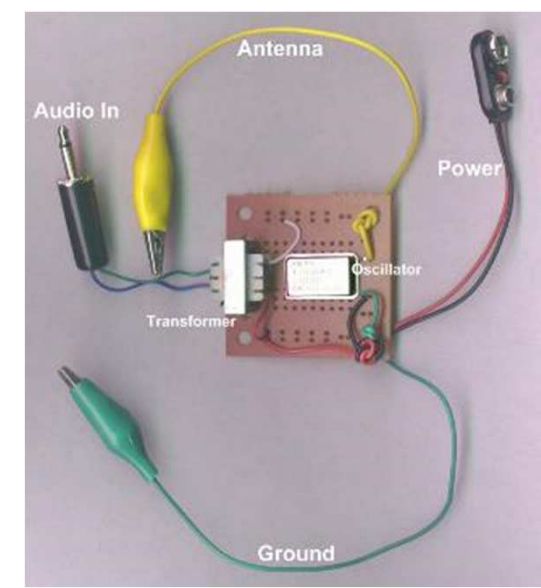
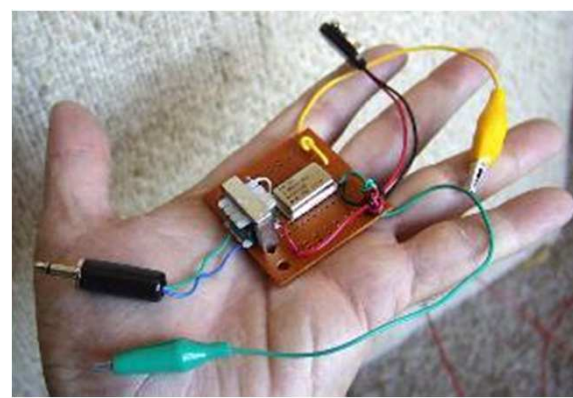
Emissor de rádio AM pirata ... *

* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.



Sinal áudio

Microfone
MP3/MP4/CD



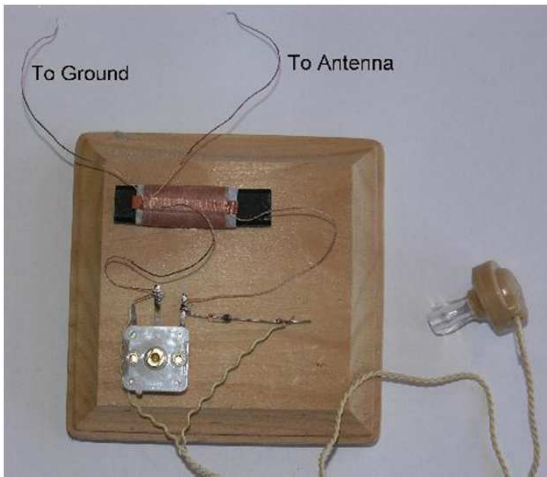
Ver: http://sci-toys.com/scitoys/scitoys/radio/am_transmitter.html



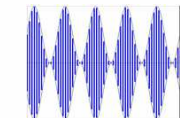


Um receptor de rádio simples ... *

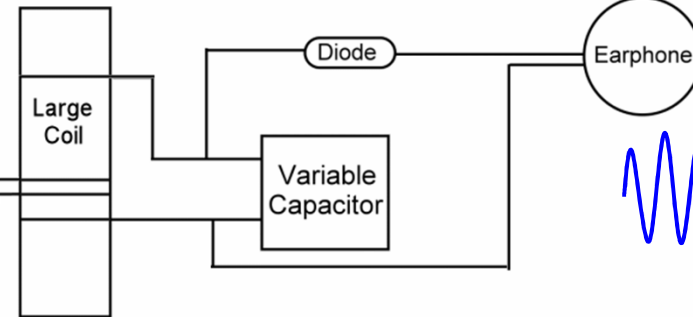
* Não faz parte do conteúdo programático da disciplina.



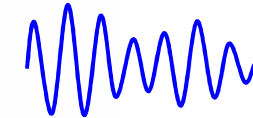
Sinal AM



Small coil to antenna
Large Coil
Small coil to ground

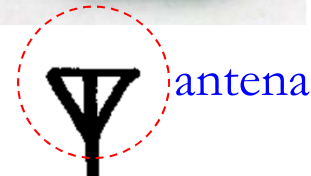
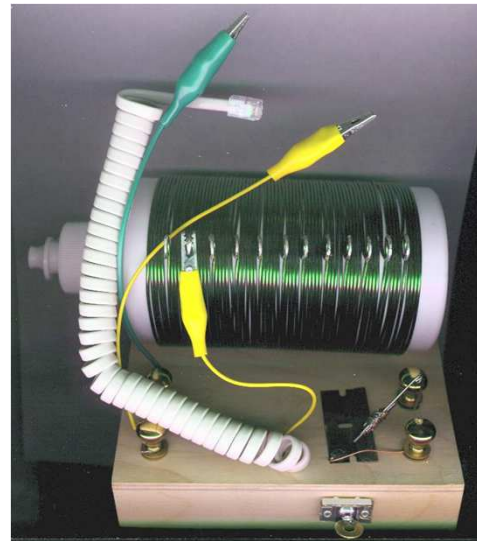
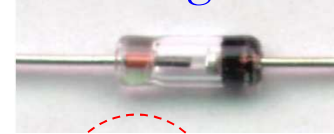


Sinal áudio

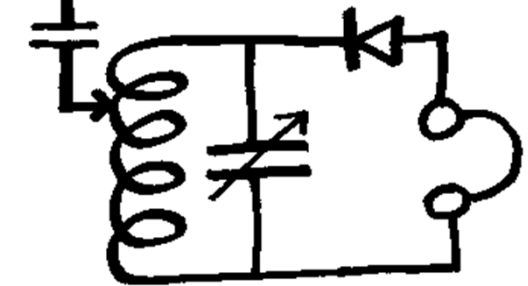


Díodo de germânio

Díodos



Díodo



Ver: http://sci-toys.com/scitoys/scitoys/radio/am_transmitter.html

auscultador





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;

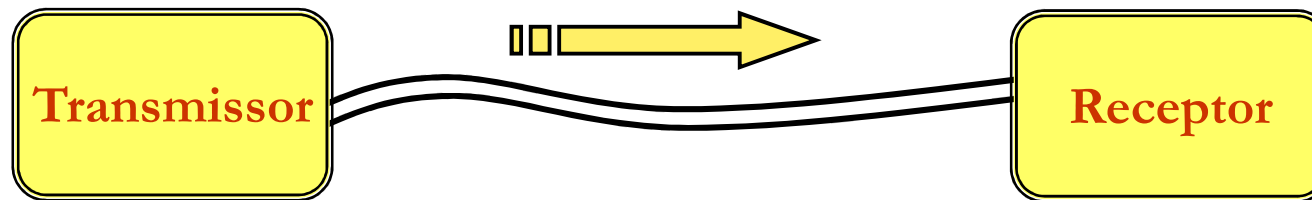
Modulação: alteração provocada, **propositadamente**, nas características de uma oscilação ou de uma onda (amplitude, frequência, etc.) de forma a introduzir informação numa onda sinusoidal (portadora); processo de adicionar «sinais» (**informação**) a uma onda de frequência muito superior (onda **portadora**) à frequência máxima dos sinais a transmitir.



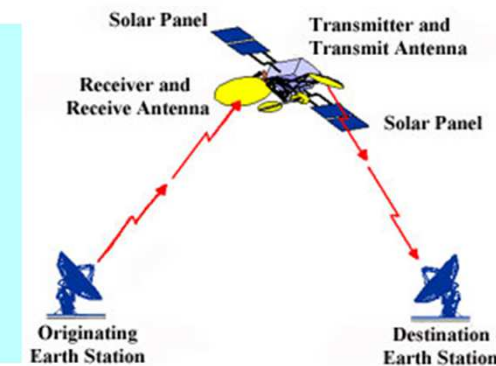
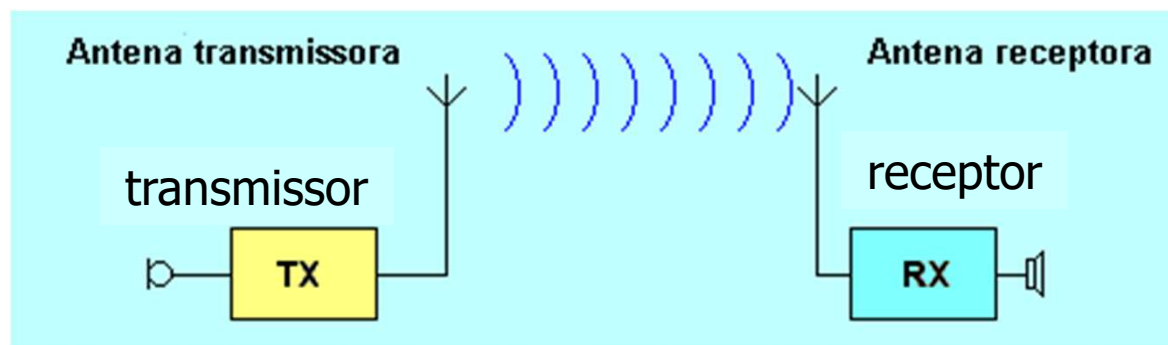


A propagação da radiação EM pode ser livre ou guiada

propagação guiada (fios, cabos, tubos, fibra óptica)



– propagação livre (na atmosfera ou via satélite)

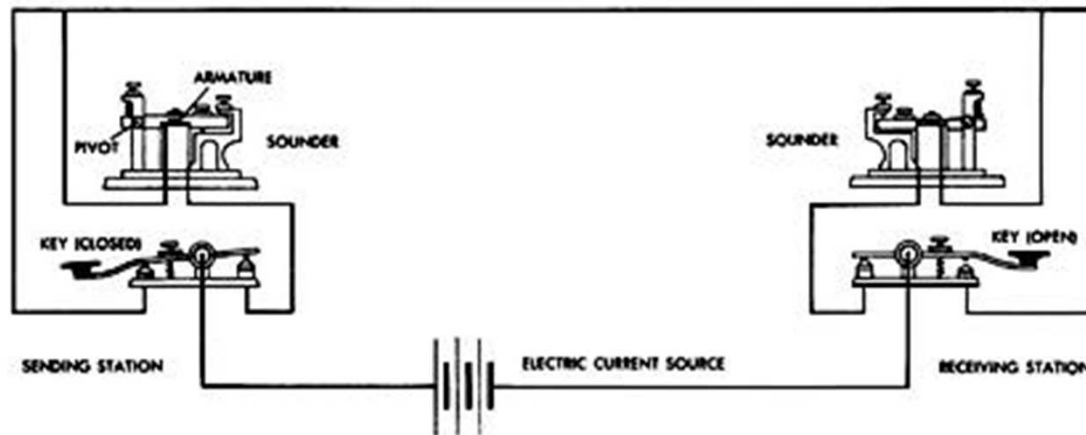




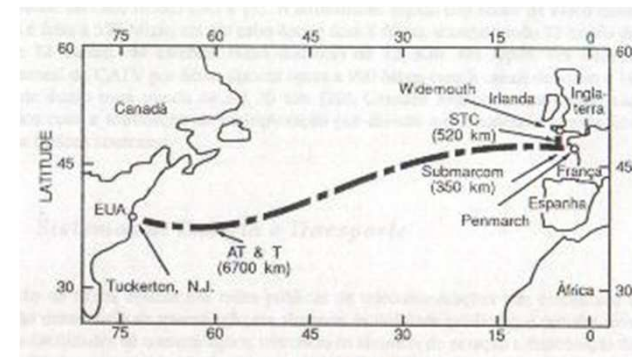
Telegrafia com fios (Samuel Morse)

- 1729: Stephan Gray descobriu que a electricidade pode ser transmitida
- 1746: Galath inventou o electrómetro (de *electro-* + *-metro*)

Telégrafo de fios, 1845



Cabos submarinos

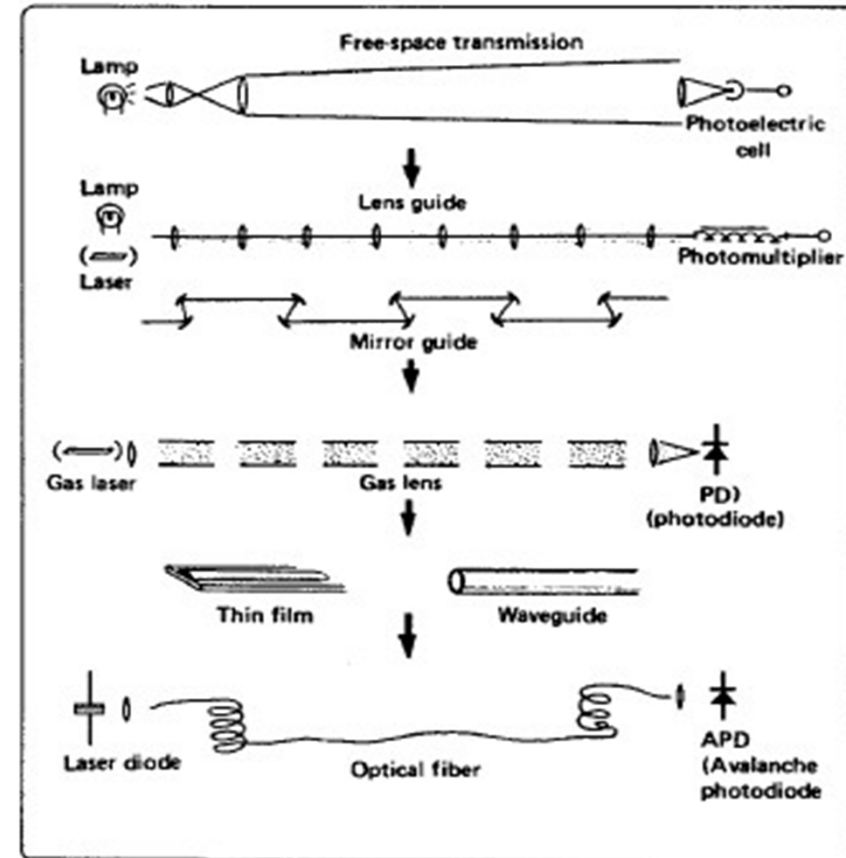
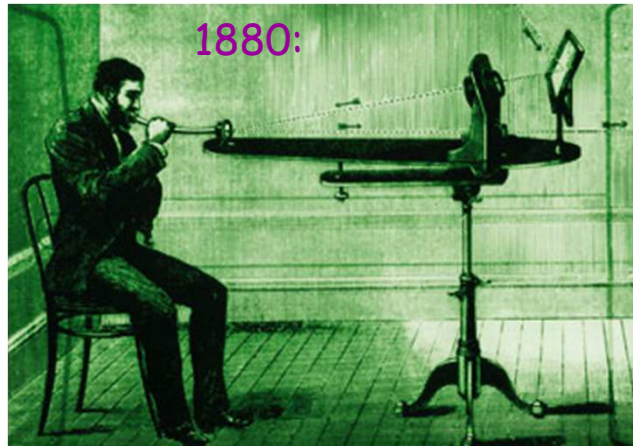


http://en.wikipedia.org/wiki/Submarine_communications_cable



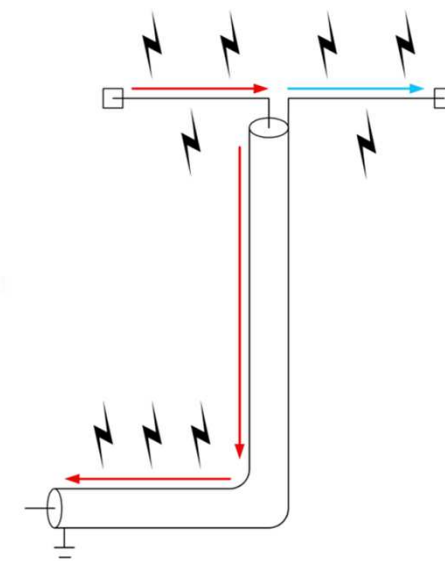
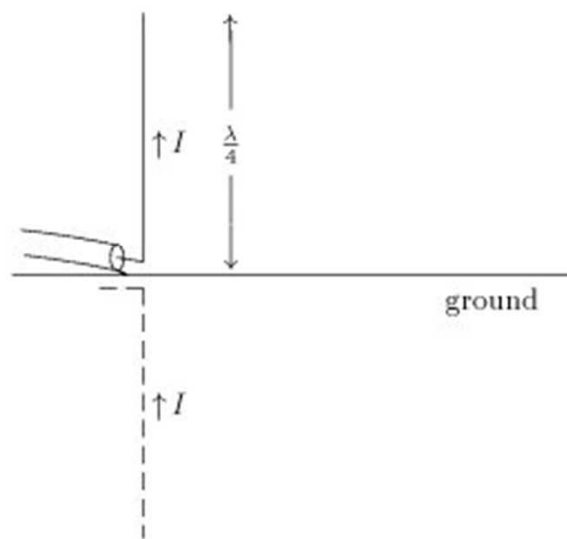
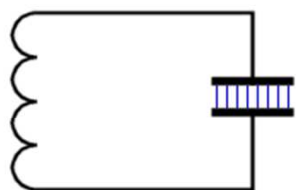
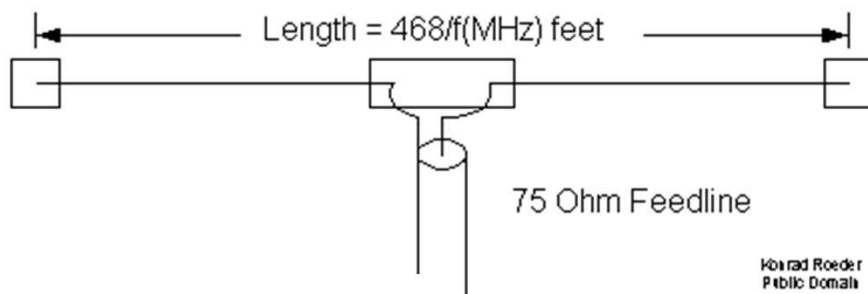


A propagação livre necessita de antenas





Antenas dipolares

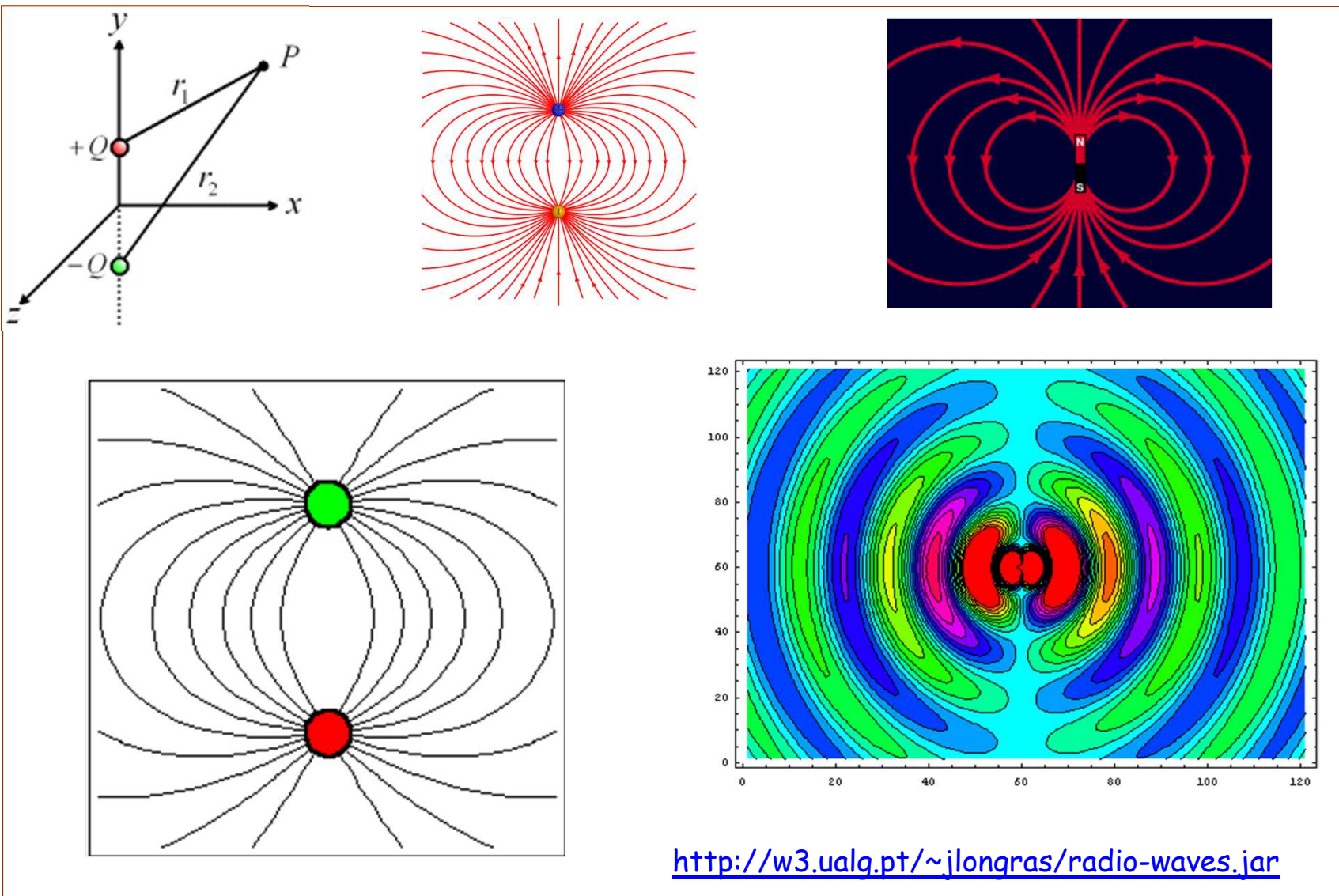


A Rádio Boa Nova ... http://www.radioboanova.com/a_radio.htm ... Montou o Centro Emissor na Catraia de S. Paio, por cima do depósito de armazenamento de Água, com emissor novo e 2 antenas dipolares, com emissão em estereofonia e já algum equipamento profissional.





Rever dipolo eléctrico

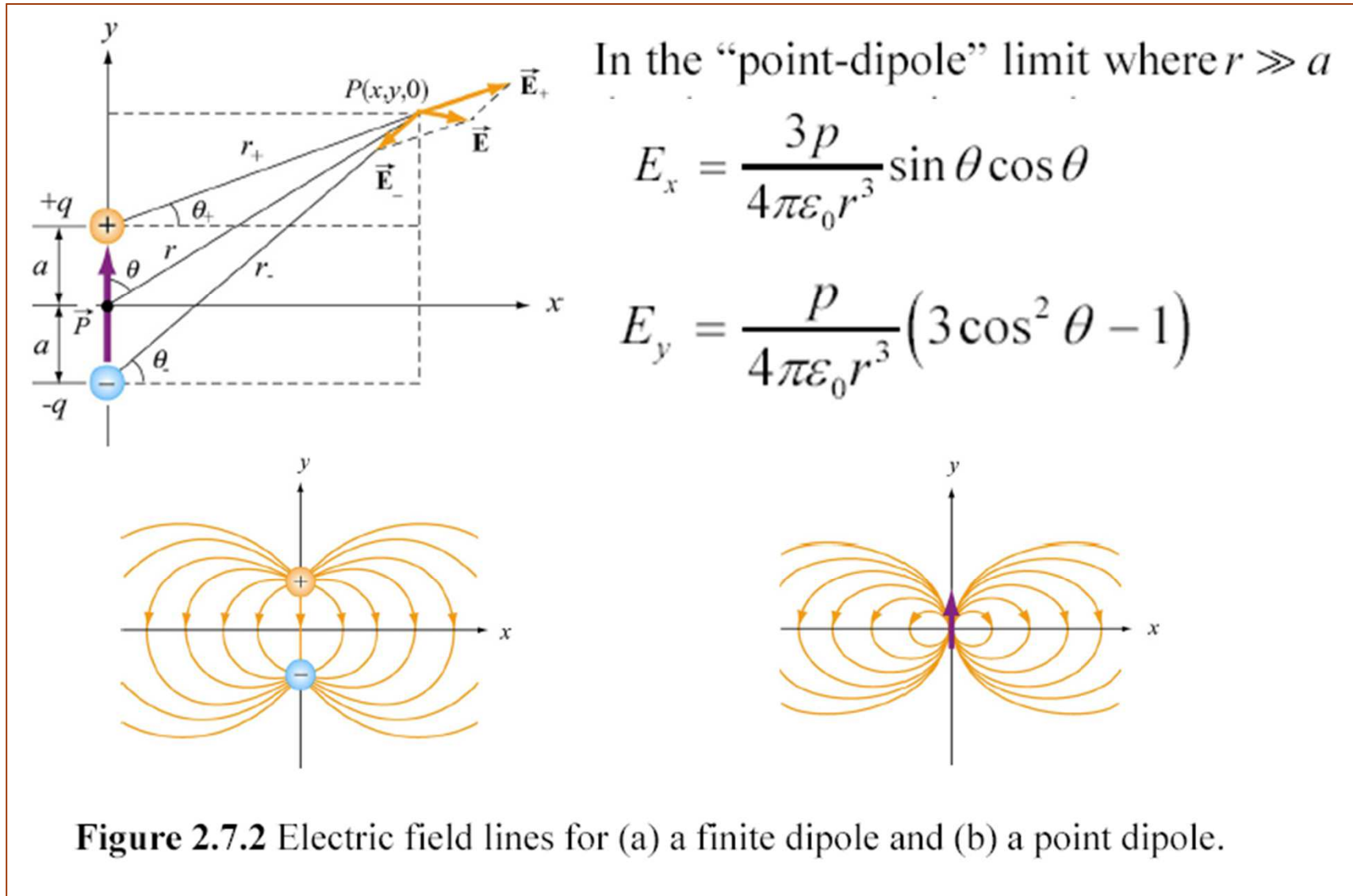


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/radio-waves.jar>





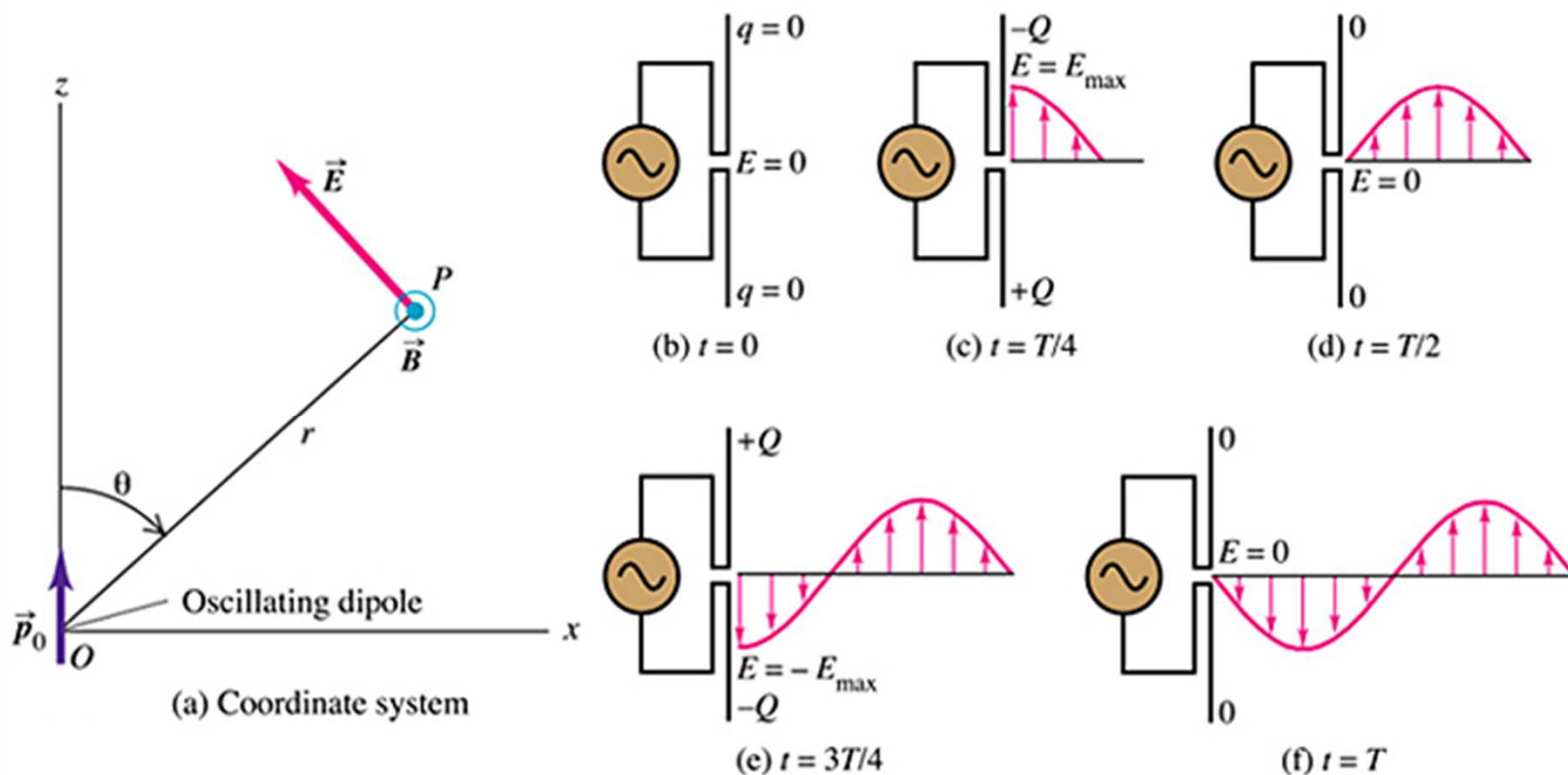
Campo E criado por um dipolo eléctrico





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).

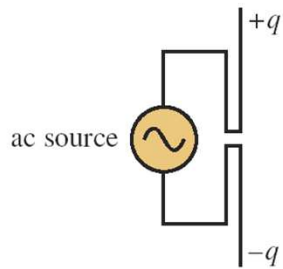


$$p(t) = p_0 \cos \omega t = qd \cos \omega t \rightarrow E(r, t) = \frac{p_0 k^2 \sin \theta \cos(kr - \omega t)}{4\pi\epsilon_0 r} \rightarrow I(r, \theta) = \frac{p_0^2 \omega^4 \sin^2 \theta}{32\pi^2 c^3 \epsilon_0 r^2}$$





Radiação de uma antena dipolar (2)



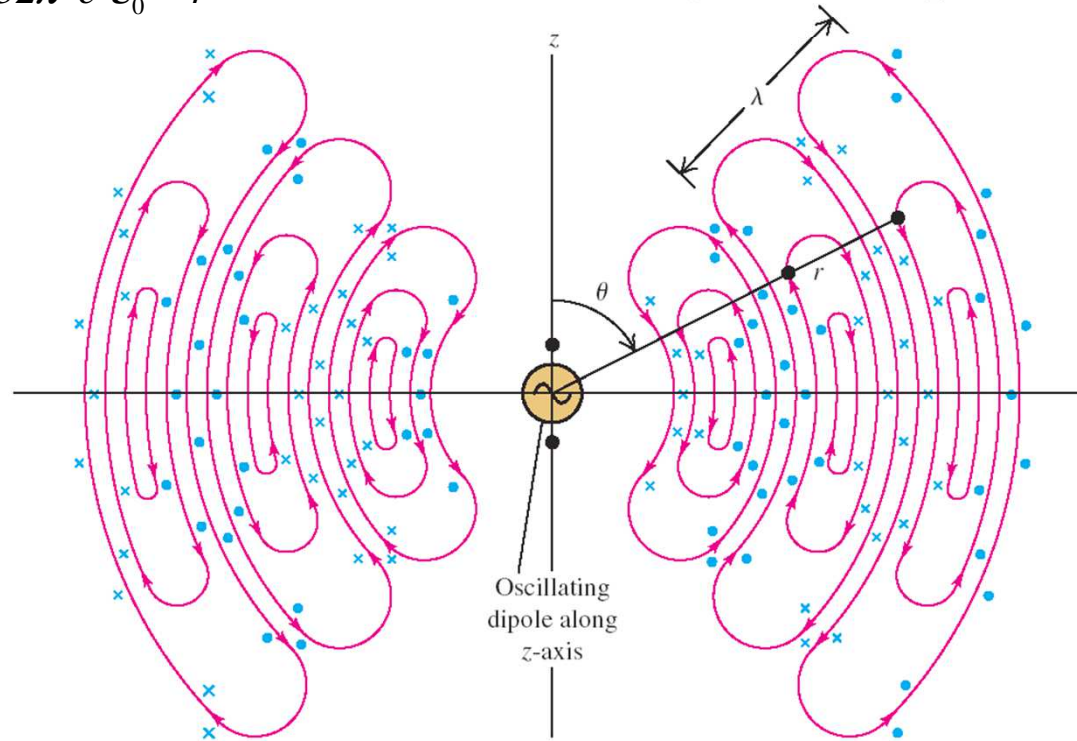
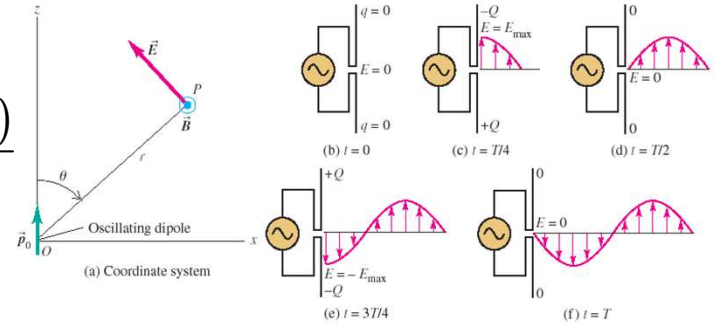
$$p(t) = p_0 \cos \omega t = qa \cos \omega t$$

$$E(r, t) = \frac{p_0 k^2 \sin \theta \cos(kr - \omega t)}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$I(r, \theta) = \frac{p_0^2 \omega^4 \sin^2 \theta}{32\pi^2 c^3 \epsilon_0 r^2}$$

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.

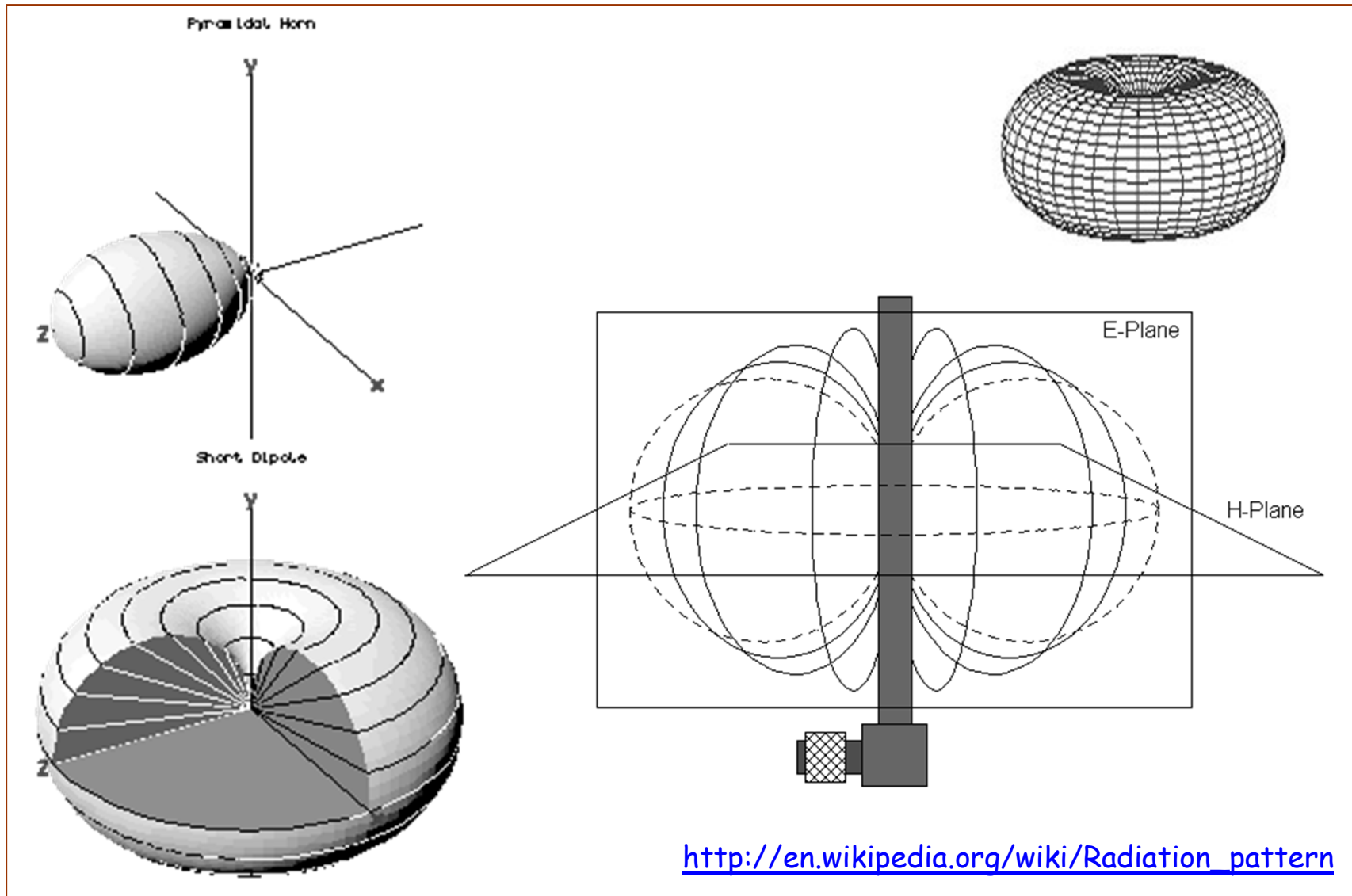


C 2004 Pearson Educational / Addison Wesley



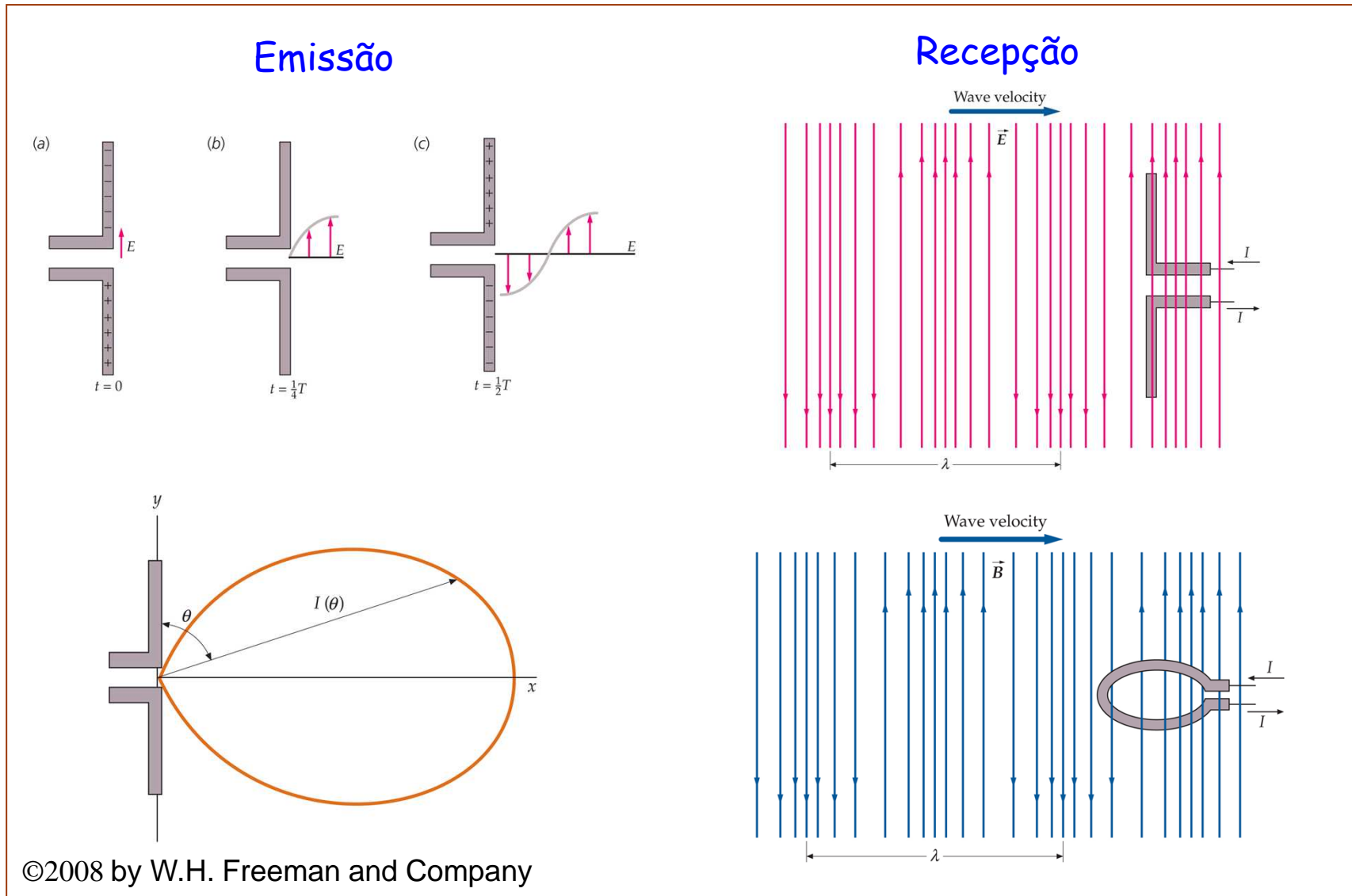


Padrão de radiação da antena dipolar





Antena dipolar em modo de recepção

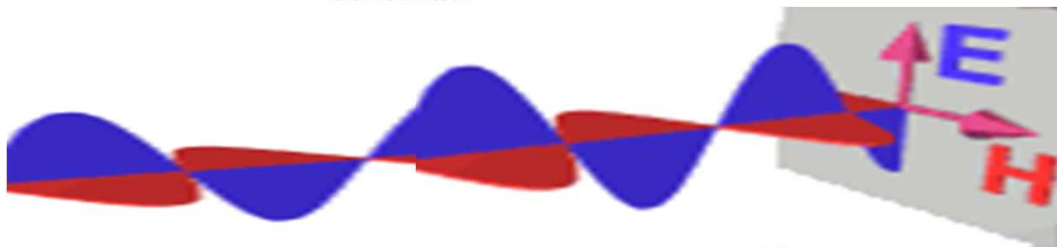
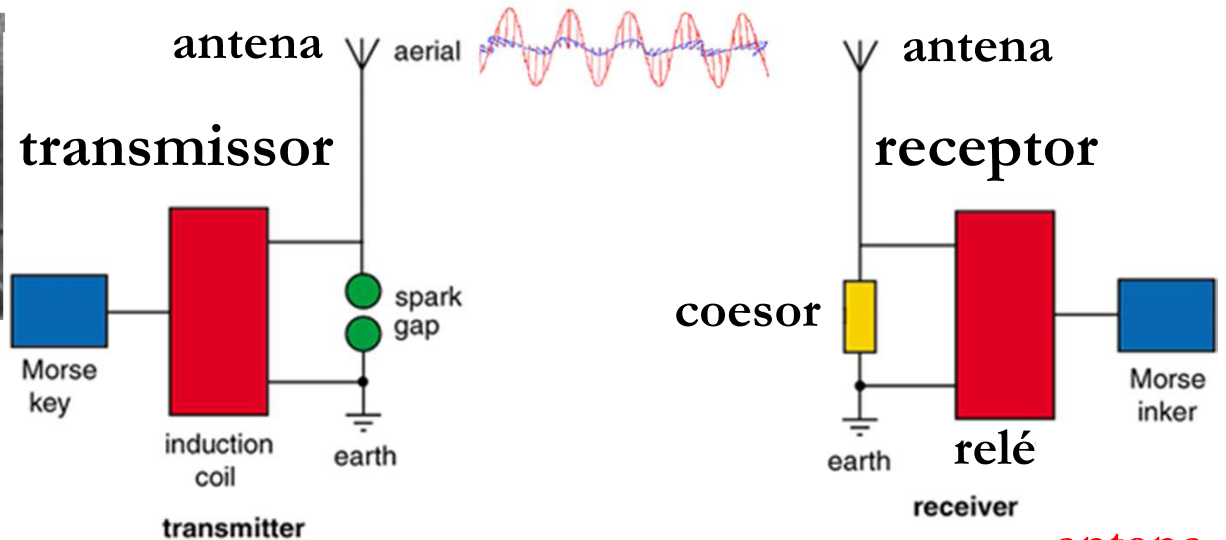
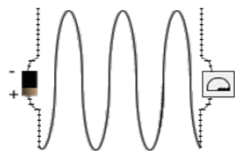


©2008 by W.H. Freeman and Company





Sistema de comunicação sem fios (radiodifusão)



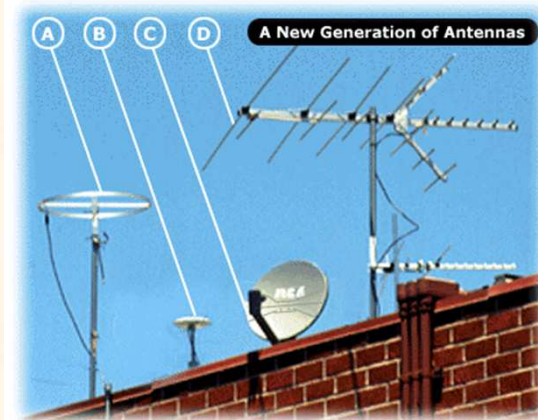
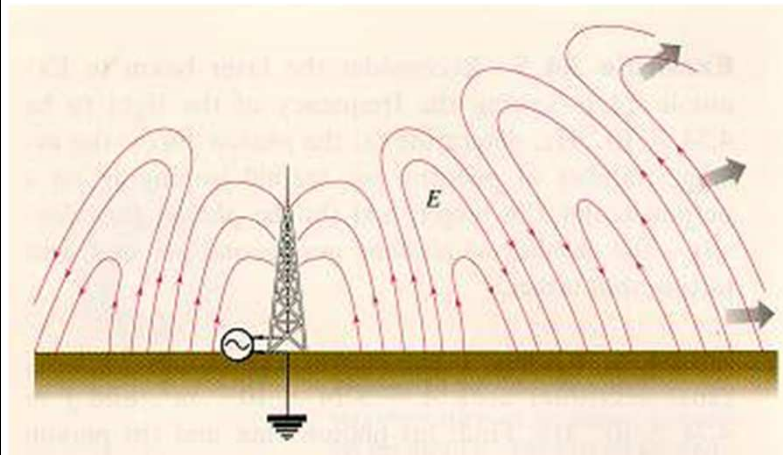
Coesor (fís.) dispositivo detector de radiações electromagnéticas cujo funcionamento se baseia na variação de condutibilidade eléctrica da limalha metálica quando submetida a essas radiações.





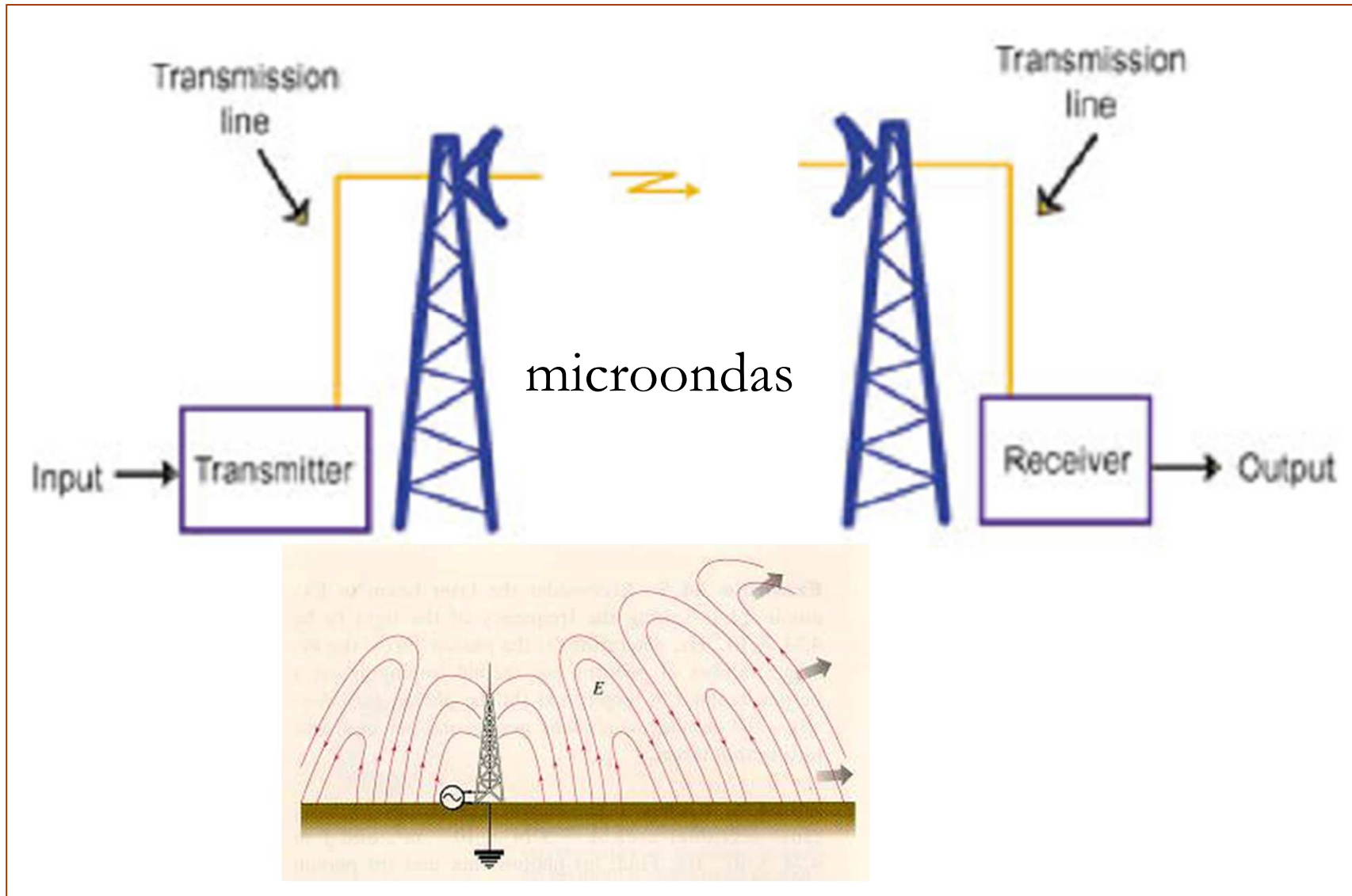
Antenas para radiodifusão (rádios AM e FM, e TVs)

Ondas rádio: MF (0.3 MHz - 3 MHz), VHF (30 MHz - 300 MHz), UHF (0.3 GHz - 1 GHz)



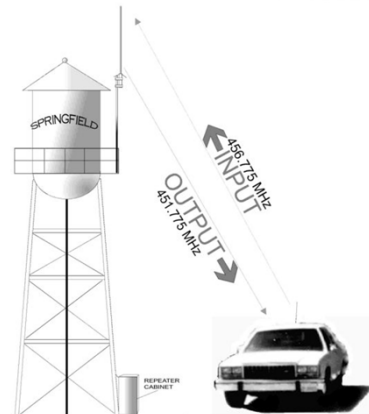
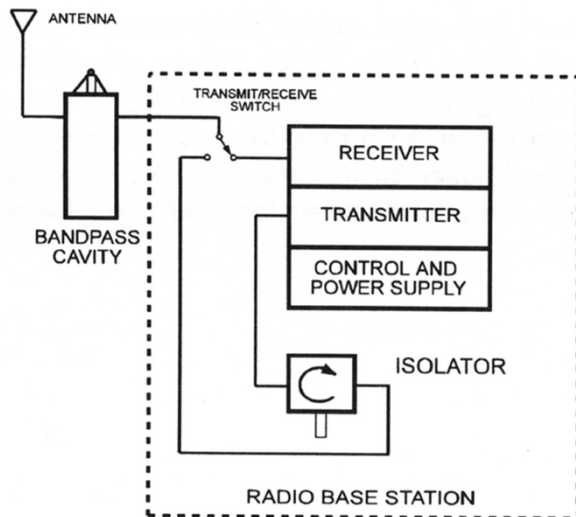


Antenas para comunicação na banda das microondas



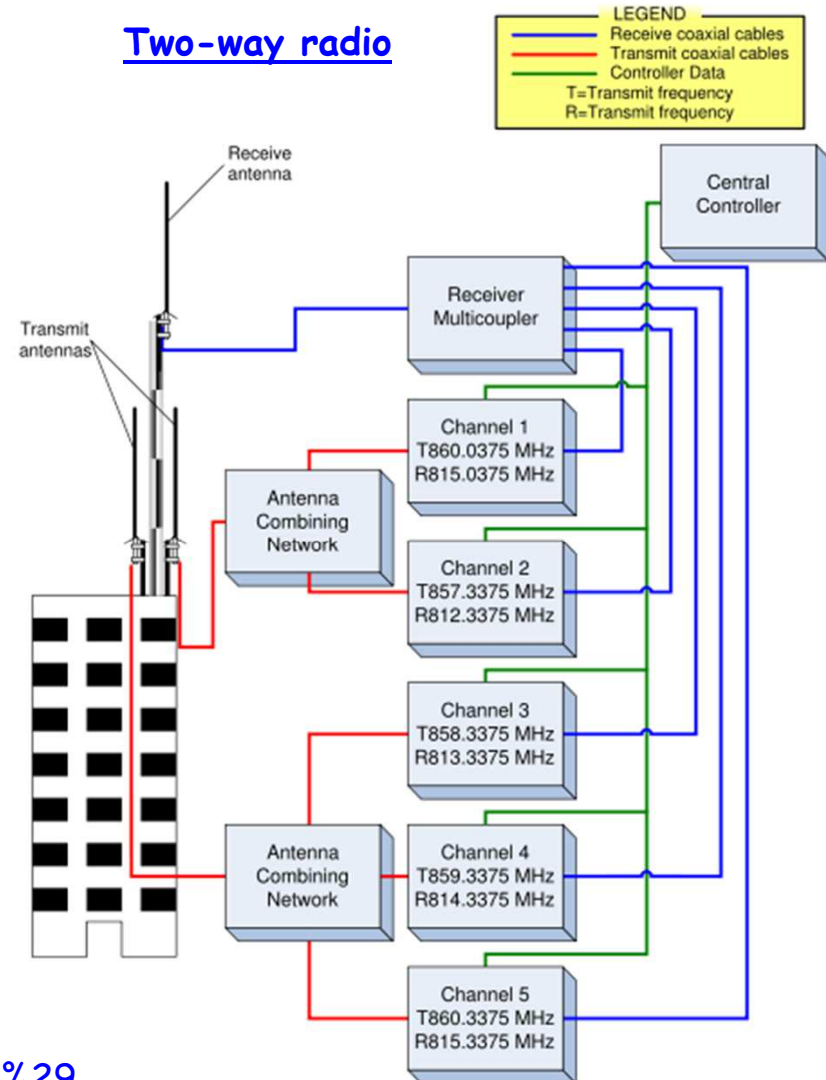
Sistemas de comunicação móveis

Antenna network for an emergency medical services base station.



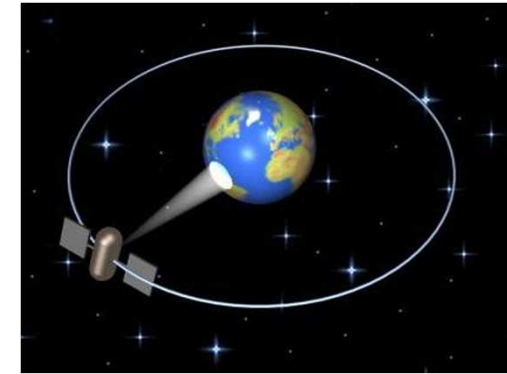
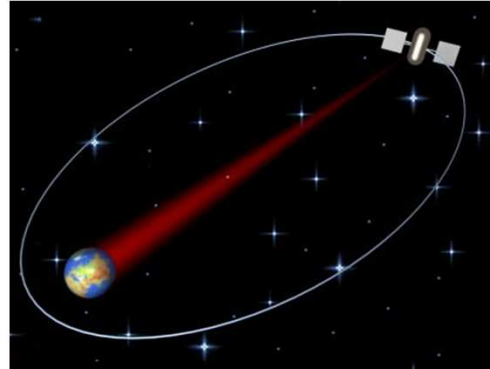
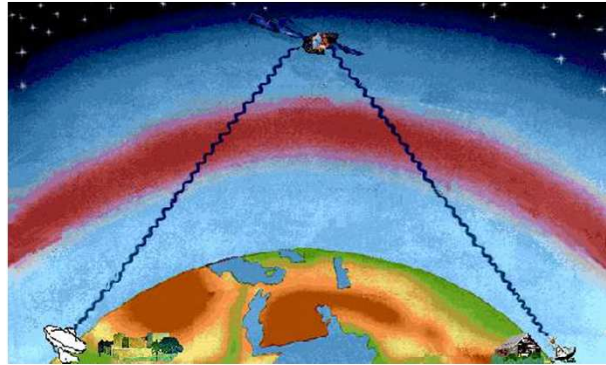
http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_%28radio%29

Two-way radio

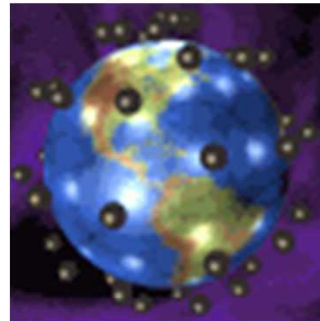
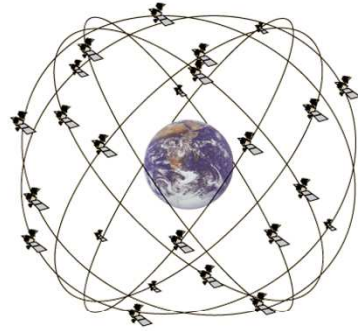




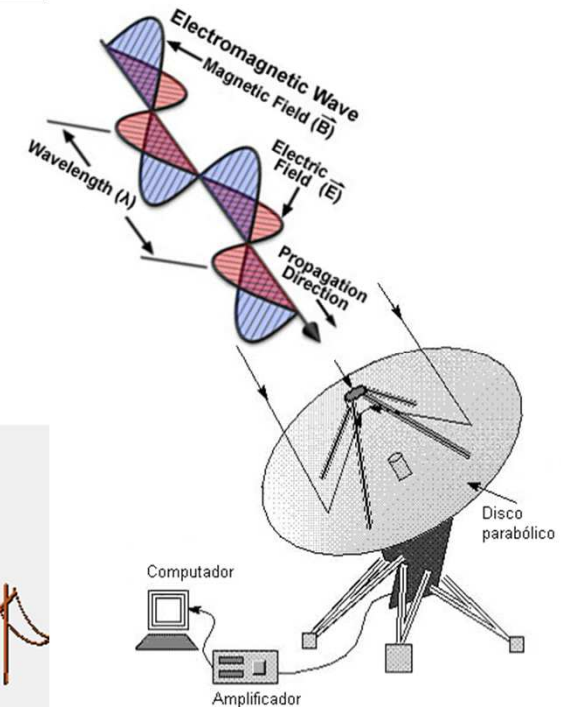
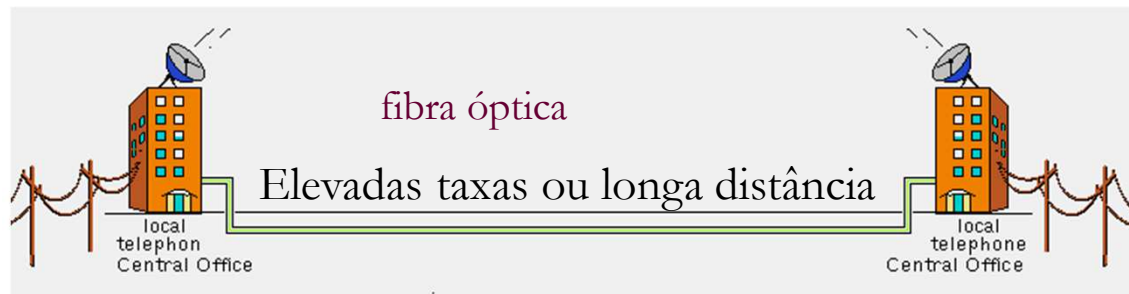
Comunicação por satélite



Sistema Galileu



microondas





-

Sistemas ópticos de comunicação baseados em fibras ópticas e lasers

(não faz parte do programa)

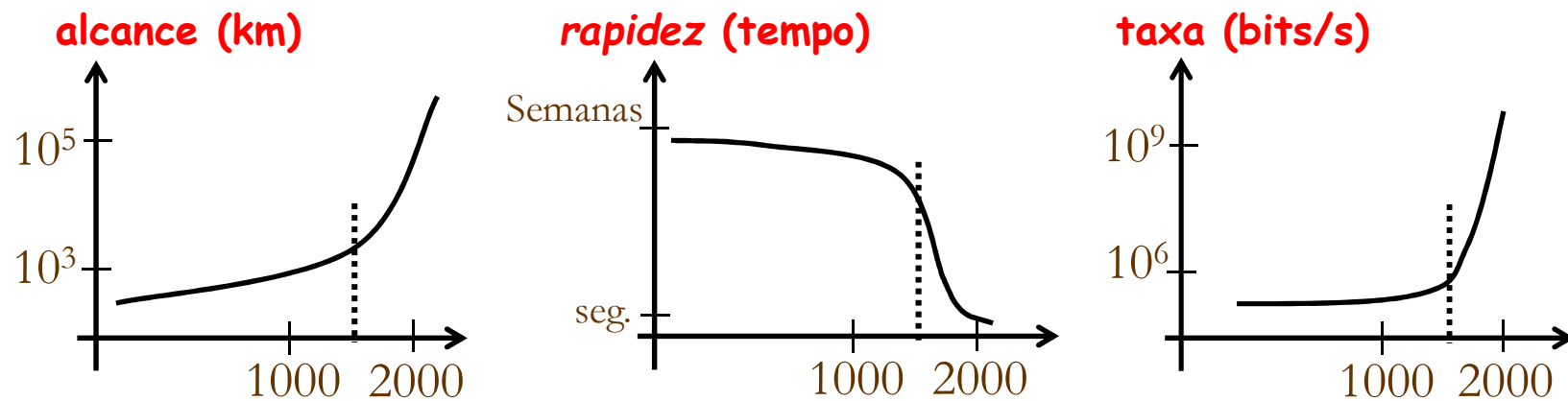




Parâmetros que caracterizam um sistema de comunicação

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.

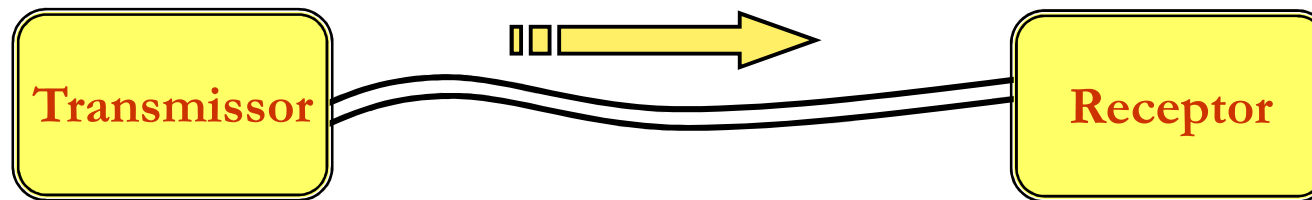
A telegrafia e o telefone eléctricos permitiram avanços significativos, intensificando as relações entre países e povos ... um 'passo' importante para globalização, mas só com o advento das comunicações sem fios (radiodifusão, satélite, etc.) e dos modernos sistemas de comunicação baseados em sinais ópticos as comunicações se tornaram realmente globais, com a internet e www.



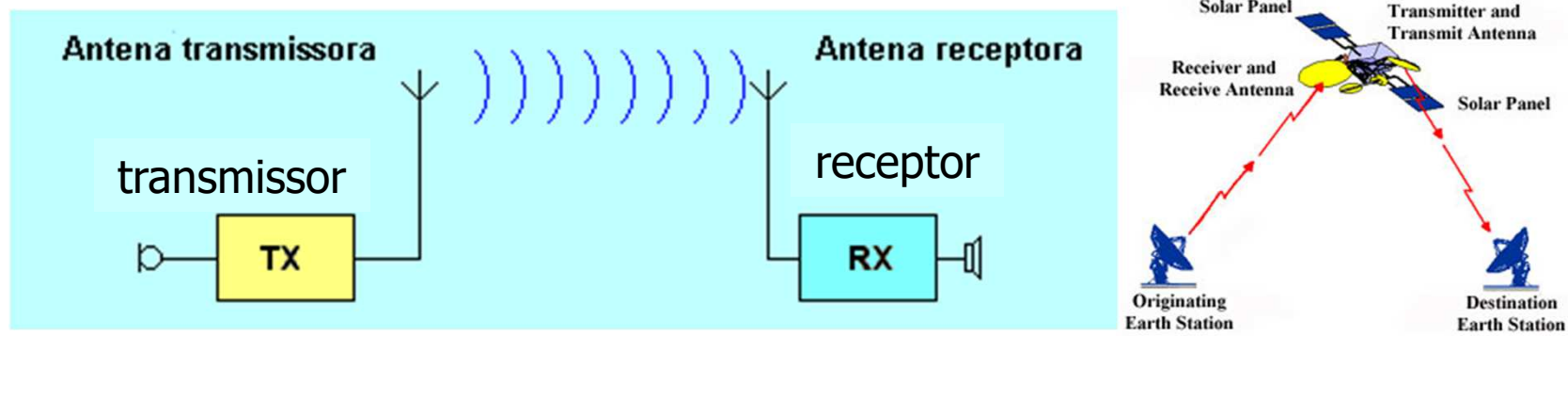


Propagação guiada e propagação livre

propagação guiada (fios, cabos, tubos, fibra óptica)

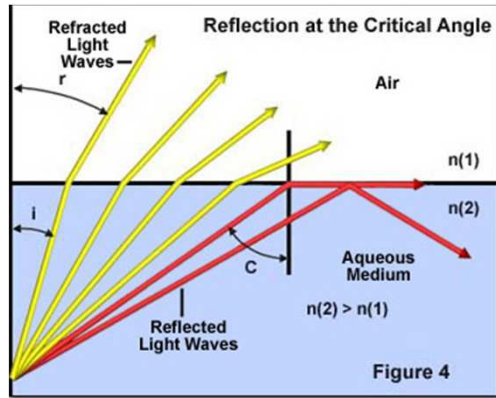


propagação livre (na atmosfera ou via satélite)

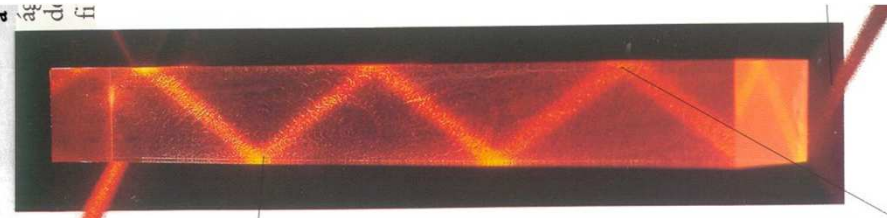




Reflexão interna total e fibras ópticas



Se o mergulhador continuar a atingir a superfície de cada vez maior. Quando água, atinge-se o «ângulo



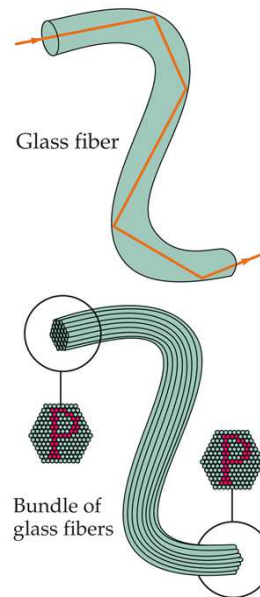
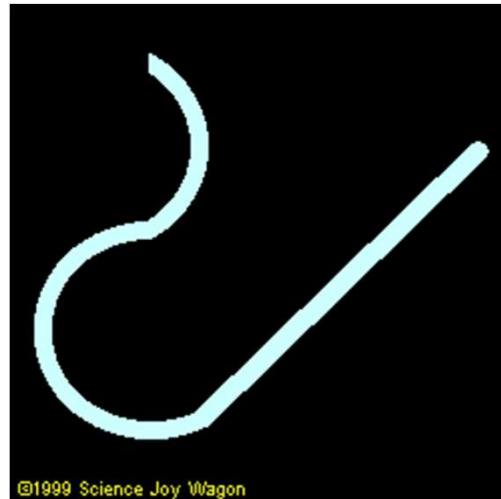
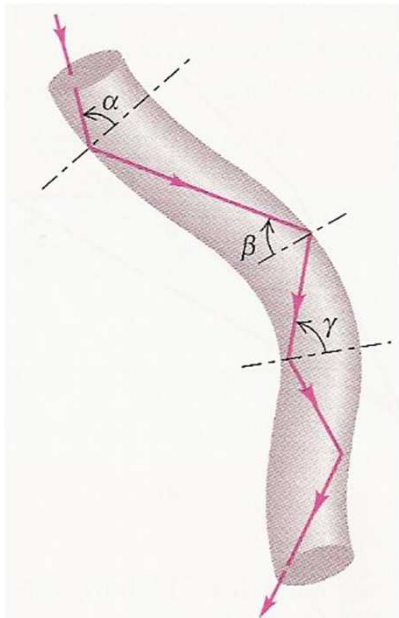
Raio de luz



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



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

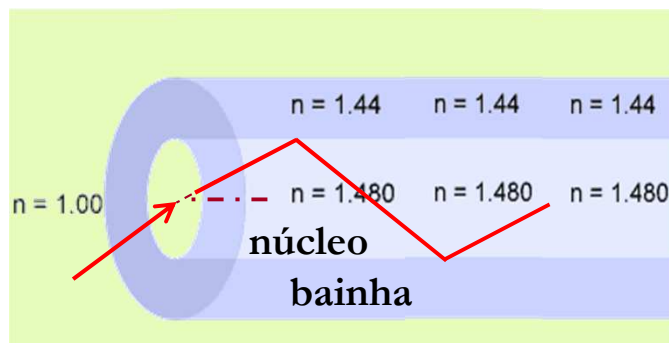
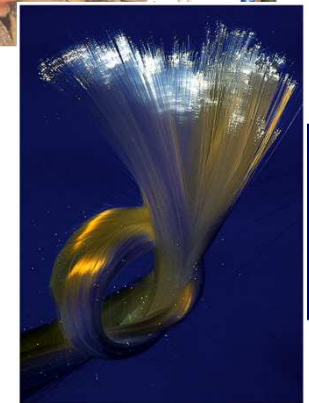




Fibra óptica monomodo

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

Cabo de fibra óptica
para telecomunicações



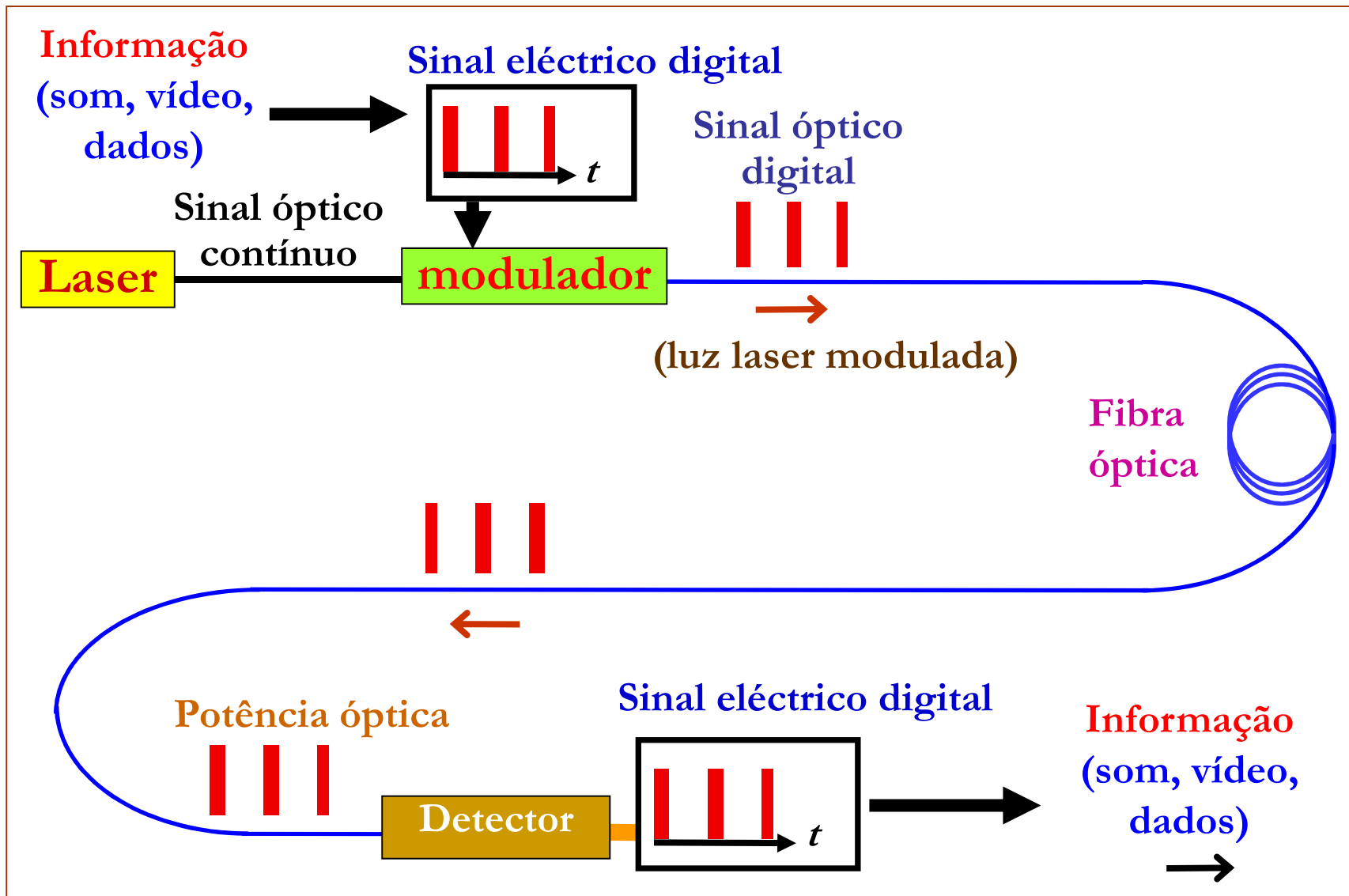
O índice de refração do núcleo é ligeiramente superior ao da bainha. As fibras podem ser monomodo ou multimodo. Uma fibra é multimodo quando o diâmetro efectivo do núcleo é superior ao comprimento de onda.

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

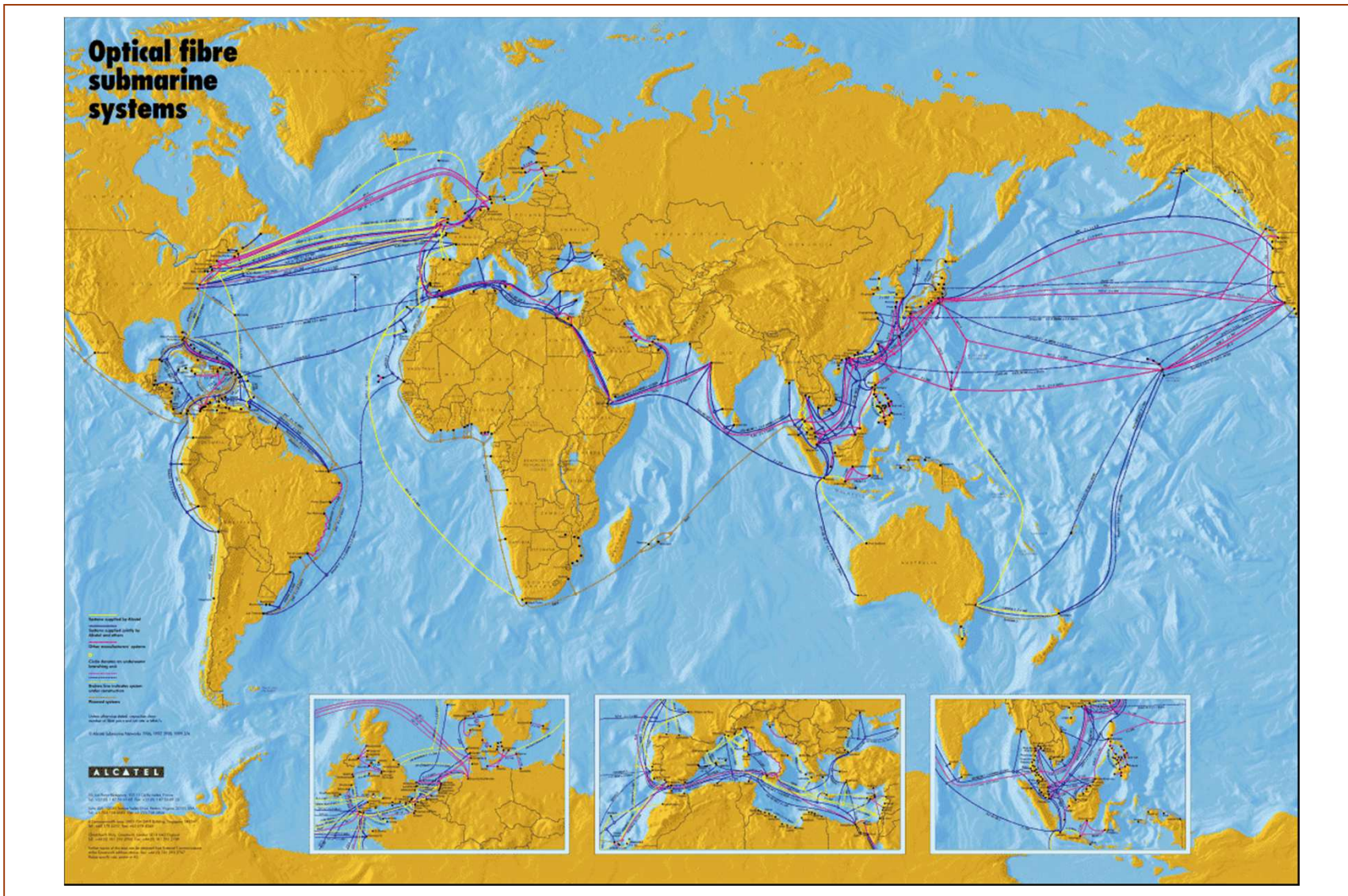




Sistema de comunicação por fibra óptica

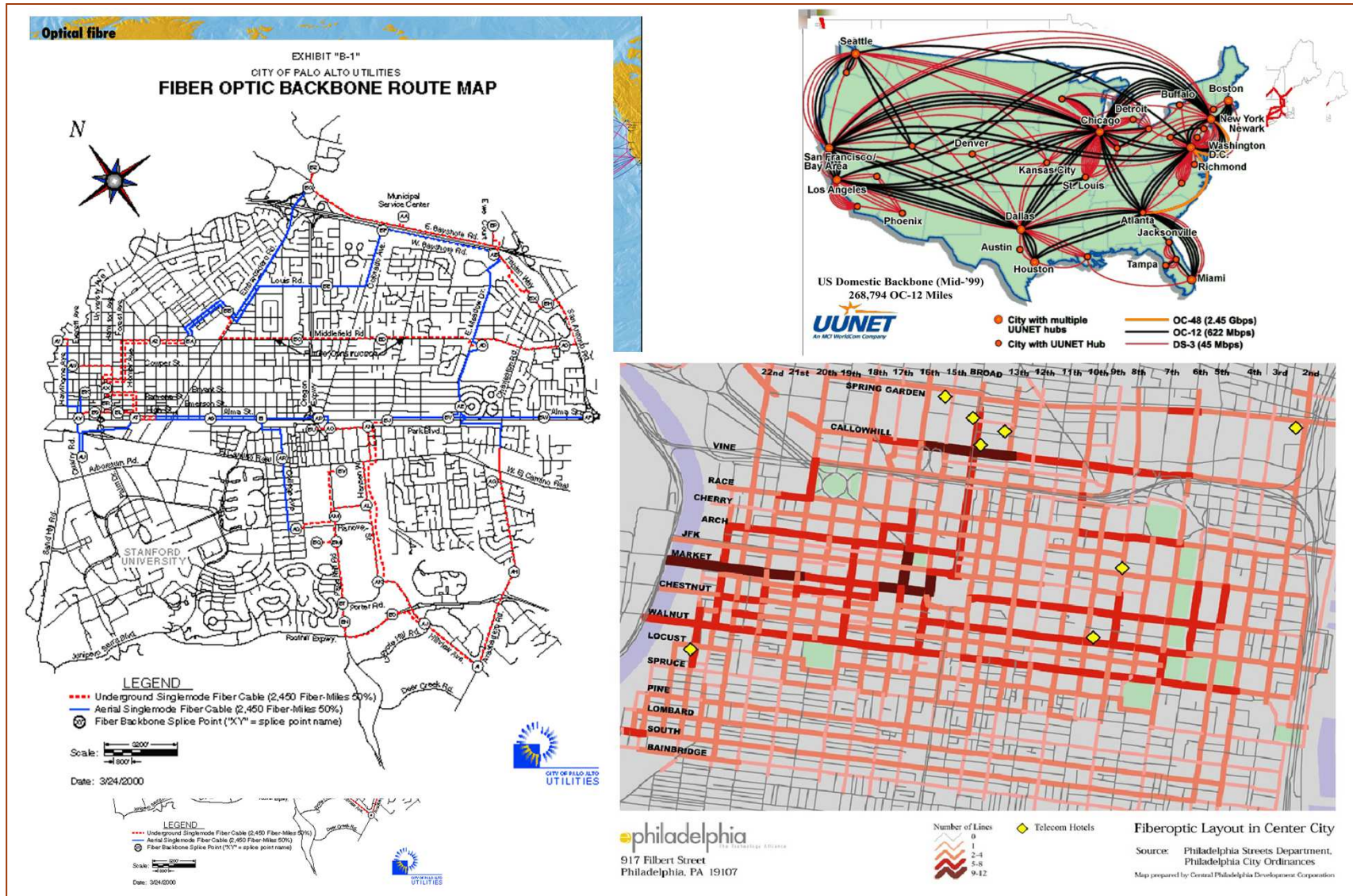


Redes de fibra óptica no mundo



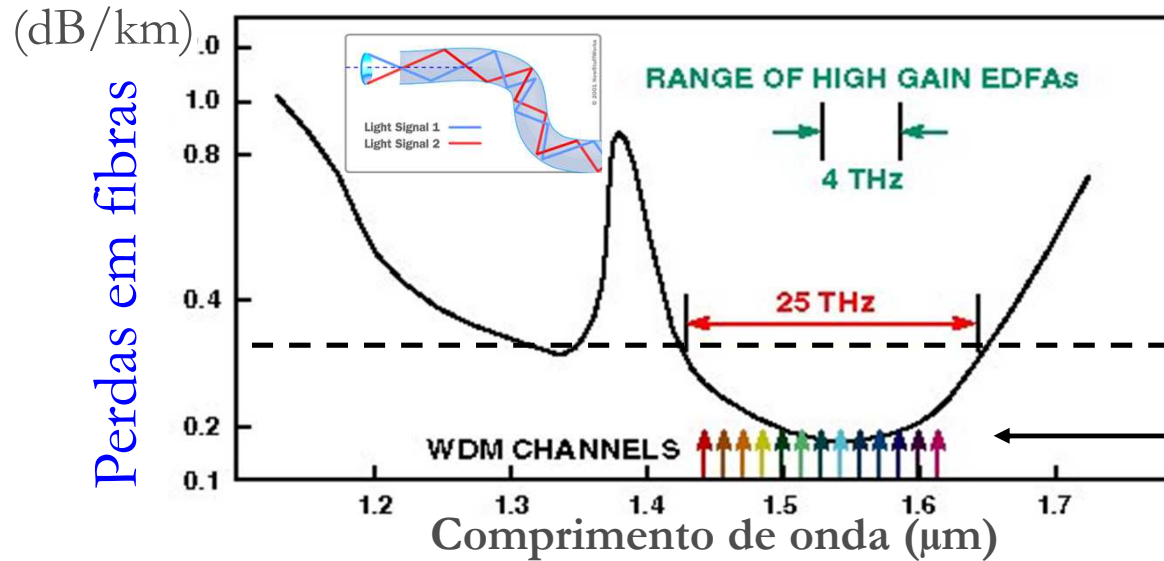


Redes de fibra óptica nos EUA





Vantagens das redes de fibra óptica

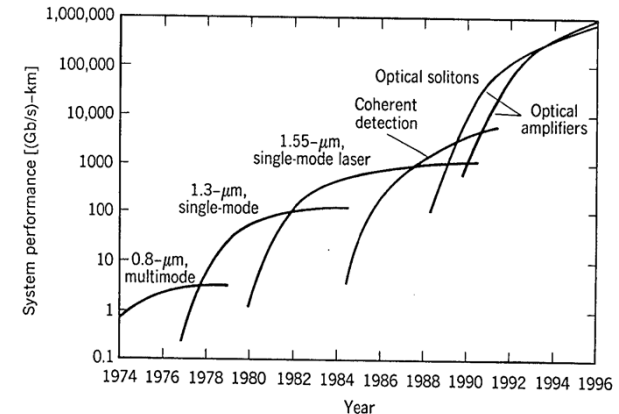
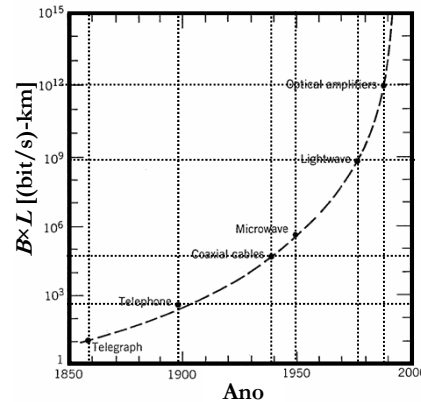
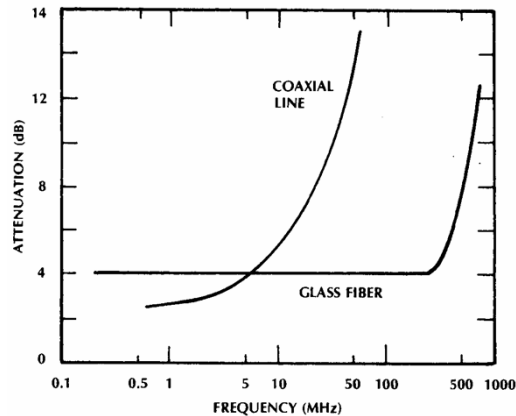


1 THz = 10^3 GHz

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

