



Tópicos de Física Contemporânea

As propriedades da luz laser

Como funciona o laser

Holografia

Óptica e Optoelectrónica

José Figueiredo

(<http://w3.uaig.pt/~jlongras/>)

Gab. 2.32

23 de Janeiro de 2016



Motivação

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

Theodore H. Maiman, inventor do laser (1960)

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 um dispositivo gerador de um feixe de radiação electromagnética intensa, *quasi-monocromática*, e coerente, possuindo múltiplas aplicações nos campos da indústria, da investigação e tecnologia, da medicina, da comunicações entre muitos outros.

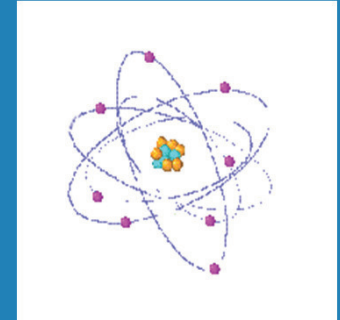
“Actualmente, o laser é a solução para diversos problemas.”

Algumas aplicações do laser

- Entretimento
- Escrita e leitura de CDs e DVDs
- Investigação e Desenvolvimento
- Comunicação por meio de fibras ópticas
- Metalurgia (corte, soldadura, etc.)
- Trabalhos topográficos de precisão
- Medições interferométricas de precisão
- Aplicações médicas
- Holografia

Temas a bordar

- Características da luz *comum* vs luz laser
- Interação entre a radiação e a matéria
- Espectroscopia, absorção e emissão fluorescente
- Emissão estimulada, amplificação e atenuação de radiação
- Como se obtém a emissão *quasi-monocromático*
- Constituintes essenciais de um laser
- O primeiro laser: laser de rubi (laser pulsado de estado sólido)
- Laser de hélio-néon (laser gasoso contínuo)
- Laser de diodo
- Aplicações dos lasers
- Interferometria
- Holografia





O laser

Introdução

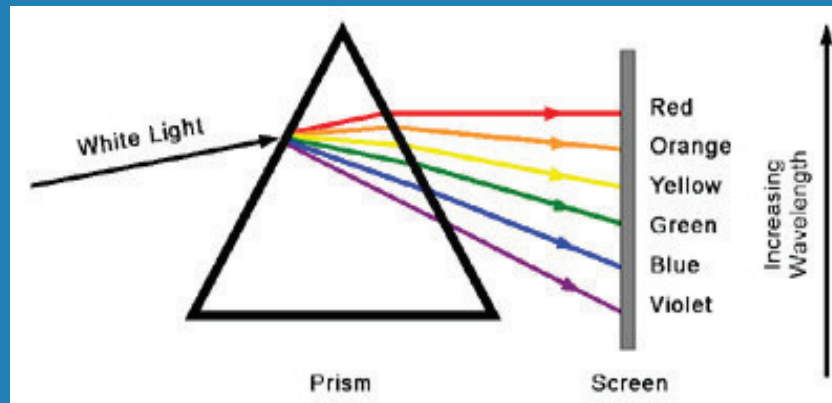
- No final da década de 1940 e no início da década de 1960, os estudos da Física Quântica deram origem as duas contribuições sem precedentes: o transístor e o **laser**.
- O primeiro estimulou o crescimento da microelectrónica, que explora o comportamento dos electrões na matéria.
- O laser abriu caminho para um novo campo – às vezes denominado fotónica – que trata da interação (novamente ao nível quântico) entre os fótons 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.**



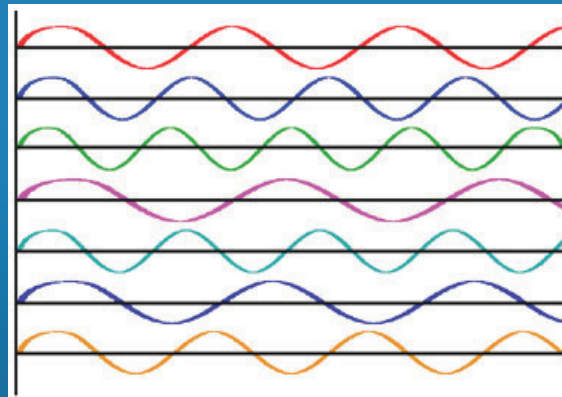
O que há, então, de tão diferente a respeito da luz de um laser?

Luz comum

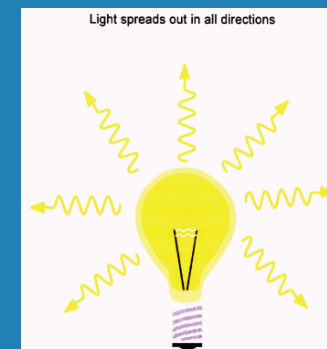
Policromática



Incoerente



Muito
divergente

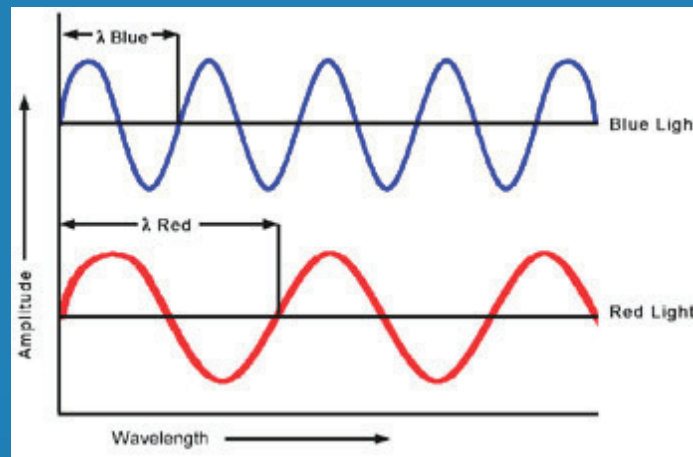




Características da luz laser

Quasi-monocromaticidade

- **A luz laser é *quasi-monocromática*:** as riscas de emissão de um gás rarefeito, com comprimento de onda central na região visível, $\sim 0,5 \mu\text{m}$ (500 nm), podem ter larguras espectrais inferiores a 1 nm, mas a risca de emissão de um laser pode ser inferior a 1 pm.

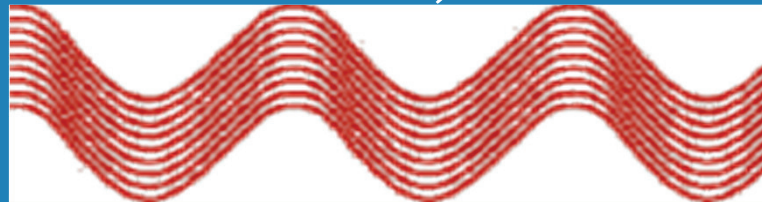


Quasi-monocromática ☺)

Elevada coerência

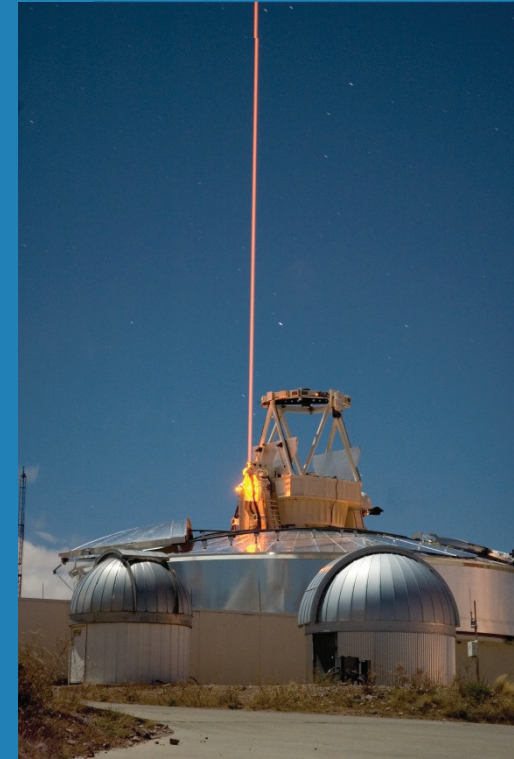
- **A luz laser pode ter elevado grau de coerência:** os trens de onda da radiação laser com a mesma fase podem ter centenas de metros, isto é, o comprimento de *coerência da radiação* pode atingir **centenas de metros**. Isto significa que se podem obter **franjas de interferência** a partir da combinação de dois feixes laser, conseguidos por divisão do feixe inicial, enquanto a diferença de percursos ópticos dos dois feixes é, no máximo, dessa ordem de grandeza.

Coerente ☐☺☺)



- (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 laser poder ser *facilmante* colimada



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

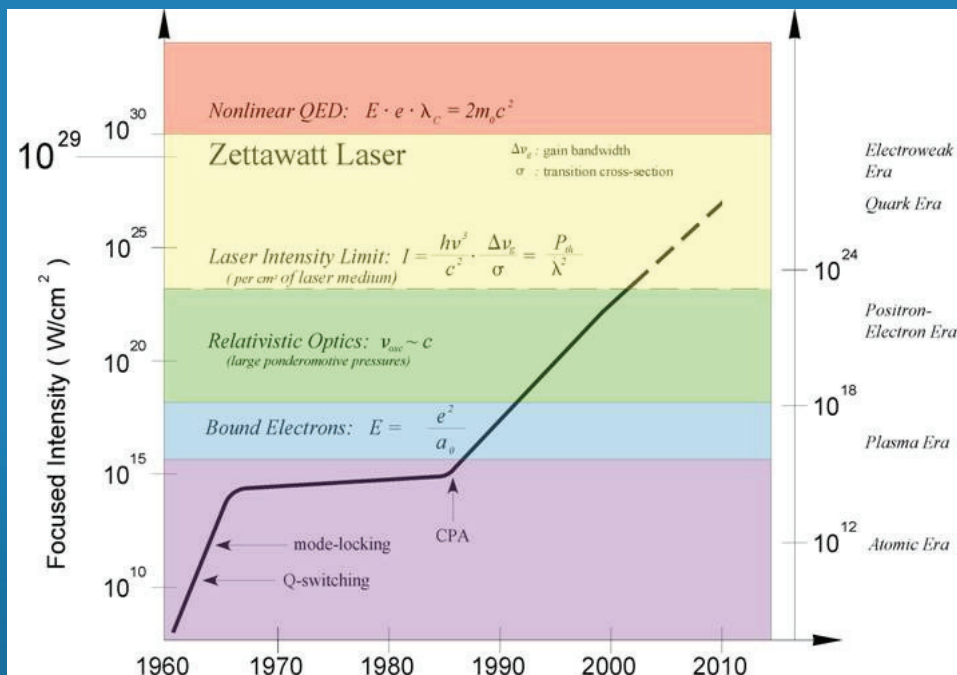
Colimador s. m. (fís.) dispositivo que serve para tornar paralelo um feixe luminoso divergente e que é constituído por uma fenda ou um objecto transparente colocado no plano focal de uma lente corrigida; instrumento óptico utilizado para fazer a pontaria numa boca-de-fogo. (De colimar + -dor)

Facilmente colimável e pouco divergente

- Para determinados 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 forma do filamento e não pelos efeitos de difracção.

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/cm^2 .
- Uma chama de maçarico oxiacetilénico tem uma densidade de fluxo de energia de apenas 10^3 W/cm^2 .



Muito intensa (☺)

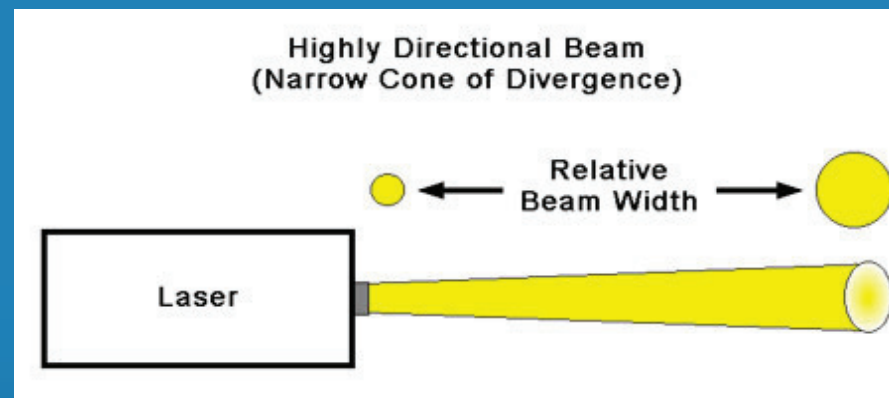
Intensidade da radiação produzida pelo Sol, numa região próxima da sua superfície é de apenas

64 MW/m^2 .

Luz muito brilhante e muito direcional

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

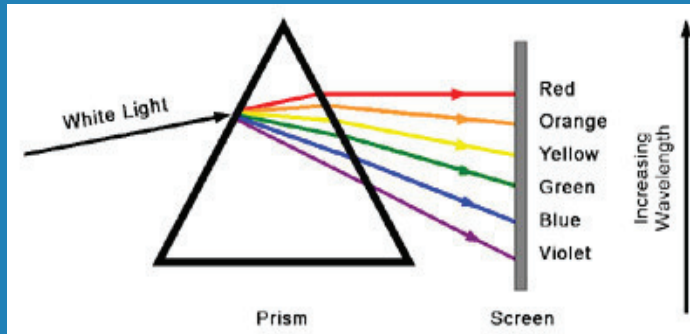
Brilho: (fís.) intensidade luminosa em determinada direção, por unidade de superfície do corpo luminoso, projetada perpendicularmente à direção;



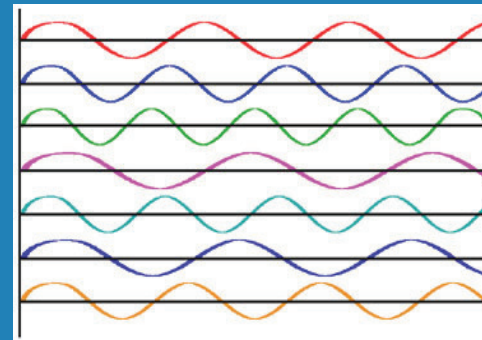
Pouco divergente (☺)

Resumo: luz *comum* vs luz laser

• Luz “comum” Policromática



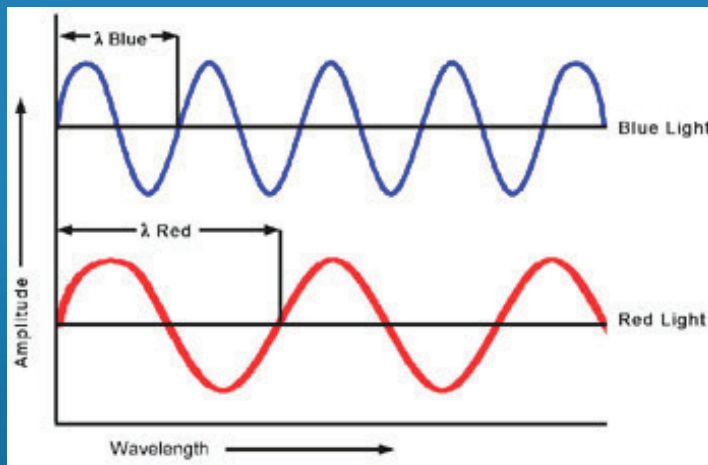
Incoerente



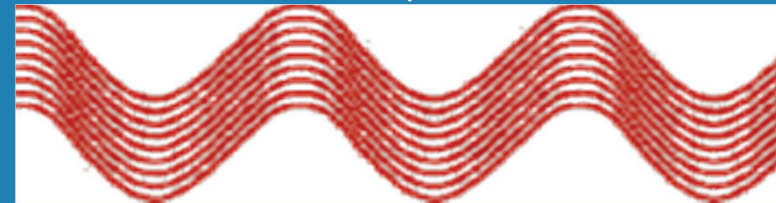
Muito divergente



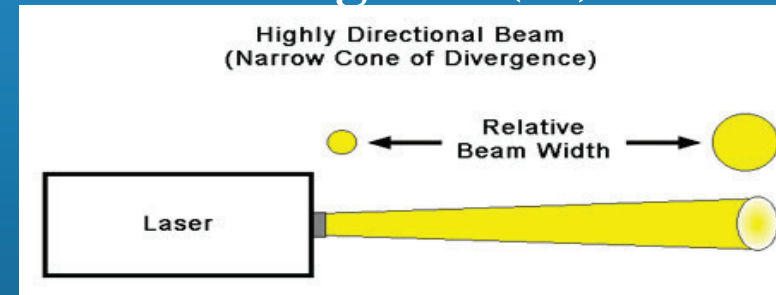
• Luz laser Quasi-monocromática ☹)




Coerente ☺☺)



Pouco divergente ☺)



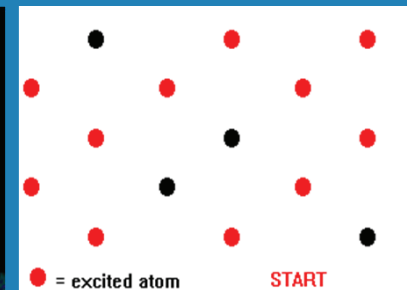
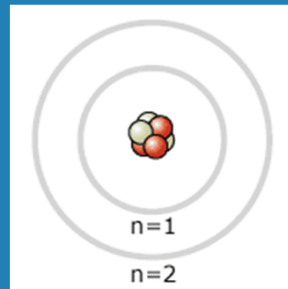


**Mas como é que se obtém
luz laser?**

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 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**:

$$h\nu = E_i - E_f,$$

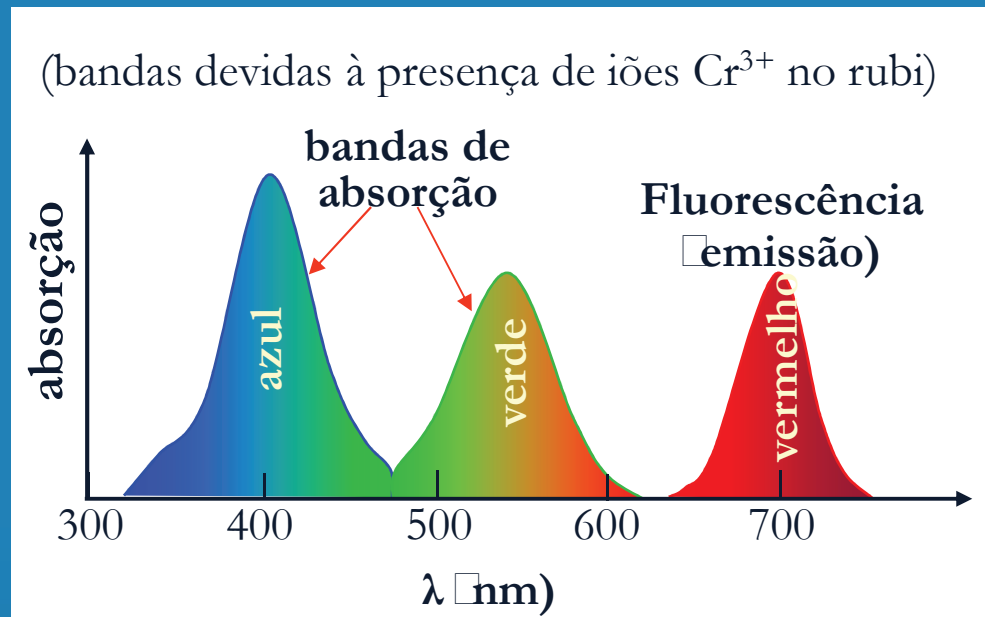
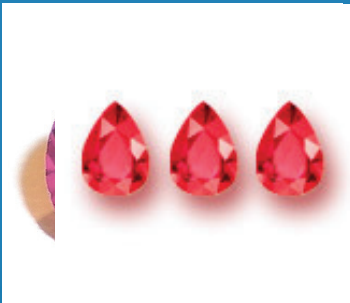


- Assim, se quisermos que uma fonte emita radiação de uma dada frequência ν , só temos de procurar um meio em que dois níveis atômicos satisfaçam a condição $h\nu = E_i - E_f$.
- **Ter presente que os átomos também podem emitir/absorver energia por processos não radiativos.**

Espectros de absorção e de emissão de um sólido

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

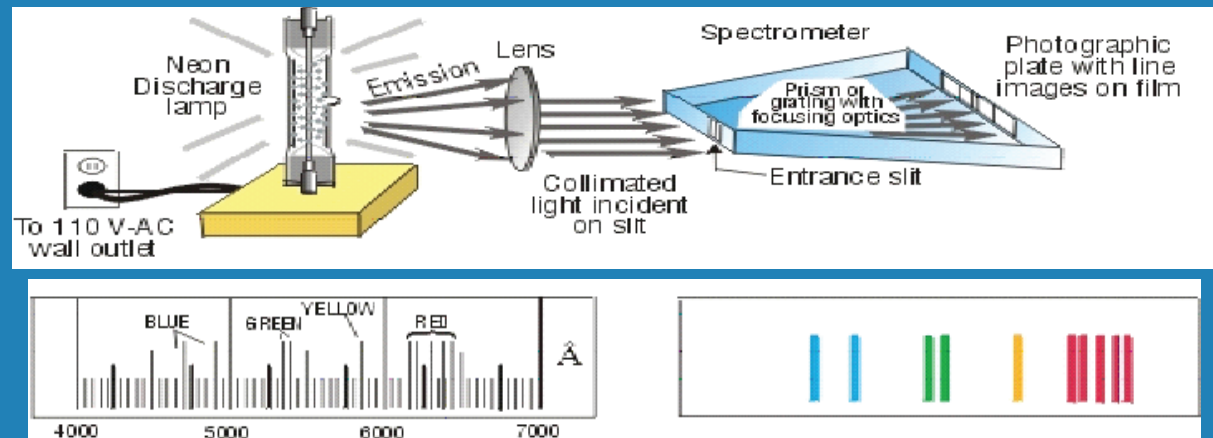
Exemplo: espectros de absorção e emissão do rubi



- **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 .

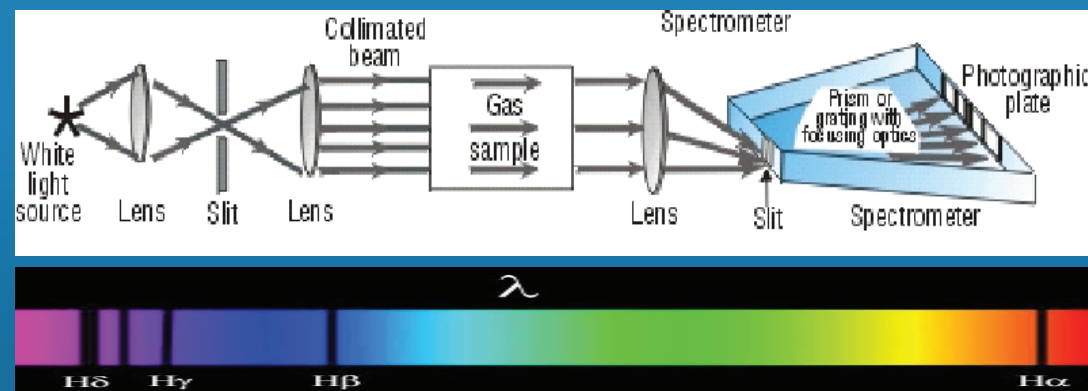
Espectros de absorção e de emissão de um gás

Espectro de emissão de um gás rarefeito



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

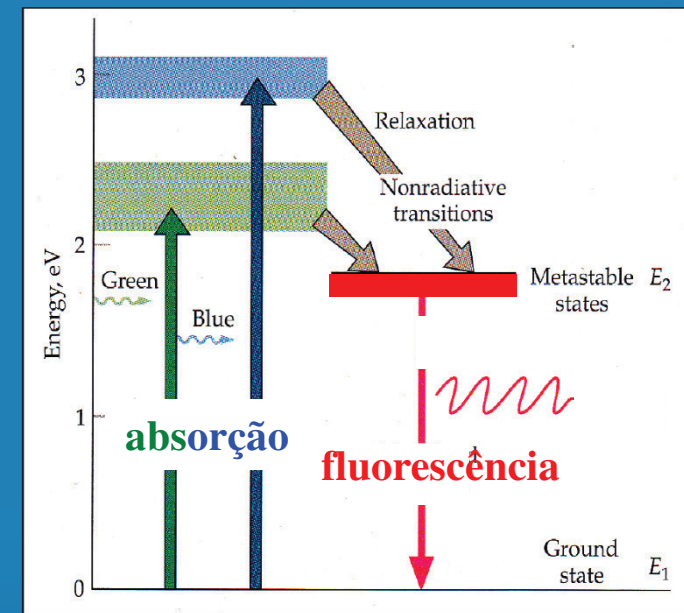
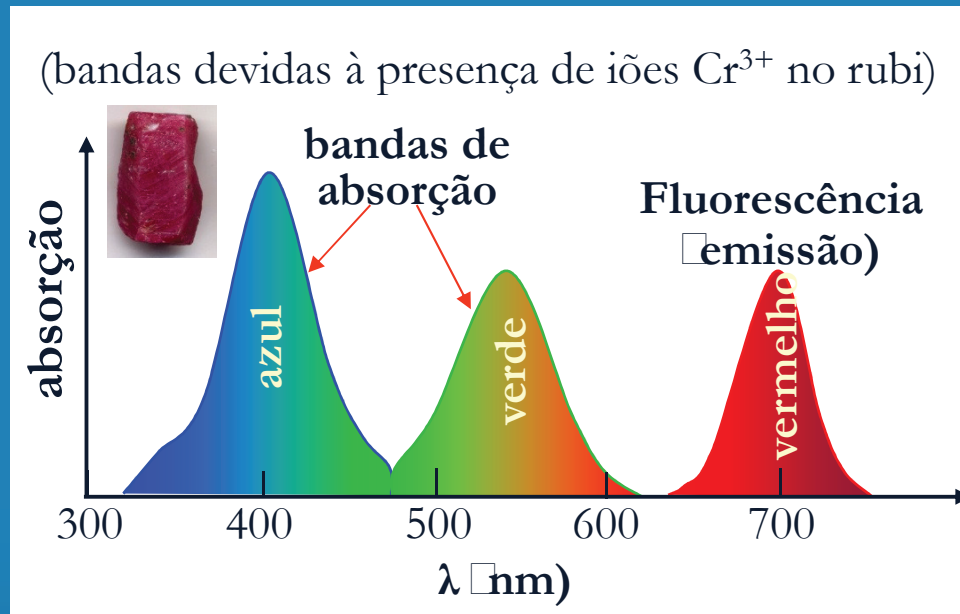
Espectro de absorção de um gás rarefeito



Emissão policromática em sólidos (fluorescência)

- O espectro de emissão (fluorescência) de um meio é, em geral, composto por bandas *contínuas* de frequências/comprimentos de onda (muito estreitas nos gases e largas nos sólidos e líquidos)

Espectros de absorção e de emissão do rubi Diagrama dos níveis de energia

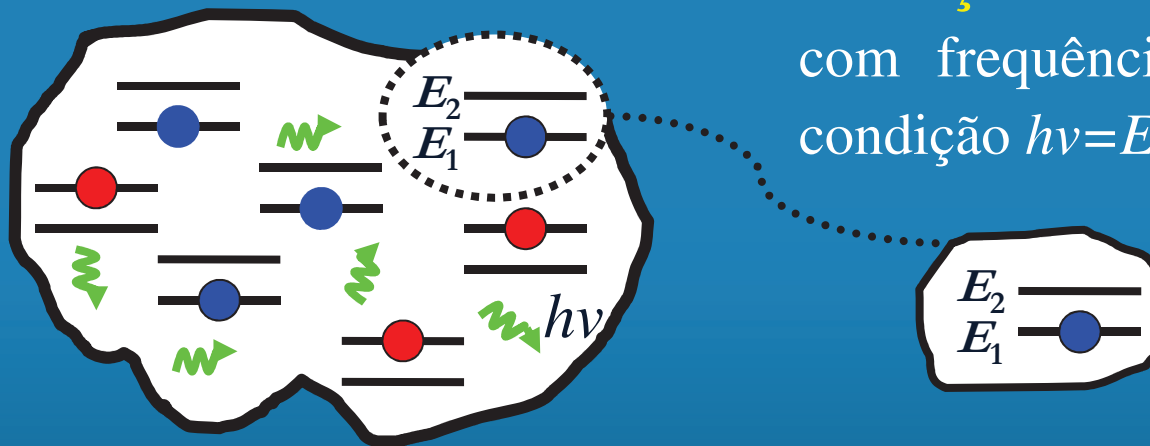
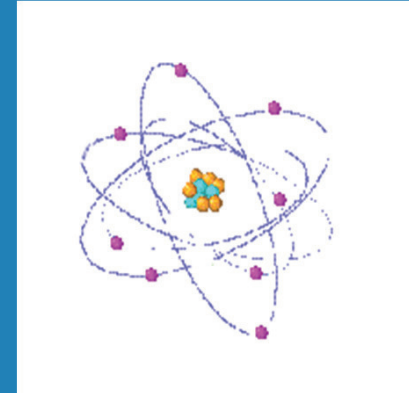


- Mas como se obtém luz *quasi-monocromática*?

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

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 interagir entre si.
- No que se segue considera-se apenas dois níveis de energia por átomo de interesse.

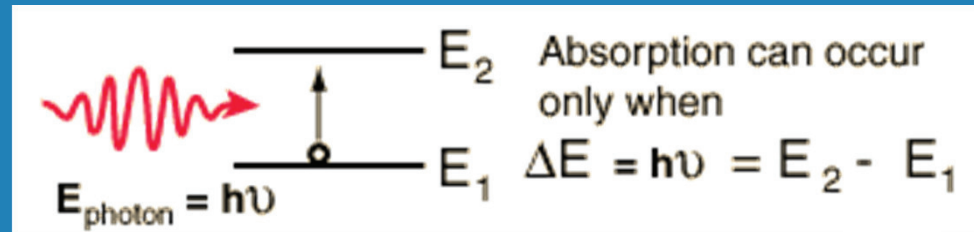


Radiação ressonante: é a radiação com frequência ν satisfazendo a condição $h\nu = E_2 - E_1$.

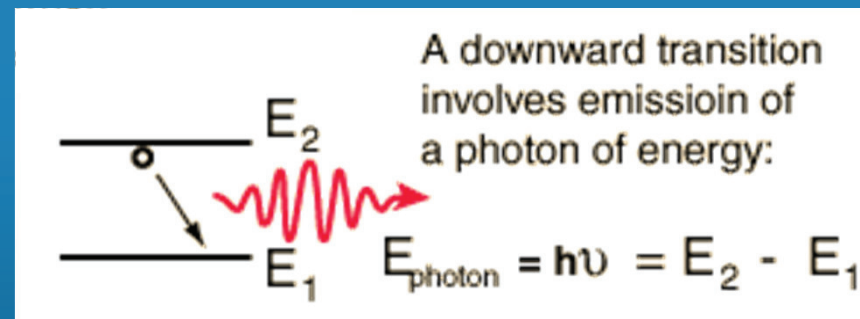
Átomo: do gr. átomos, «indivisível», pelo lat. atòmu-, «átomo»).

Absorção (estimulada) e emissão espontânea

- Absorção (estimulada)

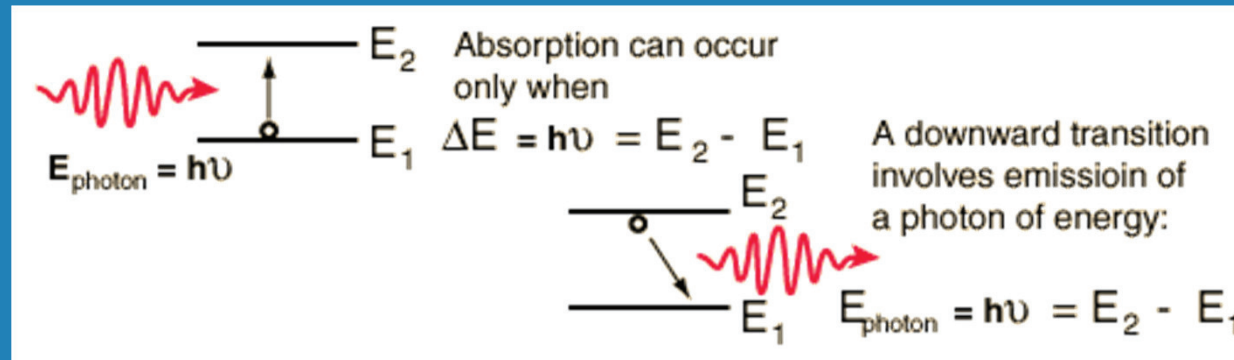


- Emissão espontânea



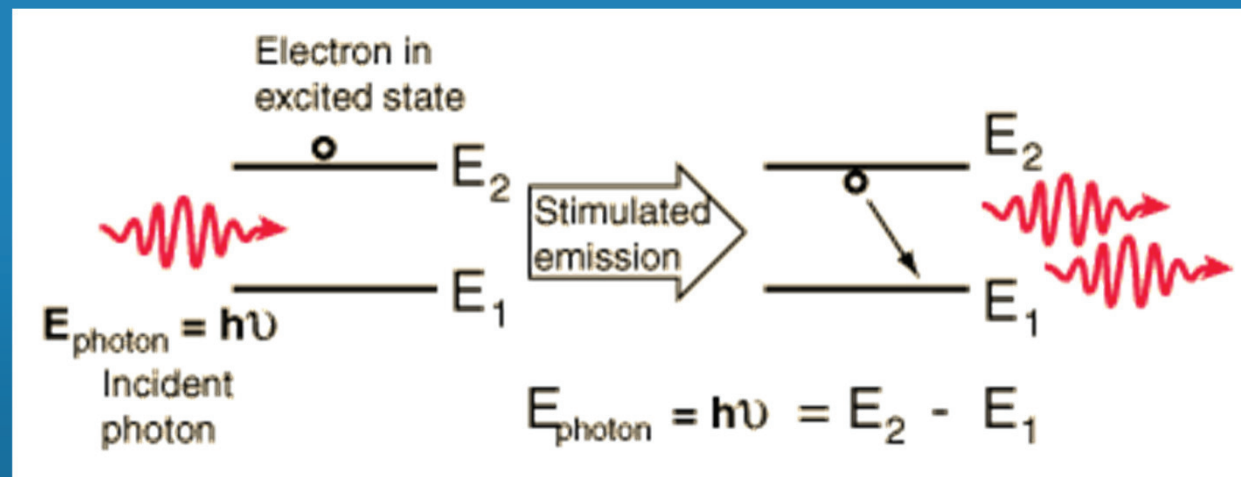
A emissão pode ser espontânea ou estimulada

- Absorção (estimulada)

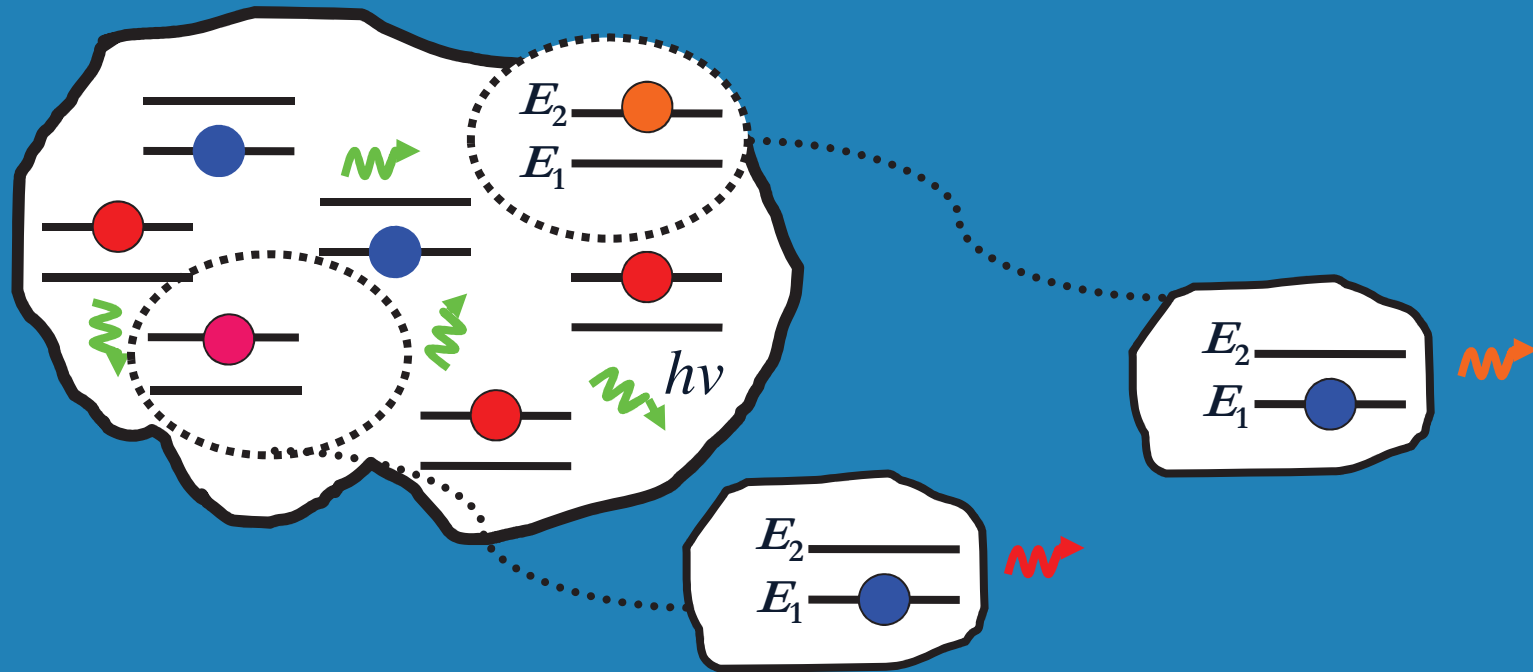


- Emissão espontânea

- Emissão estimulada



A emissão estimulada é, em geral, policromática

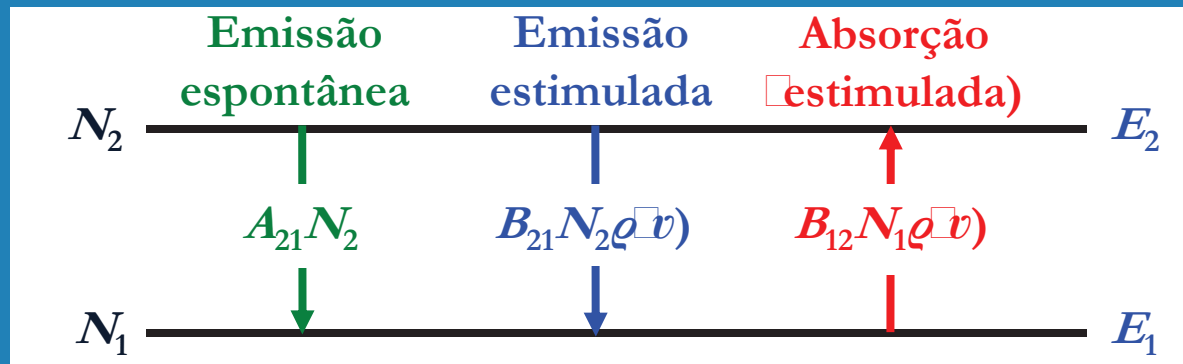


Num meio material cada nível de energia apresenta uma dada largura espectral, permitindo *diversas* transições ressonante: A radiação é emitida tem frequências ν :

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

Interacção entre a radiação e a matéria

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



B_{21} : coeficiente de emissão estimulada;

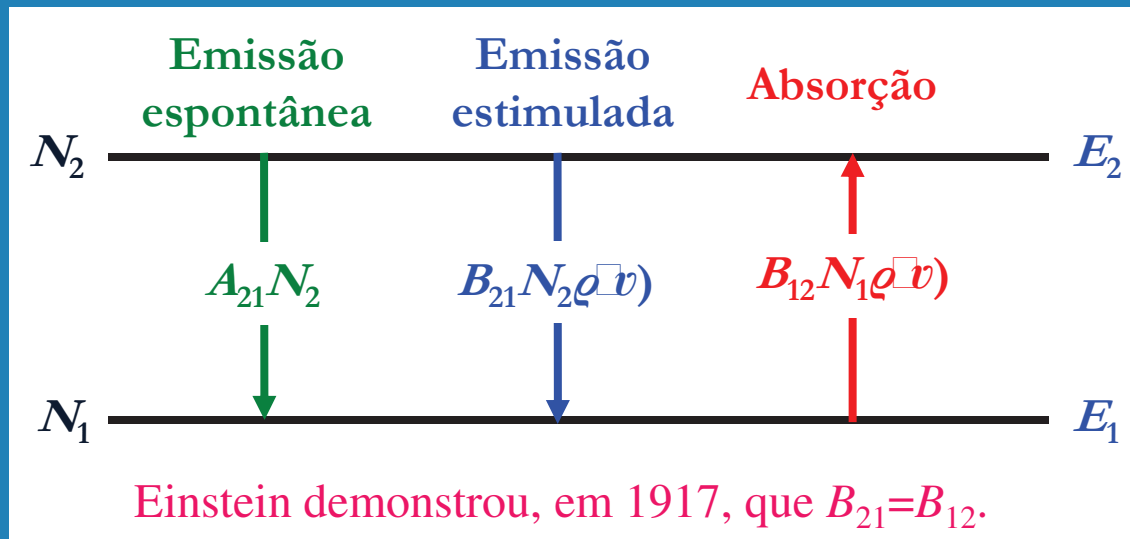
B_{12} : coeficiente de absorção;

A_{21} : coeficiente de emissão espontânea.

- 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 transitam para E_1 durante o processo de emissão, e o número de átomos N_1 que passam para E_2 durante o processo de absorção, é tal que as densidades das populações de N_1 e de N_2 se mantêm 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;

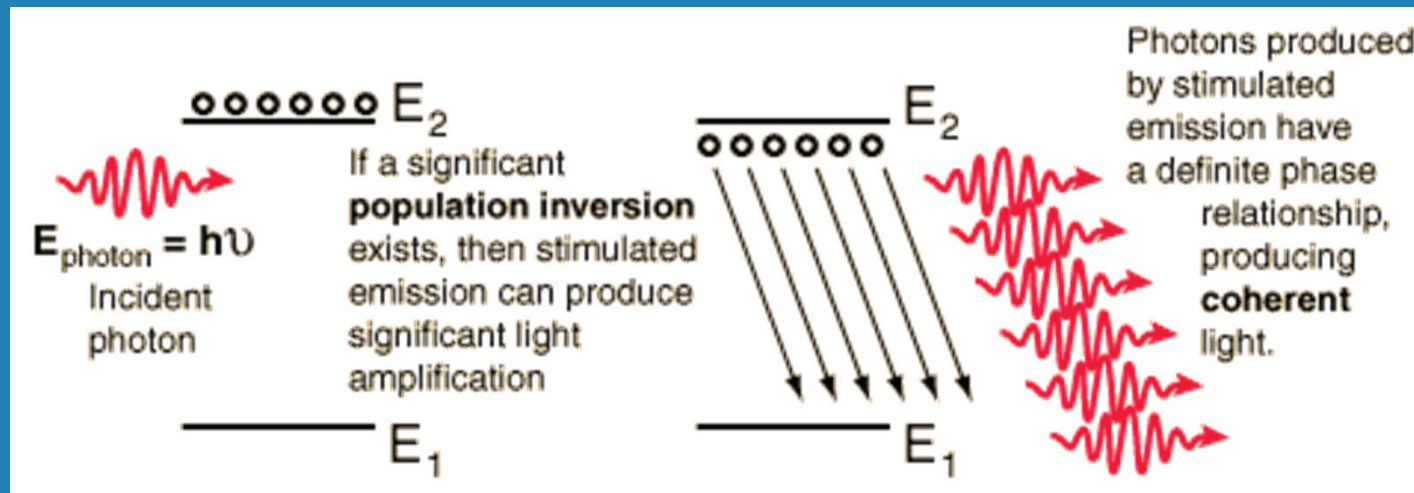
A_{21} : coeficiente de emissão espontânea.

$$B_{21}=B_{12}$$

- 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.

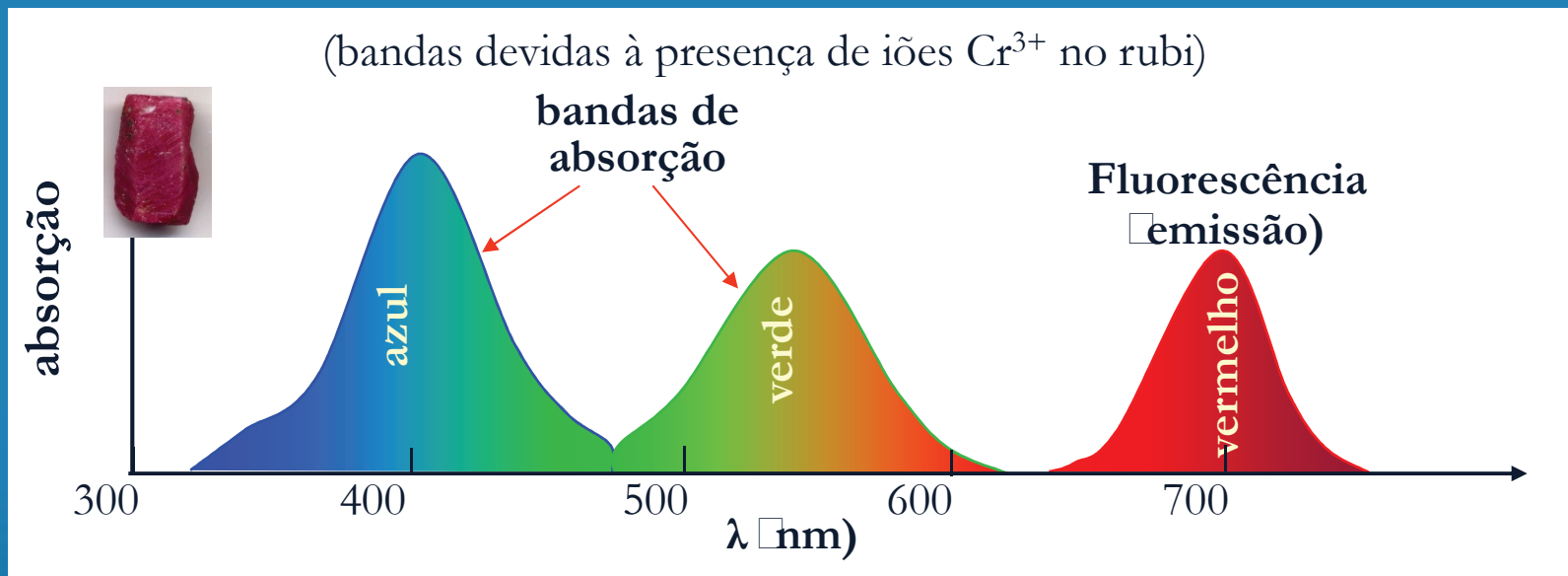


- Quando a radiação interage com os átomos, a emissão estimulada é maior do que a absorção, aumentando a densidade de fótons $\rho(\nu)$ – **amplificação por emissão estimulada de radiação**.
- A inversão de população pode ser obtida por bombeamento óptico, aplicando uma descarga eléctrica sobre o meio laser, etc.

Emissão policromática em sólidos (fluorescência)

- A luz produzida por um laser é *quasi-monocromática*, isto é, é formada por um feixe de ondas luminosas de **uma só** frequência ou comprimento de onda.
- Contudo, 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



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

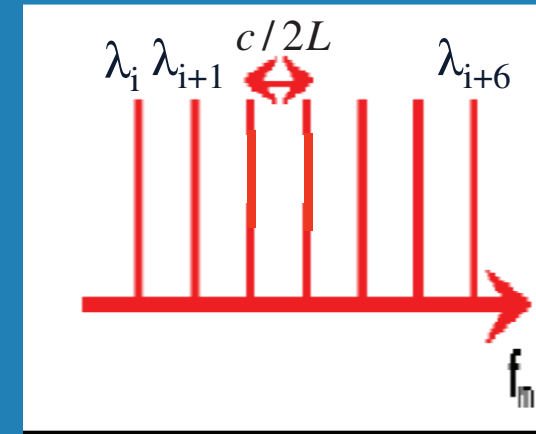
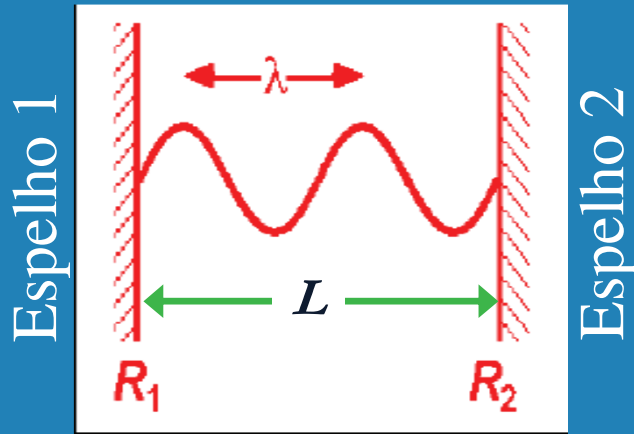
Monocromático: do gr. *mónos*, «único» + *chrōma*, -atos, «cor».

Cavidade óptica: selecção de frequência

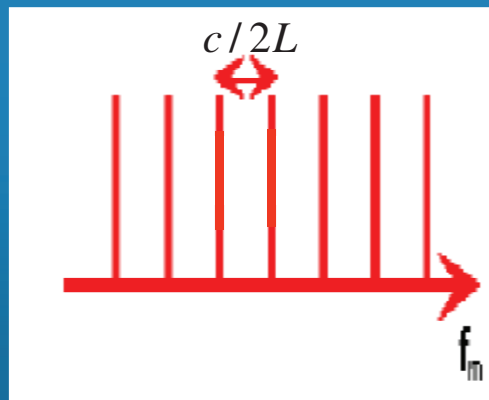
Assumindo emissão *quasi-monocromática*:

Cavidade laser é *ópticamente ressonante*

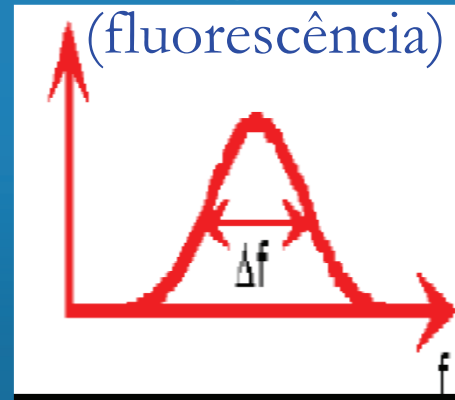
Modos próprios da cavidade



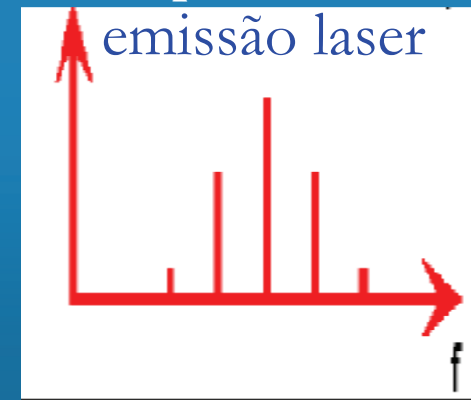
Modos próprios



Banda de ganho óptico
(fluorescência)



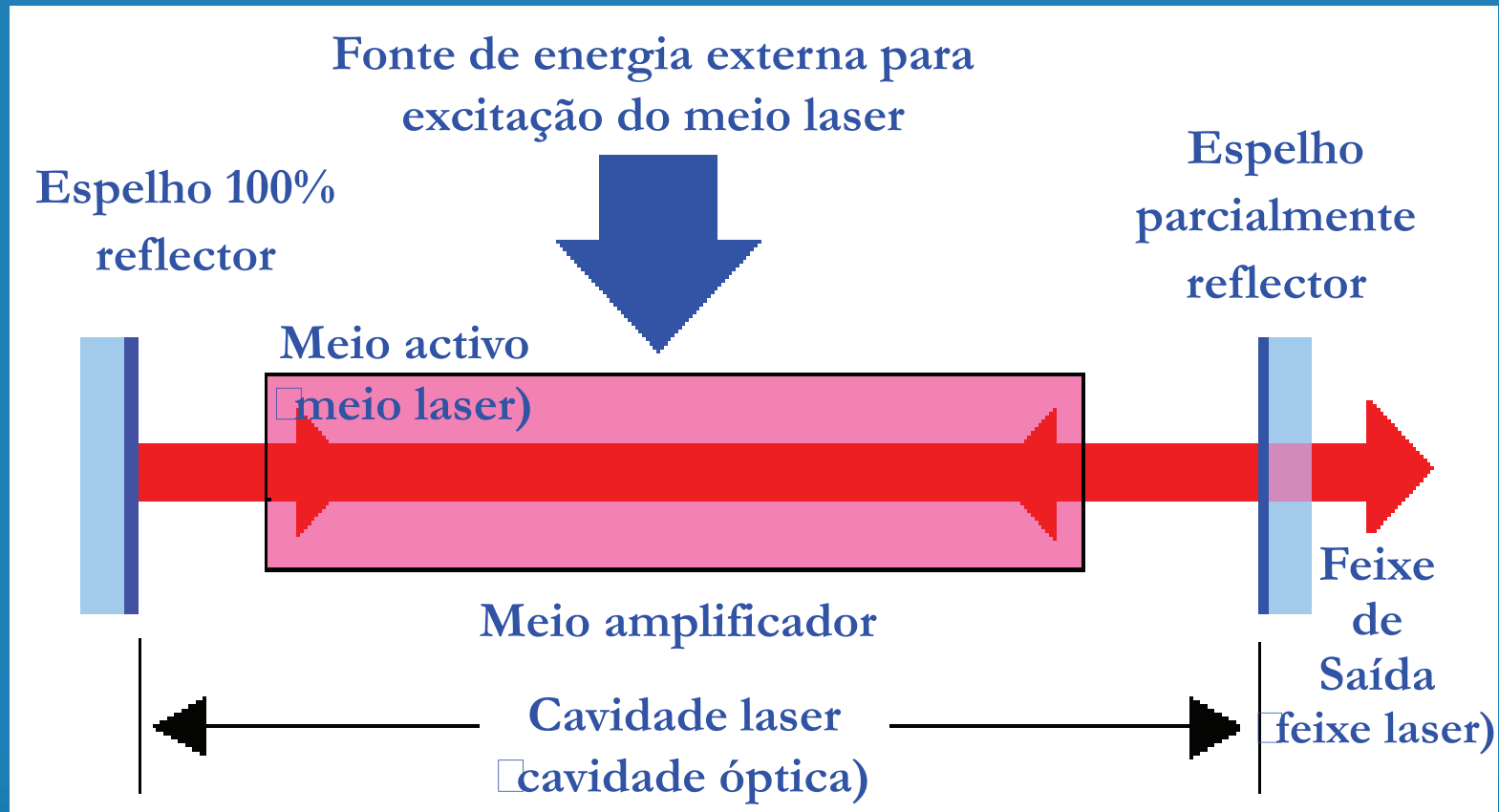
Espectro da emissão laser



\times

$=$

Constituintes essenciais de um laser



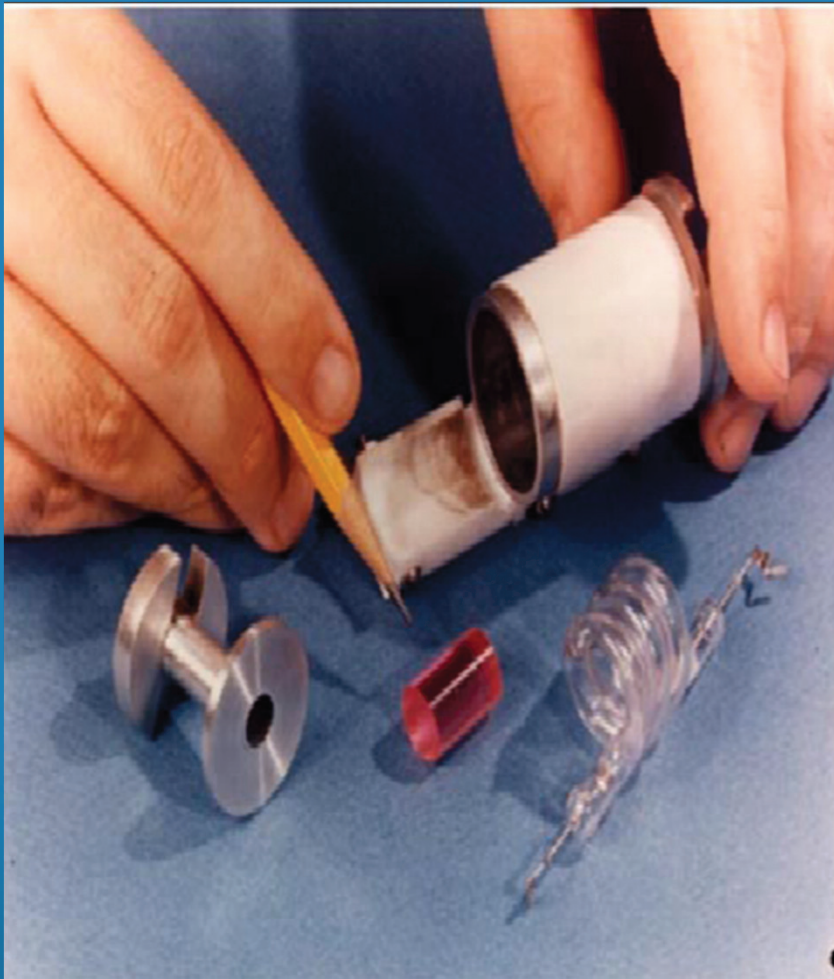
Meio activo (meio laser): material onde ocorre inversão de população.



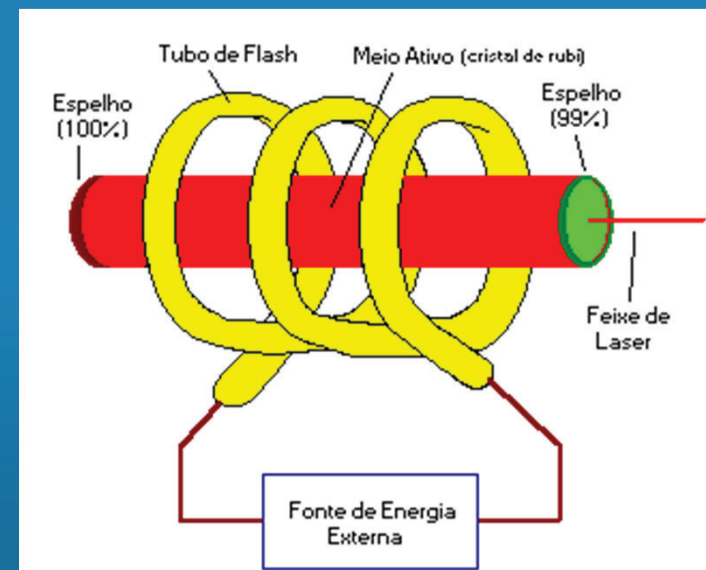
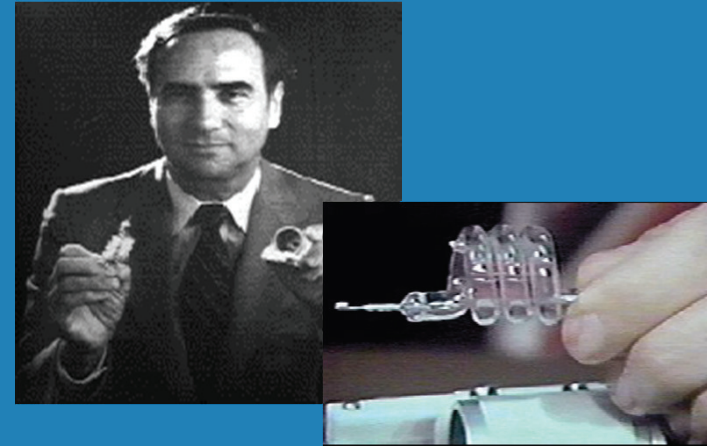
Principais sistemas laser

O primeiro laser: laser de rubi

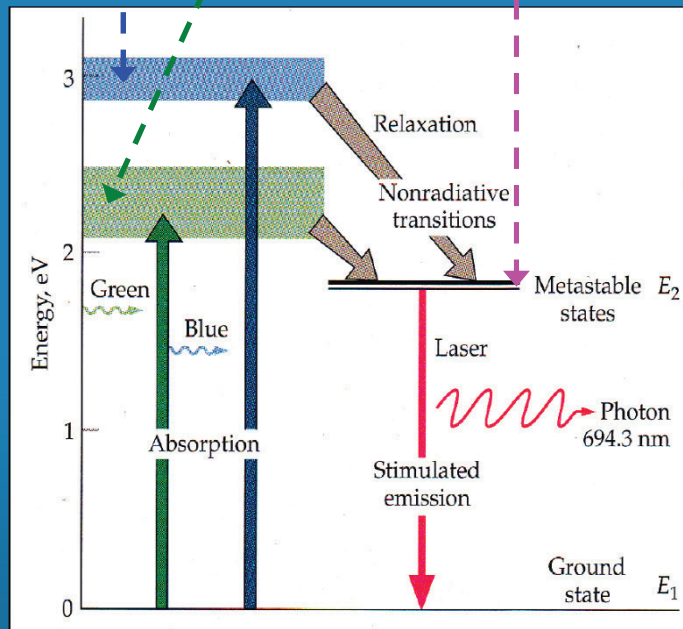
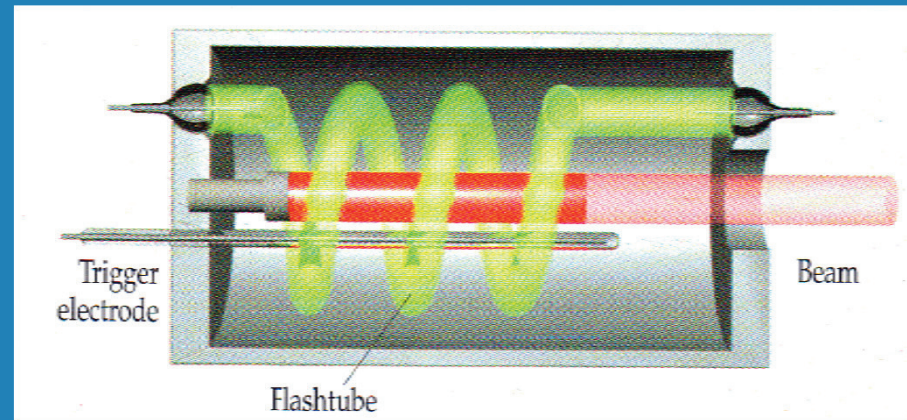
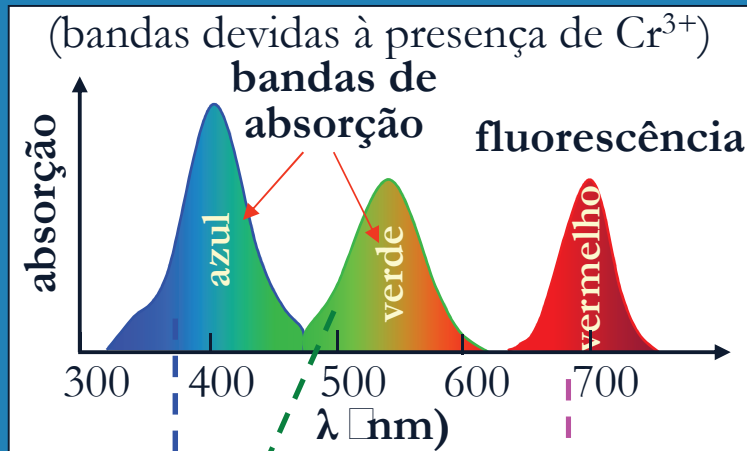
Meio activo: cristal de rubi



Theodore Maiman, 1960

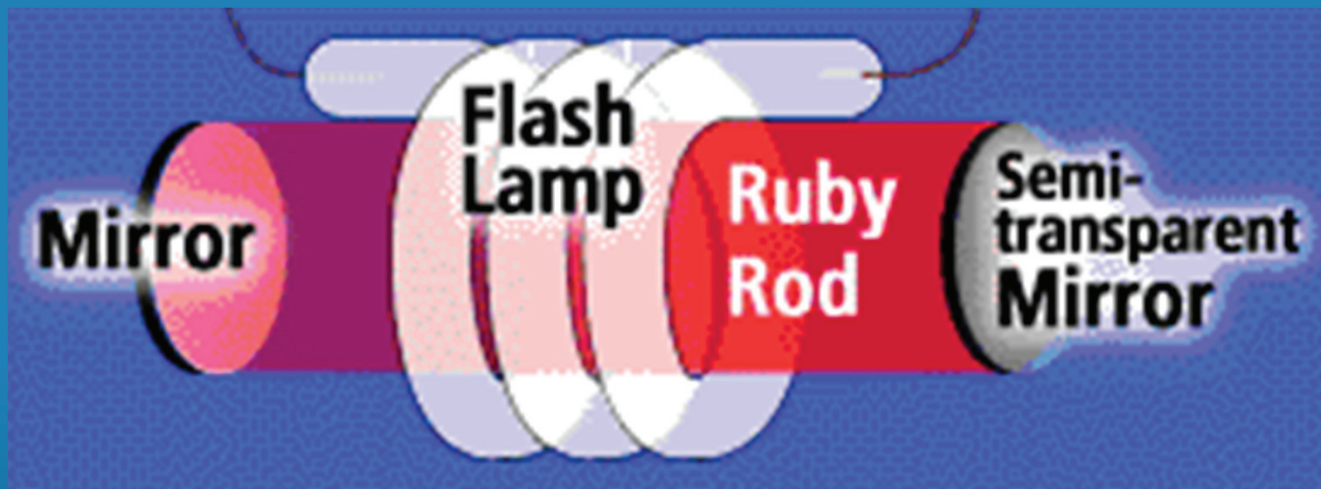
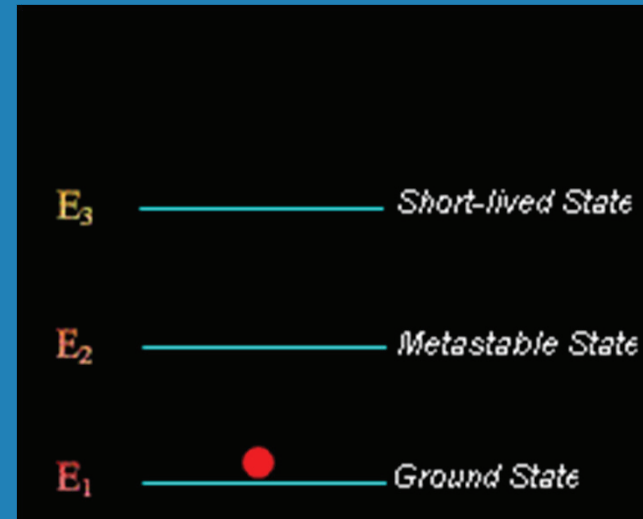
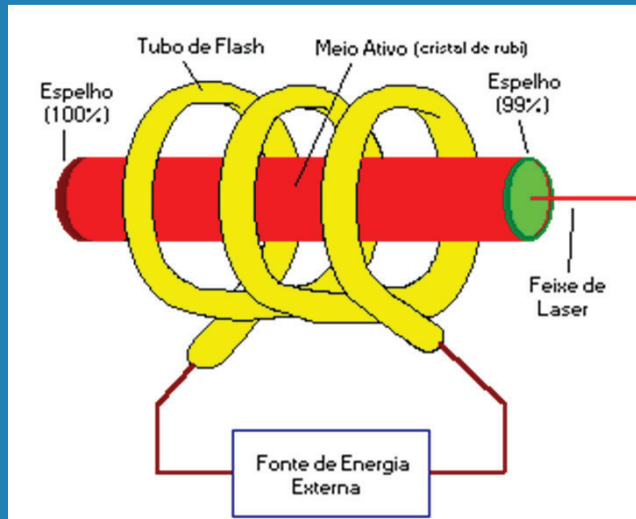


O primeiro laser: o laser de rubi (estrutura)



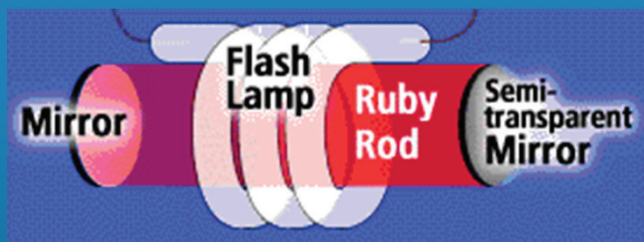
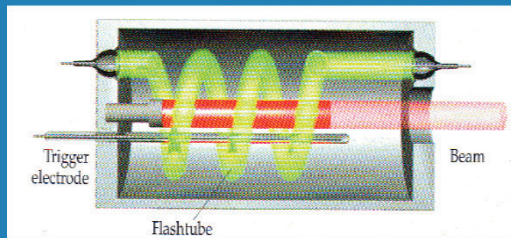
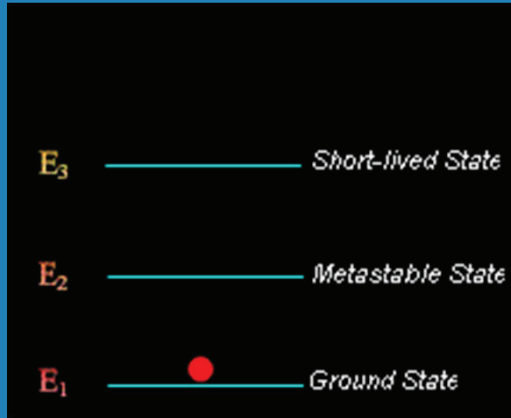
O laser de rubi é um sistema a três níveis, que requer muita energia de bombeamento para se obter a inversão entre o nível E_2 e o nível E_1 (estado fundamental), porque o estado final da emissão laser é o estado fundamental.

O primeiro laser: o laser de rubi (operação)

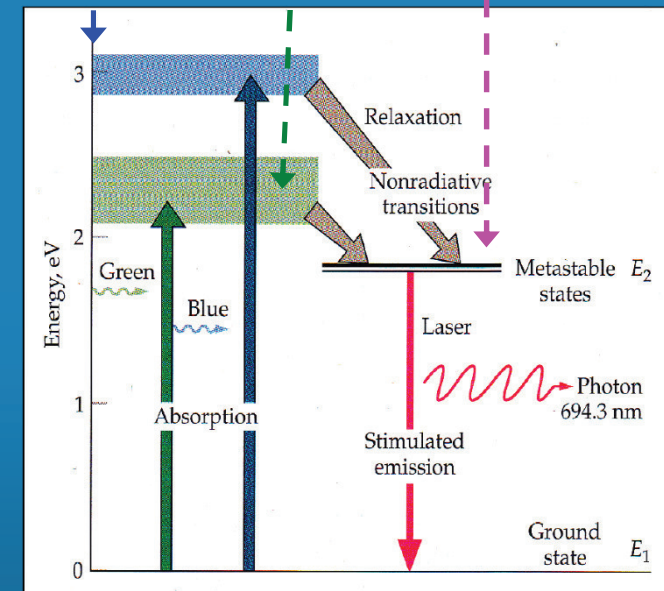
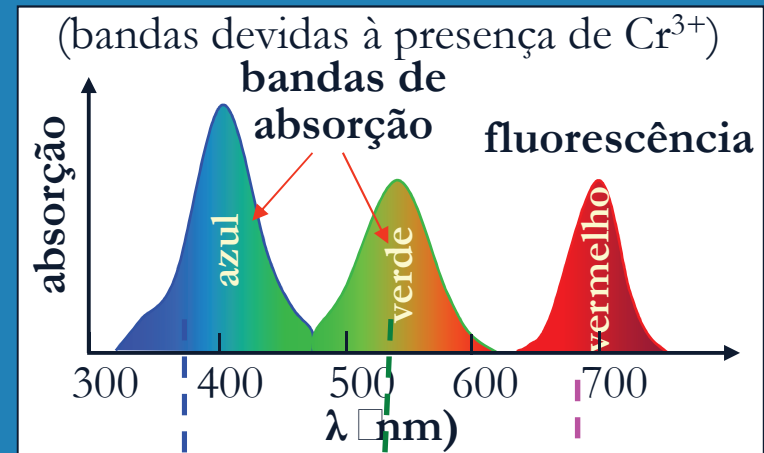


O laser de rubi é um laser pulsado. A eficiência dos lasers de rubi comerciais é inferior a 1%.

Operação do laser de rubi



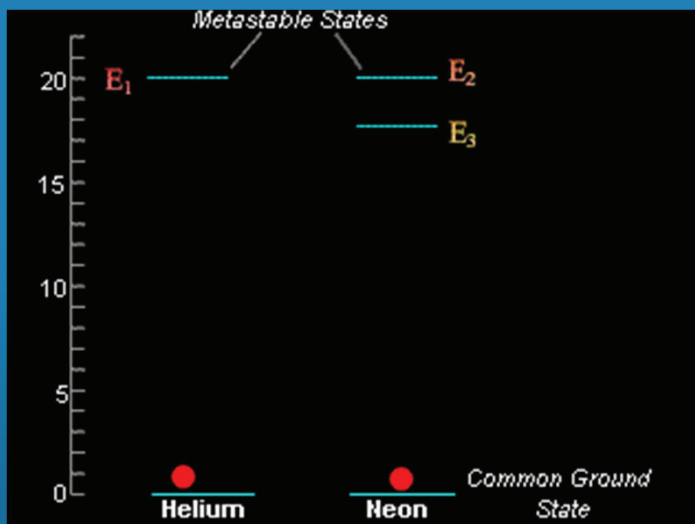
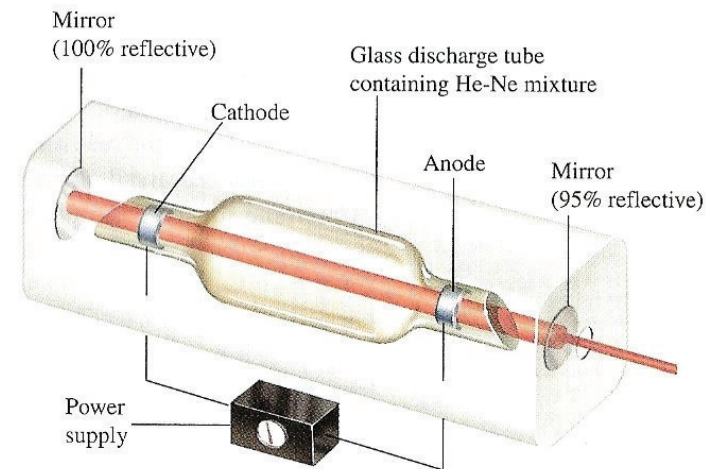
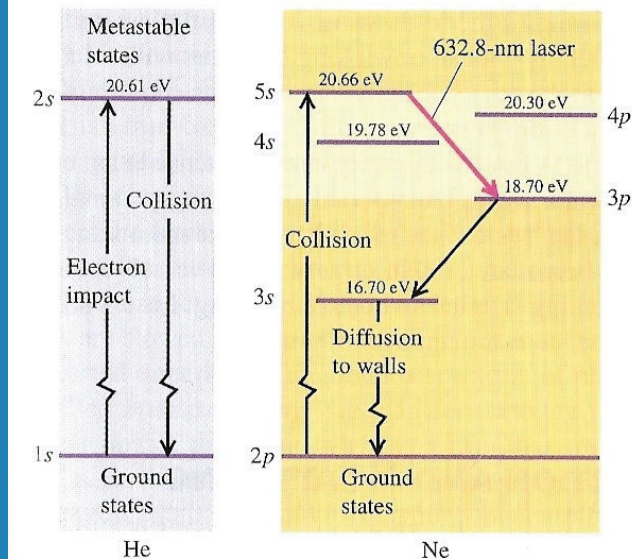
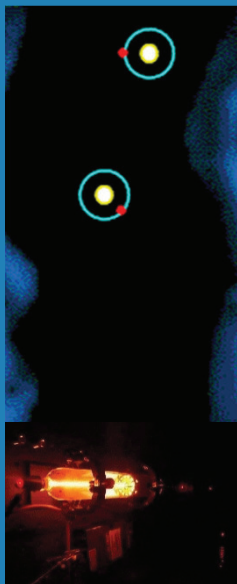
O laser de rubi é um sistema a três níveis, que requer muita energia de bombeamento para se obter a inversão entre o nível E_2 e o nível E_1 (estado fundamental), porque o estado final da emissão laser é o estado fundamental.



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

Laser de hélio-néon: 1º laser contínuo

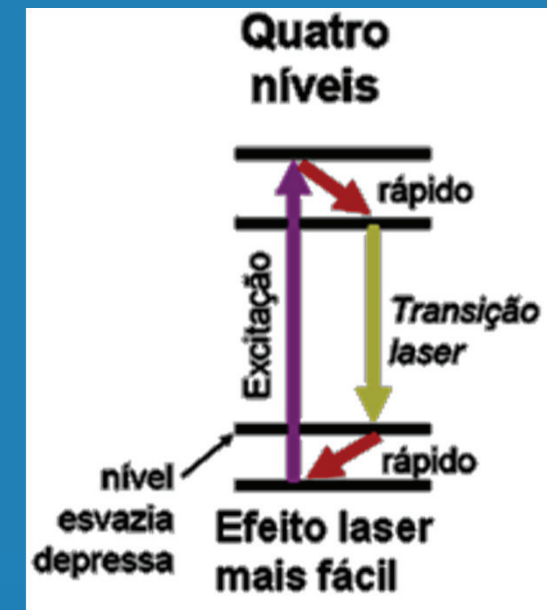
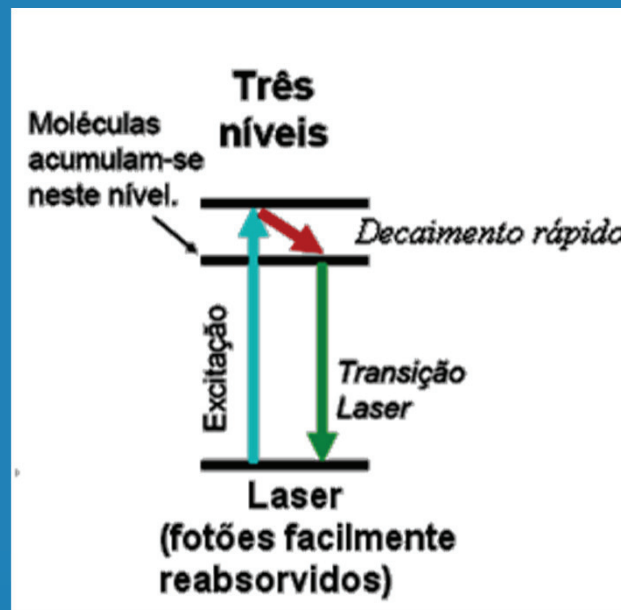
Inventores: Ali Javan, W. R. Bennett Jr. E D. R. Herriott, 1961.



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)