



Lasers

Interferometria

Holografia

- **José Figueiredo**
(<http://w3.ualg.pt/~jlongras/>)
- **UALG, FCT, DF, Gab. C2-2.32**



O laser

Introdução

- No final da década de 1940 e no início da década de 1960, os estudos da Física Quântica deram origem as duas contribuições sem precedentes: o transístor e o **laser**.
- O primeiro estimulou o crescimento da microelectrónica, que explora o comportamento dos electrões na matéria.
- O laser abriu caminho para um novo campo – às vezes denominado fotónica – que trata da interação (novamente ao nível quântico) entre os fotões e a matéria.
- A palavra “laser” é formada pelas iniciais da expressão “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation”, ou seja, *amplificação da luz por emissão estimulada de radiação*.
- A chave da operação do laser está no processo de **emissão estimulada**, previsto por Albert Einstein em 1917.

Introdução (cont.)

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

“O LASER é uma solução à procura de um problema.”

Theodore H. Maiman, inventor do laser (1960)

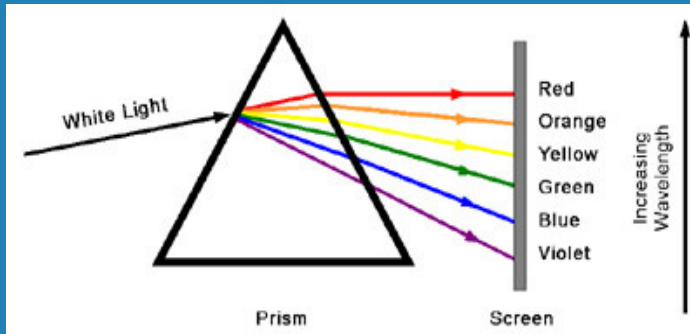
O laser está na base de muitos equipamentos e várias técnicas de diagnósticos, e é largamente empregue na investigação e na indústria.



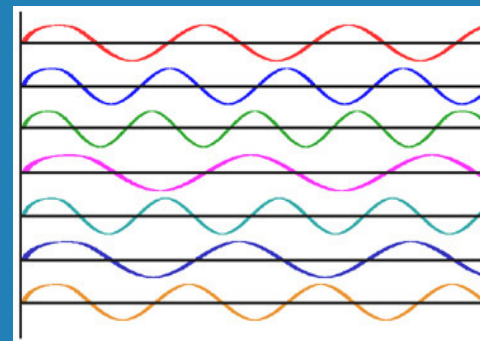
O que há, então, de tão diferente a respeito da luz de um laser?

Luz comum vs luz laser

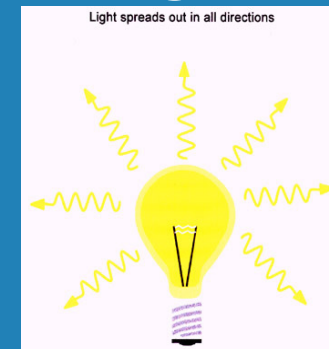
- Luz “comum”
Policromática



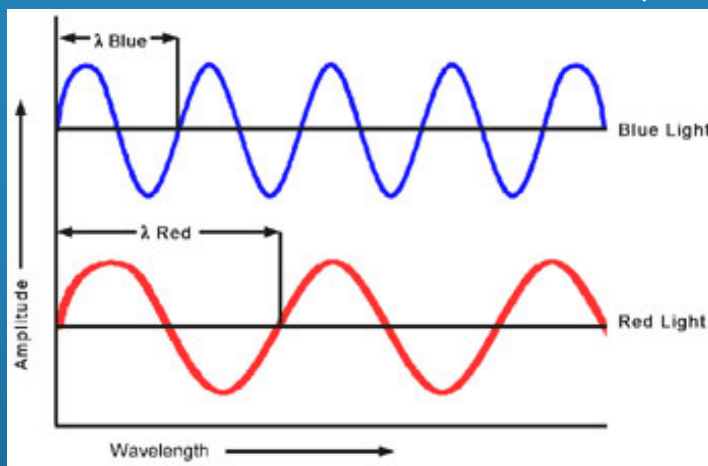
Incoerente



Muito divergente



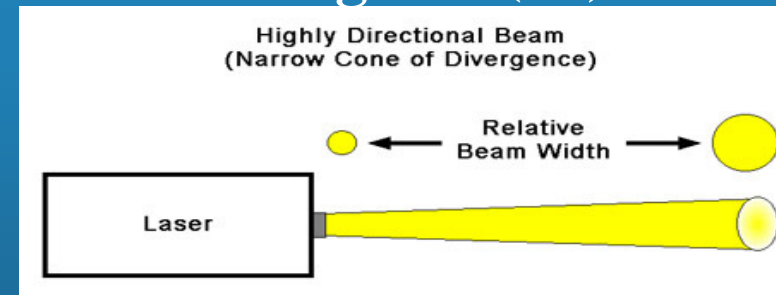
- Luz laser
Quasi-monocromática (☺)



Coerente (☺ ☺)

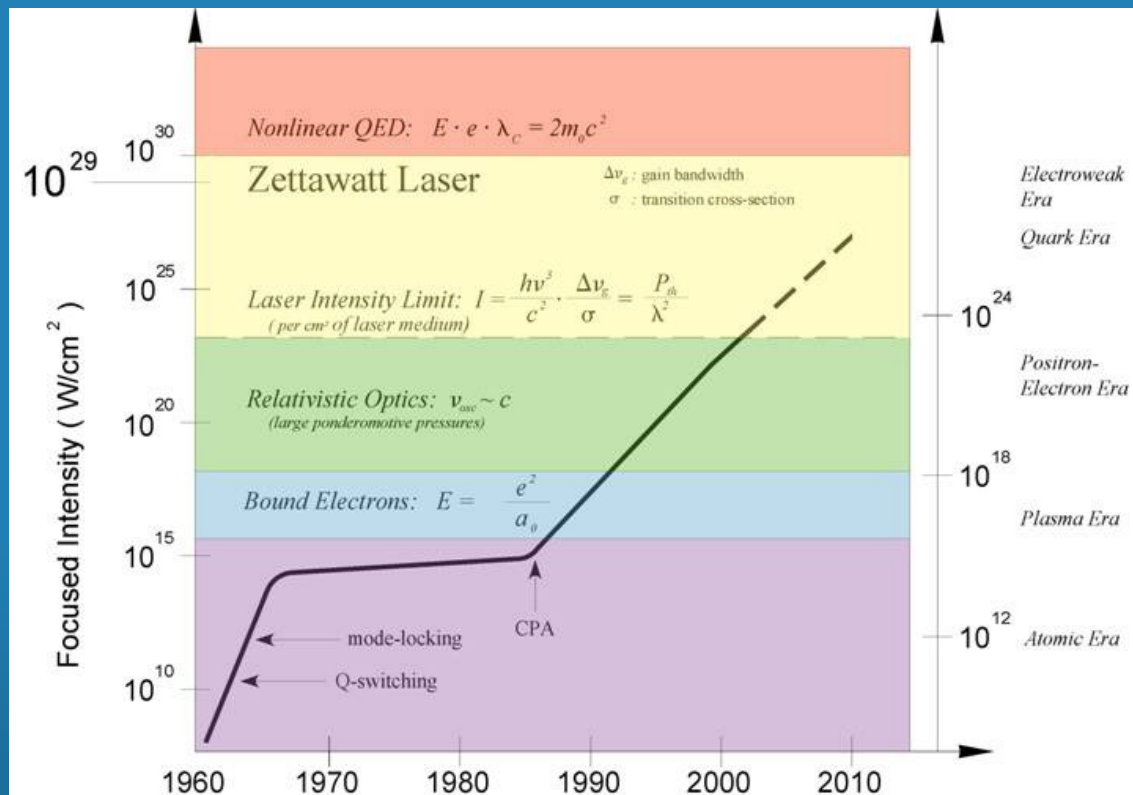


Pouco divergente (☺)



Pode ser *muito concentrada (focada)*

- Esta propriedade está relacionada com o *paralelismo* do feixe laser.
- O diâmetro da área de focagem de um feixe de laser é limitado somente pela difração, e não pelo tamanho da fonte.
- Com luz laser podem obter-se intensidades superiores a 10^{20} W/cm².
- Uma chama de maçarico oxiacetilénico tem uma densidade de fluxo de energia de apenas 10^3 W/cm².



Intensidade da radiação produzida pelo Sol, numa região próxima da sua superfície é apenas

64 MW/m².



Características da luz laser

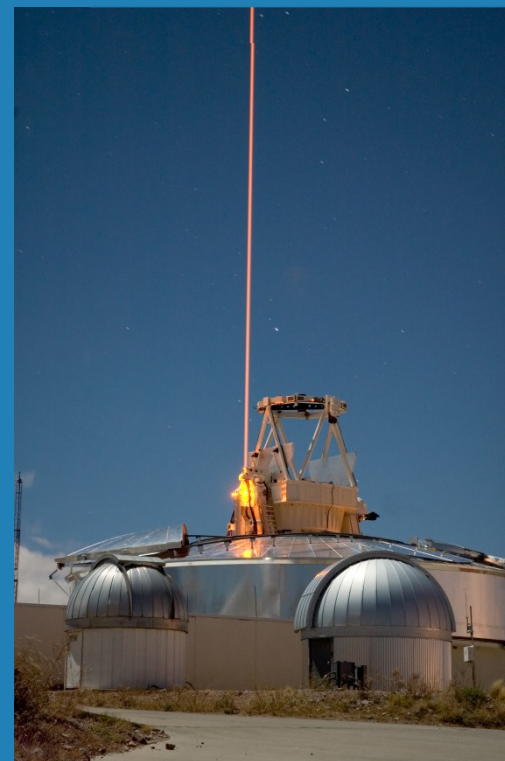
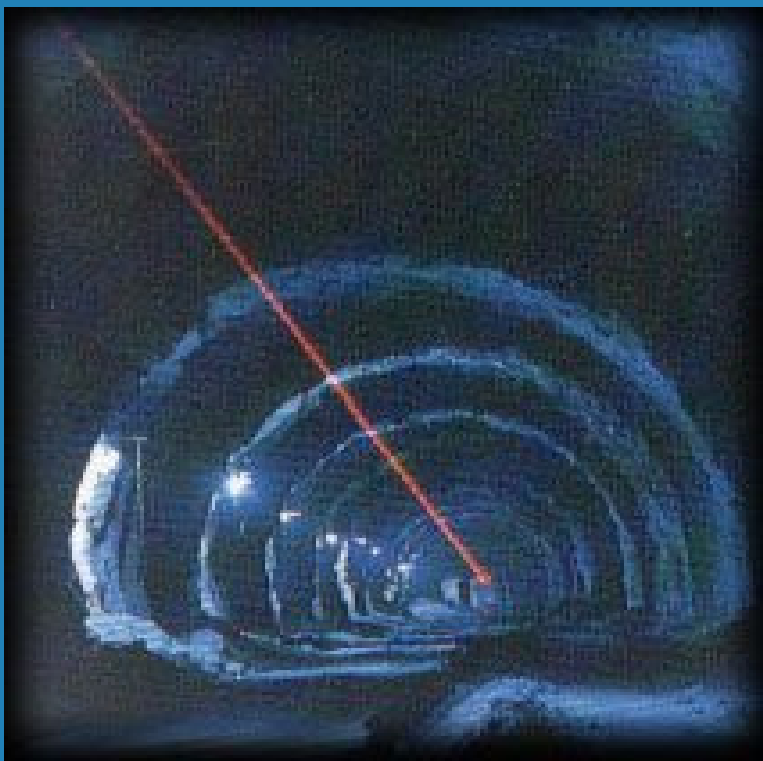
Quasi-monocromaticidade

- **A luz laser é quasi-monocromática:** as riscas de emissão de um gás rarefeito, com comprimento de onda central na região visível, $\sim 0,5 \mu\text{m}$, podem ter larguras espectrais inferiores a 1 nm, mas a risca de emissão de um laser pode ser inferior a 1 pm.
- **A luz laser pode ter elevado grau de coerência:** os trens de onda da radiação laser com a mesma fase podem ter centenas de metros de comprimento, isto é, o comprimento de coerência da radiação pode atingir **centenas de metros**. Isto significa que se pode obter franjas de interferência a partir da combinação de dois feixes laser, conseguidos por divisão desses trens de onda, enquanto a diferença de percursos ópticos dos dois feixes é no máximo dessa ordem de grandeza.
- O comprimento de coerência da luz de uma lâmpada de filamento de tungstênio ou de um tubo de descarga, por exemplo, é, tipicamente, inferior a 1 cm.

A luz do laser poder ser muito pouco divergente

- Em certos lasers, o feixe só se afasta do paralelismo *perfeito* em virtude dos efeitos de difracção, resultantes do comprimento de onda e do diâmetro do feixe.
- A luz proveniente de outras fontes pode ser colimada, isto é, transformada num feixe paralelo, por meio de uma lente ou de um espelho, mas a divergência do feixe é muito maior que a de um laser.
- Cada ponto sobre uma fonte de filamento de tungsténio, por exemplo, forma o seu próprio *feixe*, e a divergência angular do feixe total é determinada pelo tamanho e pela forma do filamento e não pelos efeitos de difracção.

Pode ter elevado grau de colimação

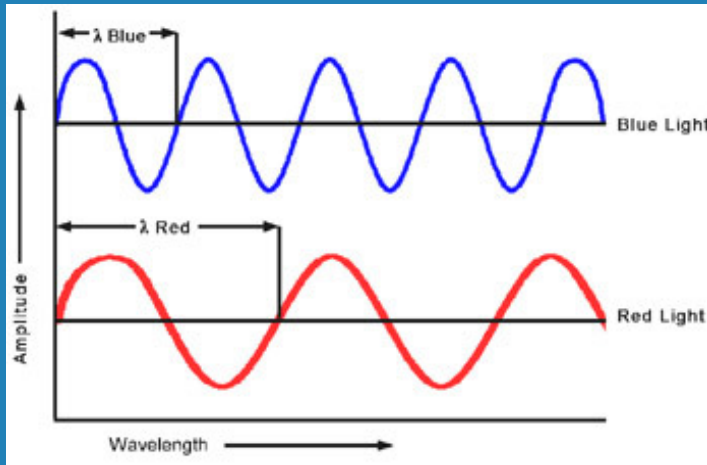


Colimação s. f. acto de colimar; (fís.) limitação de um feixe de radiação no interior de determinado ângulo sólido. (De colimar + -ção)

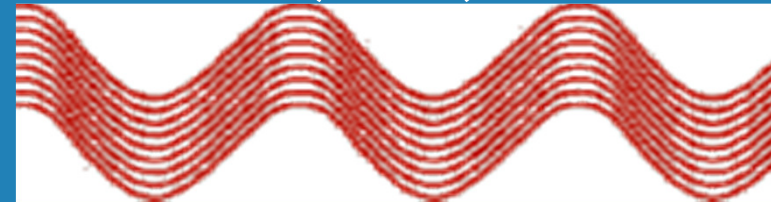
Colimador s. m. (fís.) dispositivo que serve para tornar paralelo um feixe luminoso divergente e que é constituído por uma fenda ou um objecto transparente colocado no plano focal de uma lente corrigida; instrumento óptico utilizado para fazer a pontaria numa boca-de-fogo. (De colimar + -dor)

Resumo: a luz laser pode ser ...

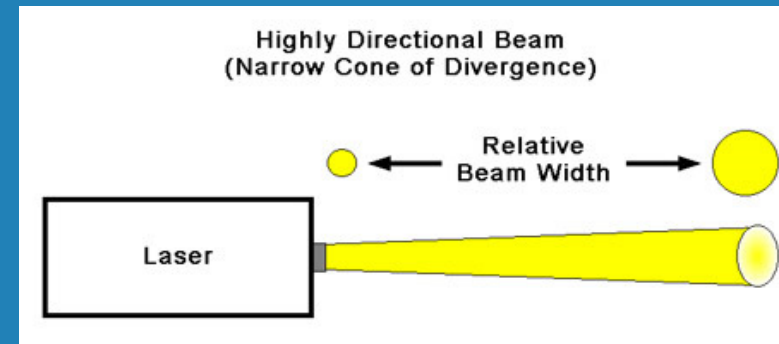
Quasi-monocromática (☺)



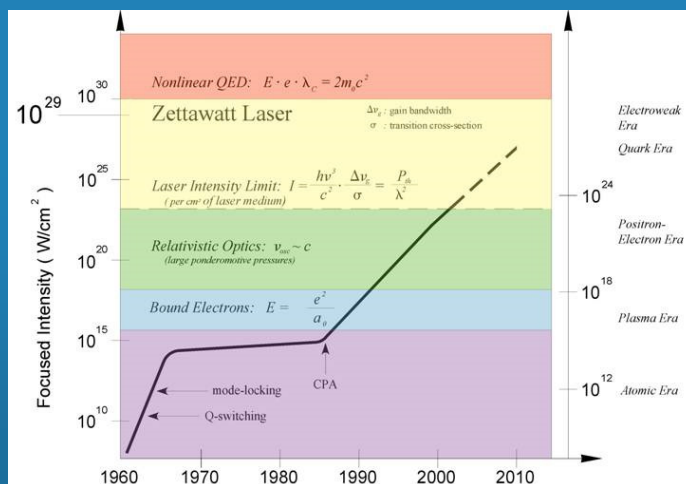
Coerente (☺ ☺)



Pouco divergente (☺)



Muito intensa (☺)



Um laser de diodo é, facilmente, 10 000 vezes mais brilhante que o Sol.

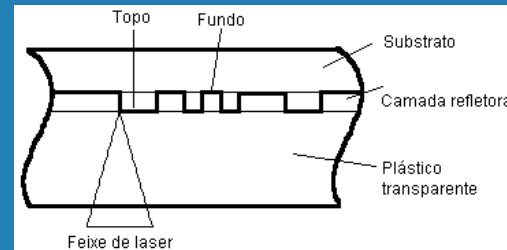
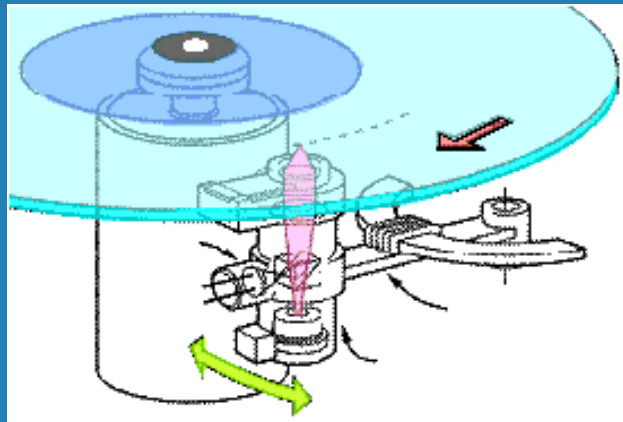
Brilho: (fís.) intensidade luminosa em determinada direcção, por unidade de superfície do corpo luminoso, projectada perpendicularmente à direcção;



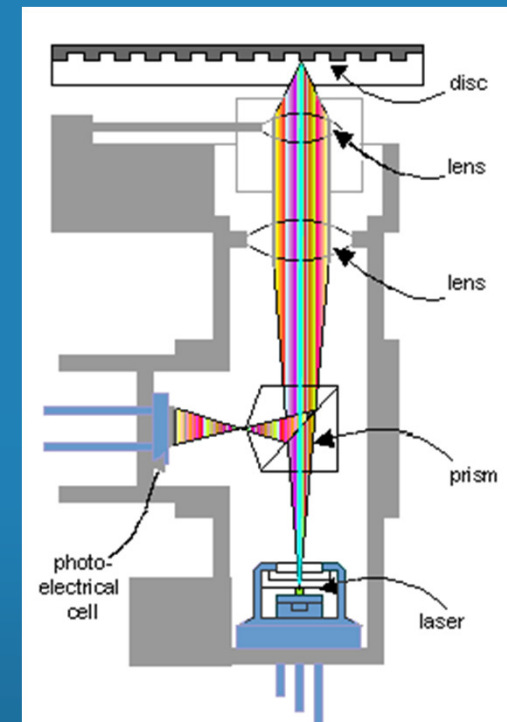
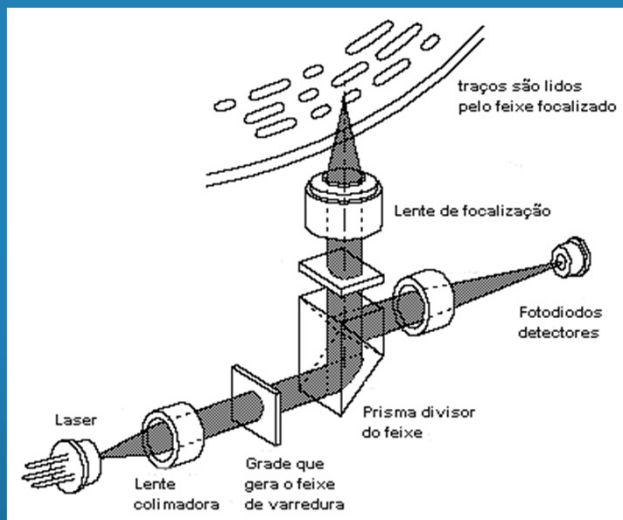
Aplicações da radiação laser

Sistema óptico de leitores de CD/DVD

Lasers de díodo semiconductor

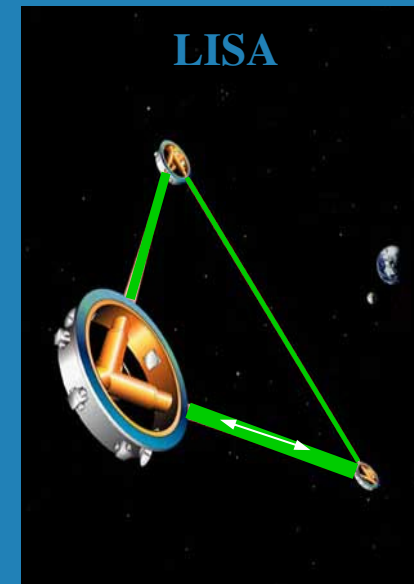


Leitores de códigos de barras



Metrologia e metalurgia

Metrologia: ciência que trata da medição das grandezas físicas, dos sistemas de unidades, dos instrumentos de medida e dos métodos e técnicas operatórias (do gr. métron, «medida» + lógos, «estudo» + -ia).

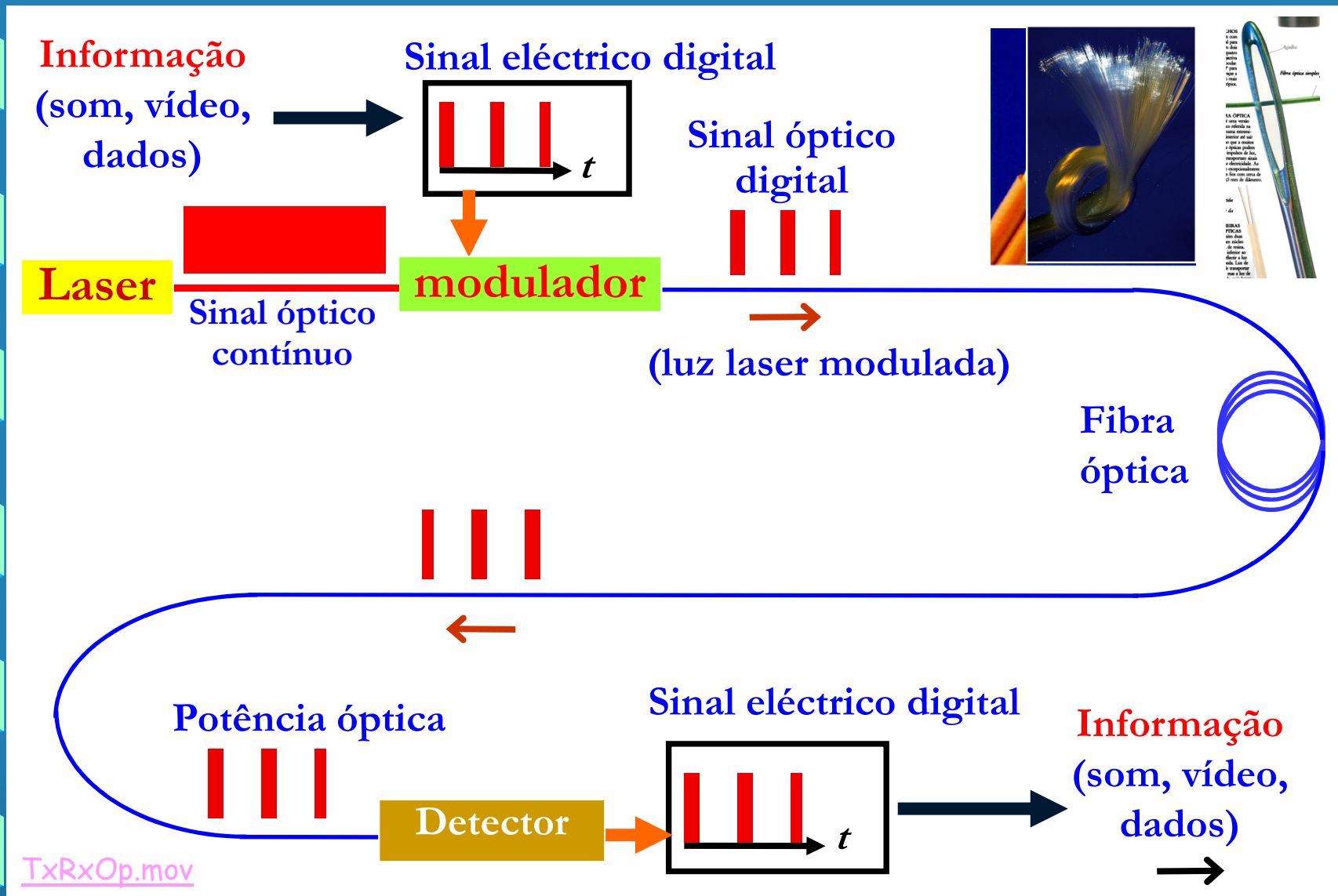


Metalurgia

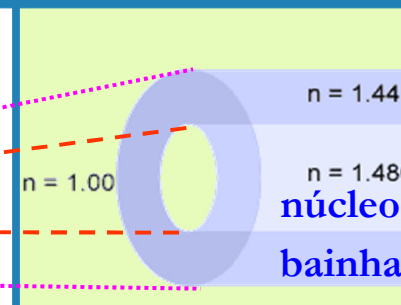
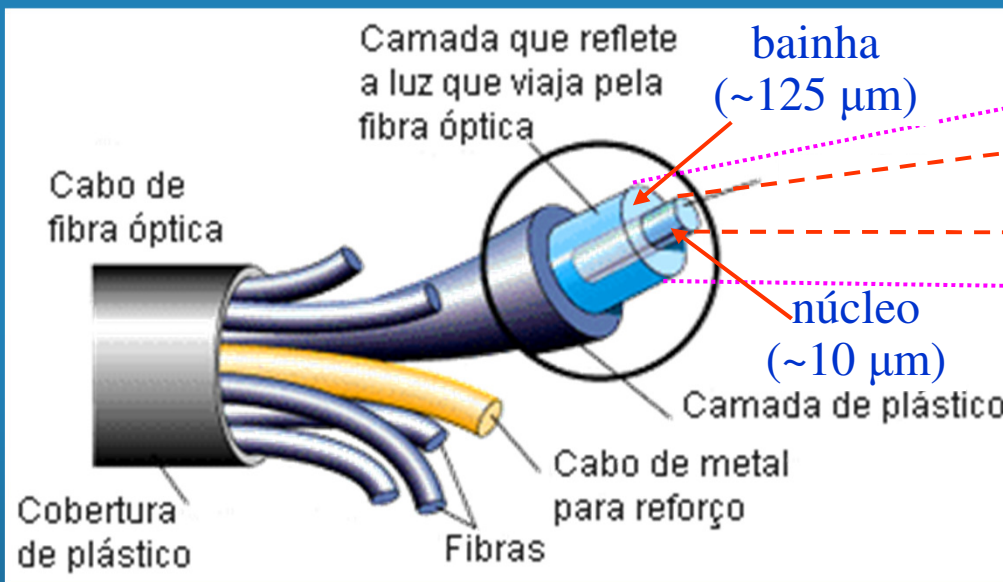
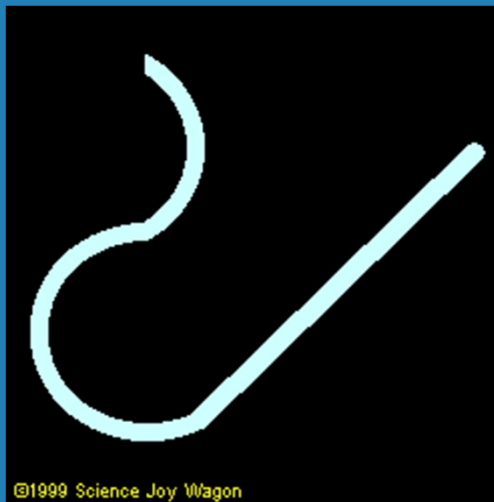
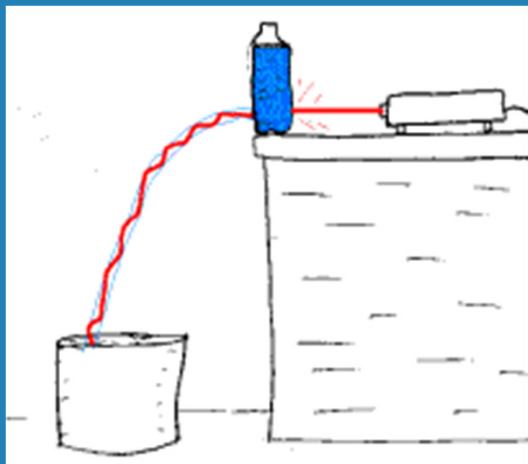
O laser de dióxido de carbono é de emissão contínua e é muito intenso. Quando concentrado por meio de lentes, o feixe de radiação infravermelha produz altíssimas temperaturas, e, por isso, pode ser utilizado no corte ou na soldagem de metais.

Metalurgia s. f. arte de extrair os metais dos seus minérios, e de os manipular industrialmente (do gr. metallourgía, «trabalho de metais»).

Comunicações por fibra óptica

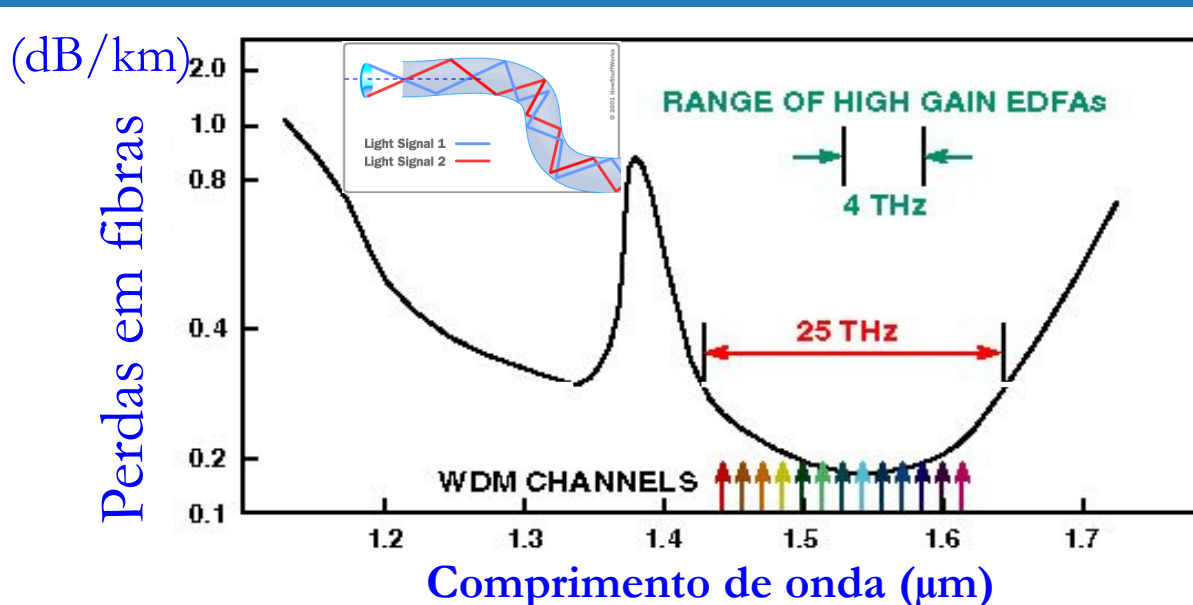


Fibra óptica



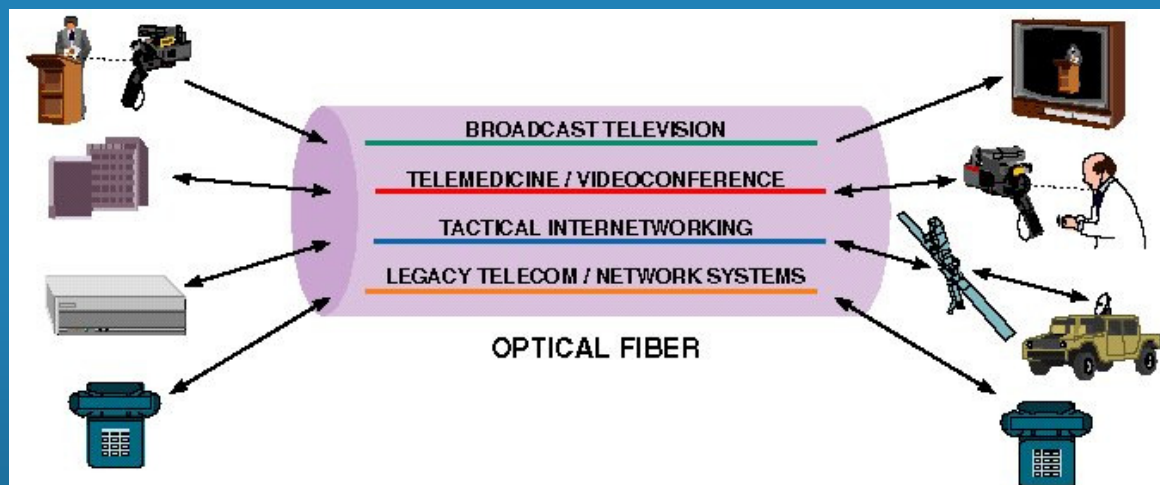
Ver, por exemplo, <http://w3.ualg.pt/~jlongras/temas-interesse.htm>

Multiplexagem de comprimentos de onda (WDM)

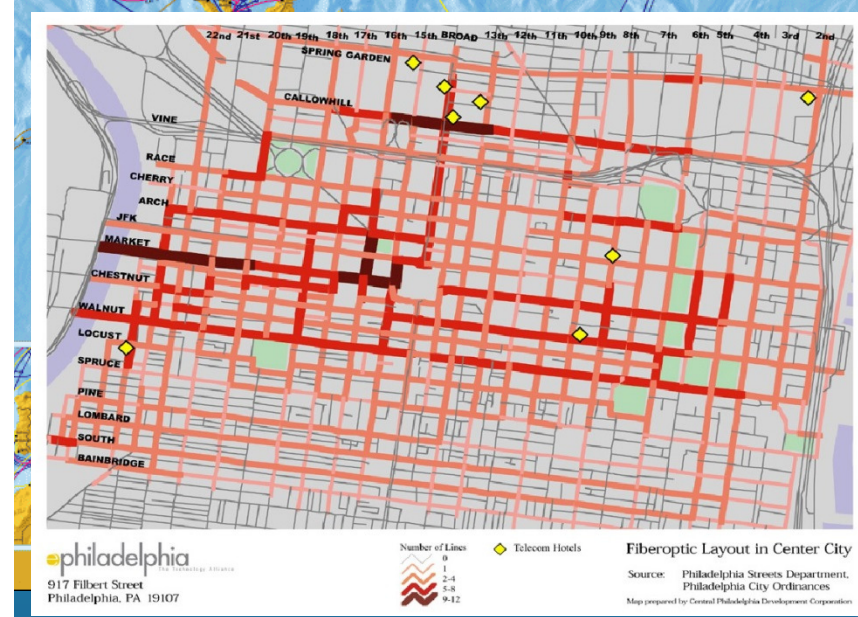
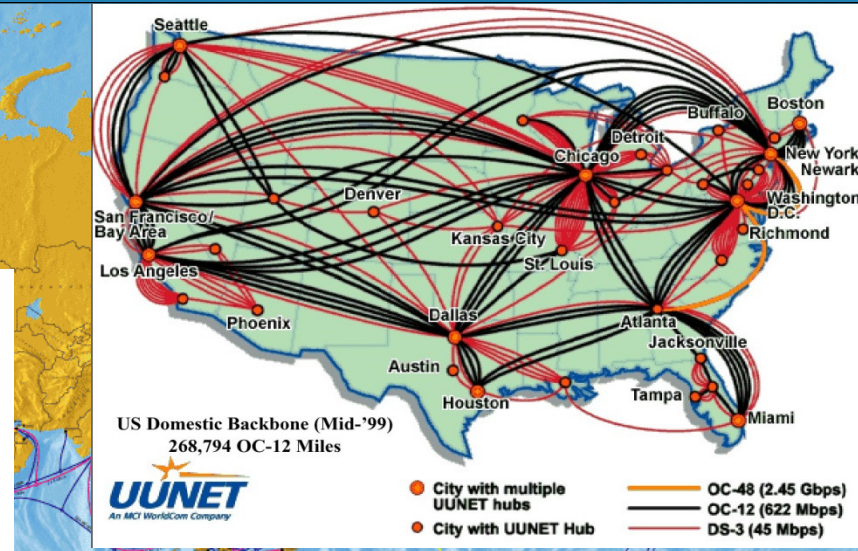
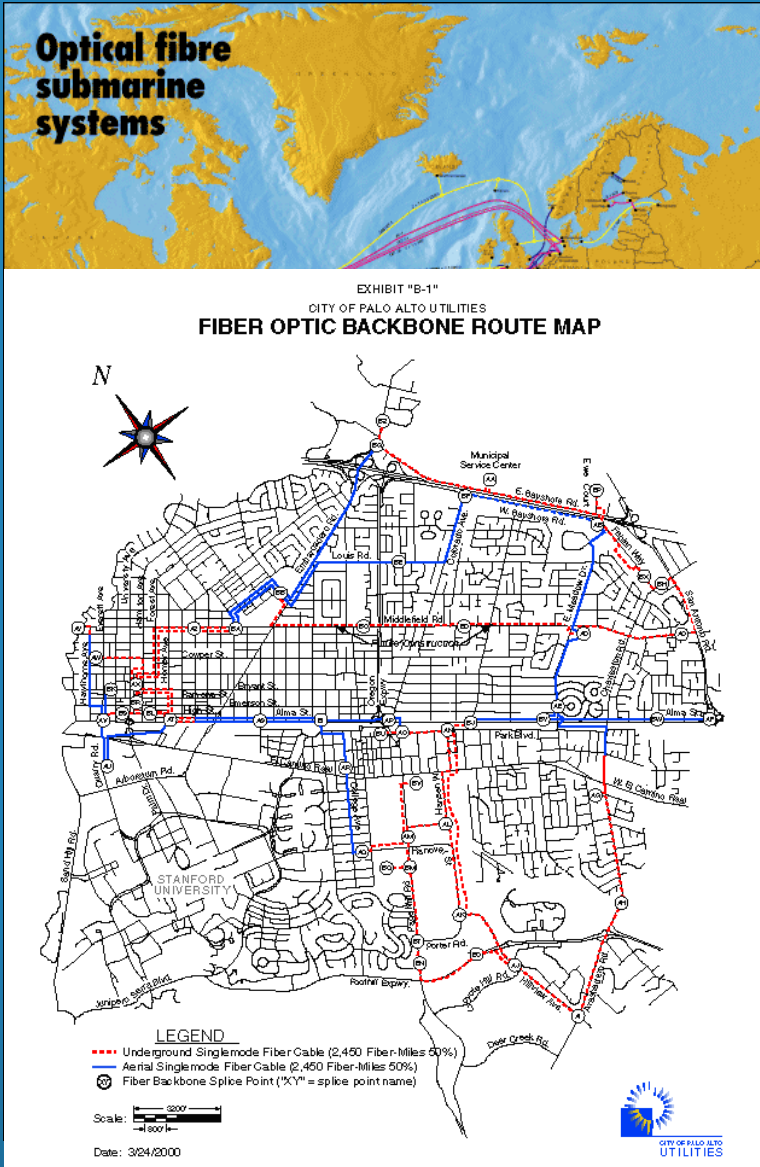


1 THz = 10^3 GHz
25 THz / 50 GHz
(500 canais)
(13 canais representados)

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



Redes de fibra óptica

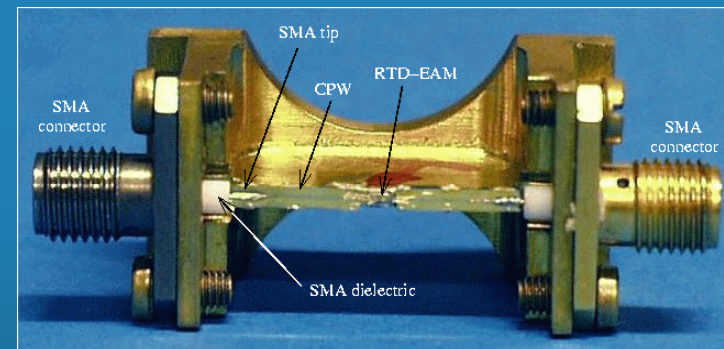
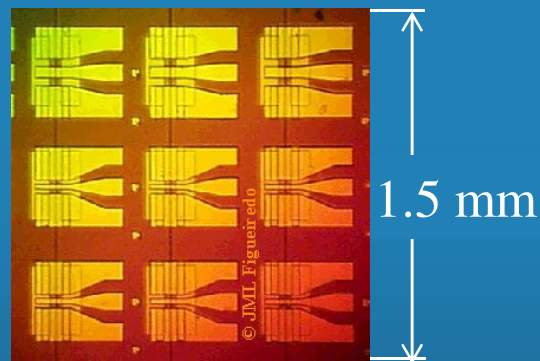
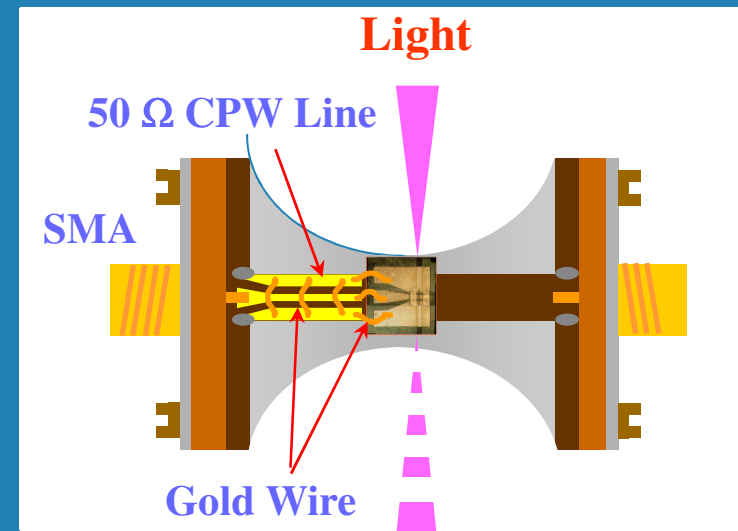
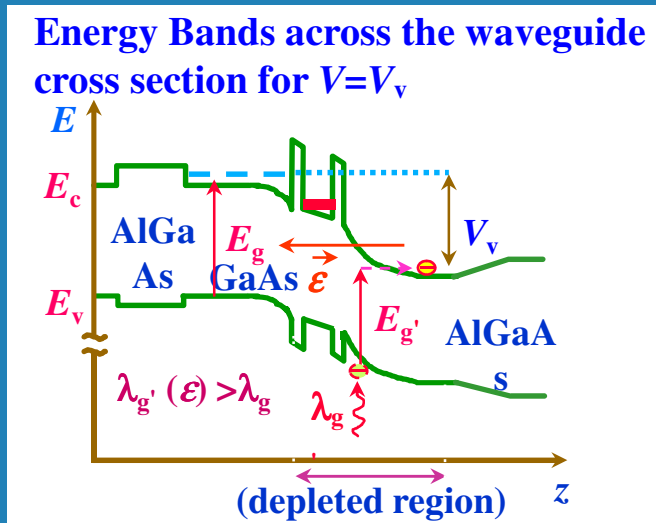


O laser e a fibra óptica: grande largura de banda

Usando luz de lasers de diodo e fibras ópticas monomodo é possível transmitir até 10 000 km, sem regeneração eléctrica, utilizando apenas uma fibra óptica, mais de 100 canais (comprimentos de onda), espaçados de 50 GHz, com taxas de transmissão de 40 Gb/s por canal, a que correspondem **4 Tb/s** de informação, **o equivalente a mais de 70 milhões de chamadas telefónicas simultâneas.**

Dispositivos para processamento de informação

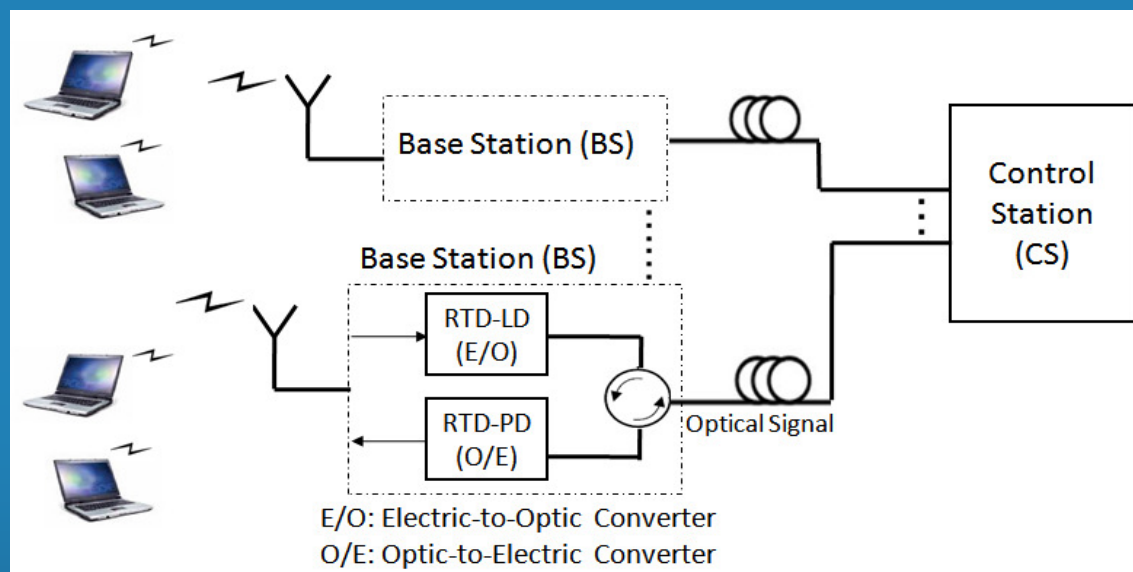
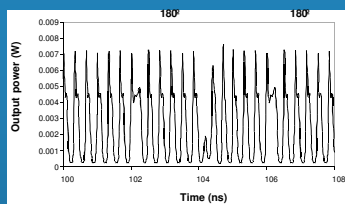
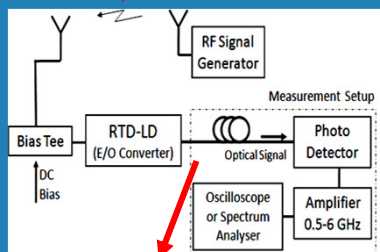
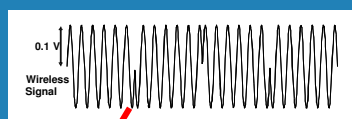
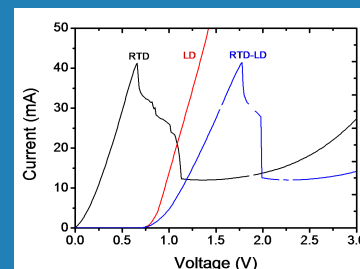
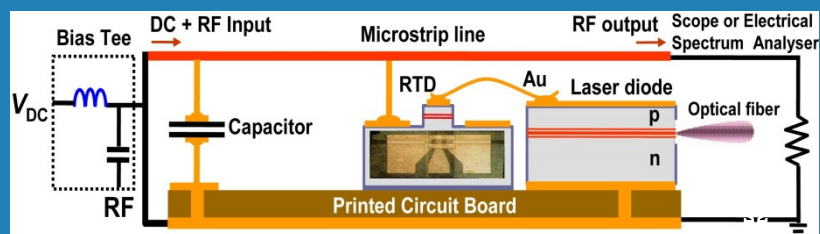
Dispositivos optoelectrónicos baseados RTDs
(RTDs: resonant tunneling diodes)



Optoelectronic device e Improved optoelectronic device: 2 patentes submetidas (Univ. de Glasgow)

Circuitos opto-electrónicos não-lineares

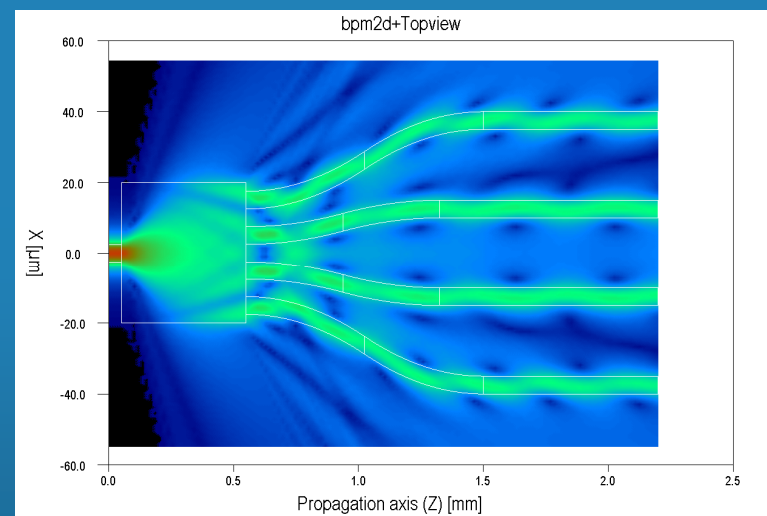
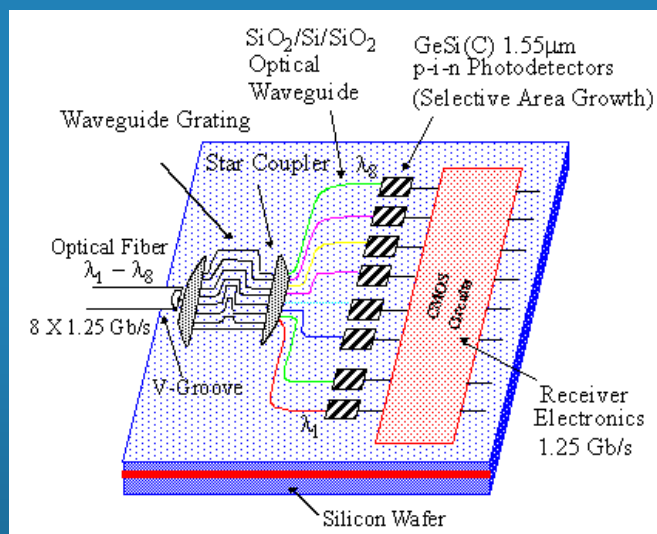
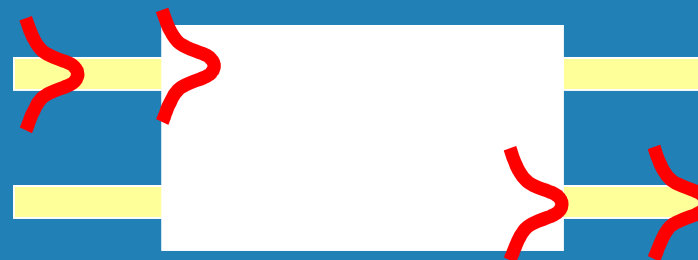
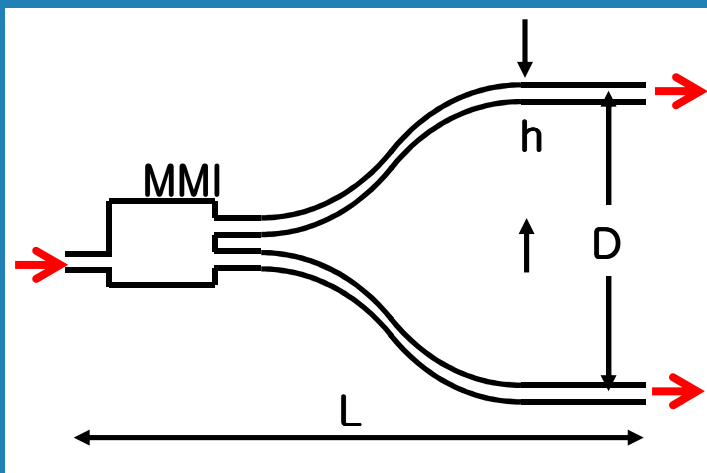
- Sincronização e geração de caos para aplicação nas novas redes de comunicação baseados em fibra óptica e sem fios



TELECOMMUNICATIONS INTERFACING SYSTEMS AND METHODS, patente submetida a 7 de Novembro de 2008 (Universidade do Algarve e Universidade de Glasgow)

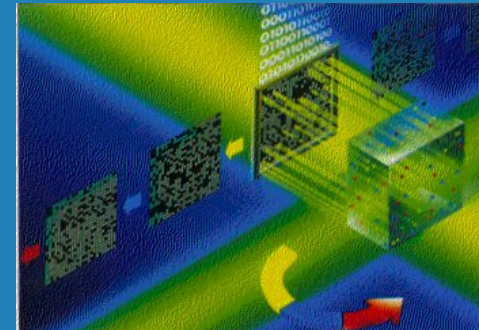
Circuitos para processamento de informação

Circuitos de ópticos e óptica integrada

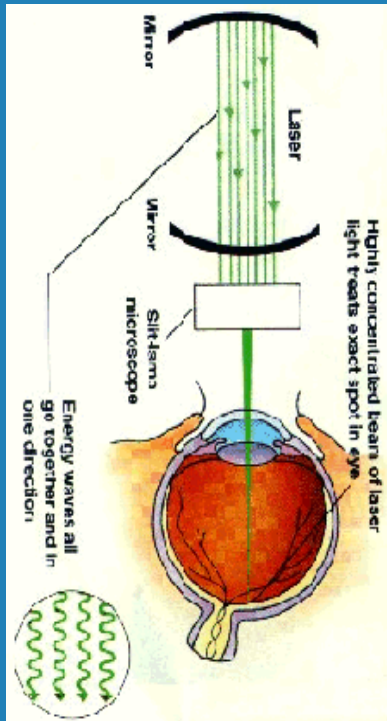


Holografia

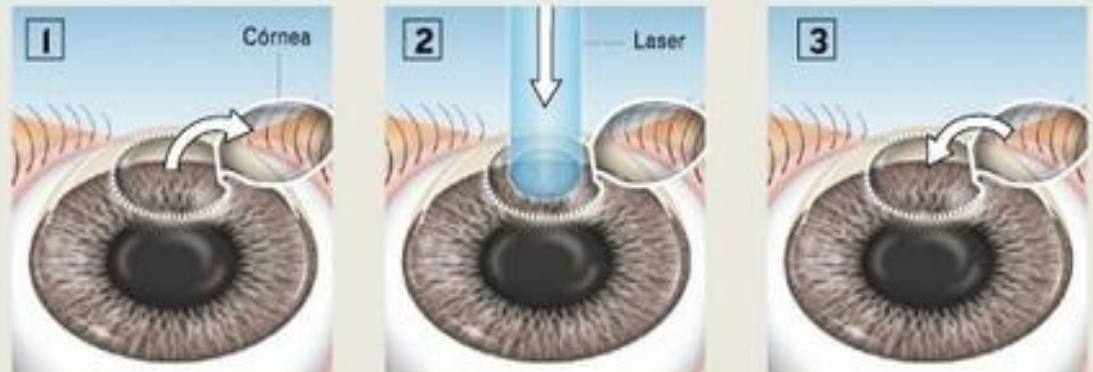
- Holografia é o conjunto de técnicas de obtenção e utilização de hologramas.
- Um holograma é o registo, numa emulsão (película gelatinosa que tem em suspensão finas partículas de sais de prata sensíveis à luz;), dos efeitos da sobreposição de duas ondas emanadas da mesma fonte luminosa, uma directa e outra reflectida pelo objecto a *holografar*, que dá a ilusão de relevo, quando iluminado por um feixe de raios laser ou luz branca (de *holo-* (inteiro) + *-grama* (registo), que significa “registo inteiro”).



Aplicações na medicina: Oftalmologia



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

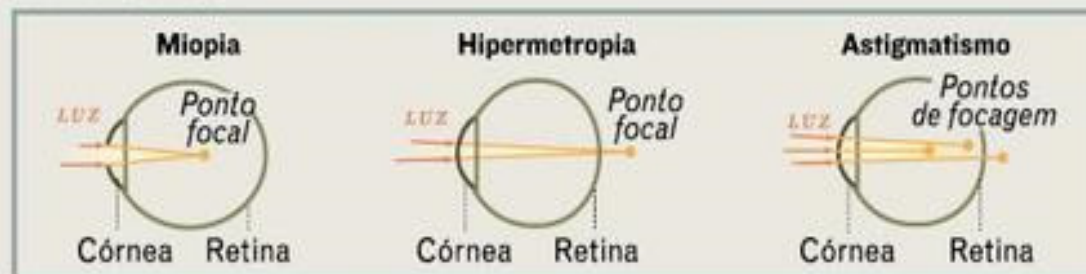


Primeiro o cirurgião corta e destaca uma aba à superfície, denominada lenticulo

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

Aplicações na medicina

Oftalmologia

Na área de oftalmologia é necessário trabalhar com várias frequências, pois cada tipo de célula absorve melhor uma determinada frequência, em detrimento das demais. Utiliza-se, basicamente 6 tipos de laser: Rubi, Árgon, Xénon, Cripton, Nd/YAG e Excimer. Os lasers são usadas na foto-coagulação de vasos sanguíneos, em tratamentos de tumores, em cirurgias oculares, em alguns tipos de cataratas, glaucomas, e úlceras da córnea. O laser de excimer, através do princípio da foto-ablação (retirada de uma pequena parte ou superfície do corpo através de um feixe luminoso), torna possível tratar miopia e astigmatismo apenas com a mudança da curvatura da superfície da córnea. A vantagem desta técnica (PRK) em comparação com a cirurgia refractiva por incisões (RK) é sua segurança e precisão.

Ablação: do lat. ablatiōne-, «acto de tirar».

Um excimer (de “excited dimer”) é um composto resultante da união de duas moléculas de monómero ou substância composta de tais moléculas duplas (do gr. di, por dís, «duas vezes» + méros, «parte») com tempo de vida curto, em que pelo menos um dos constituintes está num estado excitado.

Um laser de excimer é um laser que emite no ultravioleta, sendo muito usado em oftalmologia e no fabrico de dispositivos semicondutores electrónicos e optoelectrónicos.

Outras aplicações na medicina

Otorrinolaringologia

Os tipos de laser mais aplicados, em geral, são os de Árgon, CO₂ e Nd/YAG. Entre as várias aplicações do laser no campo de otorrino, pode-se destacar as operações nas cordas vocais, onde é possível vaporizar tumores; a endoscopia, onde as úlceras podem ser tratadas sem que seja preciso operar o paciente; as hemorragias internas; através de um broncoscópio - instrumento para examinar o interior dos brônquios -, sendo possível operar lesões nos pulmões, desobstruir as vias respiratórias, entre várias outras possibilidades.

Cardiologia

O laser de excimer ajuda também a tratar a angioplastia, onde uma ou mais artérias estão bloqueadas pelo estreitamento localizado, resultado da acumulação de colesterol no sangue. Também é empregue na desobstrução de vasos sanguíneos, no interior do próprio coração, através de fibras ópticas; nesse caso, a fibra é acoplada a um monitor de TV, a fim de que possa ser visualizado o local da aplicação.

Outras aplicações na medicina

Neurologia

Na neurocirurgia, o laser está a ser muito utilizado, devido às suas qualidades de remoção dos tecidos sem sangramento e sem contacto físico algum.

Ginecologia

Em ginecologia, usa-se o laser para vaporizar carcinomas - tumor maligno, cancro -, condilomas - saliência de aspectos «verrucosos» no ânus ou nos órgãos genitais -, vírus de herpes; cicatrizar hemorragias e úlceras; desobstruir canais, entre outras aplicações.

Urologia

Em urologia permite realizar algumas operações através de fibras ópticas, como, por exemplo, vaporização de pedras nos rins, desde que essas se encontrem numa posição favorável. As hemorróidas são vaporizadas rapidamente, apenas com anestesia local e sem muita dor

Outras aplicações na medicina

Dermatologia e Cirurgia Plástica: Na área de dermatologia e Cirurgia Plástica, o laser é activamente aplicado na eliminação das manchas de pele, verrugas, tumores benignos, tatuagens, rejuvenescimento cutâneo, tratamento de cicatrizes de acne, varizes, estrias, *quelóides*, implante capilar, cirurgia de pálpebras, depilação definitiva e outros. Além disso, permite fazer vários tipos de operações plásticas.

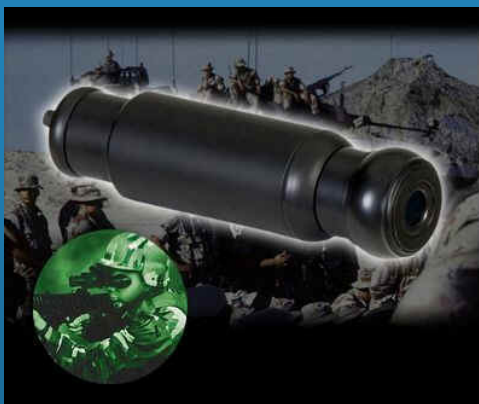
Odontologia - *O Laser em vez da broca*: O laser entrou nas clínicas odontológicas nos anos 90. O tipo mais usado nos tratamentos clínicos é o laser de baixa potência, pois tem acção analgésica, anti-inflamatória e bioestimulante, contribuindo para a regeneração dos tecidos. É aplicado no tratamento de aftas e herpes labiais, incisões ou remoções de tumores e lesões, vaporização de tecidos em operações plásticas e tratamentos gengivais e como adjuvantes de outros procedimentos clínicos, como tratamento de canal.

Entretimento (espectáculos, etc.)




Aplicações militares

Nas aplicações militares de alto custo utiliza-se os laser de neodímio e o laser de dióxido de carbono, utilizados para localizar alvos a longa distância, tais como satélites espões e orientar mísseis balísticos de defesa, em virtude da sua elevada intensidade. Outras aplicações são a mira laser de emprego individual que utiliza o laser de díodo, utilizadas em arma de pequeno calibre (geralmente portáteis). Pode servir de arma de longe alcance – o “Raio da Morte” – que durante tanto tempo foi apenas um tema de ficção científica.



Estes lasers possibilitam o alcance de alvos aéreos a uma distância de até três quilômetros. Mas as aplicações militares são limitadas, pois os feixes de alta potência divergem ao atravessar o ar.

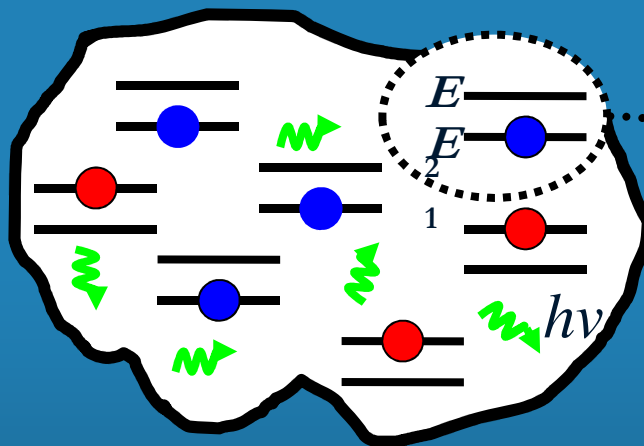
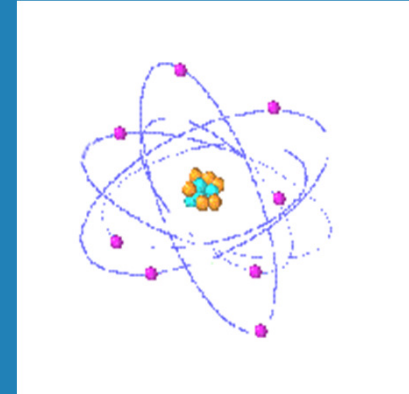
Uma bomba guiada a laser é tão precisa que pode atingir a cabina de um caminhão, após um voo de vários quilômetros.



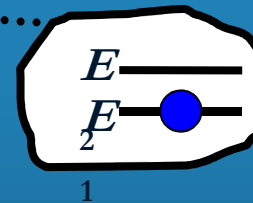
**Mas como é que se obtém
luz laser?**

Modelo da matéria

- A matéria (coleção de átomos) está em equilíbrio termodinâmico com um campo de radiação.
- Átomos e **radiação ressonante** estão contidos num volume a uma temperatura T , podendo interagirem entre si.
- No que se segue considera-se apenas dois níveis de energia por átomo de interesse.



Radiação ressonante: radiação com frequência ν satisfazendo a condição $h\nu = E_2 - E_1$.

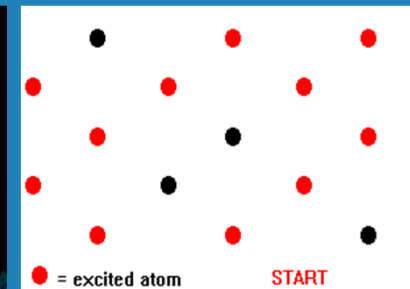
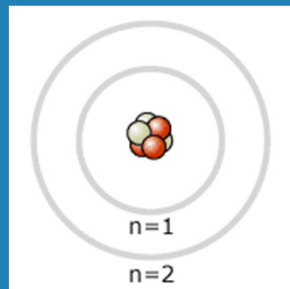


Átomo: do gr. átomos, «indivisível», pelo lat. atòmu-, «átomo»).

Os átomos podem emitir e absorver luz

- Uma característica fundamental dos átomos é que eles emitem e absorvem luz em frequências bem definidas, que é consequência de apenas poderem existir em determinados estados quânticos, cada estado com sua energia específica.
- Um átomo emite luz ao passar de um desses estados para outro de menor energia. A frequência ν da luz emitida é dada pela **condição de ressonância de Bohr**:

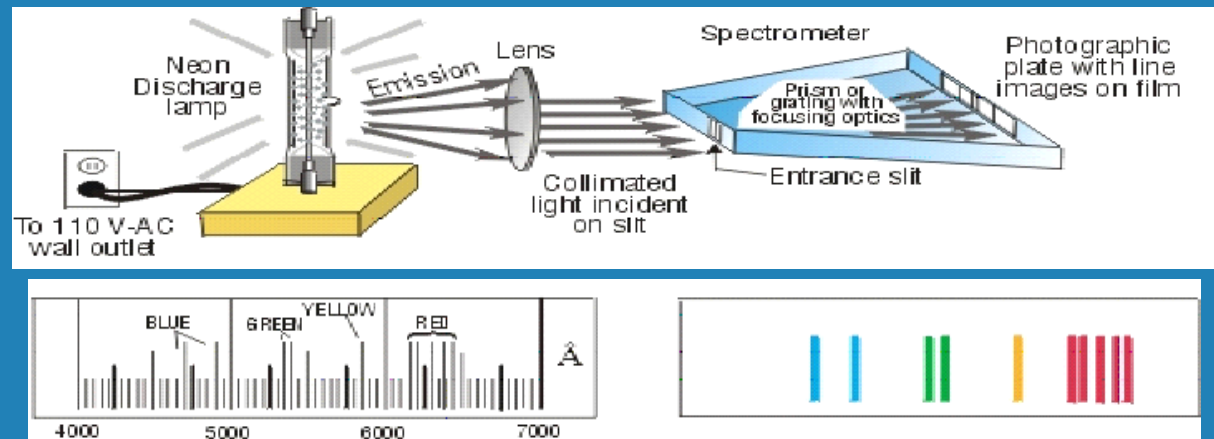
$$h\nu = E_i - E_f$$



- Assim, se quisermos que uma fonte emita radiação de uma dada frequência ν , só temos de procurar um meio em que dois níveis atômicos possíveis satisfaçam a condição $h\nu = E_i - E_f$.
- **Ter presente que os átomos também podem emitir/absorver energia por processos não radiativos.**

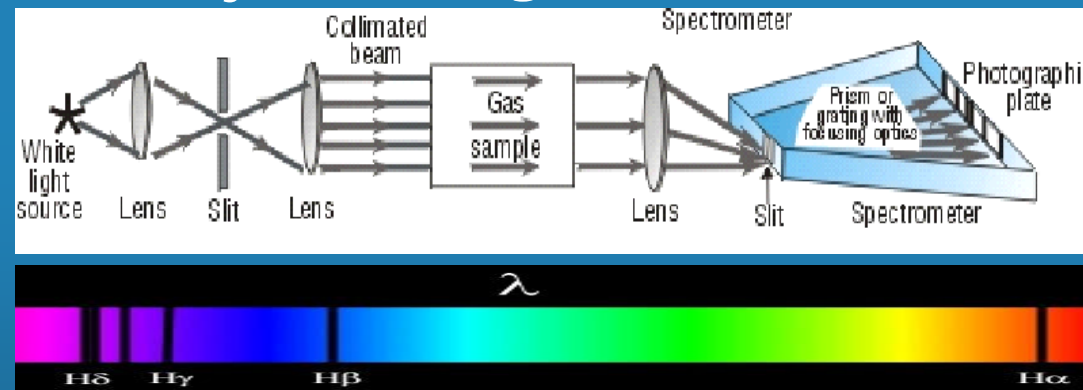
Espectros de absorção e de emissão de um gás

Espectro de emissão de um gás rarefeito



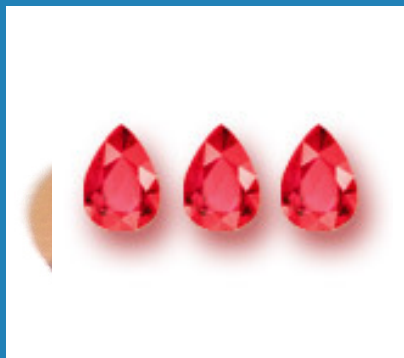
Espectroscopia: do lat. spectru-, «espectro» + gr. skope, n, «olhar» + -ia.

Espectro de absorção de um gás rarefeito

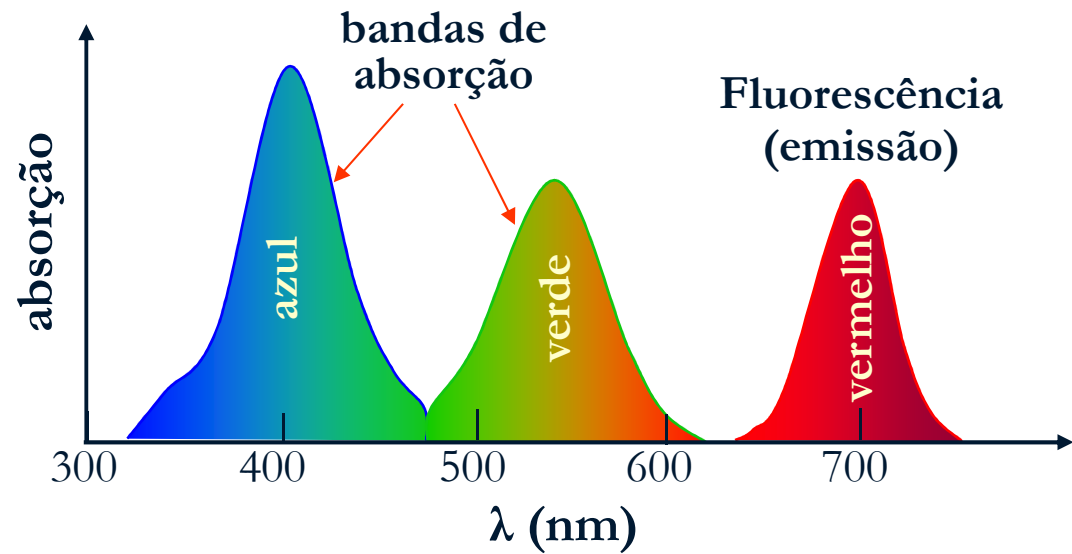


Espectros de absorção e de emissão de um sólido

Exemplo: espectros de absorção e emissão do rubi



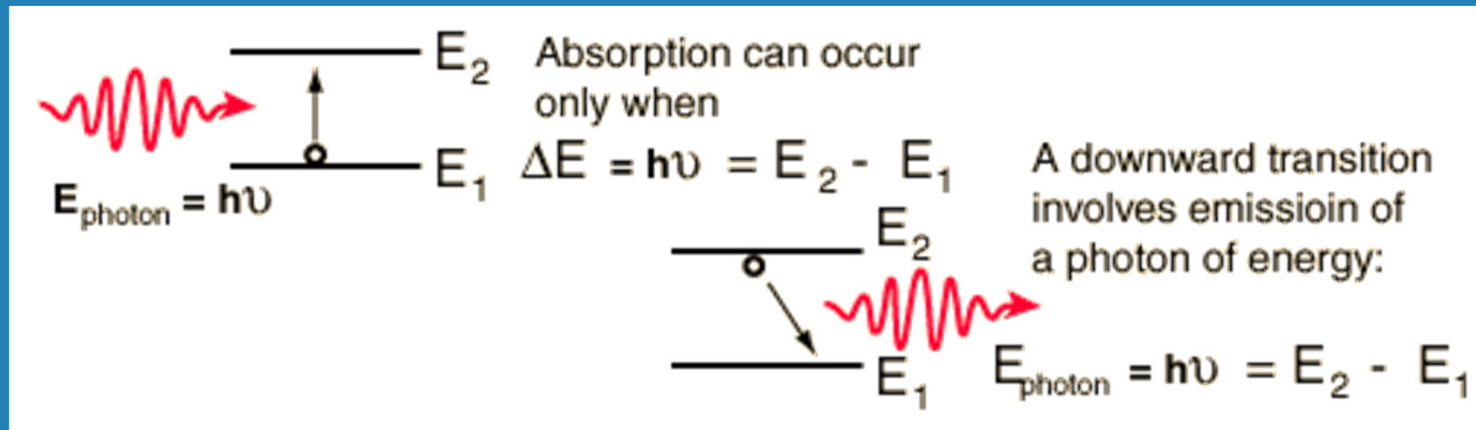
(bandas devidas à presença de íons Cr^{3+} no rubi)



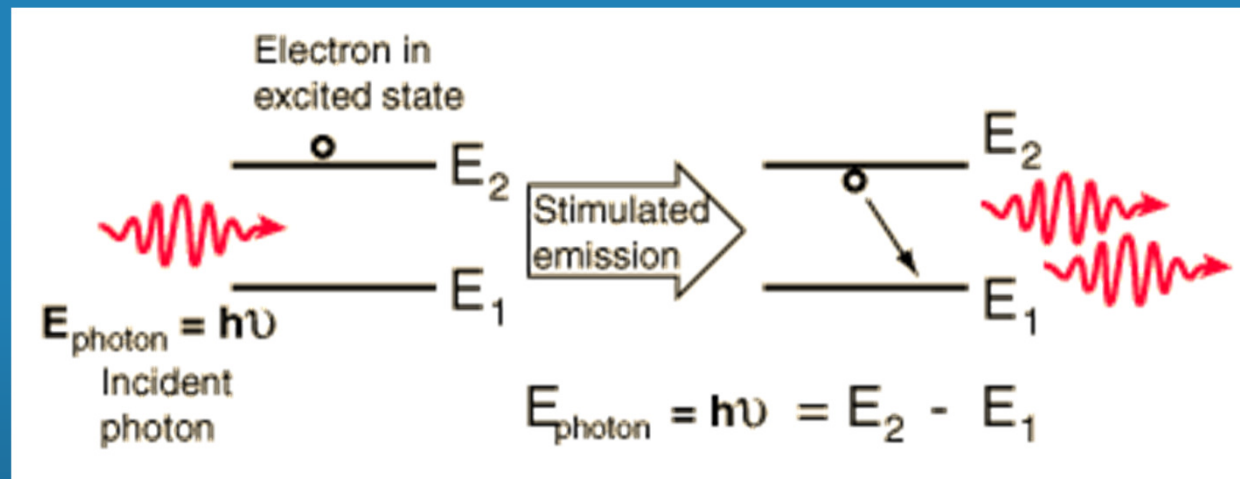
- As **bandas de absorção/emissão fluorescente** correspondem às gamas de frequências disponíveis associadas às transições radiativas permitidas.
- **Rubi** é uma gema, uma variedade de corindo (mineral constituído pelo sesquióxido de alumínio, muito duro, utilizado como pedra preciosa e como abrasivo), transparente, de um vermelho vivo porque contém uma pequena percentagem de Cr_2O_3 .

A emissão pode ser espontânea ou estimulada

- Emissão espontânea

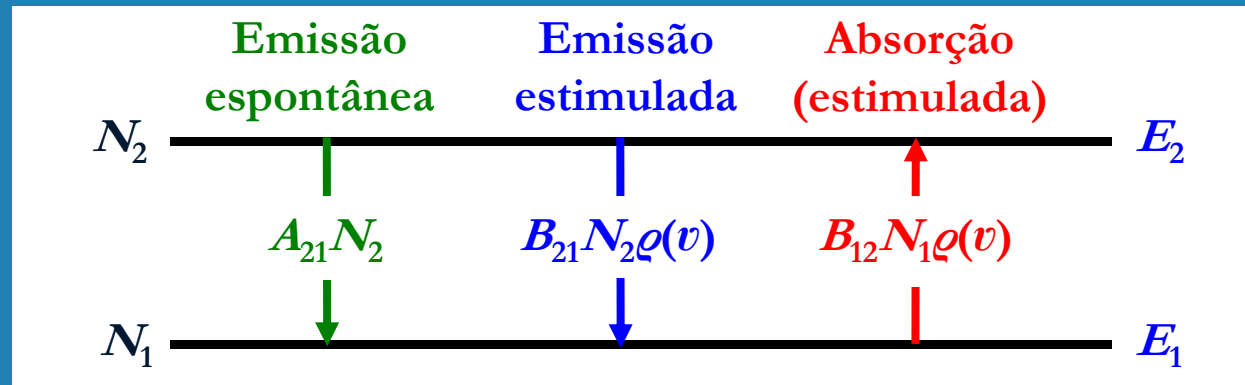


- Emissão estimulada



Interacção entre a radiação e a matéria

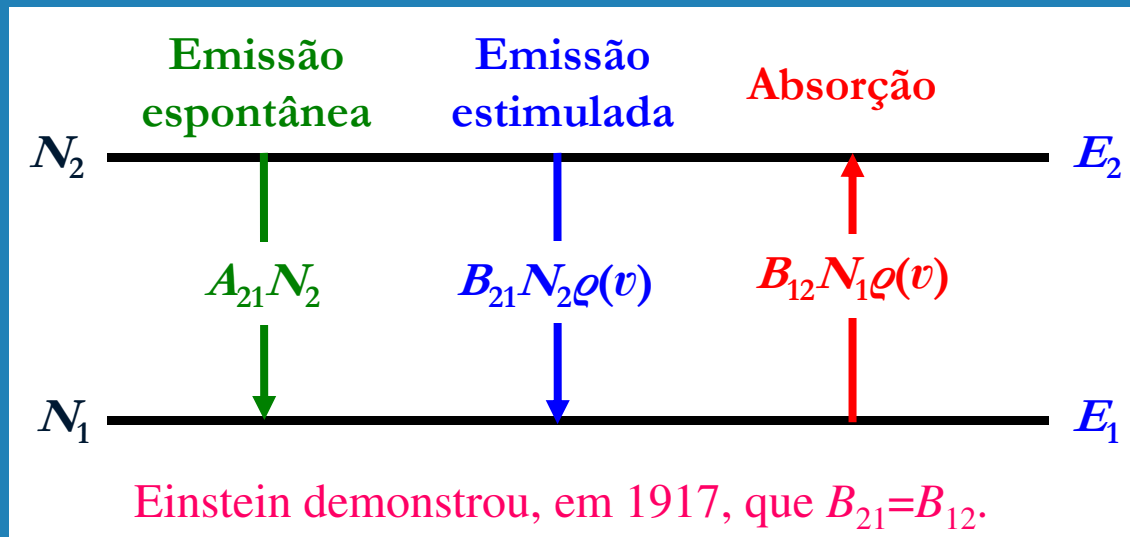
- Se todo o sistema está em equilíbrio termodinâmico à temperatura T , o número de átomos N_2 nos níveis de energia E_2 , o número de átomos N_1 nos níveis de energia E_1 e o número de fótons contidos no volume material permanecerão praticamente inalteráveis.



- Embora ocorram processos de emissão e absorção que, adicionando e removendo fótons do campo de radiação a uma taxa constante, estes deixam invariável o número total de fótons no volume em causa.
- Ao mesmo tempo, o número de átomos N_2 que se transitam para E_1 durante o processo de emissão, e o número de átomos N_1 que se passam para E_2 durante o processo de absorção, é tal que as densidades das populações de N_1 e de N_2 mantêm-se inalteráveis.

Amplificação e atenuação de radiação

- Em condições normais, $N_1 > N_2$ e a absorção excede a emissão estimulada, diminuindo o número de fótons no meio: diminuição da densidade de fótons $\rho(\nu)$ – atenuação.



B_{21} : coeficiente de emissão estimulada;

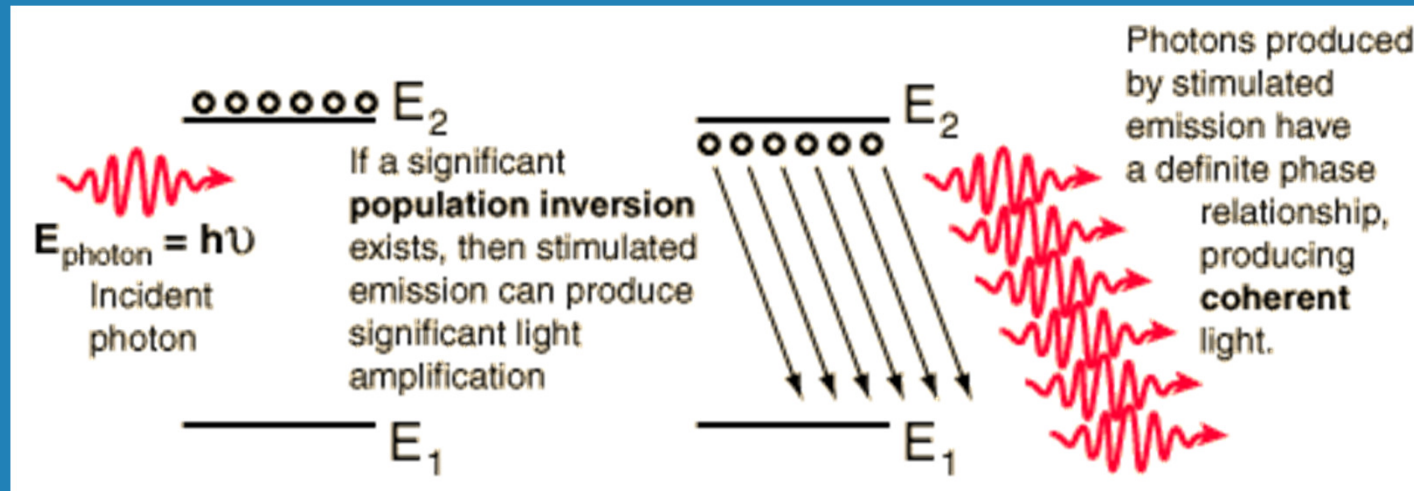
B_{12} : coeficiente de absorção;

A_{21} : coeficiente de emissão espontânea.

- Se $N_2 > N_1$ e a radiação interagir com os átomos, a emissão estimulada é maior que a absorção e serão *adicionados* fótons ao meio: aumenta a densidade de fótons $\rho(\nu)$ – amplificação. Para termos emissão laser é necessário que $N_2 > N_1$: condição de inversão da população, que não ocorre naturalmente.

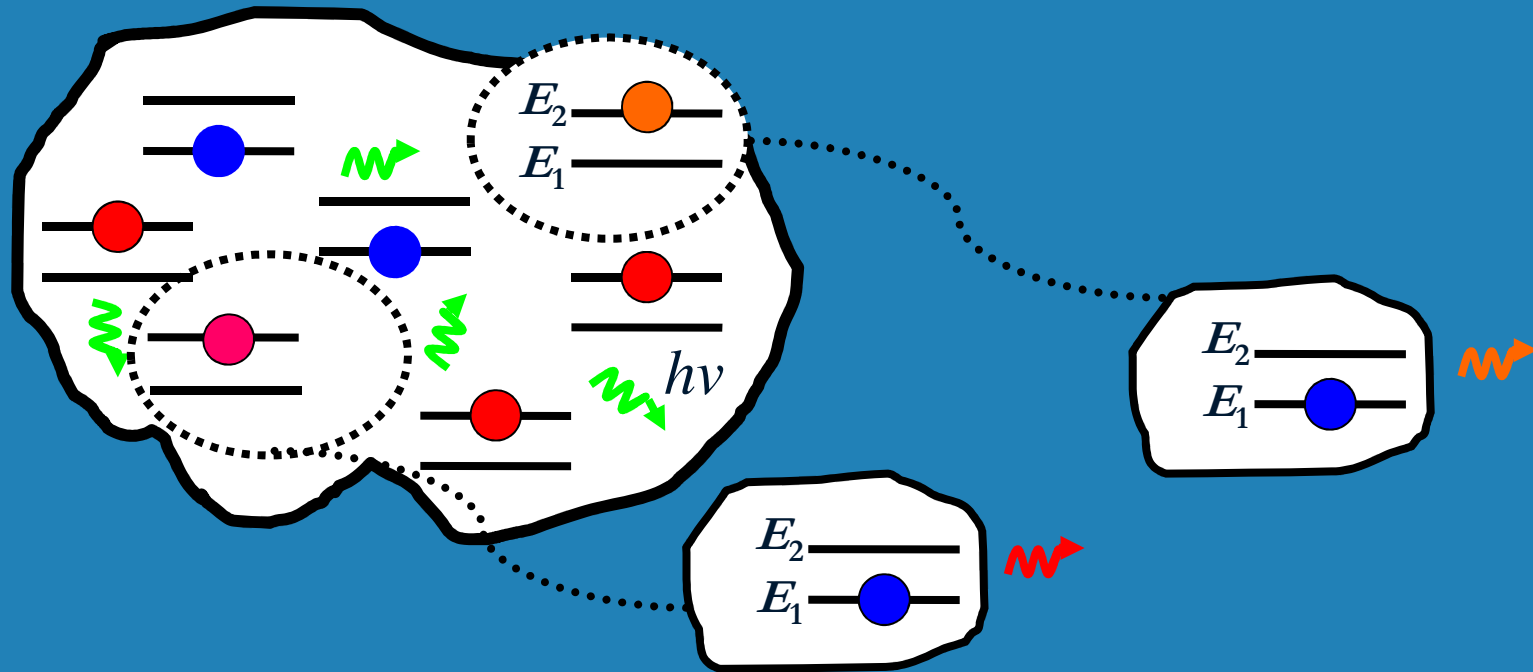
Inversão da população e amplificação de radiação

- Quando a população no nível 2 N_2 é superior à população no nível 1 N_1 , diz-se que ocorre inversão da população entre os níveis 1 e 2.



- Quando a radiação interage com os átomos, a emissão estimulada é maior do que a absorção, 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 o meio laser, etc.

A emissão estimulada é, em geral, policromática



Num meio material cada nível de energia apresenta uma dada largura espectral, permitindo *diversas* transições ressonante: A radiação é emitida com frequência

$$\nu_0 - \Delta\nu < \nu < \nu_0 + \Delta\nu, \text{ com } h\nu_0 = E_2 - E_1.$$

Emissão policromática em sólidos (fluorescência)

- O espectro de emissão (fluorescência) de um meio é, em geral, composto por uma banda *contínua* de frequências/comprimentos de onda (estreita nos gases e larga nos sólidos e líquidos)

Espectros de absorção e de emissão do rubi

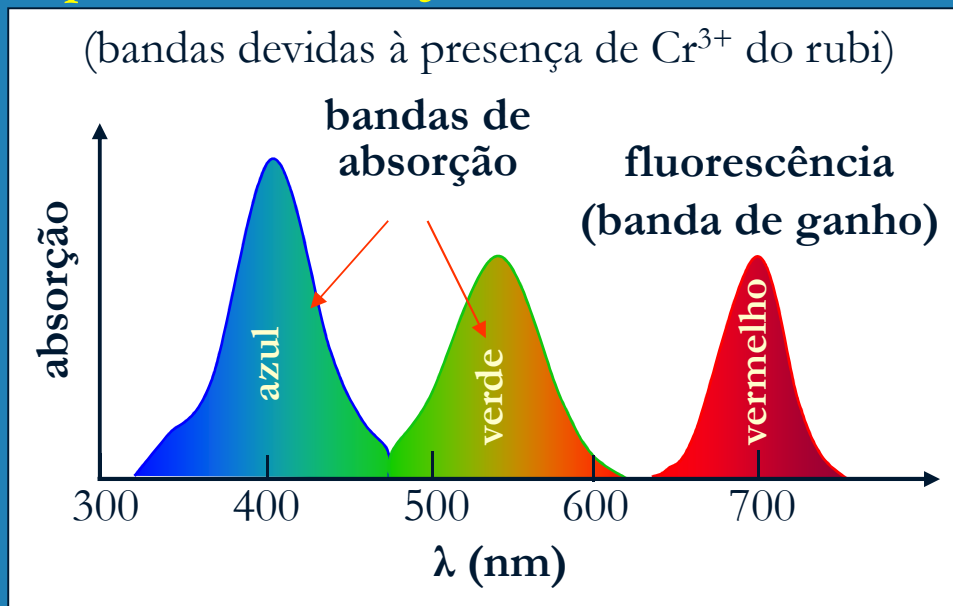
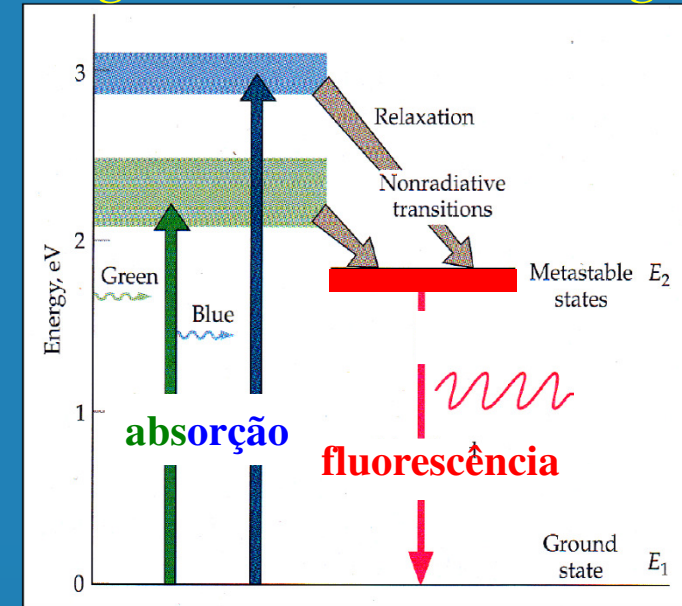


Diagrama dos níveis de energia



- Mas como se obtém luz *quasi-monocromática*?

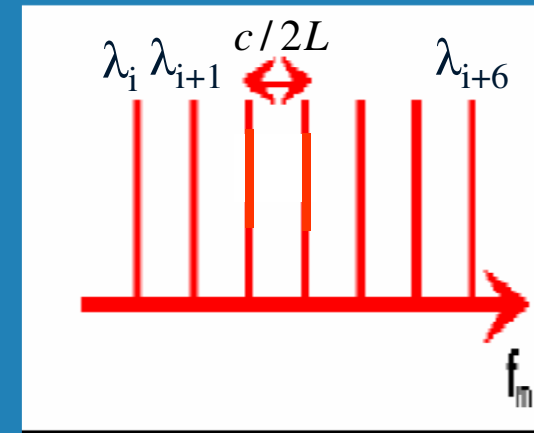
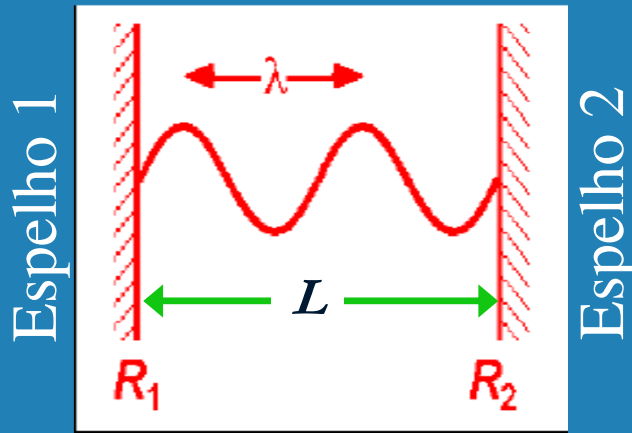
Monocromático: do gr. *mónos*, «único» + *chrōma*, -atos, «cor».

Cavidade óptica: selecção de frequência

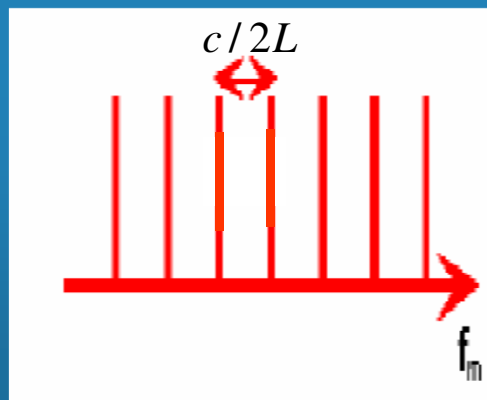
emissão *quasi-monocromática*

Cavidade laser é *ópticamente ressonante*

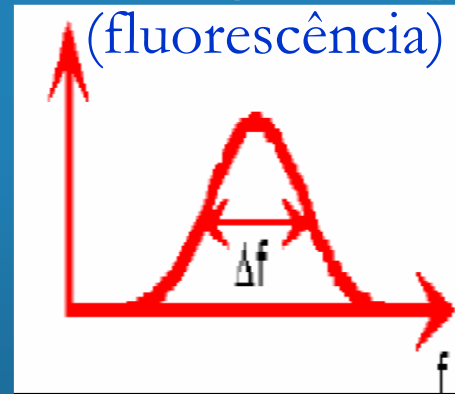
Modos próprios da cavidade



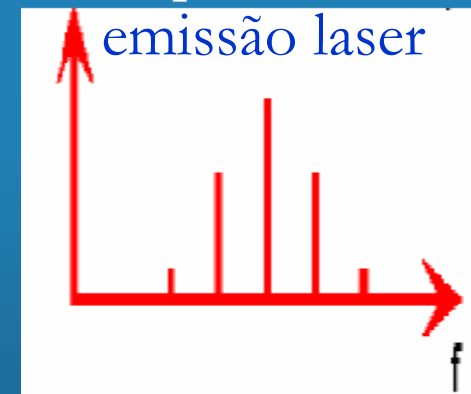
Modos próprios



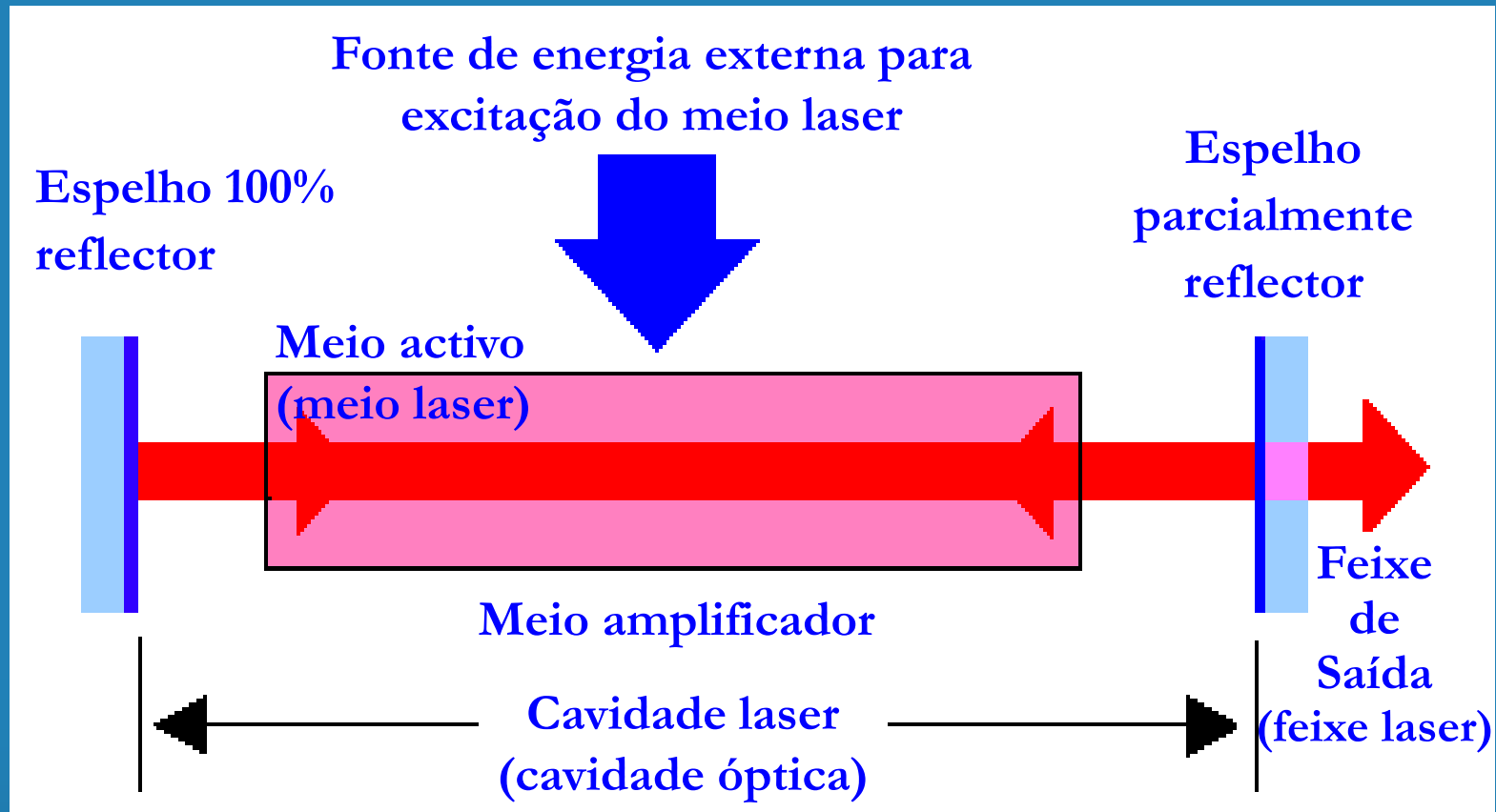
Banda de ganho óptico
(fluorescência)



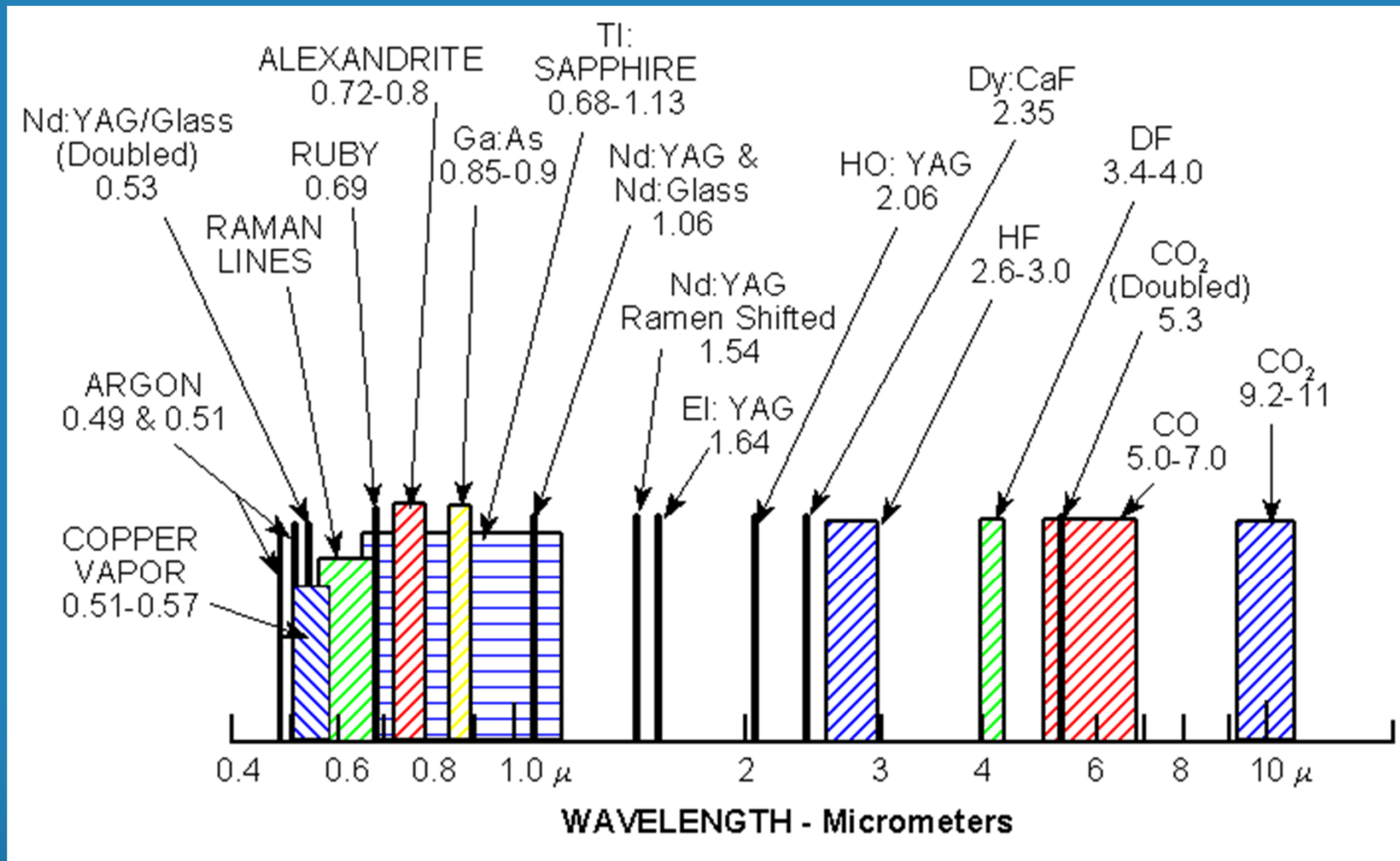
Espectro da
emissão laser



Constituintes essenciais de um laser



Meios laser

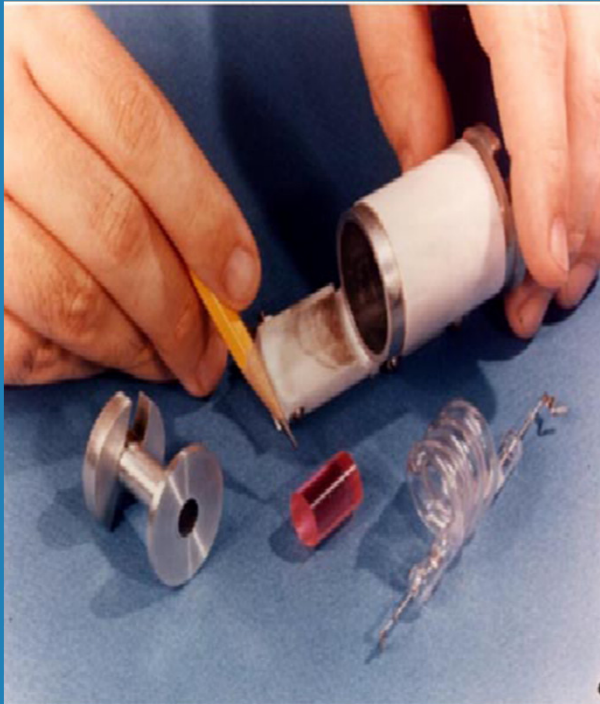




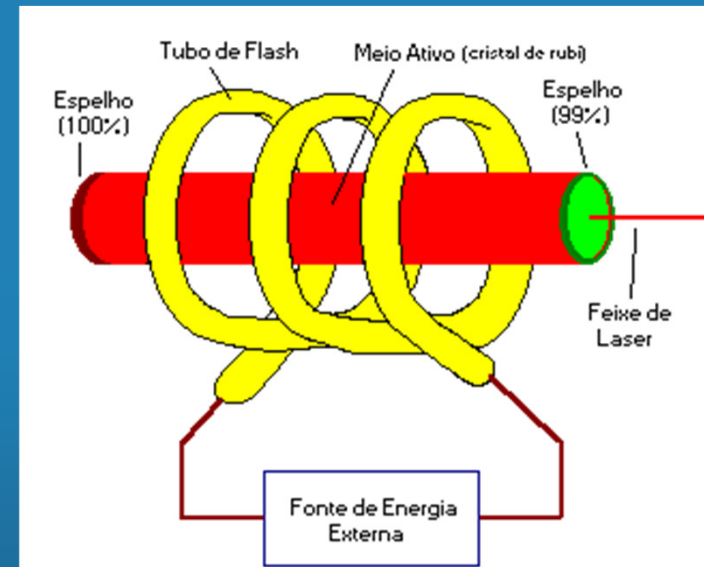
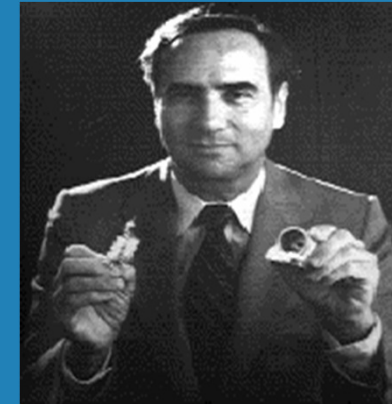
Principais sistemas laser

O primeiro laser: laser de rubi

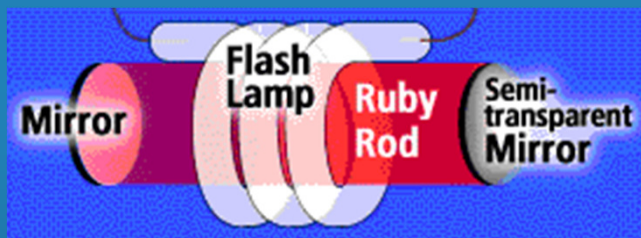
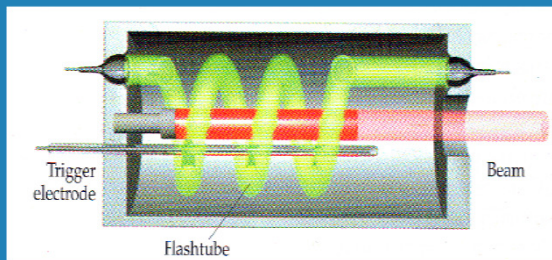
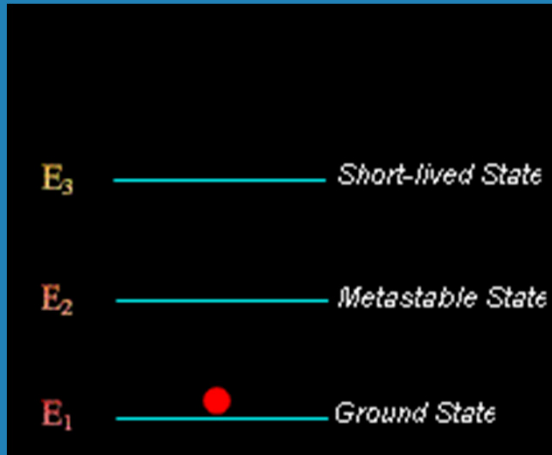
Meio activo: cristal de rubi



Theodore Maiman, 1960

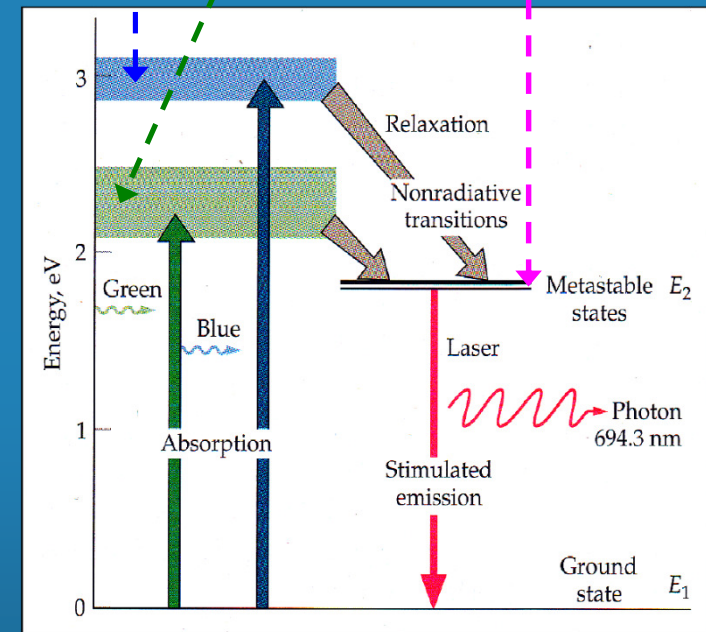
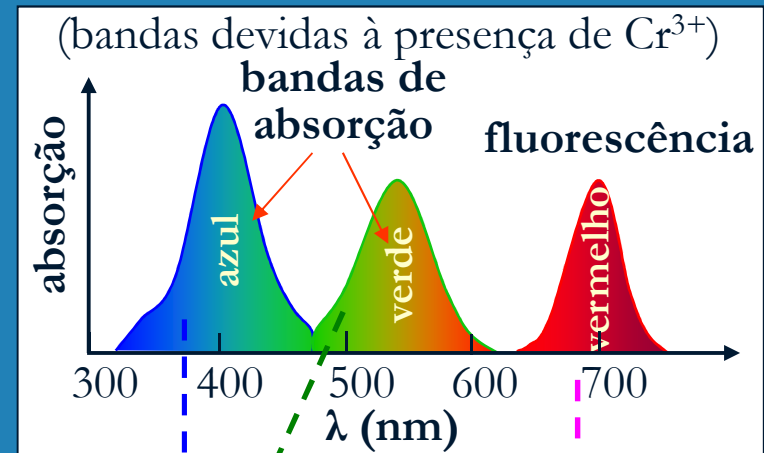


Operação do laser de rubi



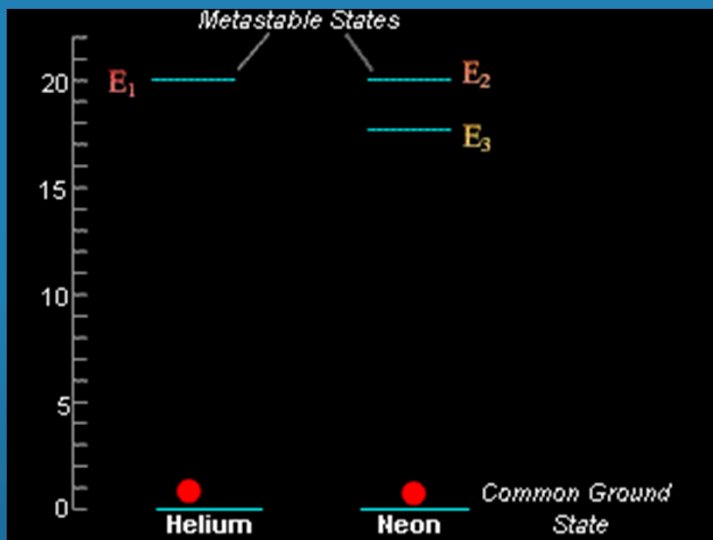
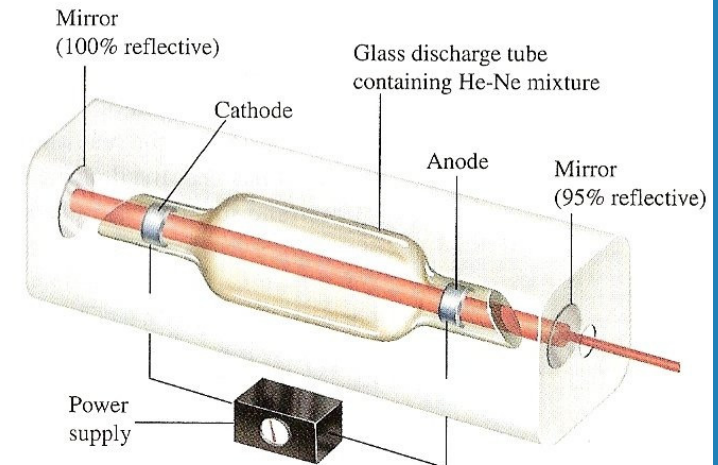
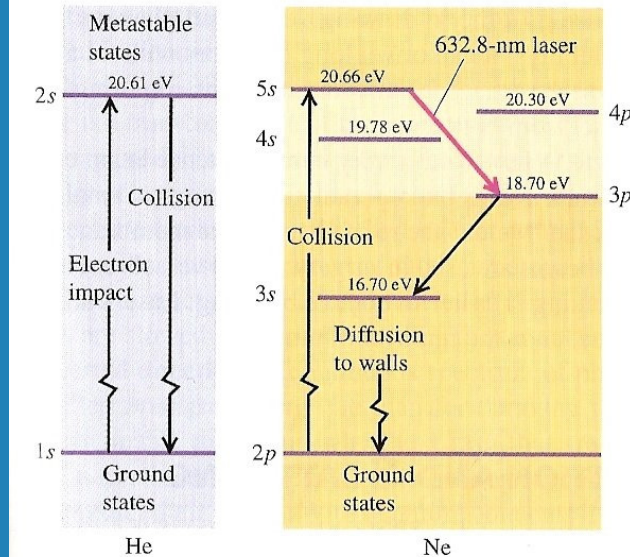
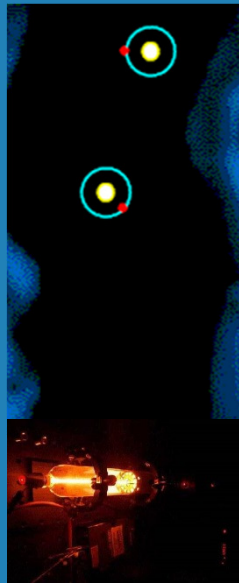
O laser de rubi é um laser pulsado. A eficiência dos lasers de rubi é inferior a 1%.

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: 1º laser contínuo

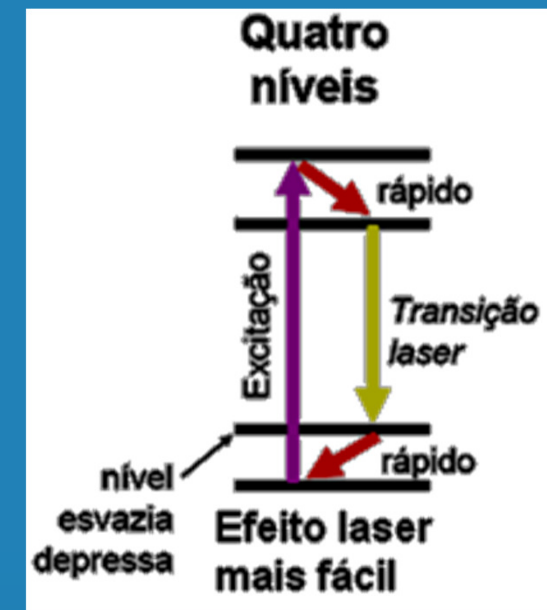
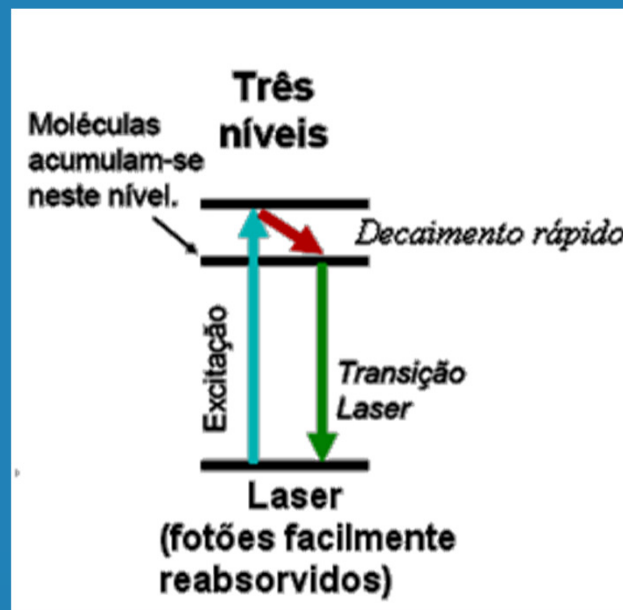
Inventores: Ali Javan, W. R. Bennett Jr. E D. R. Herriott, 1961.



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%.

Sistemas laser envolvendo 2, 3 e 4 níveis de energia

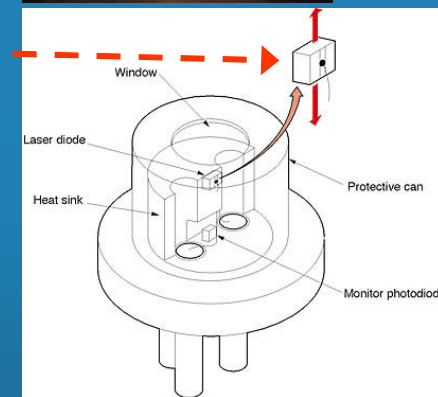
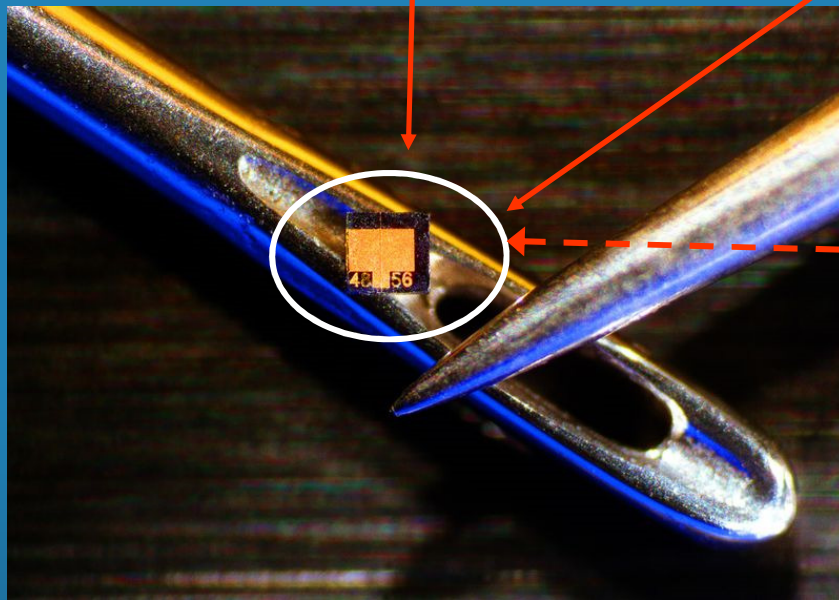
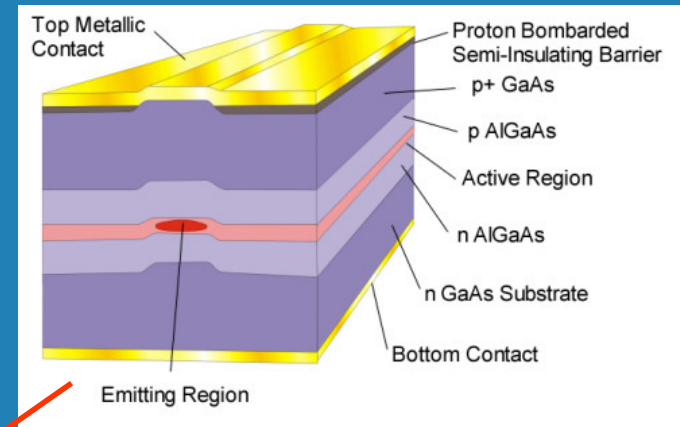
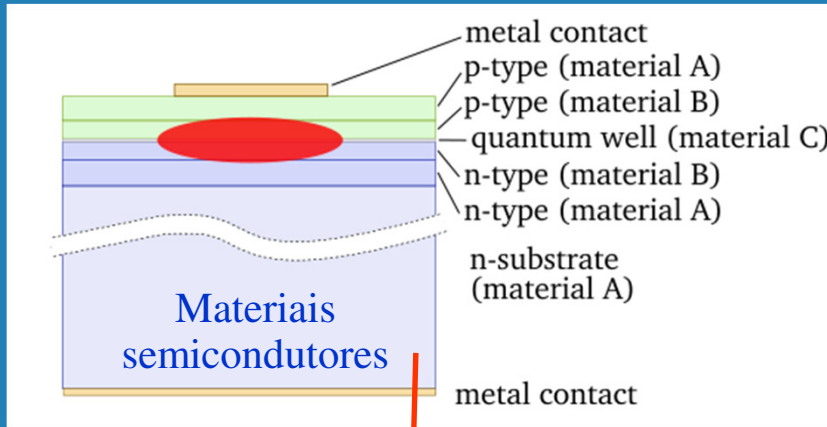
Só após vários estudos e tentativas se percebeu que os sistemas laser a 4 níveis são de facto os *melhores* ...



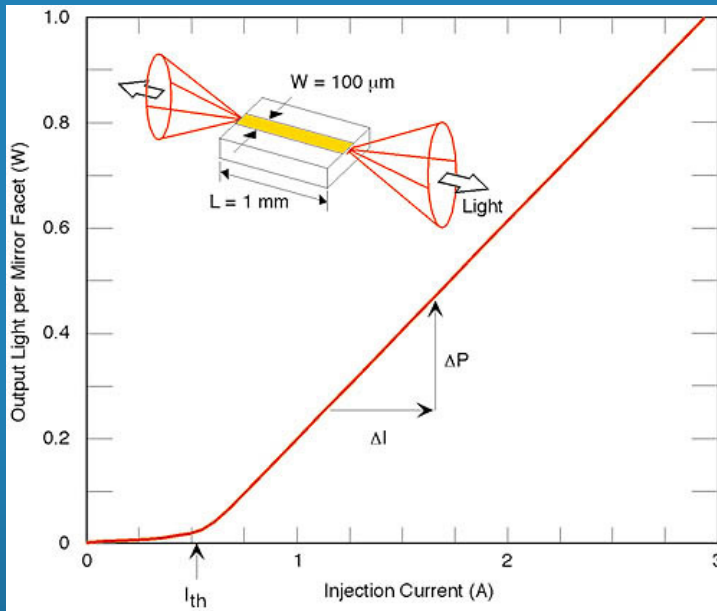
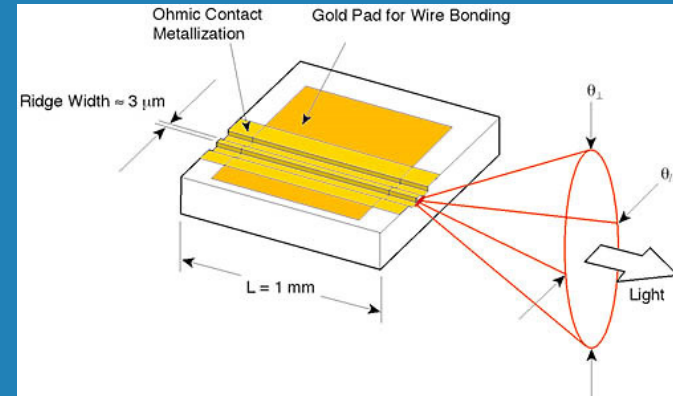
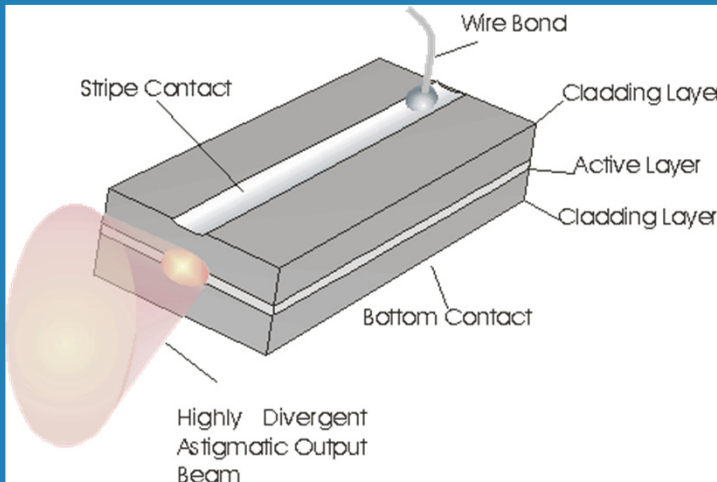
(Ex.: laser de rubi)

(Ex.: laser de He-Ne)

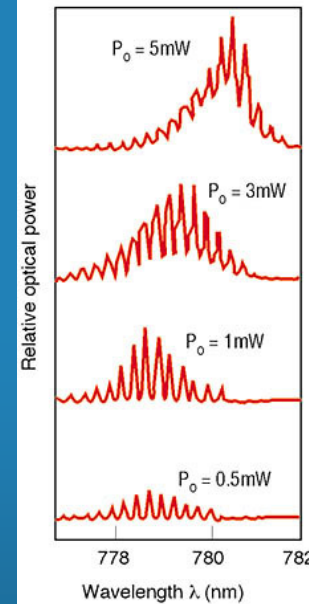
Estrutura do laser de diodo



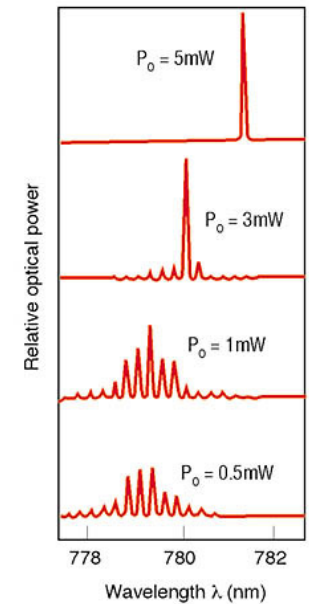
Funcionamento do laser de díodo



Multi longitudinal mode (gain guided)



Single longitudinal mode (index guided)





Interferometria

Interferência

Interferência: fenômeno que se dá quando se combinam dois ou mais movimentos vibratórios;

Interferência de luz: fenômeno 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.

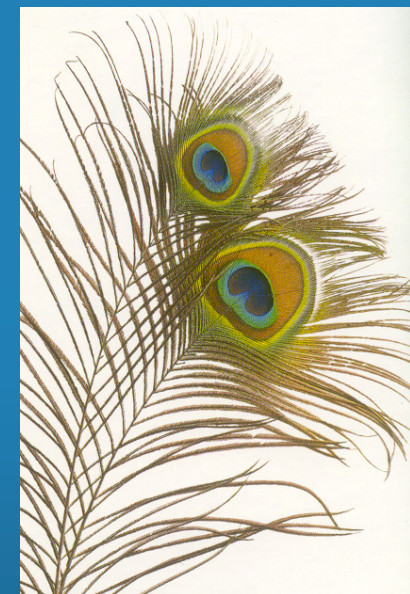
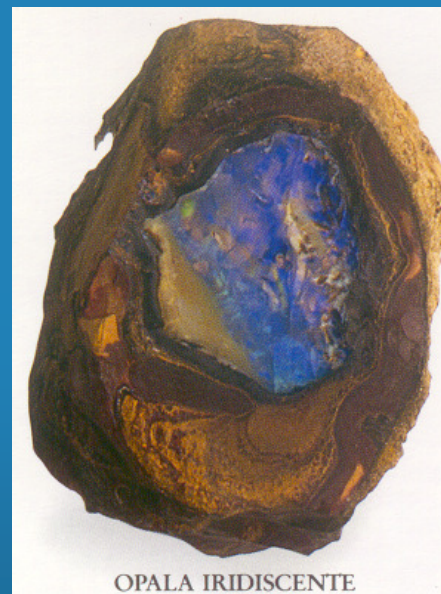
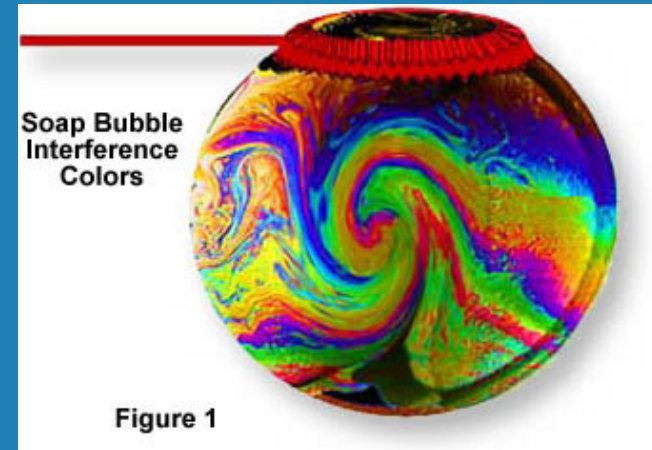
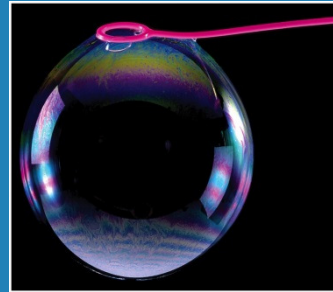
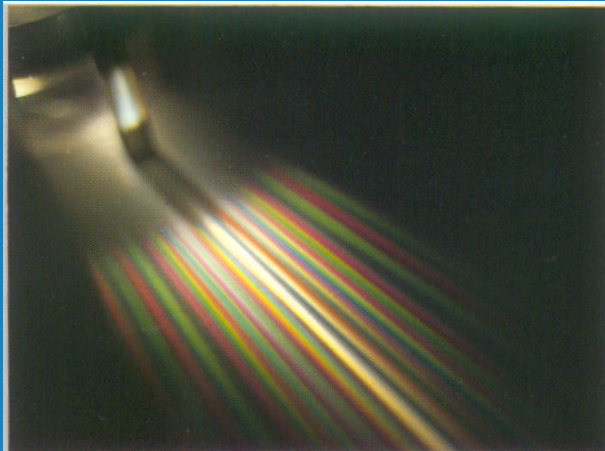
No que se segue serão considerados dois tipos de **interferómetros** (instrumentos ópticos baseados na interferência de ondas luminosas): **interferómetros de divisão de frente de onda** e **interferómetros de divisão de amplitude**.

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.

Interferência da luz na Natureza



Interferência e difracção

Um corpo opaco colocado entre uma fonte ondulatória pontual e um alvo, projecta sobre o alvo uma sombra constituída por regiões claras e escuras. Este efeito pode ser demonstrado facilmente iluminando um lápis com uma fonte pontual (p. ex. uma lâmpada de alta potência a irradiar através de um pequeno orifício) ou, em certas situações, na sombra projecta pela mão directamente iluminada pelo Sol. Este comportamento designado por **difracção** não é explicável pelas leis da óptica geométrica. Ocorre difracção sempre que a fase ou a amplitude de parte da frente de onda se altera, após interacção com obstáculos. Os vários segmentos da frente de onda que se propagam para além do obstáculo interferem, dando origem a uma distribuição particular de energia, correntemente designada padrão de difracção. A primeira referência à difracção foi publicada por Francesco Grimaldi, no séc. XVII, que designou por "diffractio".

Interferência de ondas é um fenómeno que se dá quando se combinam dois feixes ondulatórios coerentes, que provenham, portanto, da mesma fonte ondulatória. A interferência e a difracção são dois fenómenos que distinguem as propriedades ondulatória de um sistema das propriedades corpusculares desse ou de outro sistema. *Na verdade não existe uma distinção física significativa entre interferência e difracção.* No entanto é corrente falar-se de interferência quando se considera a sobreposição de um número reduzido de ondas, reservando-se a difracção para os casos em que o número de ondas é elevado. Porém, continua-se a falar em interferência de feixes em certos contextos como, por exemplo, a difracção da luz por uma rede de difracção.

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.

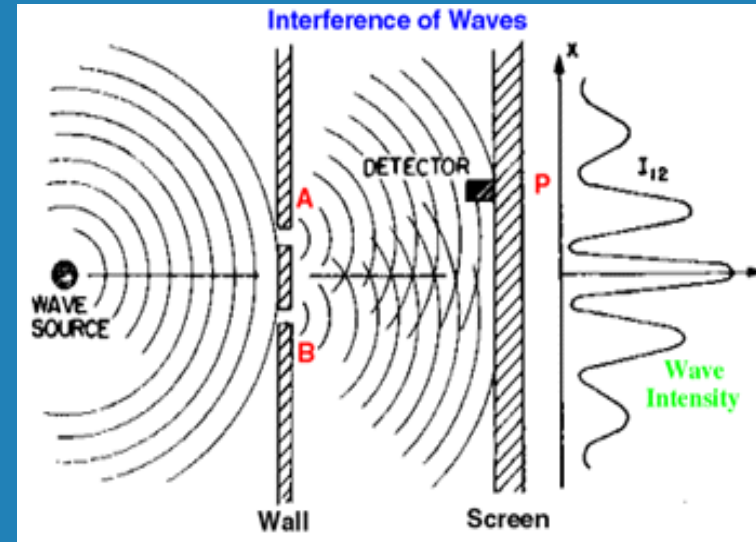
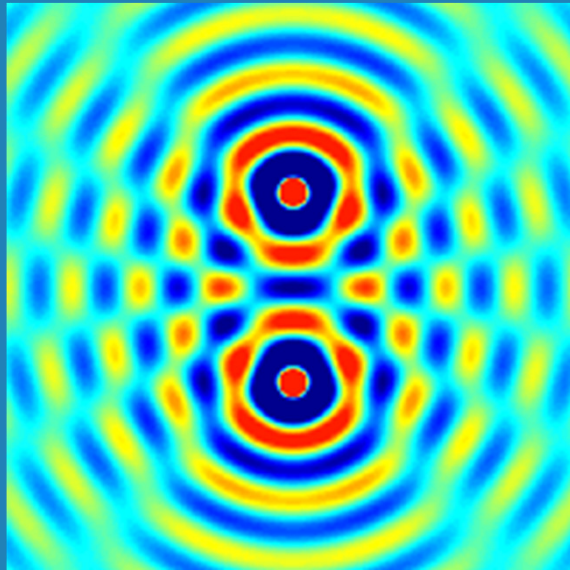
Resultado obtido anteriormente, de grande importância para o estudo da interferência e da difracção: Diferença de fase devida à reflexão - se a luz propagando-se num dado meio incide na superfície um meio na qual se propaga com menor velocidade, a componente reflectida sofre uma variação de fase de π (180°).

<http://www.ligo.caltech.edu/>

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

<http://lisa.nasa.gov/>

Experiência de Young da dupla fenda



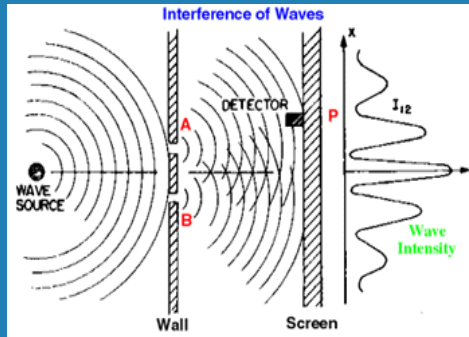
<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/Doubleslitexperiment.wmv>

<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:

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

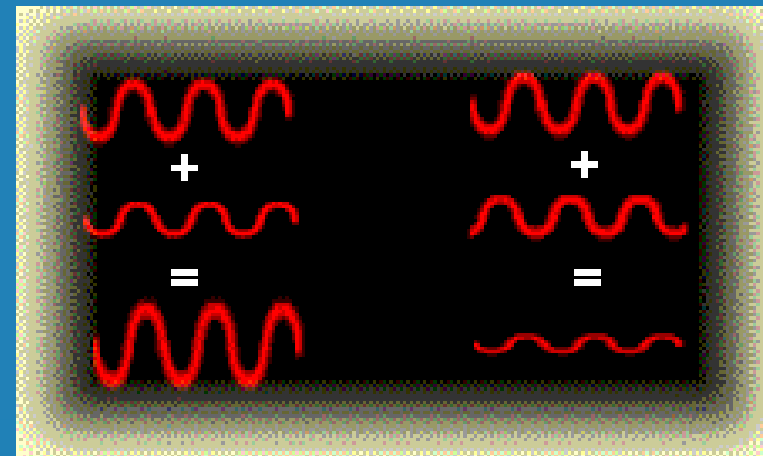
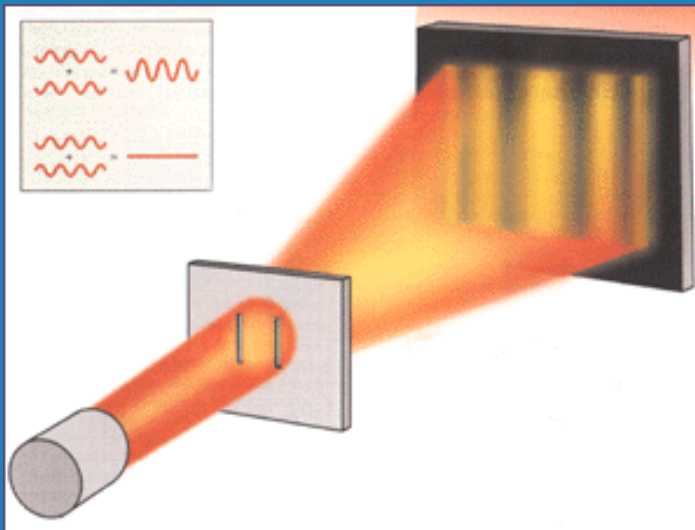
Interferência construtiva e interferência destrutiva

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

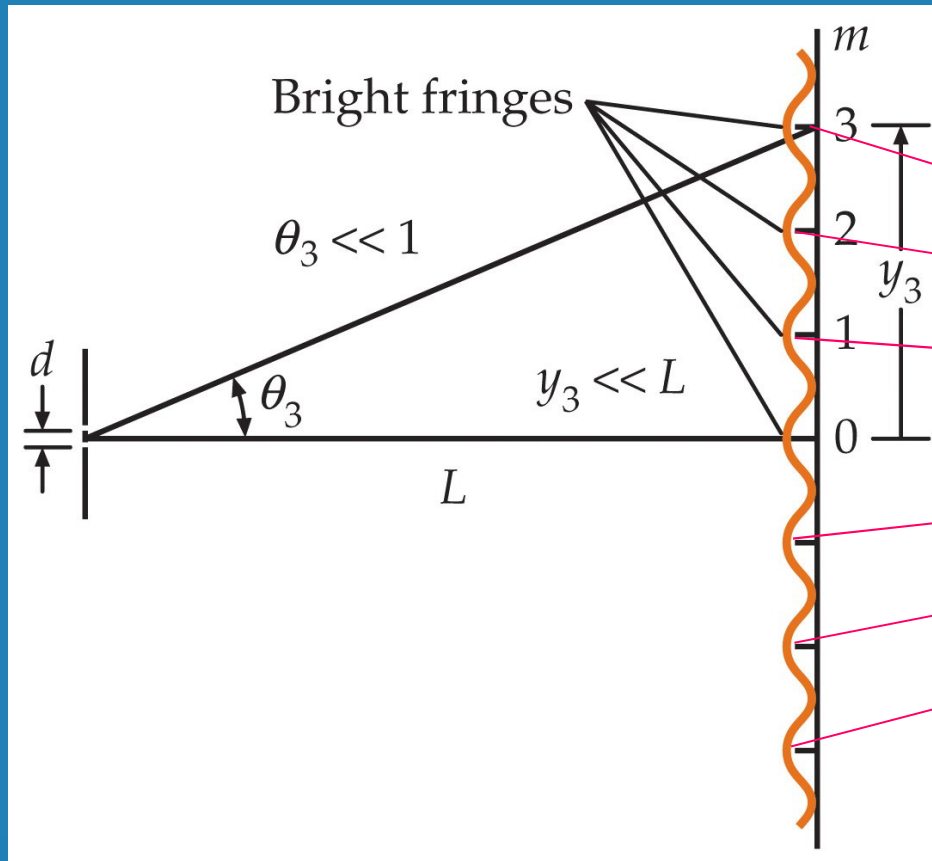


<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/Doublelitexperiment.wmv>

Nas regiões onde $(r_1 - r_2) = m\lambda$: **luz+luz=4x luz** - interferência construtiva

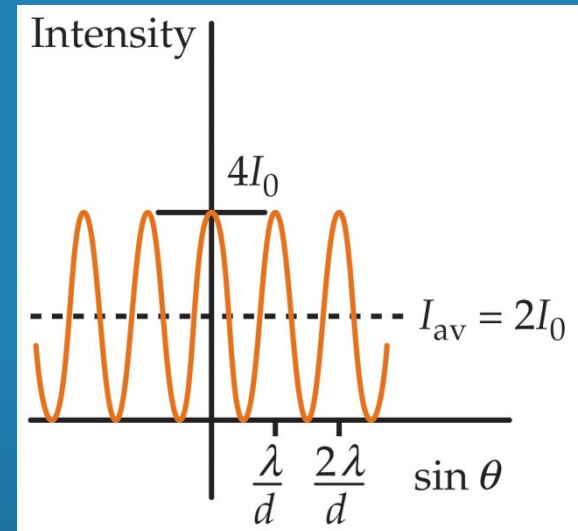
Nas regiões onde $(r_1 - r_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$: **luz+luz=escuro!!!** - interferência destrutiva

Padrão de interferência



Irradiância em termos de diferença de fase

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



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

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

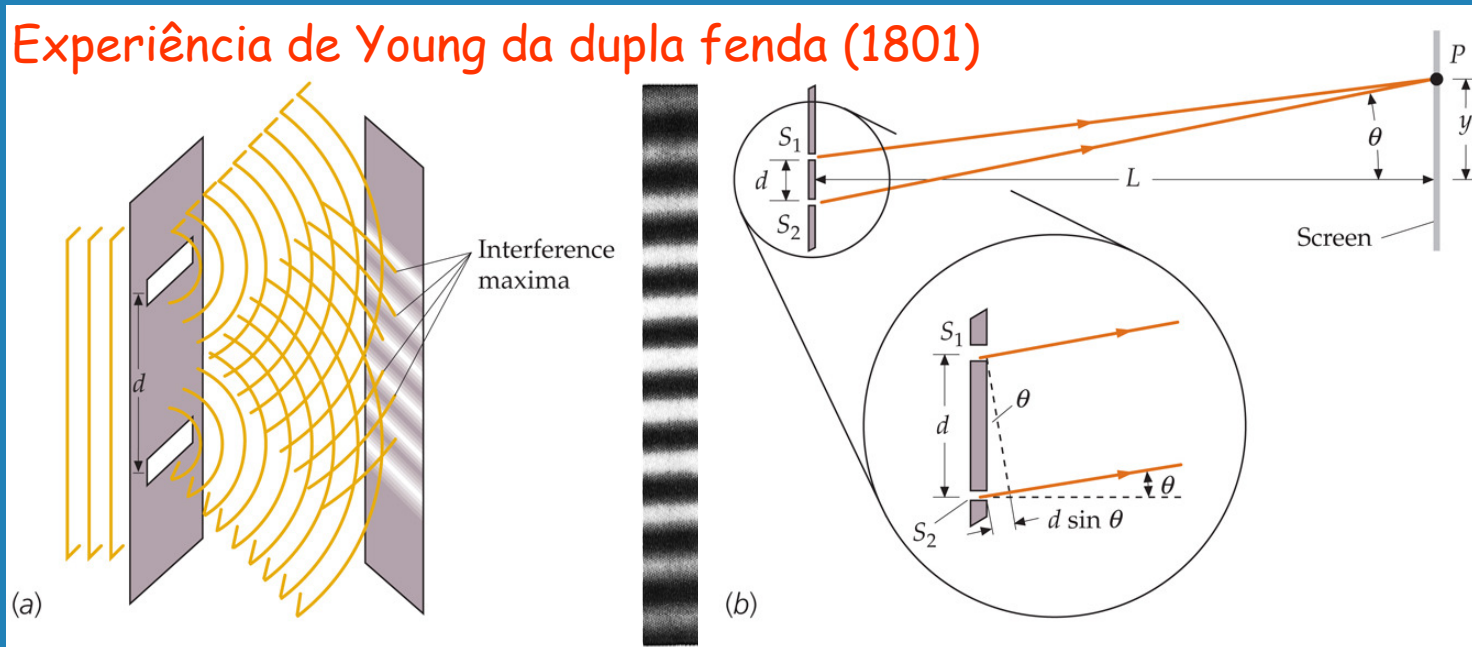


Interferómetros

Interferômetro de divisão de frente de onda

Interferômetros de divisão de frente de onda; interferômetro de Young; biprisma de Fresnel e espelho de Lloyd.

Experiência de Young da dupla fenda (1801)



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

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

$$d \sin \theta_m = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Máximo}$$

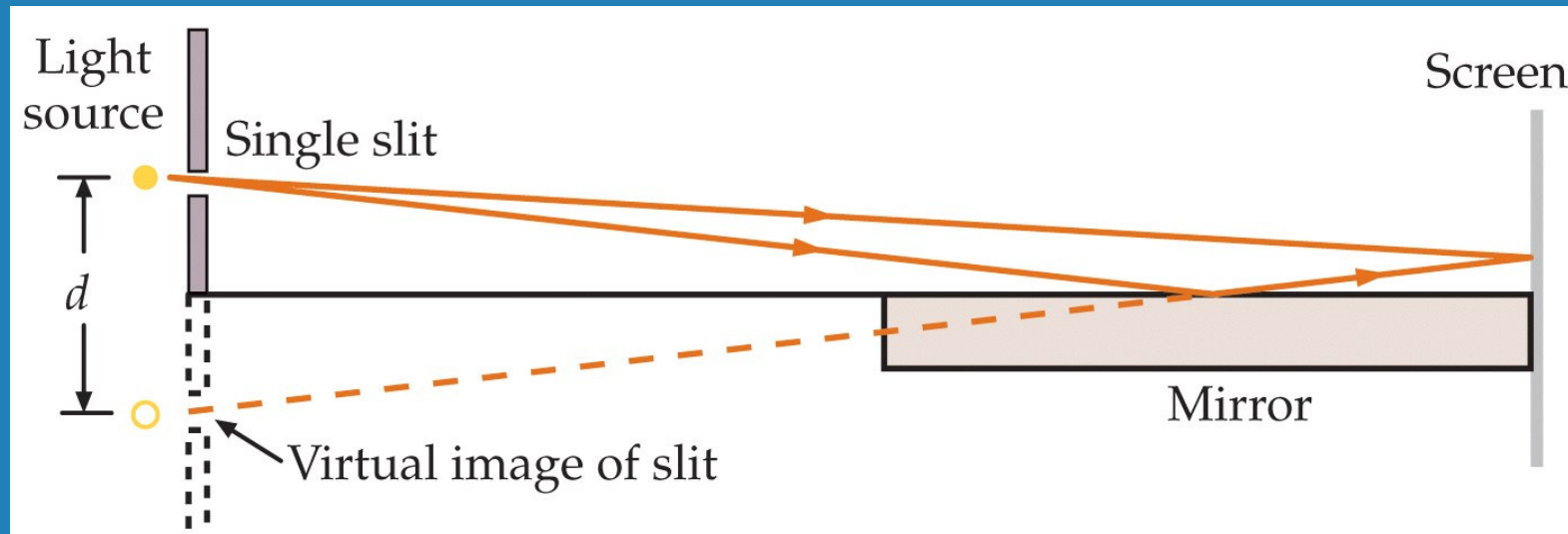
$$d \sin \theta_m = (m - \frac{1}{2})\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Mínimo}$$

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

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

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?

Interferómetro de divisão de amplitude

Interferómetros de divisão de amplitude: lâmina de faces paralelas; franjas de Haidinger e de Fizeau; anéis de Newton; interferómetros de Michelson e de Mach-Zehnder; interferómetro de Sagnac.

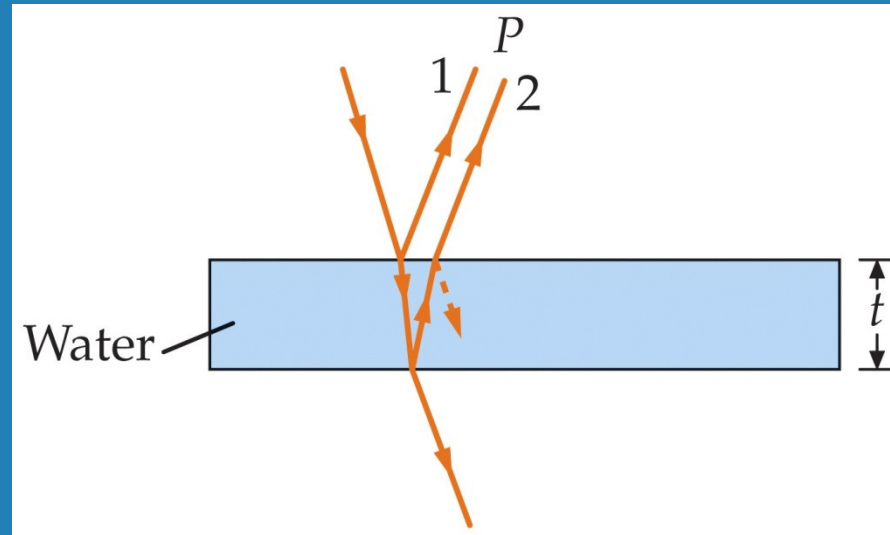
Nestes interferómetros o feixe ondulatório incidente é fraccionado em dois feixes que seguem percursos ópticos distintos. Quando os dois feixes são recombinados, existe uma diferença de fase entre eles, dado que eles percorreram, em geral, caminhos ópticos diferentes, podendo haver interferência construtiva ou destrutiva, dependendo do valor da diferença de caminhos.

Se os dois percursos ópticos diferirem de um número inteiro de comprimentos de onda (incluindo 0) ocorre interferência construtiva e aparece um sinal forte no detector.

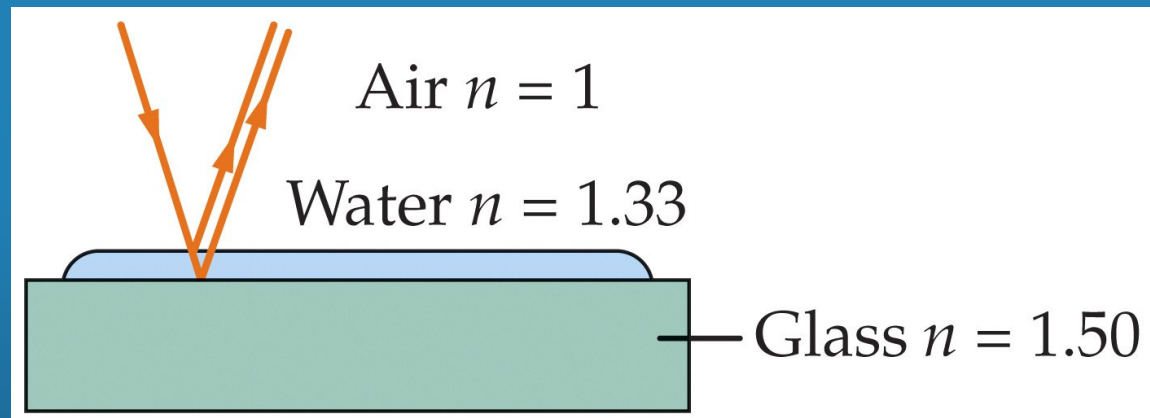
Se o caminho diferir de um número semi-inteiro (por exemplo 0,5, 1,5, 2,5 ...) ocorre interferência destrutiva e o sinal indicado pelo detector é fraco.

Interferência lâmina de faces paralelas e em filmes finos

Lâmina de faces paralelas

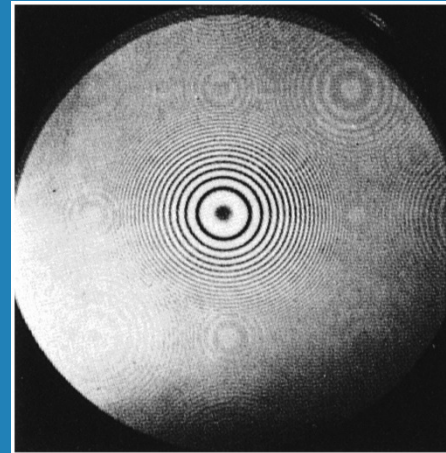
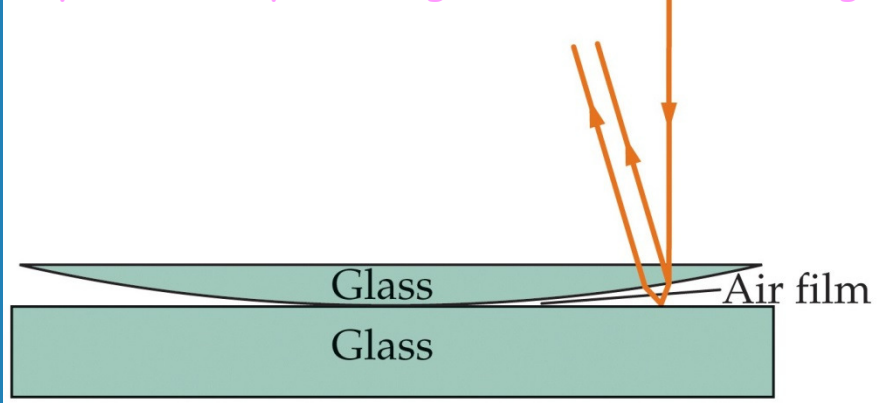


Filmes finos



Anéis de Newton

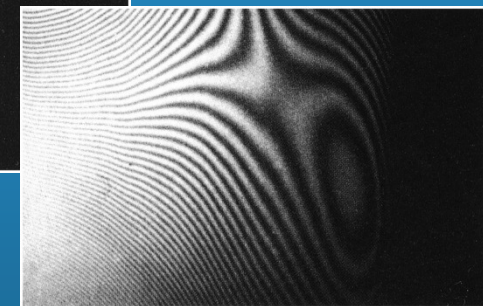
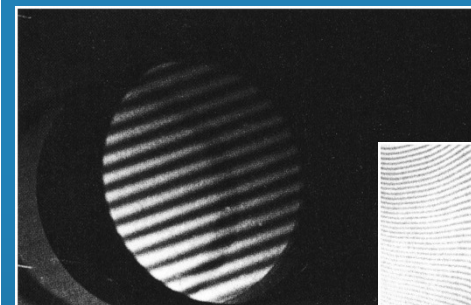
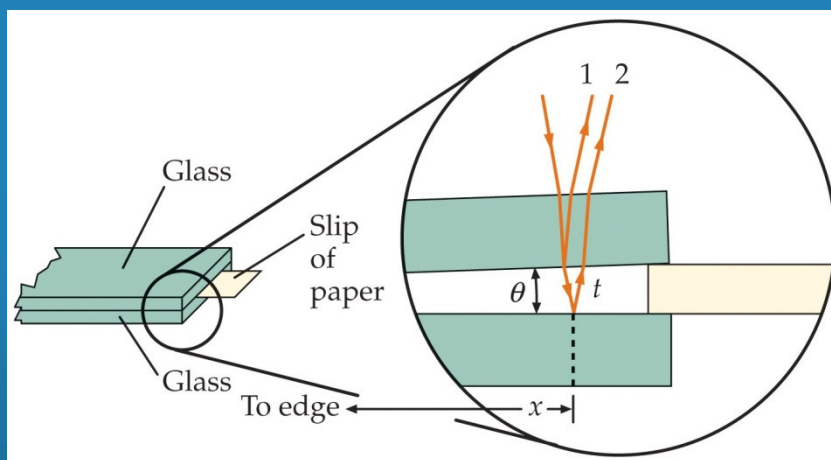
http://en.wikipedia.org/wiki/Newton's_rings



<http://shortwork.net/equip/review-1Ds-SQ-scantech/#wmount>

<http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/aneisnewton/aneisnewton.htm>

Interferência num filme de ar



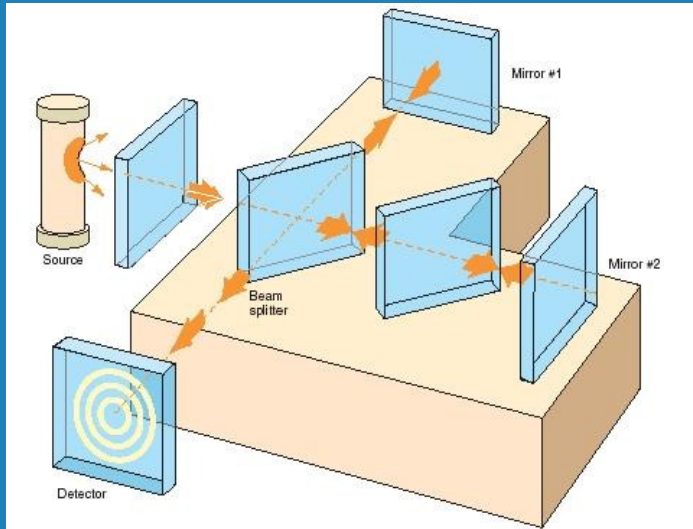
Interferómetro de Michelson

O Interferómetro de Michelson é um interferómetro de dois feixes (divisão de amplitude). Foi proposto e construído por Michelson, em 1881, para tentar comprovar a existência do éter.

Este interferómetro pode ser usado para medir comprimentos de onda e deslocamentos com grande precisão.

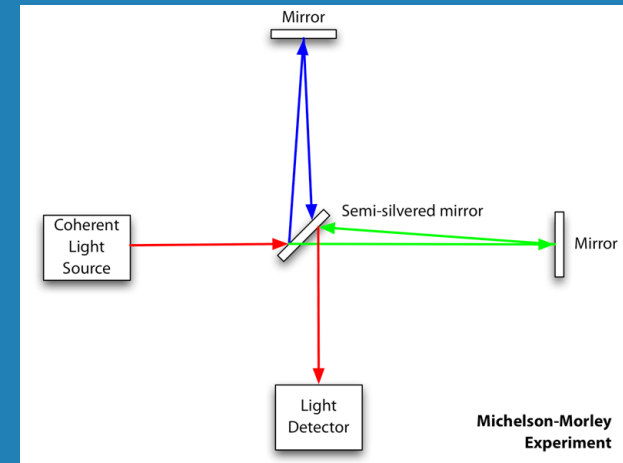
No interferómetro de Michelson, um feixe de luz atravessa um espelho semi-transparente, que divide o feixe incidente em dois: uma parte da luz *atravessa* o divisor de feixe até um espelho, é reflectido de volta para o espelho semi-transparente, sendo reflectido para o detector; a outra parte é *reflectida* 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.

Interferómetro de Michelson

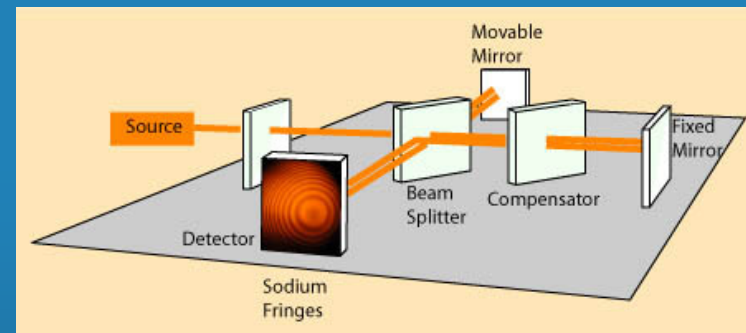
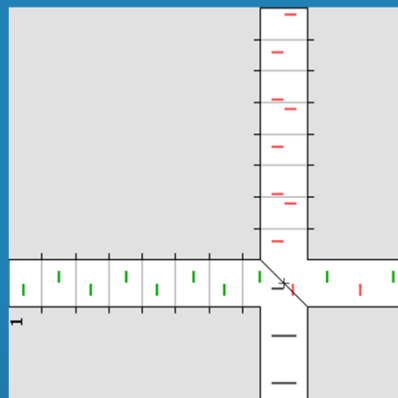


Interferência construtiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = m\lambda$

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



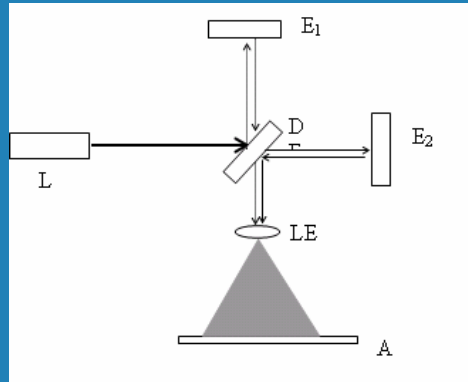
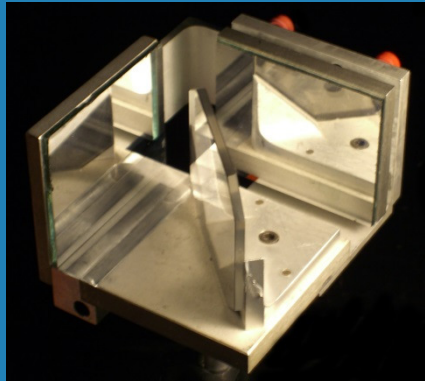
<http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/Michelson-interf.wmv>



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>

http://www.youtube.com/watch?v=Nsa8D5_DMIg&feature=related

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

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.

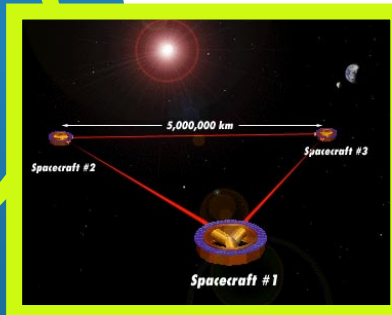
Detecção de ondas gravitacionais



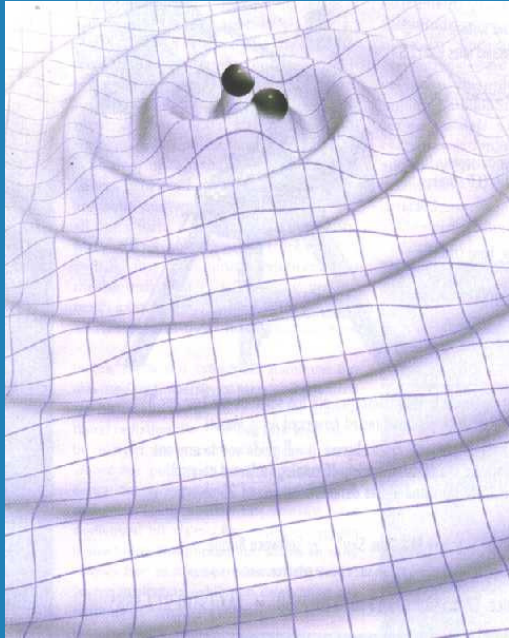
Fontes de ondas gravitacionais

Detectores na Terra
LIGO, Virgo, TAMA, GEO
AIGO

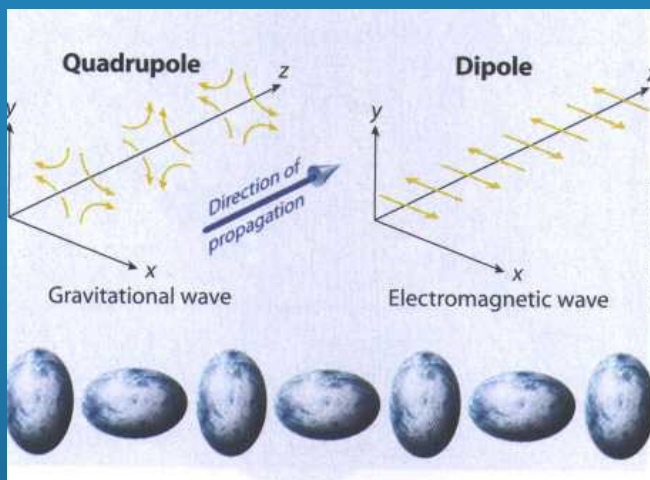
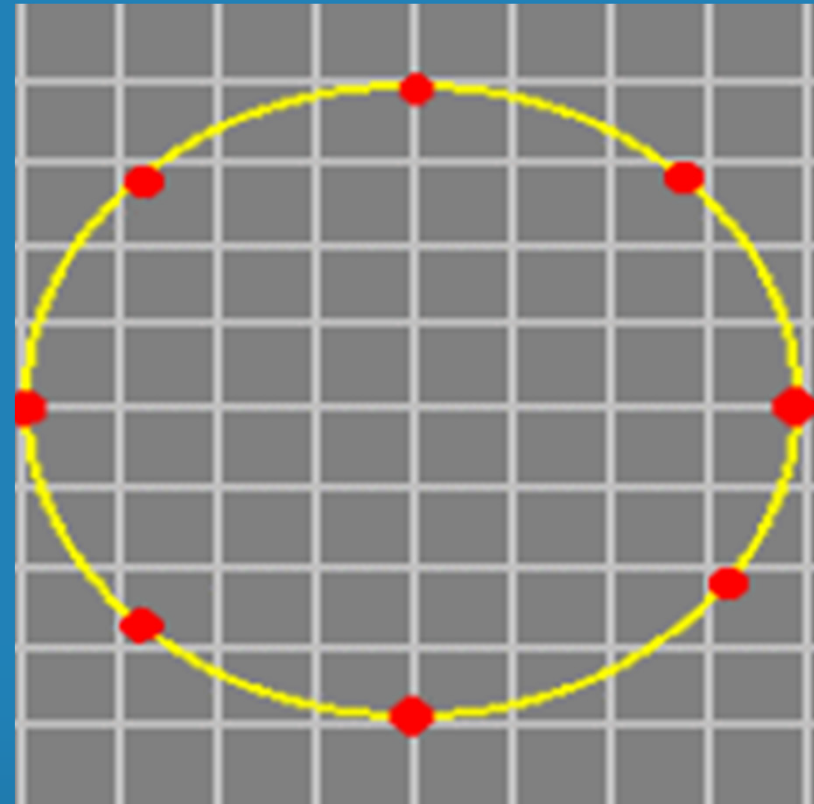
Detectores no espaço
LISA



Efeitos de uma onda gravitacional a passar

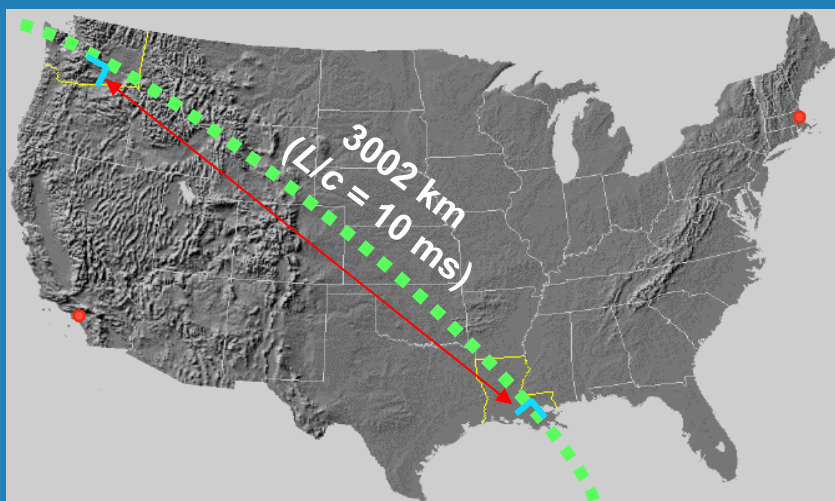


Massas livres



LIGO

Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory



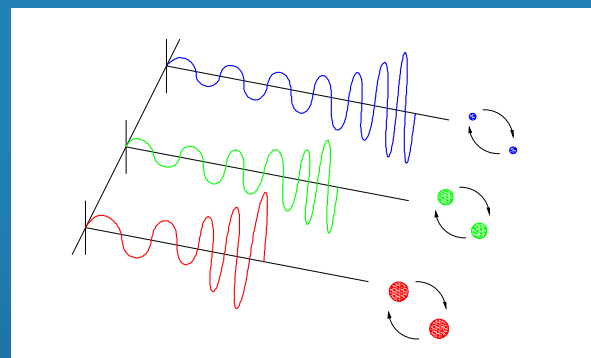
LIGO Hanford Observatory



LIGO Livingston Observatory

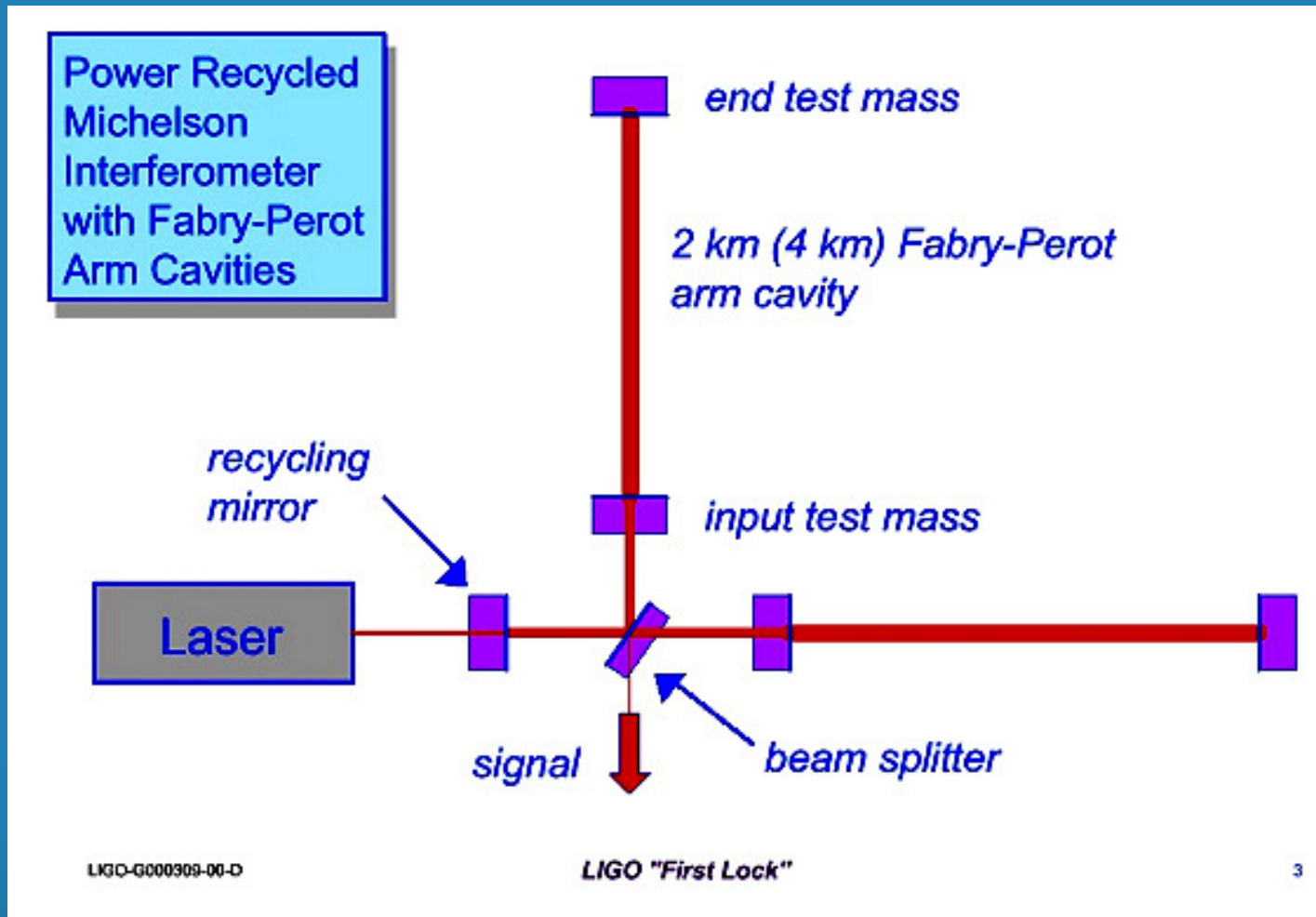


Fontes de ondas gravitacionais



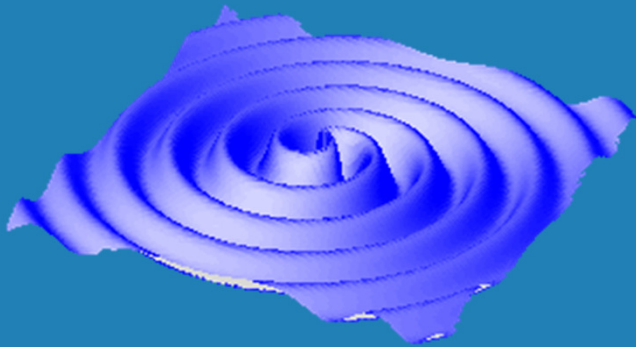
Detecção simultânea

LIGO

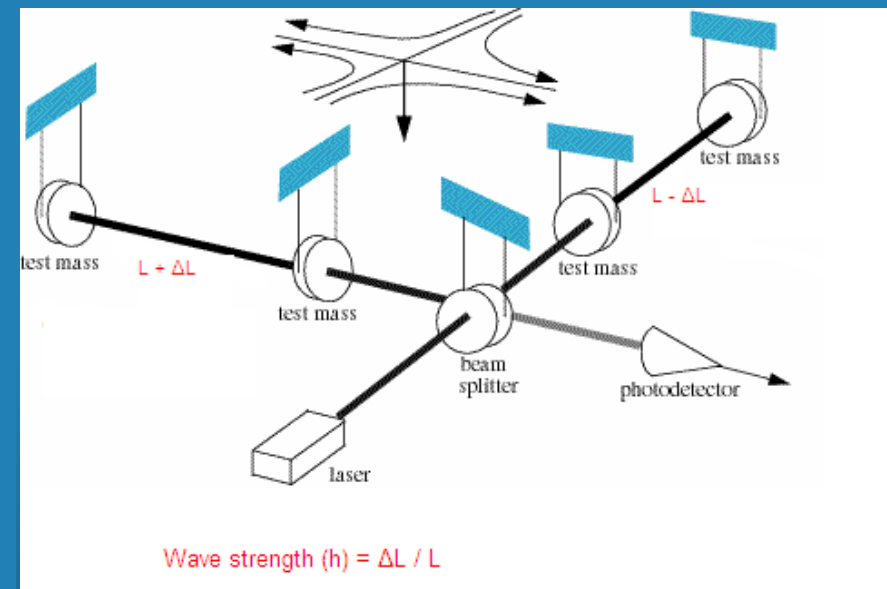
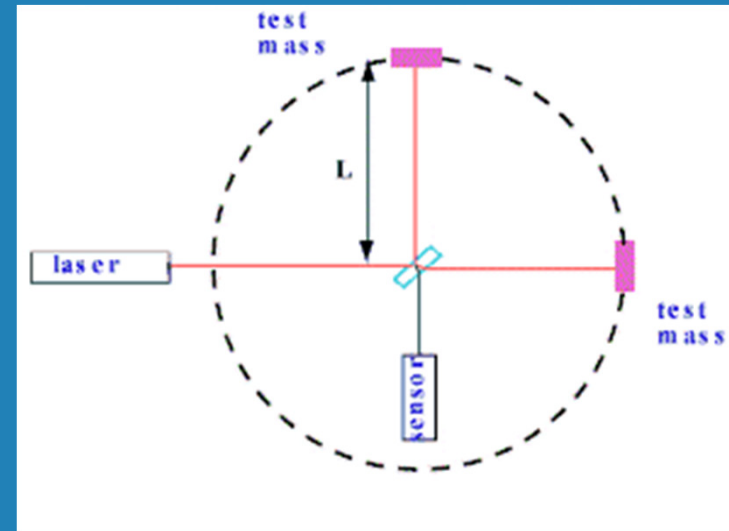
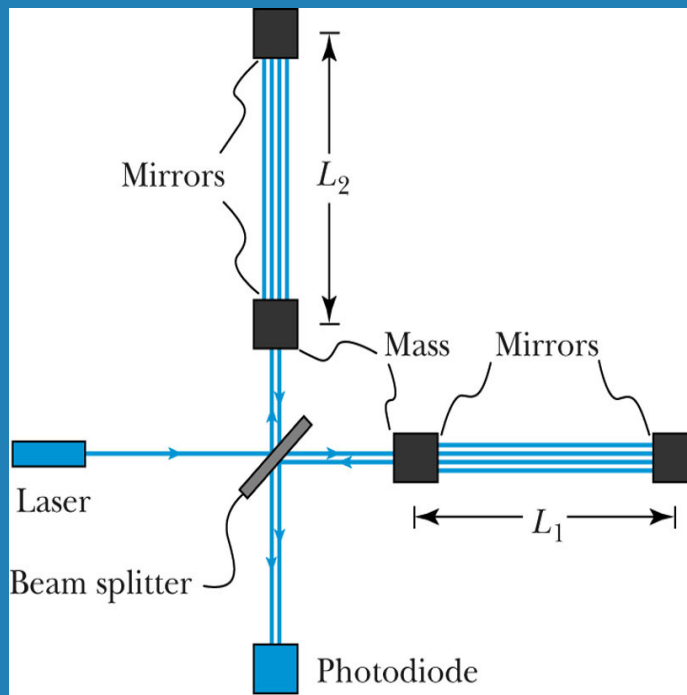


The change in length is about 10^{-18} m.

Detecção de uma onda gravitacional a passar



Interferómetro de Michelson



Rede mundial de interferómetros

LIGO Hanford 4&2 km



GEO Hannover 600 m



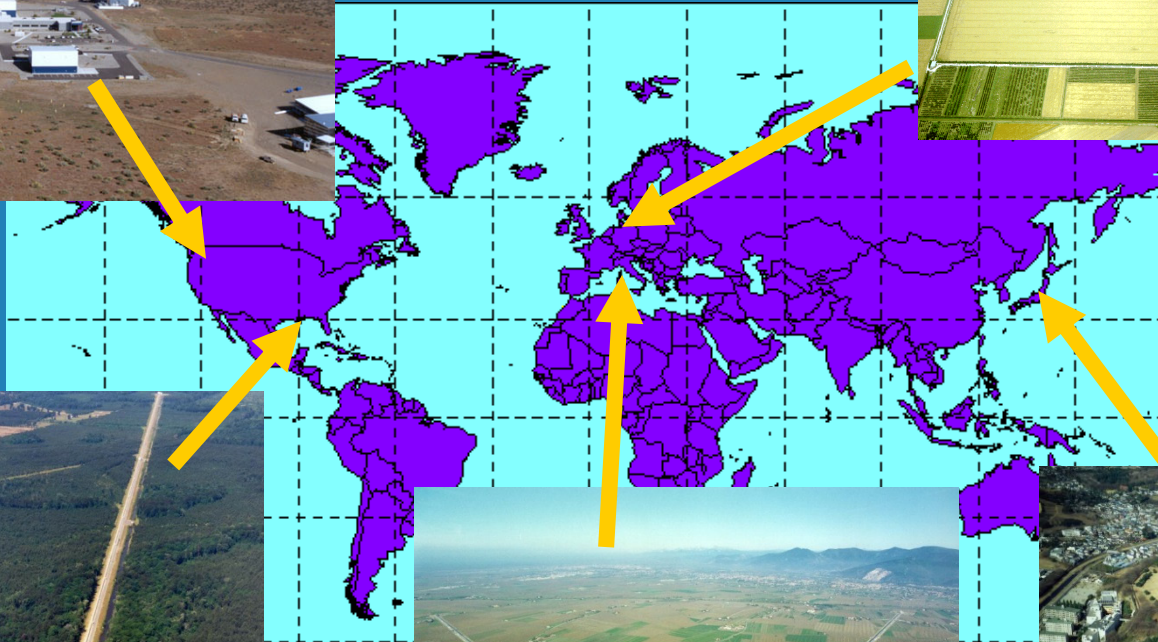
LIGO Livingston 4 km



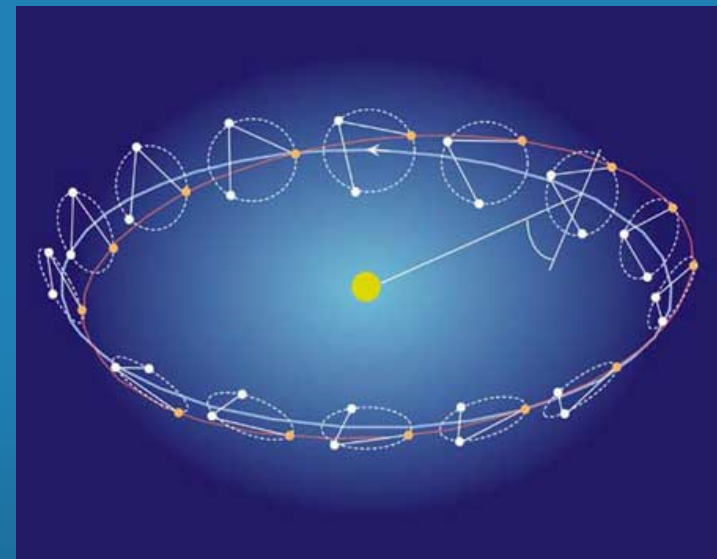
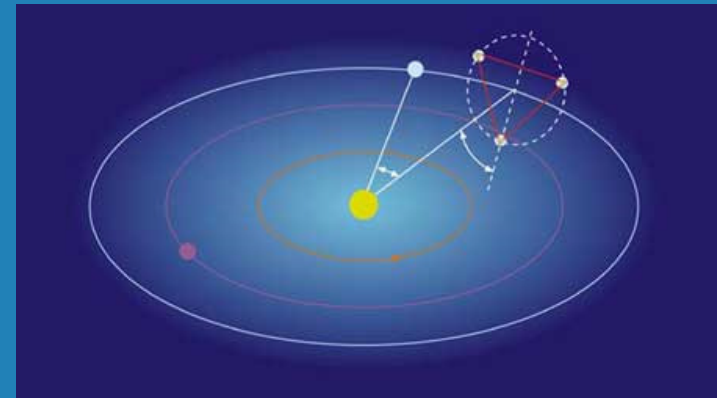
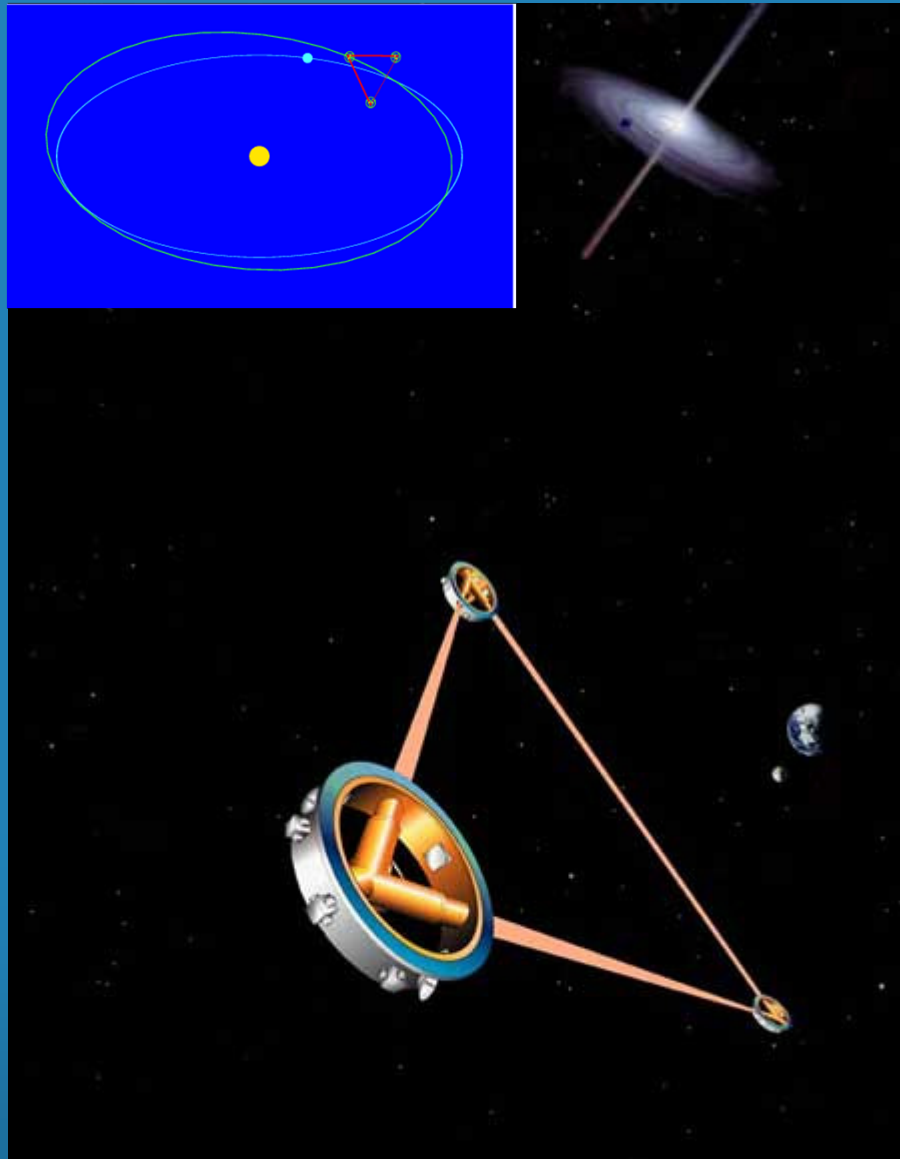
Virgo Cascina 3 km



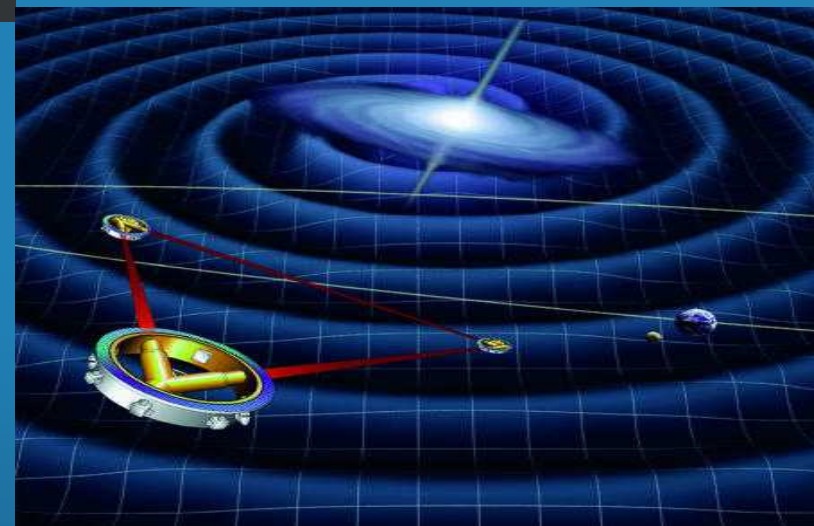
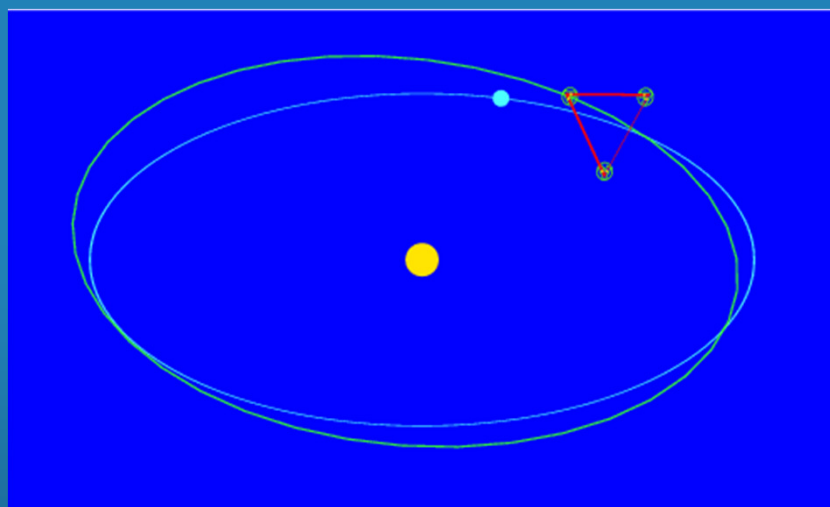
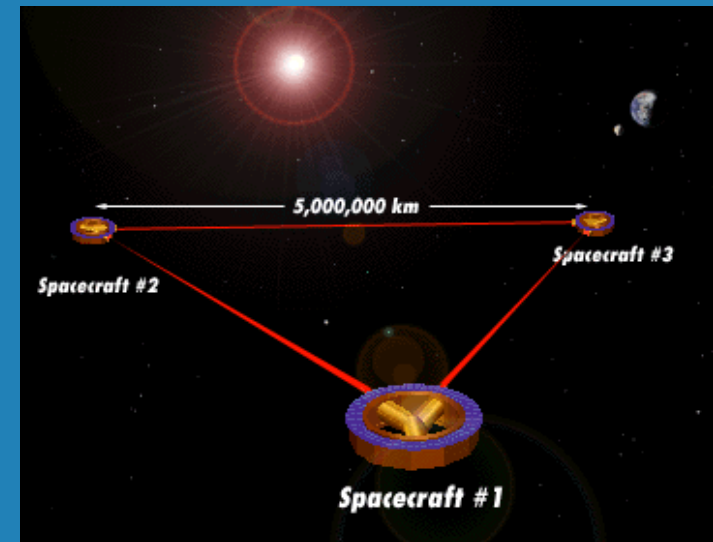
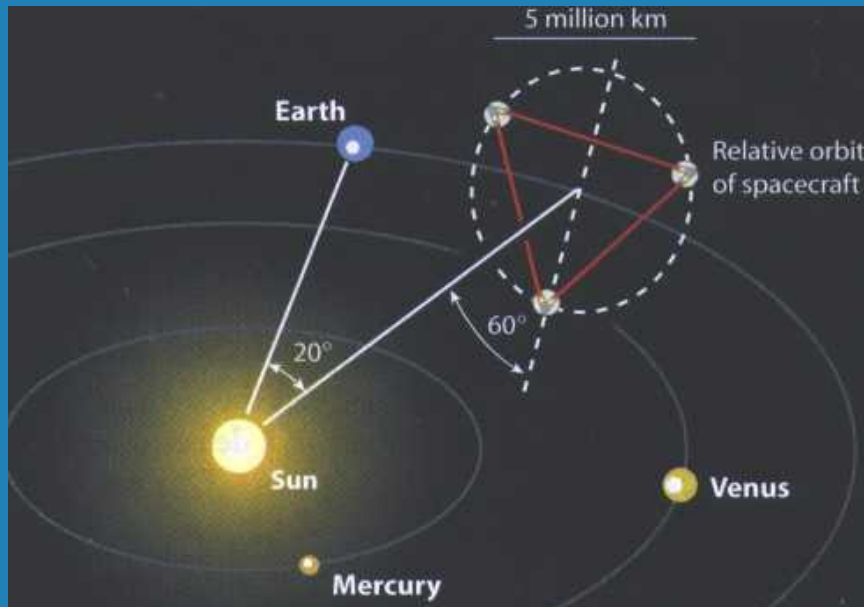
TAMA Tokyo
300 m



LISA: interferómetro espacial (2015)



LISA - Laser Interferometer Space Antenna



Será capaz de detectar $\Delta L/L \sim 10^{-23}$.

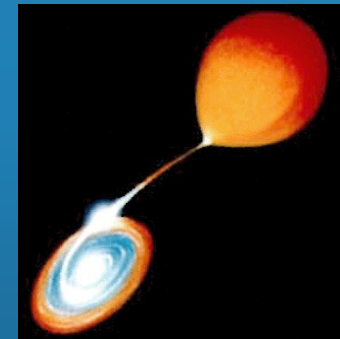
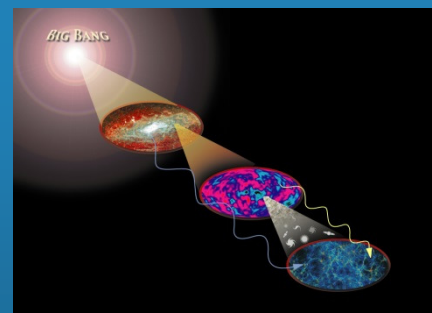
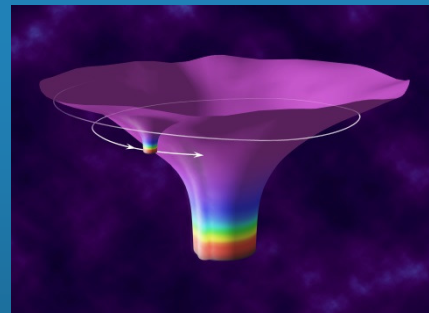
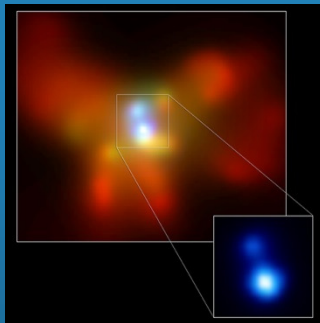
LISA: Science Goals and Sources

Goals

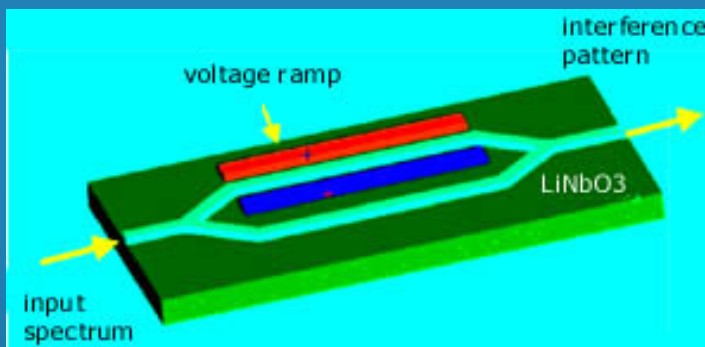
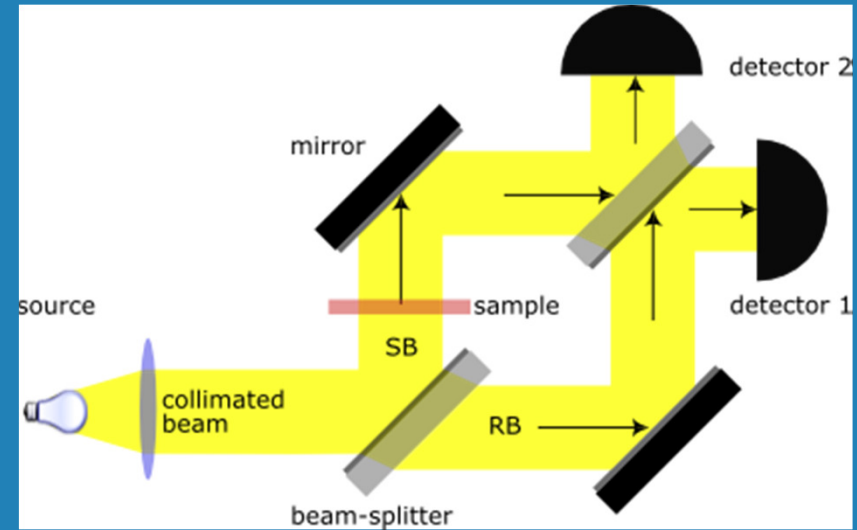
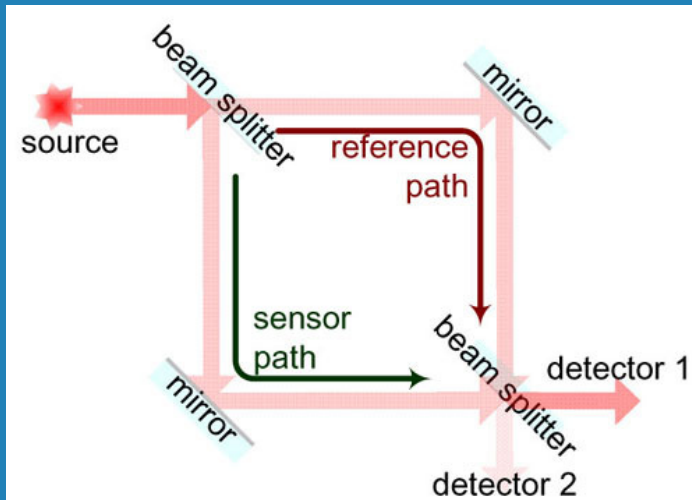
- Determine the role of massive black holes in galaxy evolution
- Make precision tests of Einstein's Theory of Relativity
- Determine the population of ultra-compact binaries in the Galaxy
- Probe the physics of the early universe

Sources

- Merging supermassive black holes
- Merging intermediate-mass/seed black holes
- Gravitational captures
- Galactic and verification binaries
- Cosmological backgrounds and bursts



Interferómetro de Mach-Zehnder



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

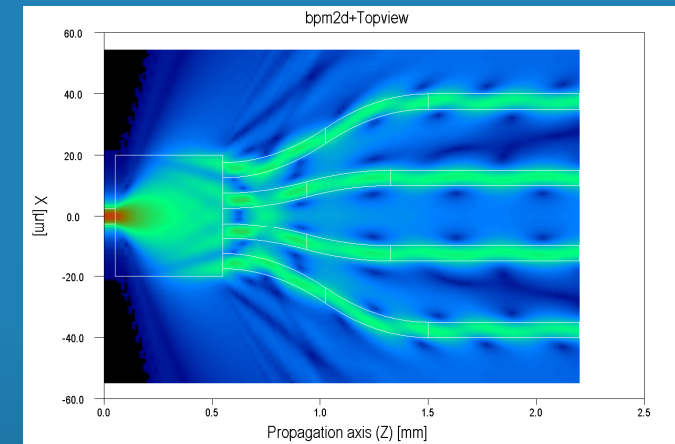
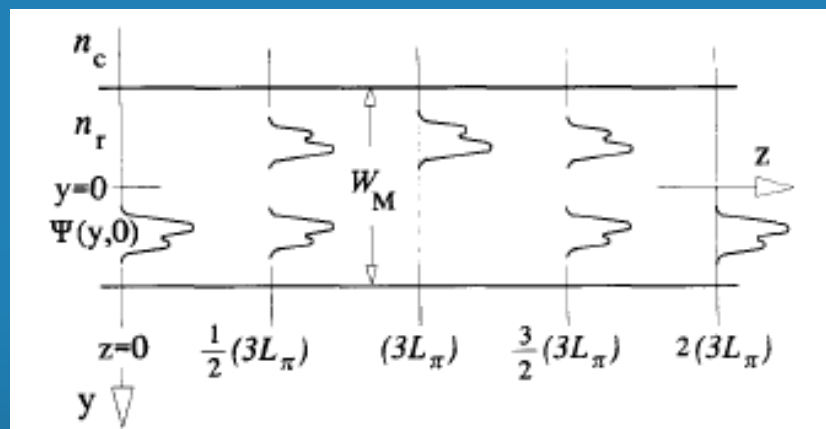
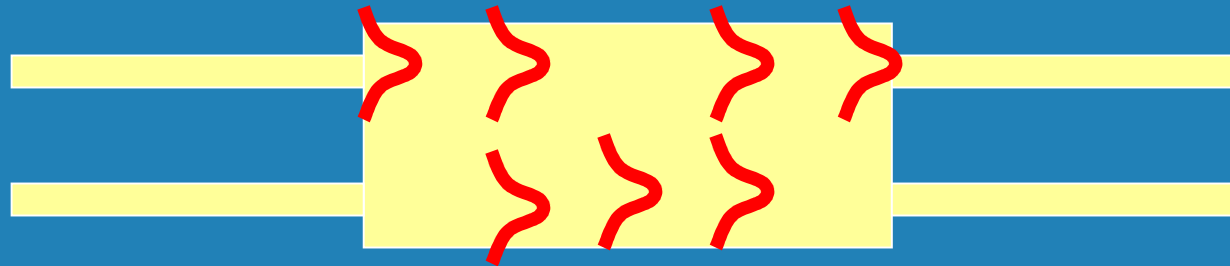
Interferência destrutiva: $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = (m + \frac{1}{2})\lambda$

http://en.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder_interferometer

Dispositivos ópticos integrados baseados

no fenômeno de interferência

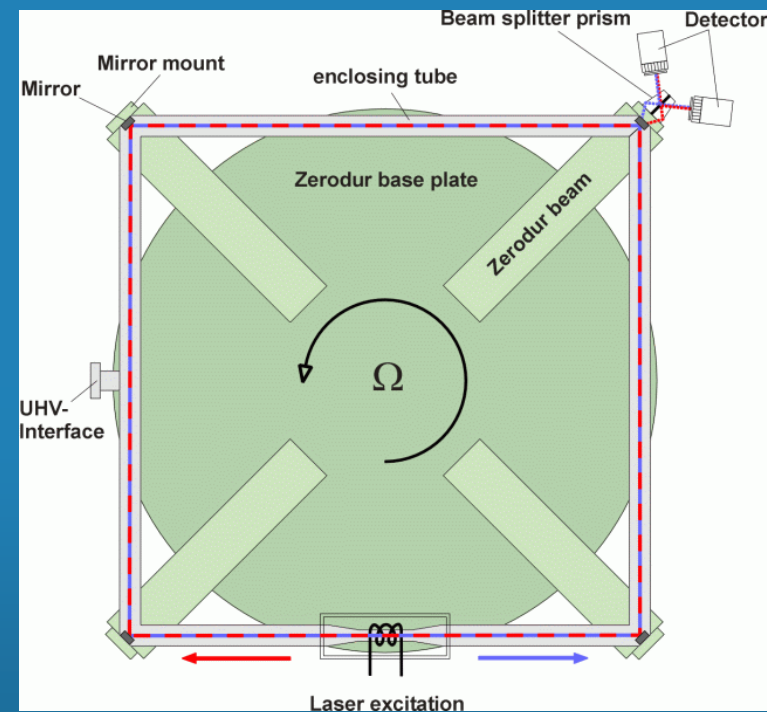
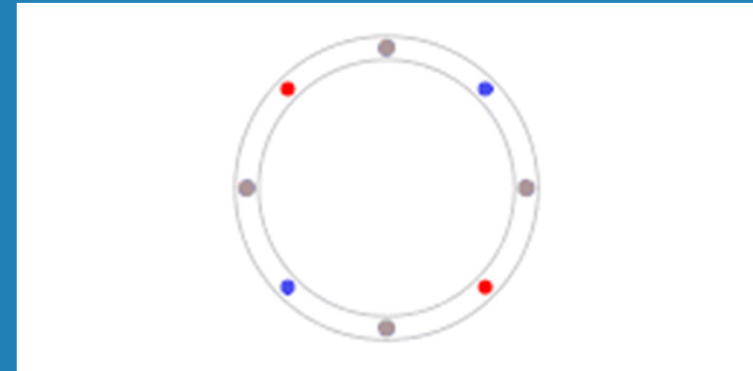
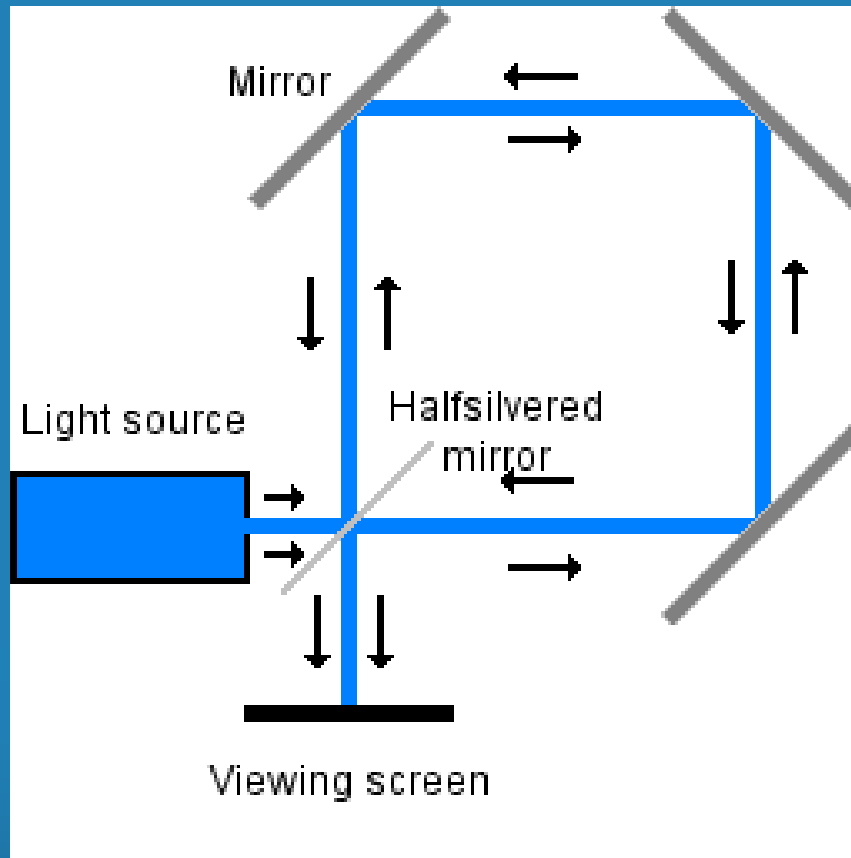
Self imaging in multimode waveguides



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

Interferómetro de Sagnac

Muito empregue em giroscópios e para detectar movimentos de rotação



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



Holografia

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>

Dennis Gabor: inventor da Holografia

O princípio da holografia foi proposto por Dennis Gabor em 1948, que recebeu o prémio Nobel da Física de 1971 por esta descoberta. Gabor propôs que um feixe de luz podia ser dividido para produzir imagens em três dimensões de objectos.

Contudo, esta técnica, baseada na interferência entre dois feixes, necessitava de uma fonte de luz coerente. Por isso esta *proposta* ficou *adormecida* até à invenção do laser, em 1960. No seguimento da invenção do laser, E. Leith e J. Upatniek aperfeiçoaram a técnica proposta por Gabor e produziram os primeiros hologramas.

A holografia corresponde ao conjunto de técnicas de obtenção e utilização de hologramas. Diz-se com frequência que um holograma é **uma janela com memórias**: a imagem de um objecto é registada num pedaço de vidro ou numa película quase transparente.

Fotografia vs Holografia

- Um holograma é o registo, numa emulsão (película gelatinosa que tem em suspensão finas partículas de sais de prata sensíveis à luz;), dos efeitos da sobreposição de duas ondas emanadas da mesma fonte luminosa, uma directa e outra reflectida pelo objecto a *holografar*, que, depois de revelada, dá a ilusão de relevo, quando iluminado por um feixe laser ou luz branca (de *holo-* (inteiro) + *-grama* (registo), que significa “registo inteiro”).
- Na fotografia apenas se regista a luz reflectida pelo objecto, não há registo da fase da radiação, e, portanto, não há noção de profundidade.



FS Mirror Reference beam PLATE

Tipos de hologramas

Existem dois tipos básicos de hologramas. Os **hologramas de reflexão**, que podem ser vistos usando luz branca, da mesma forma que se vê uma pintura; e os **hologramas de transmissão**, que requerem uma fonte de luz, em geral um laser, por trás. Existe também hologramas híbridos que combinam diferentes aspectos das várias técnicas holográficas.

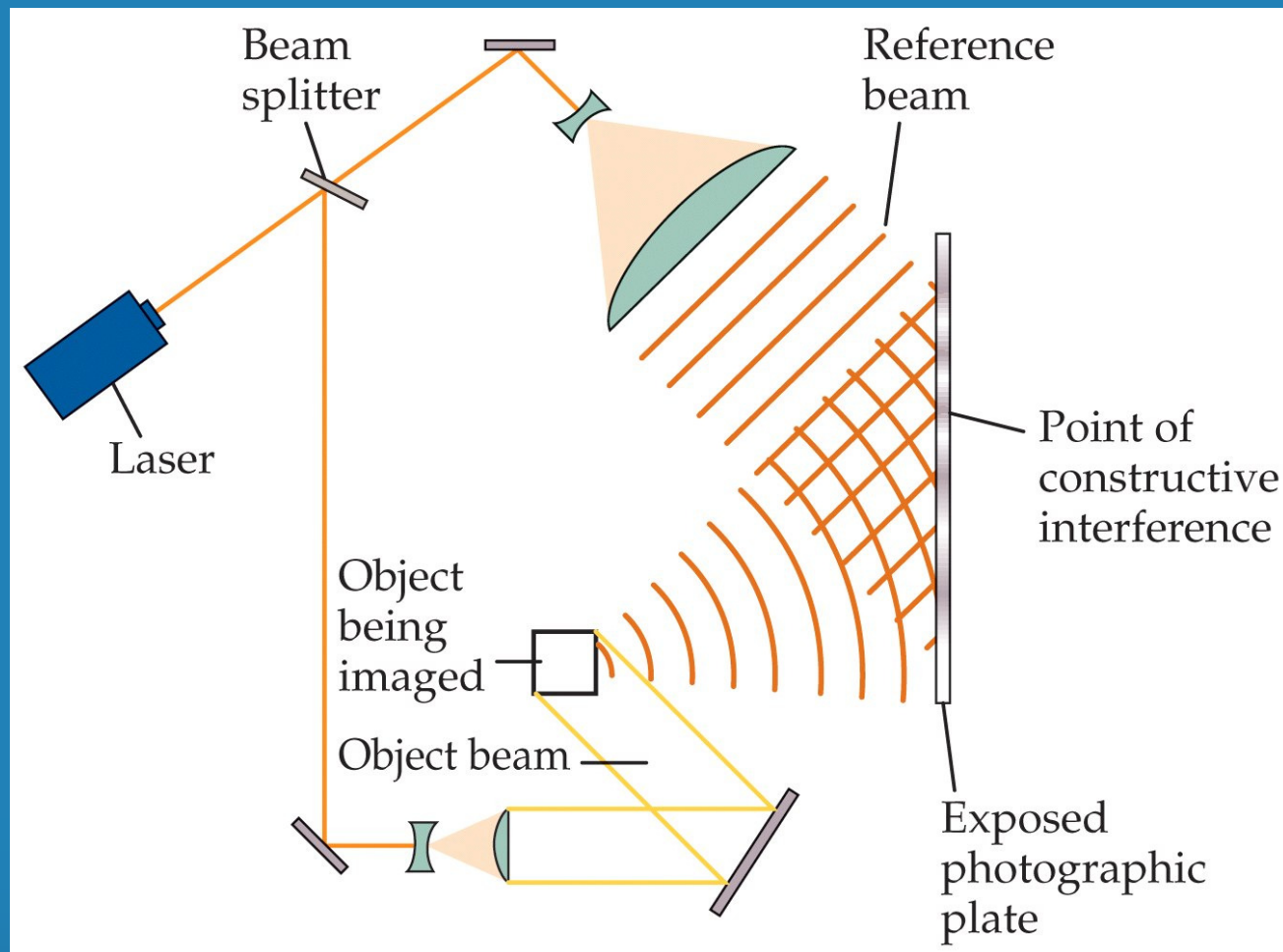
Um tipo particular de hologramas, os **hologramas gerados por computador**, permitem observar objectos e executar funções que seriam muito difíceis de realizar de outro modo.

É ainda possível obter hologramas que simulam elementos ópticos simples ou combinações deles como, por exemplo, lentes, prismas, espelhos e divisores de feixe – **elementos ópticos holográficos**.

A montagem utilizada para obter um holograma deve estar assentada numa superfície imune a vibrações. Nas páginas seguintes representam-se, esquematicamente, algumas das montagens típicas de hologramas de reflexão e de transmissão.

Os hologramas de transmissão devem ser vistos usando um feixe idêntico ao feixe de referência usado para registrar o holograma.

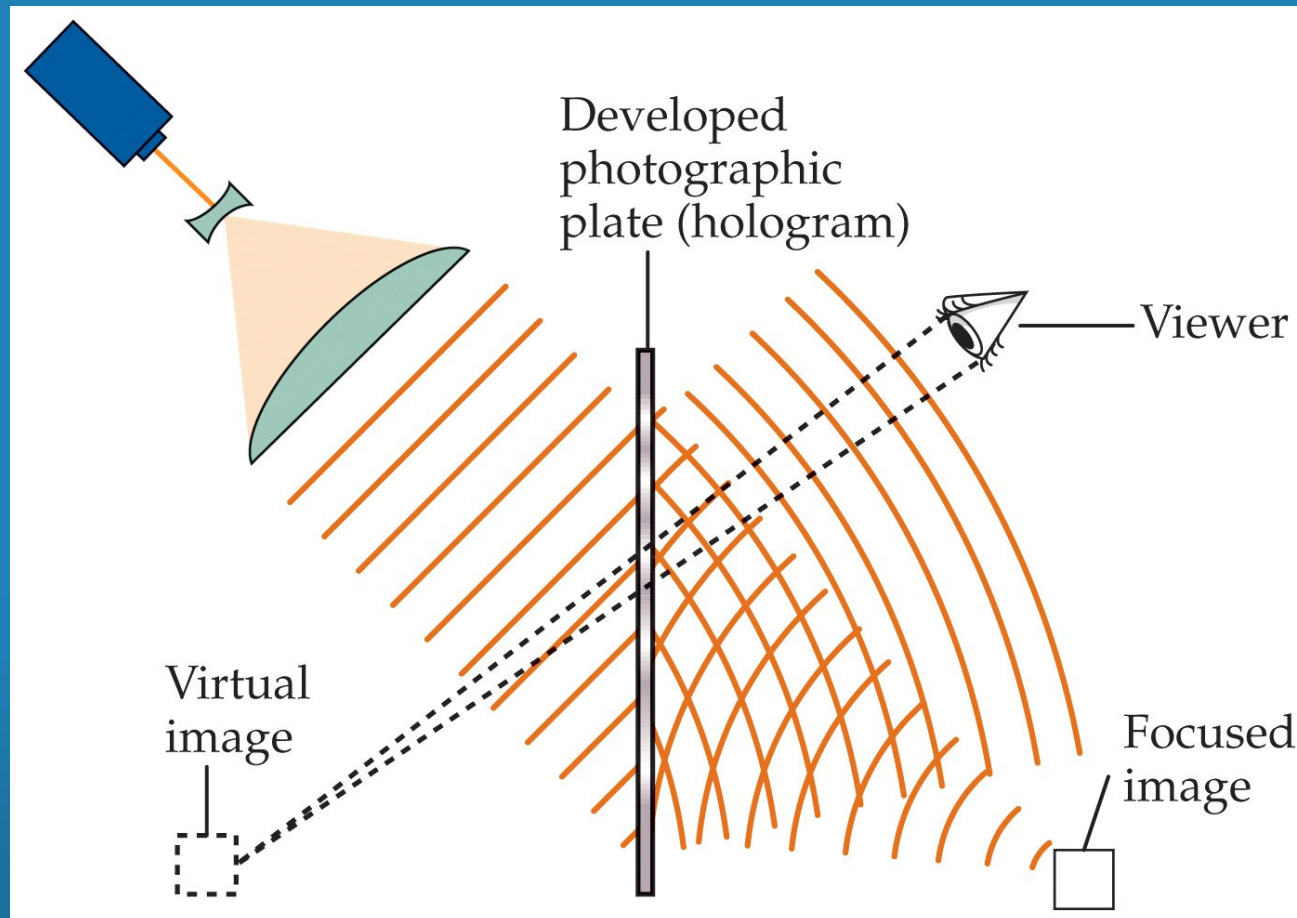
Registrar (*fazer*) um holograma



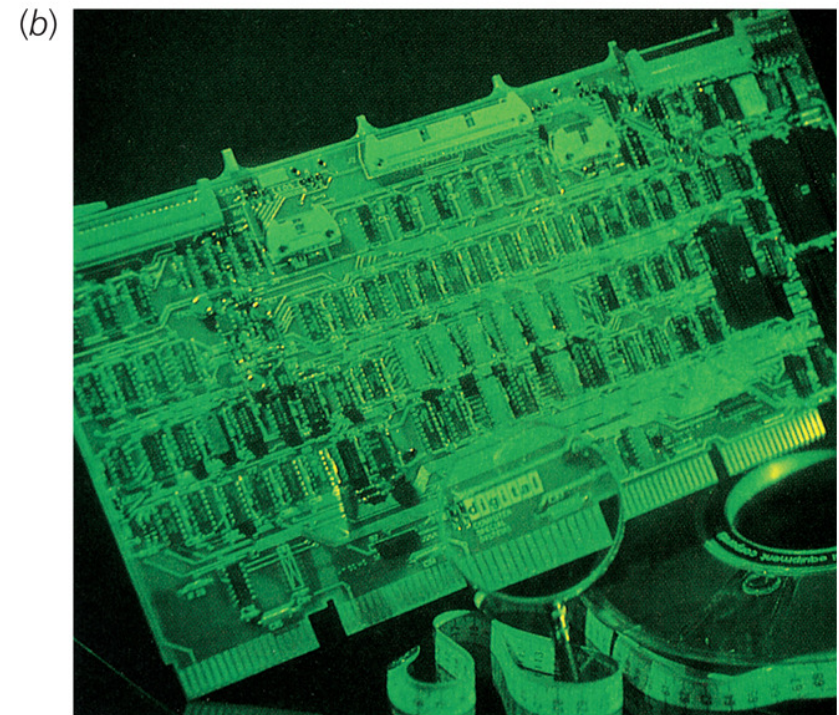
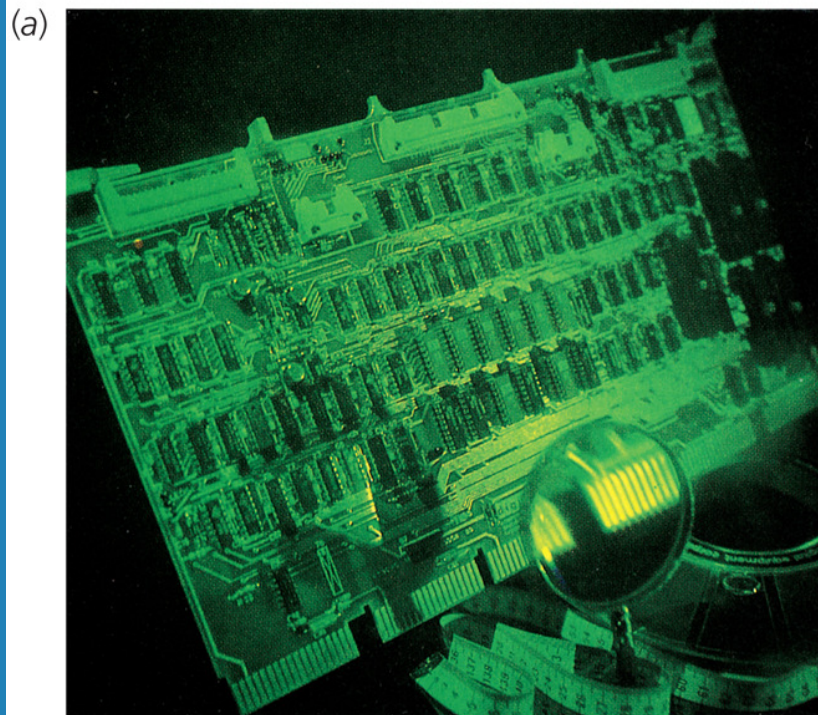
Diz-se com frequência que um holograma é **uma janela com memórias**: a imagem de um objecto é registada **num pedaço de vidro ou numa película quase transparente**.

Observar (*ler*) um holograma

Quando o filme é iluminado apropriadamente a imagem tridimensional do objecto é recriada como se o objecto fosse reproduzido por detrás do filme. Mesmo bloqueando parte do holograma, é possível ver o objecto, como quando olhamos através de uma janela parcialmente bloqueada.

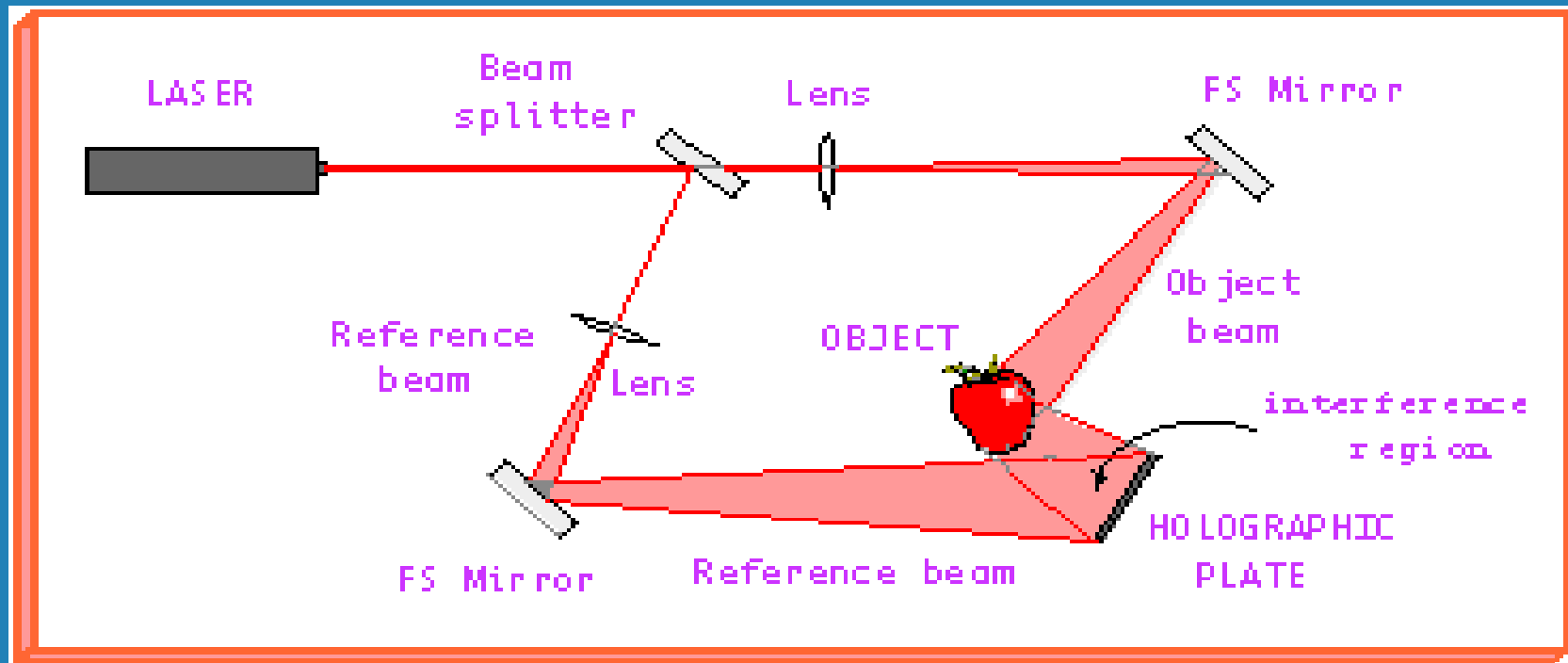


Holograma visto de dois ângulos diferentes



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

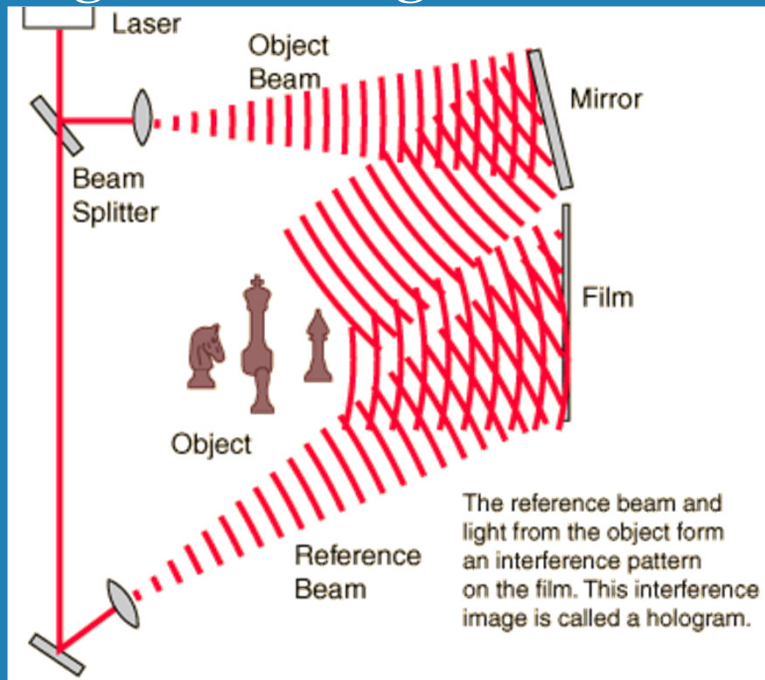
Hologramas de transmissão



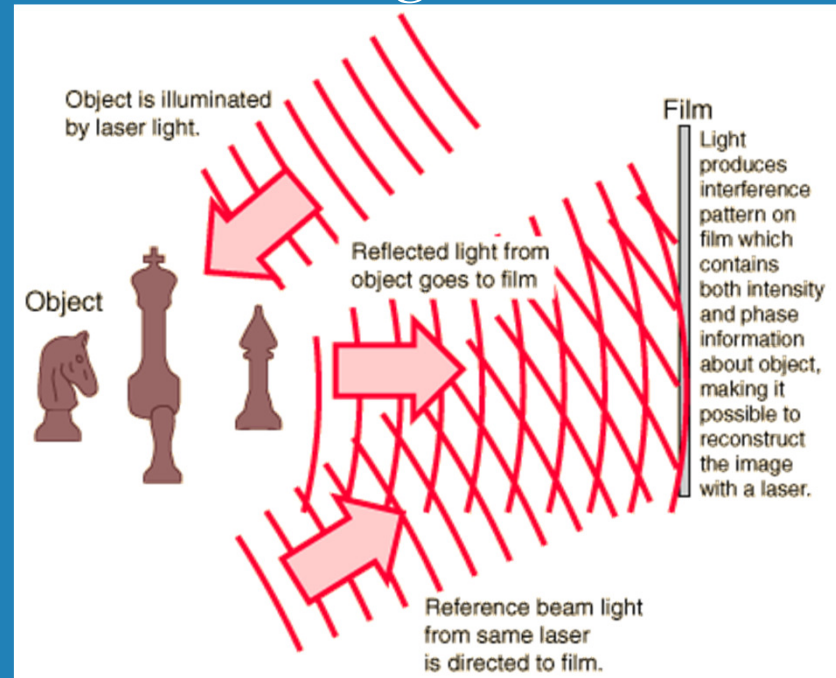
Os hologramas de transmissão devem ser lidos usando um feixe idêntico ao feixe de referência usado para registrar o holograma.

Hologramas de transmissão

Registo do holograma

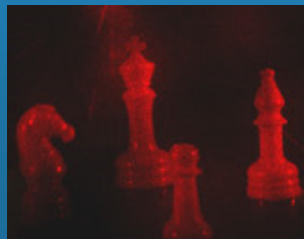
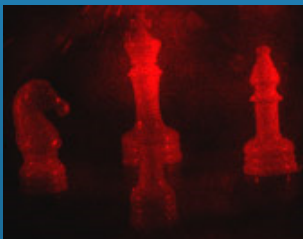


Leitura do holograma

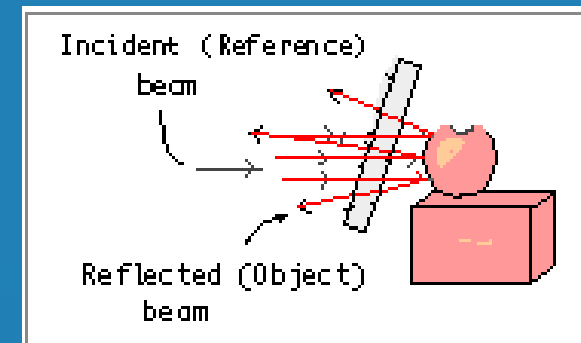
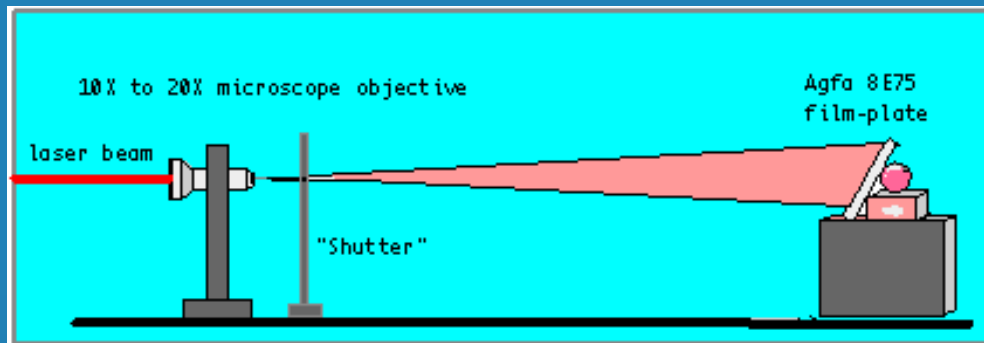
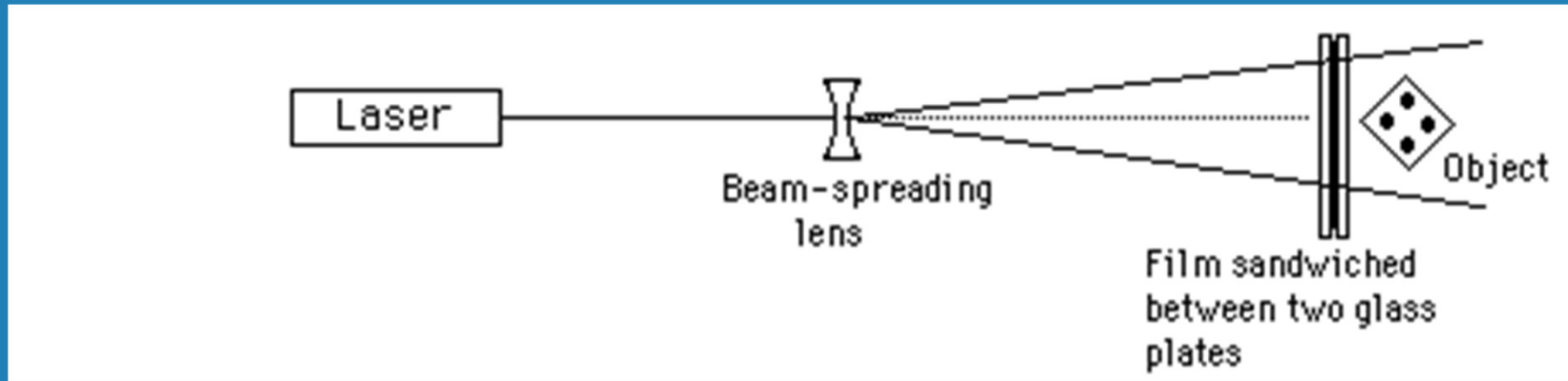


Os hologramas de transmissão devem ser lidos usando um feixe idêntico ao feixe de referência usado para registar o holograma.

Imagens do holograma visto de diferentes ângulos



Hologramas de reflexão (diagramas)



Este tipo de holograma podem ser lidos com luz branca

Ver <http://w3.ualg.pt/%7Ejlongras/MOV03751.MPG>

Hologramas gerados por computador

Padrão de difracção gerado por computador

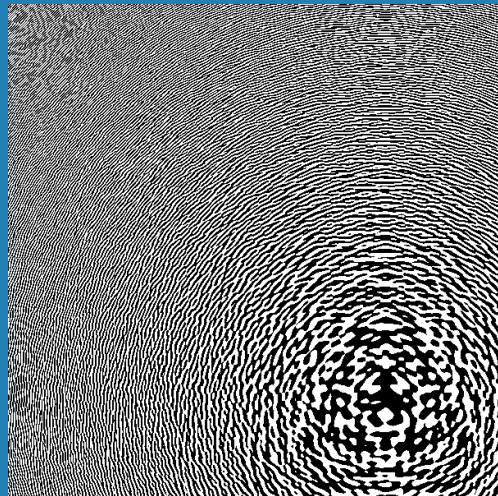
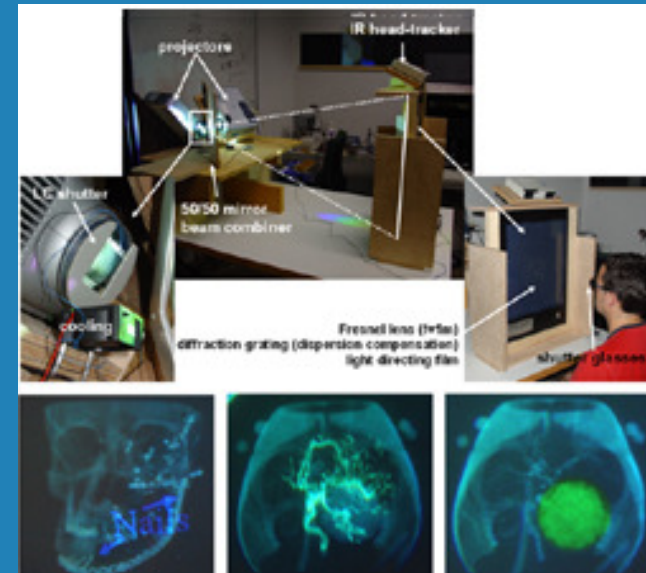
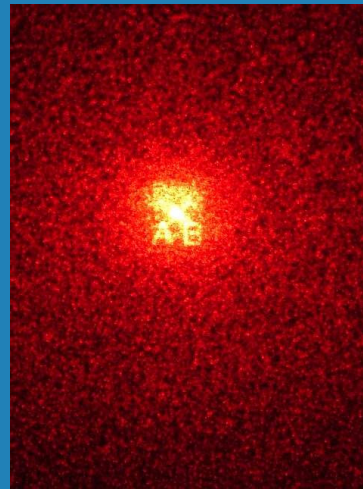
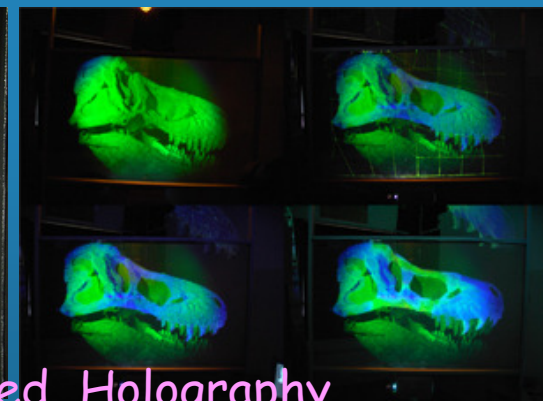
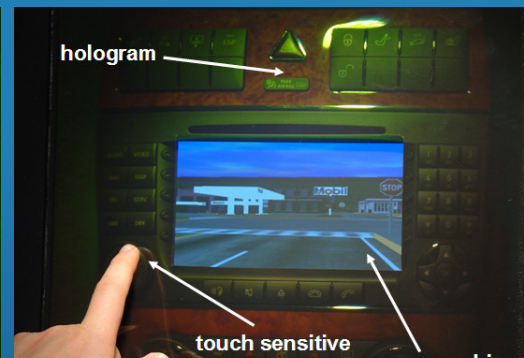
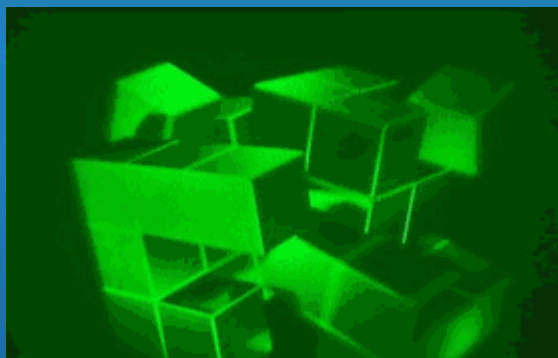


Imagem gerada



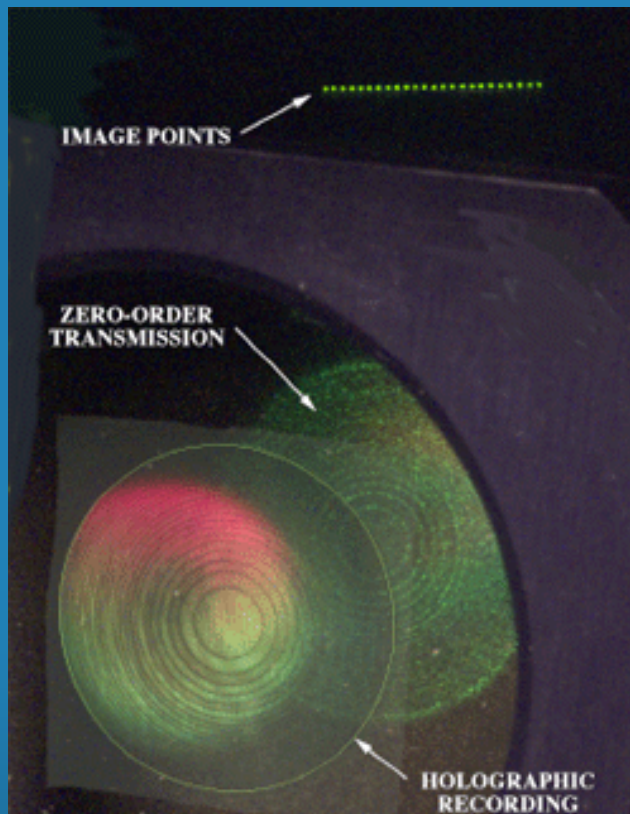
Os **hologramas gerados por computador** permitem gerar e observar objectos e executar funções que seriam muito difíceis de realizar de outro modo.



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

Elementos ópticos holográficos

É ainda possível obter hologramas que simulam elementos ópticos simples ou combinações deles como, por exemplo, lentes, prismas, espelhos e divisores de feixe, etc., obtendo-se **elementos ópticos holográficos**.



<http://harlie.gsfc.nasa.gov/HOES/HOEs.htm>

<http://www.photonics.com/directory/bg/category.asp?bqpsa=31125>

Aplicações da holografia

A holografia é aplicada com vários propósitos, desde o reforço de segurança nos cartões de crédito e no papel-moeda até aos “cockpits” dos aviões permitindo aos pilotos lerem os instrumentos sem tirarem os olhos dos objectivos.

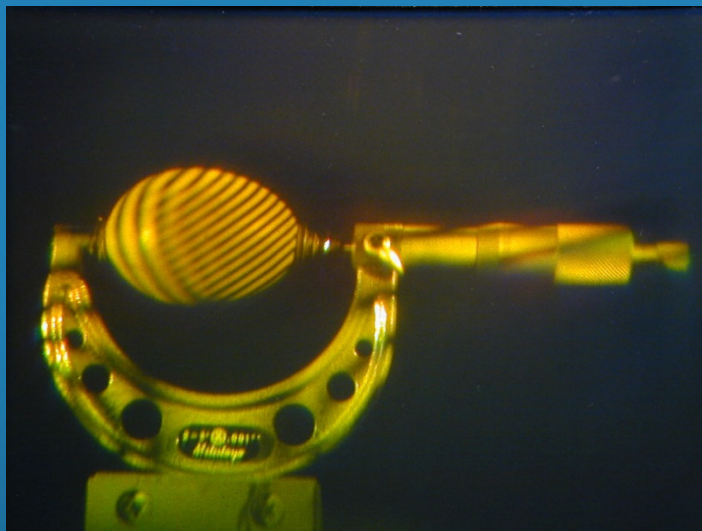
Para além de ilustrarem muitas vezes as capas de revistas, são usados nos leitores de códigos de barras, em galerias de arte, em laboratórios permitindo a realização de testes não destrutivos, em medidas de precisão, e como elementos auxiliares de processamento de informação e de memória.

Hol(o)- elem. de formação de palavras que exprime a ideia de inteiro, todo, completo (do gr. hólos, «todo»);

-grama (tón.) suf. nom., de origem grega, que exprime a ideia de escrito, registo, letra (maregrama, telegrama).

Emulsão (fot.) película gelatinosa que tem em suspensão finas partículas de sais de prata sensíveis à luz (do lat. *emulsióne-, «id.», de emulsu-, part. pass. de emulgôre, «ordenhar; esgotar»).

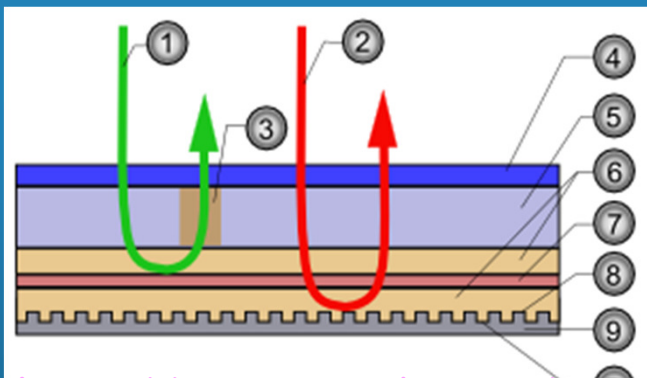
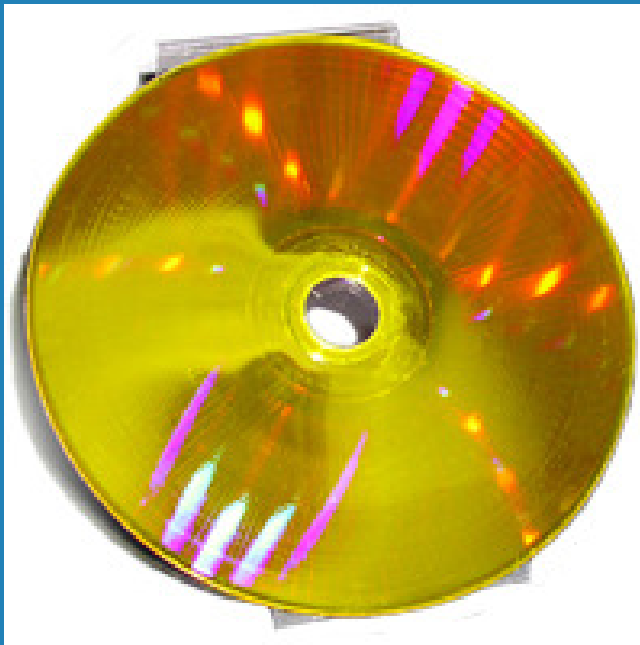
Aplicações da holografia



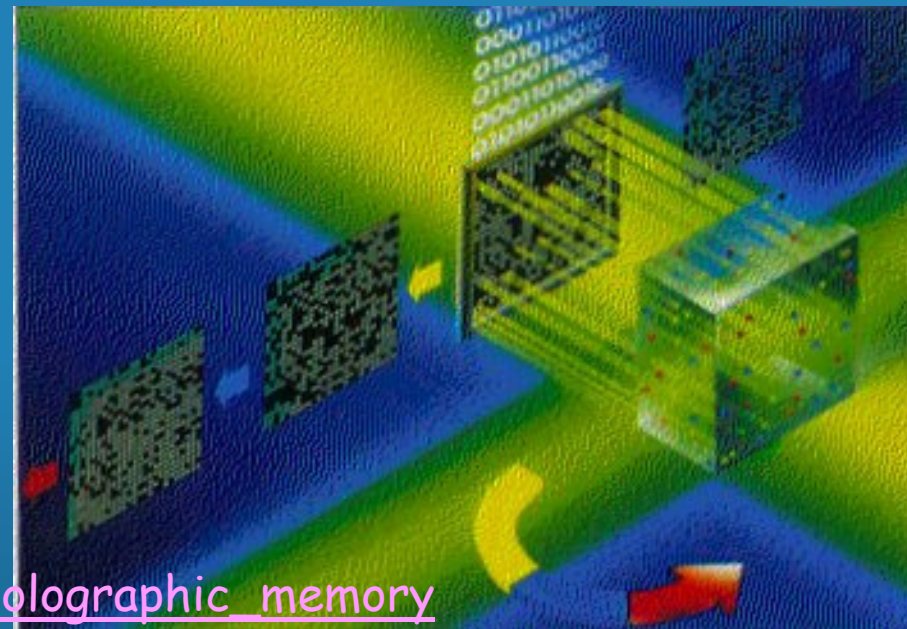
<http://en.wikipedia.org/wiki/Holography#Applications>

Memórias holográficas

Discos holográficos



Cartões de memória holográficos



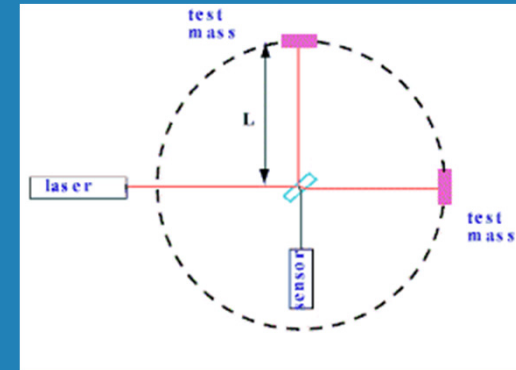
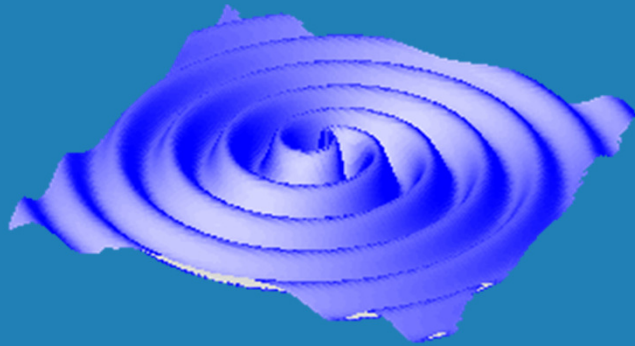
http://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_memory

Bibliografia

- *Óptica*, Eugene Hecht, Fundação Calouste Gulbenkian, 1991.
- *Enciclopédia Visual da Ciência*, Editorial Verbo, 1994.
- *História da Ciência de 1543 ao presente*, John Gribbin, Europa-América, 2005.
- *O poder da luz*, National Geographic, Outubro 2001.
- *A Evolução da Física*, A. Einstein e L. Infeld, Livros do Brasil.
- *Cosmos*, Carl Sagan, Gradiva 1985.
- *O que é uma lei Física*, Richard P. Feynman, Gradiva, 1992.
- <http://www.howstuffworks.com/>
- <http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica10/>
- <http://pt.wikipedia.org/>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- <http://br.geocities.com/saladefisica/>
- <http://www.cienciahoje.pt/>
- *Dicionário de Língua Portuguesa*, Priberam Informática e Porto Editora, 1996.

LISA

Space GW detector complementary to ground detectors



- **GW detection through measurement of phase shift due to ΔL**
 - ➔ good precision required on arm length: $\Delta L/L \sim 10^{-23}$
- **laser frequency noise and optical bench noise $\gg \gg$ GW signal**
 - ➔ TDI pre-processing of data required
 - ➔ TDI observables = time-delayed (*wrt* photon flight time t_{ij}) combination of data fluxes from = laser links, in close loops, in order to cancel bench and frequency noise

LISA: Supermassive Black Holes

- LISA will see inspiraling supermassive black holes ($\sim 10^5 - 10^7 M_{\odot}$) resulting from mergers of galaxies or pre-galactic structures out beyond $z \sim 20$
- If most galaxies have had an SMBH-SMBH merger, then estimates range from $\sim 0.1/\text{yr}$ to $10,000/\text{yr}$
- These are the strongest sources that LISA is likely to see with signal to noise ratios of $\sim 3,000$
- LISA will determine:
 - Masses, spins and direction and *absolute distance* to the binary
 - Sampling of the history of galactic merger rates
 - Demographics: space density, mass distributions, spin distributions
 - Precision test of General Relativity in the dynamical, nonlinear gravity regime

Diferentes manifestações da radiação EM



Resumo da actividade de I&D (1992-2008)

Universidades do Porto e de Glasgow

- Óptica e Electrónica: hologramas gerados por computador e elementos ópticos holográficos (L, UP)
- Lasers e Optoelectrónica: modelação computacional de dispositivos ópticos integrados (M, UP)
- Optoelectrónica e Nanoelectrónica (D, UP & UG)

Actividade corrente (UALG, UG, Univ. de Sevilha)

- Dispositivos e circuitos, para sistemas de telecomunicações, cujas funcionalidades são determinadas pelas propriedades *quânticas* dos seus constituintes

Conteúdos

- Motivação e introdução
- Espectroscopia, absorção e a emissão fluorescente
- Interacção entre a radiação e a matéria
- Amplificação e atenuação de radiação
- Constituintes essenciais de um laser
- O primeiro laser, o laser de rubi (laser pulsado de estado sólido)
- Laser de hélio-néon (laser gasoso contínuo)
- Laser de diodo
- Como se obtém a emissão *quasi*-monocromático
- Diferenças entre a luz *comum* e a luz laser
- Aplicações dos lasers

