

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Existem vários tipos de laser, mas todos têm algumas características comuns:

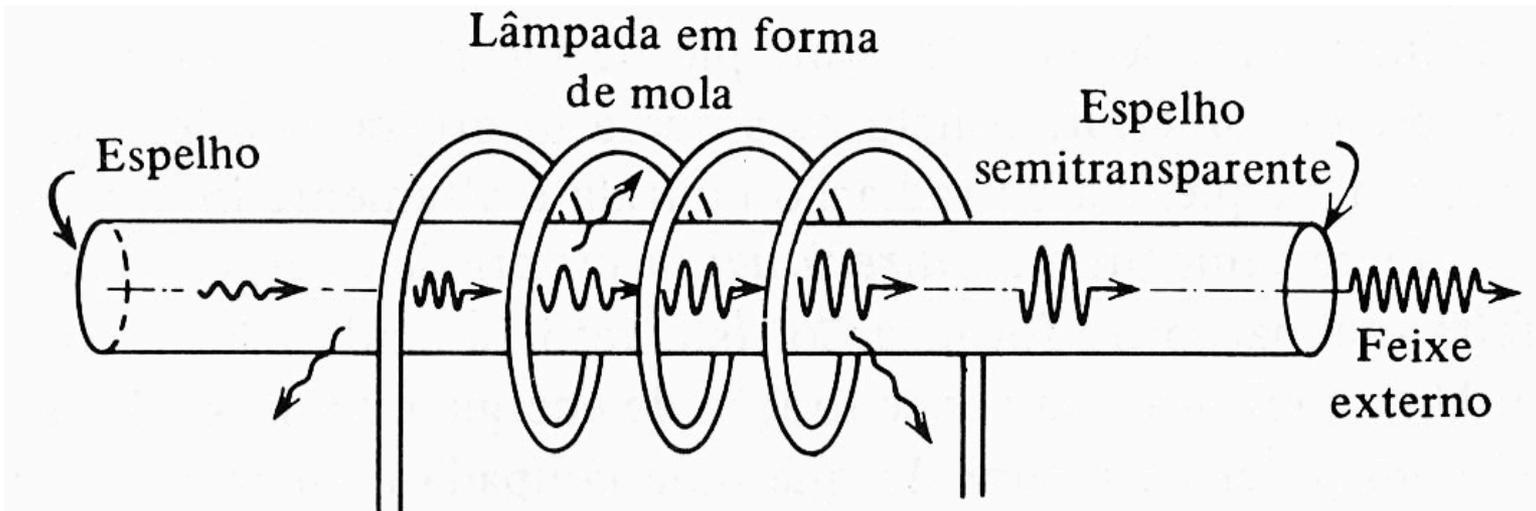
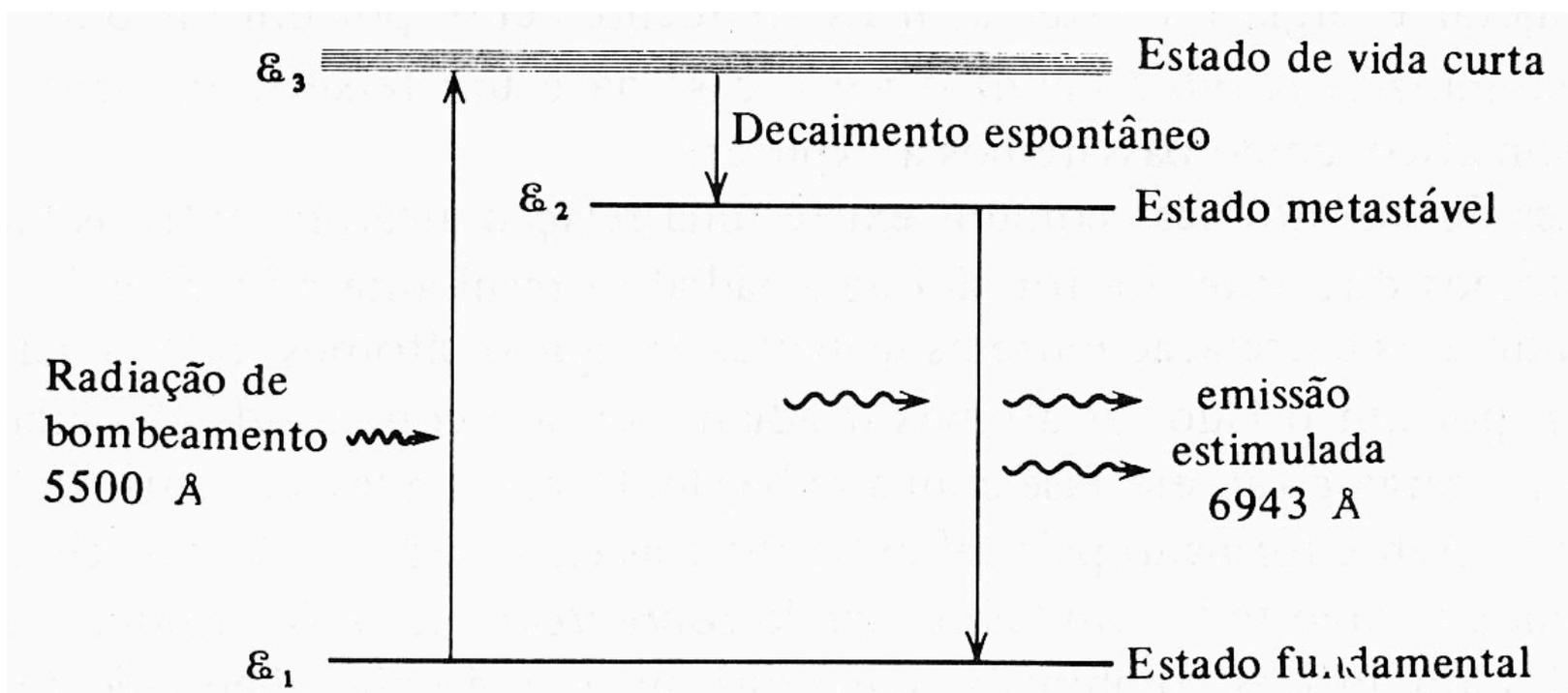
- 1) Uma fonte de energia (pulsada ou contínua) capaz de produzir inversão de população entre níveis atômicos. No caso do laser de He-Ne essa fonte é uma descarga elétrica, que transfere energia aos átomos por meio de colisões atômicas. No caso de lasers que usam cristais, é usada iluminação intensa e de espectro largo, processo conhecido como bombeamento ótico.
- 2) Um material cujos átomos tenham pelo menos 3 níveis de energia: o estado fundamental; um estado intermediário com meia-vida, t_s , relativamente longa (metaestável); e um terceiro estado, de energia mais alta, para bombeamento.

Notem que um sistema de 2 níveis não é sujeito a inversão de população, pois, com bombeamento ótico intenso, poder-se-ia, no máximo, atingir uma situação em que as populações dos 2 níveis fossem iguais.

Bombeamento mais intenso apenas aumentaria a taxa de transições tanto de $1 \rightarrow 2$ quanto de $2 \rightarrow 1$, pois as probabilidades de transição são iguais, como vimos. Para que possa haver inversão de população, a absorção de energia deve ser feita por uma transição diferente daquela que sofrerá a emissão estimulada. Daí a necessidade de 3 níveis, pelo menos.

3) Um método que inicialmente contenha os fótons emitidos no meio, de forma que eles possam estimular transições em outros átomos. Isso, em geral, é feito por meio de espelhos nas extremidades do sistema, de forma que os fótons atravessem o meio muitas vezes. Dessa forma, o laser pode ser entendido como um ressoador ótico. A oscilação consiste de uma onda plana refletida entre os espelhos das extremidades. Essas ondas que caminham em direções opostas formam uma onda estacionária com nós nos espelhos. Para que luz de alta intensidade seja extraída, um dos espelhos é semi-transparente.

A realização física desse processo é representada na figura a seguir e requer a escolha de um elemento com níveis de energia com as propriedades adequadas.



Problemas: 1) quando 1 átomo emite um fóton, decaindo para o estado fundamental, o que acontece em seguida? Se tudo correr bem, o bombeamento ótico vai levá-lo de volta para o estado excitado e o processo continua.

Mas isso pode demorar um pouco para ocorrer. Nesse caso, esse átomo pode absorver um fóton do laser, de forma a voltar para o estado ε_2 . Isso diminui a intensidade do laser, prejudicando o processo.

2) Condição de início de oscilação (ou condição de laser). A emissão laser pode ser sustentada se o aumento do número de fótons, por passagem no laser, for maior que a redução provocada por perdas (emissão do laser, absorção no meio, espalhamento por impurezas, etc.)

Vamos juntar todos os processos de perda em uma única constante de tempo:

$$I = I_0 e^{-t/t_p} \Rightarrow \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{perda}} = - \frac{I}{t_p}$$

Antes de calcularmos os ganhos, lembremos da taxa de transição induzida, que é proporcional ao coeficiente B de Einstein: $R_i = \rho(\nu, T)B$.

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \Rightarrow R_i = \frac{\rho(\nu, T)c^3}{8\pi h\nu^3} A = \frac{\rho(\nu, T)c^3}{8\pi h\nu^3 t_s}$$

onde $t_s = A^{-1}$ é a meia-vida para emissão espontânea.

O ganho em intensidade da cavidade, devido a transições estimuladas, vai ser dado pela diferença entre a emissão estimulada do nível $2 \rightarrow 1$ e a absorção do $1 \rightarrow 2$.

$$J \times m/s \times (n^\circ \text{ átomos})/m^3 = W/m^2$$

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{ganho}} = (n_2 - n_1)h\nu c R_i$$

onde $h\nu c$ é o que cada fóton contribui para a intensidade, R_i a taxa de transição induzida e n_2 (n_1) a densidade de população do nível 2 (1). Para que haja funcionamento sustentado do laser:

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{ganho}} \geq \left|\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{perda}}\right| \Rightarrow (n_2 - n_1)h\nu c R_i \geq \frac{I}{t_p}$$

$$R_i = \frac{\rho(\nu, T)c^3}{8\pi h\nu^3 t_s}$$

Substituindo R_i e lembrando que $I = c\rho$, temos:

$$n_2 - n_1 \geq \frac{8\pi\nu^2 t_s}{c^3 t_p} = \frac{\Delta N_c}{V}$$

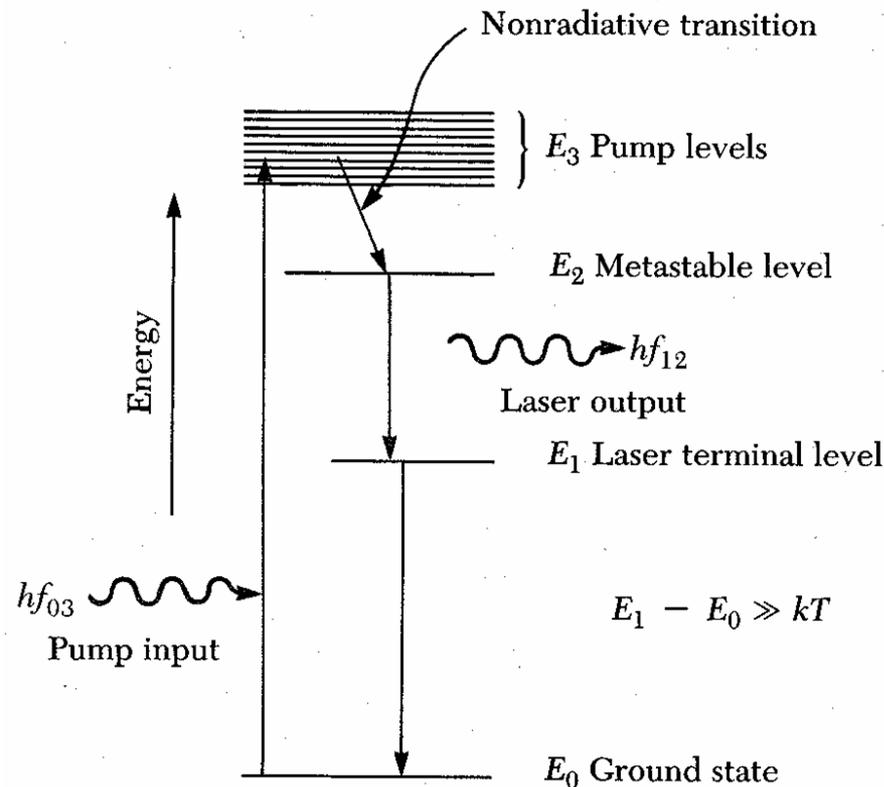
densidade de
população crítica

Essa expressão nos permite determinar a potência necessária para iniciar o funcionamento do laser. Mas, antes, devemos analisar os ...

Lasers de 4 níveis

Nesse caso, como $E_1 - E_0 \gg kT$, o nível E_1 é praticamente despopulado, ou seja, $N_1 \sim 0 \Rightarrow$ que a inversão de população é muito fácil de ser atingida. Assim: $\Delta N_c \sim N_2$ e a potência mínima necessária é:

$$P = \frac{\Delta N_c}{V} \left(\frac{h\nu}{t_s} \right) = \frac{8\pi\nu^2 t_s}{c^3 t_p} \left(\frac{h\nu}{t_s} \right) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3 t_p}$$

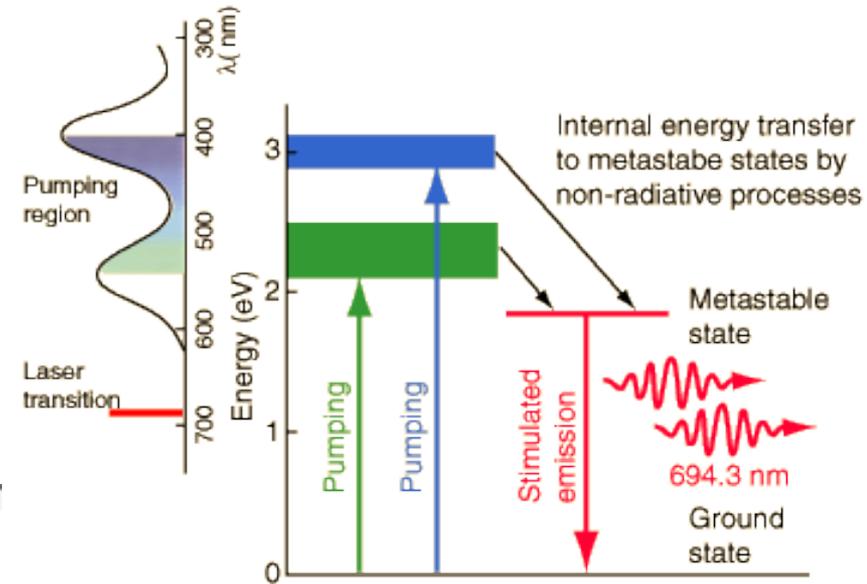
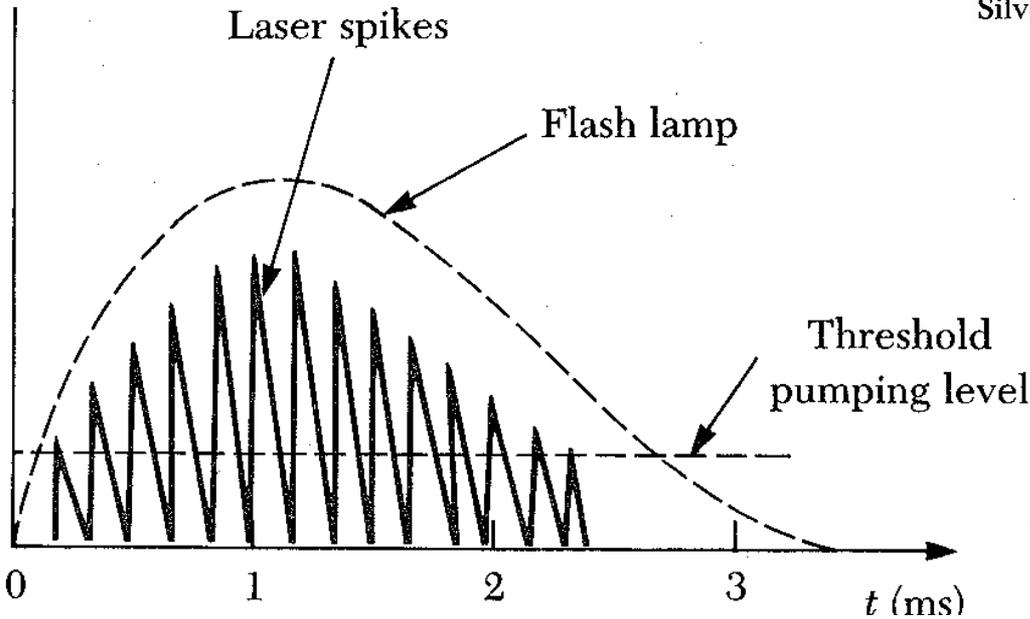
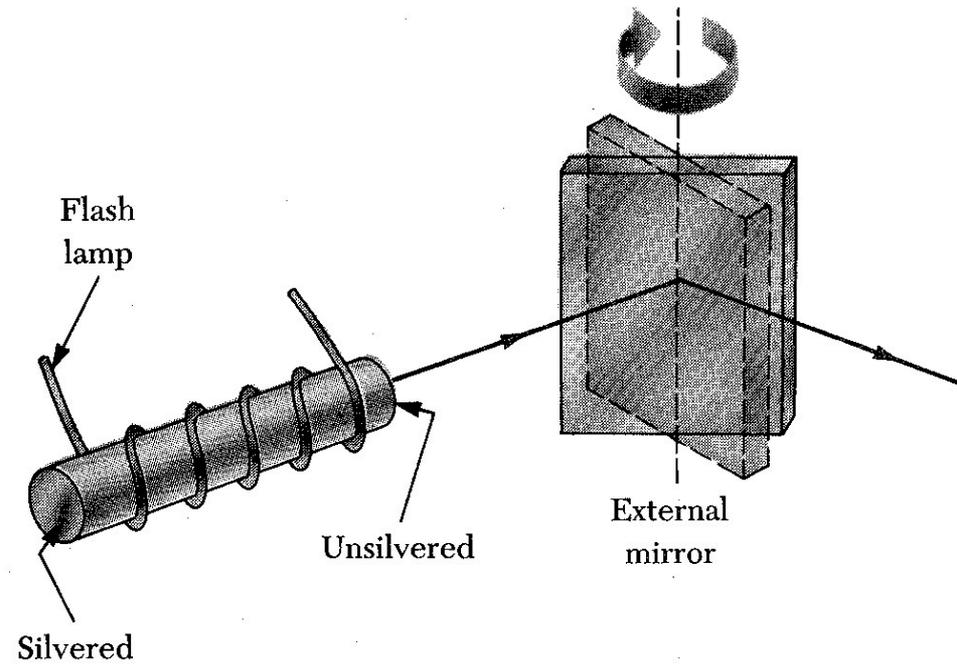
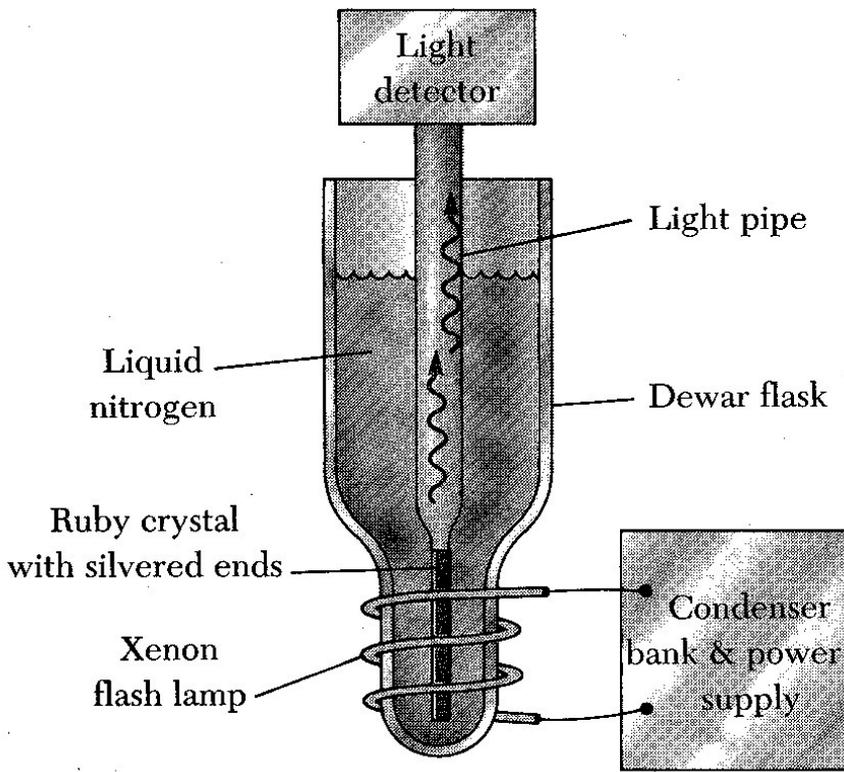


Notem que, no caso do laser de 3 níveis, o decaimento se faz entre o nível 2 e o estado fundamental, que é muito populado. Nesse caso: $N_1 \sim N \gg \Delta N_c$. Para que se consiga inversão de população, aproximadamente $N/2$ átomos têm que ir para o nível 2. Portanto:

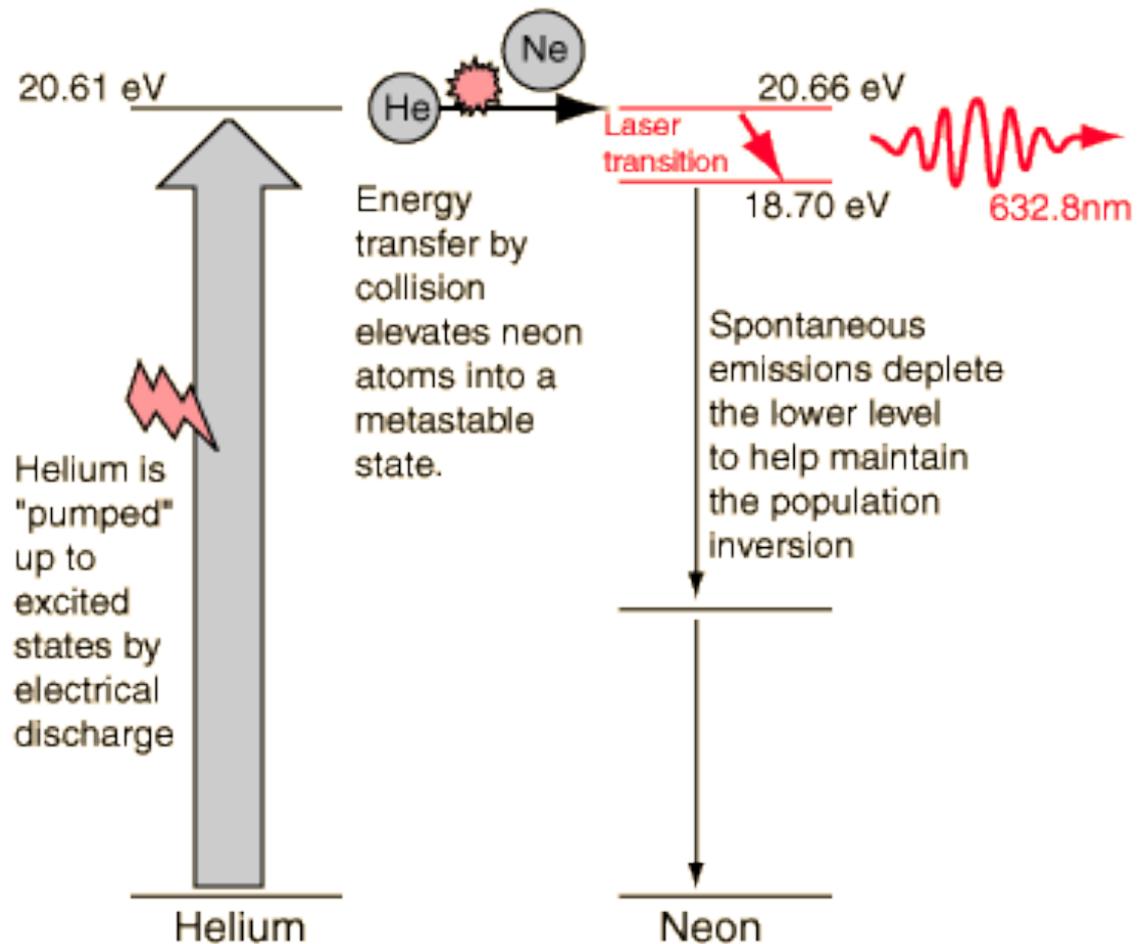
$$\frac{P_3}{P_4} \approx \frac{N/2}{\Delta N_c} \gg 1 \quad \text{Assim, os lasers de 4 níveis são muito mais eficientes que os de 3 níveis.}$$

Laser de rubi

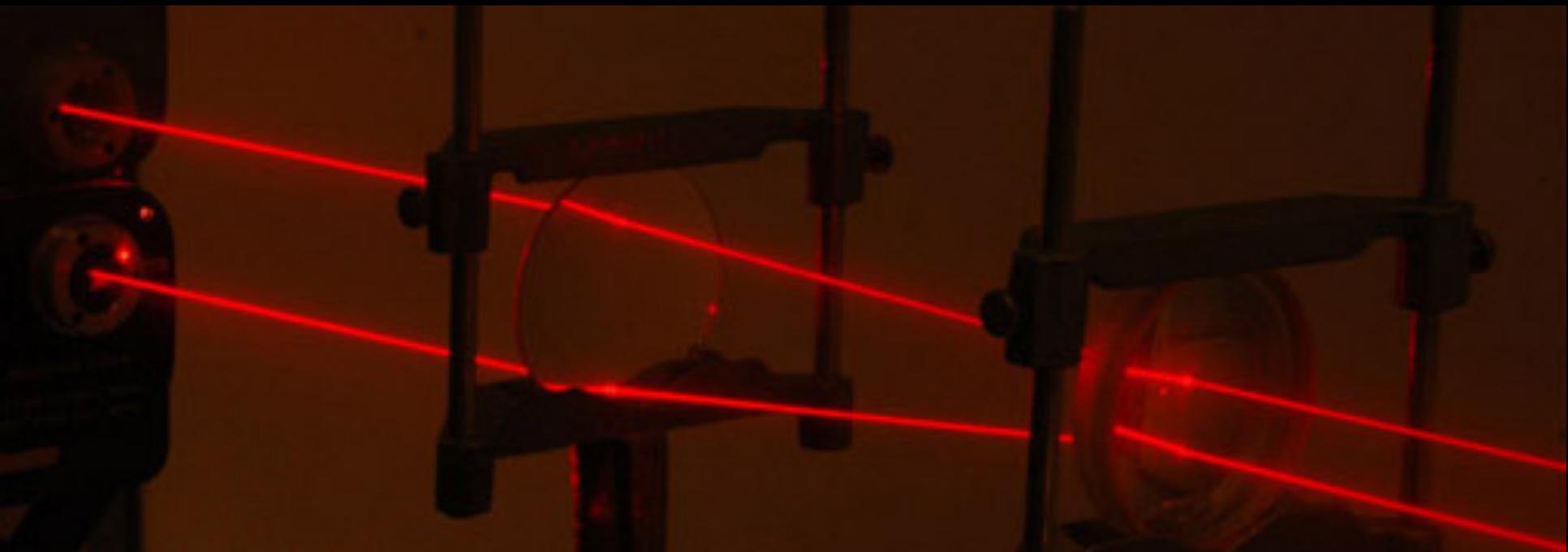
Lasers pulsados de altíssima potência



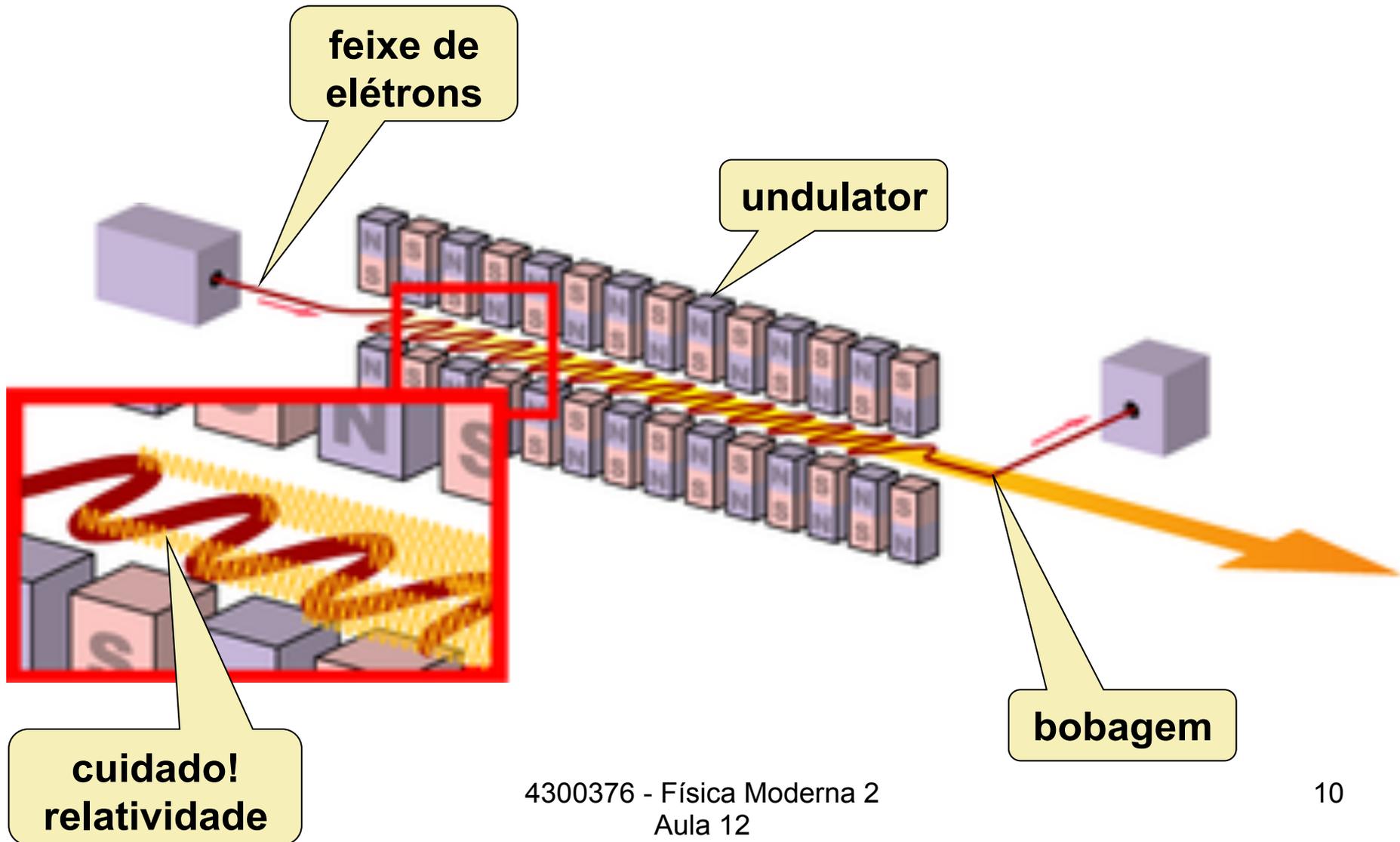
Laser de He-Ne



Por causa da forma como é produzida, a luz do laser apresenta algumas propriedades muito importantes: coerência, monocromaticidade, baixa divergência e alta densidade de energia (energia por unidade de área do feixe).

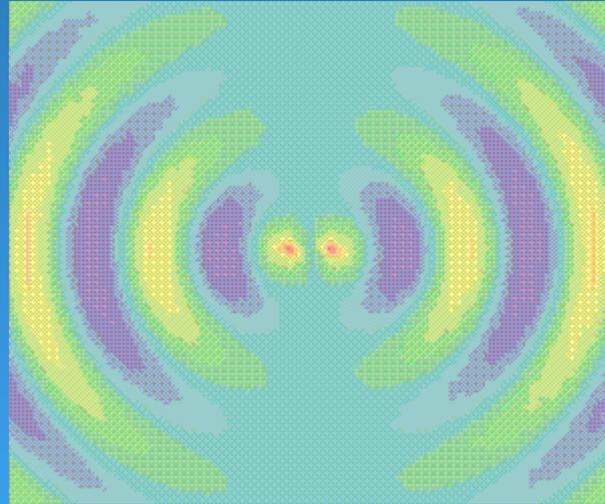
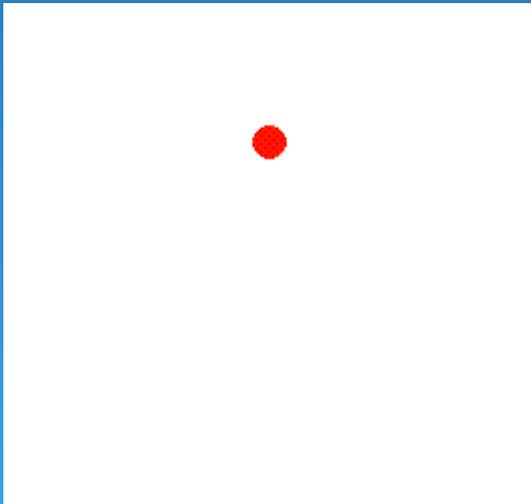


Laser de elétrons livres (*free electron laser – FEL*)



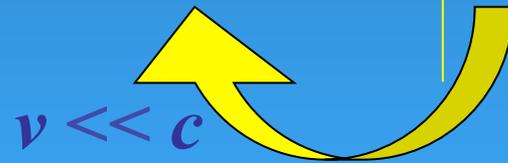
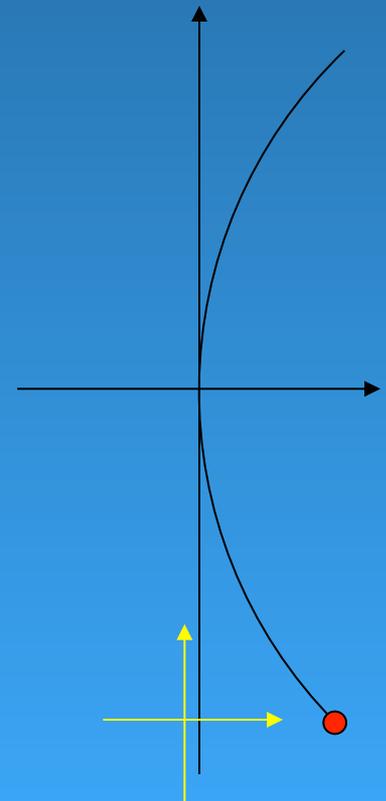
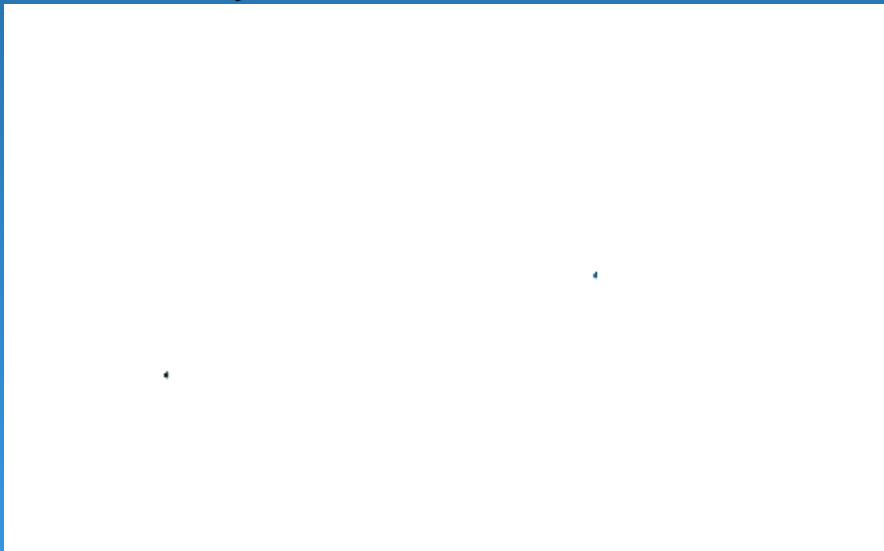
Emissão de radiação por uma carga acelerada

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2 a^2}{c^3}$$



P. Tavares, LNLS

Emissão de radiação por uma partícula carregada em movimento circular uniforme

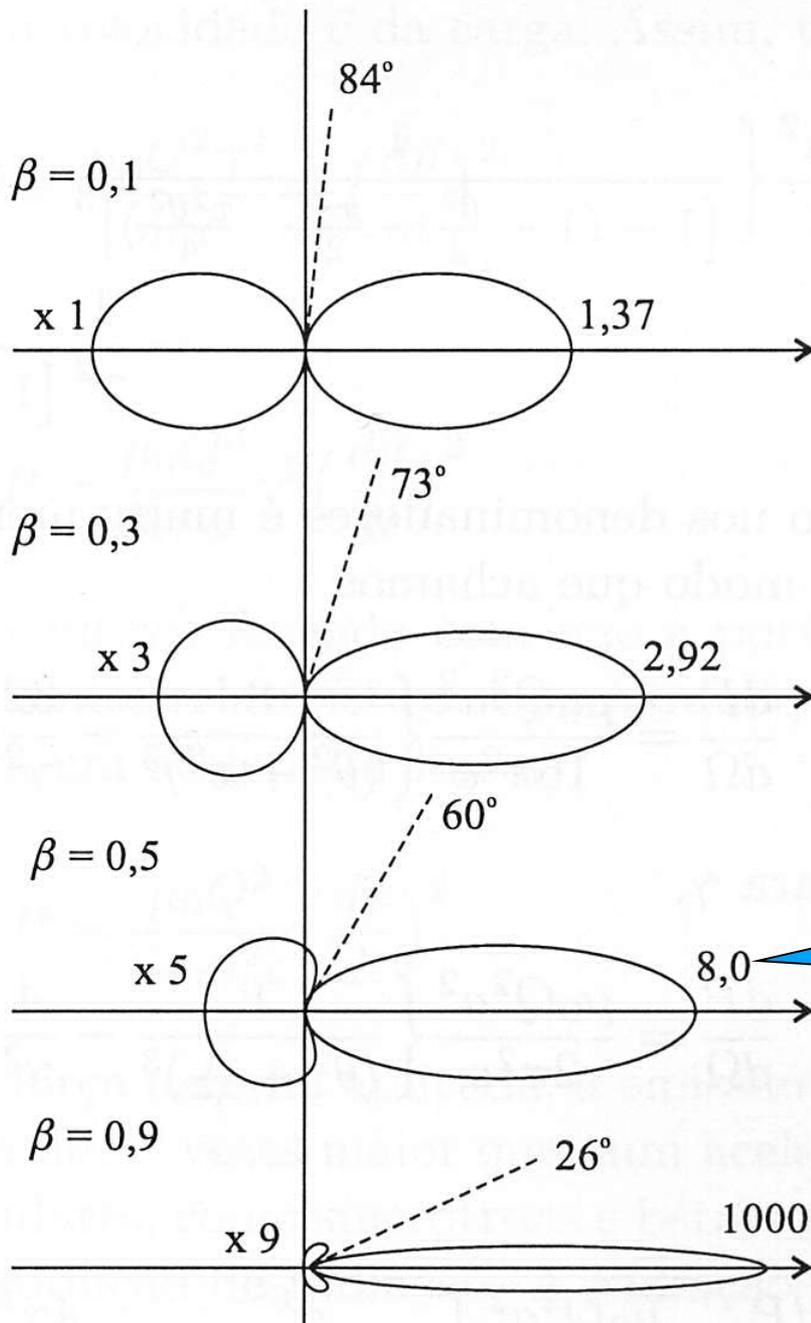


$v \ll c$

P. Tavares, LNLS

$v = 0,7c$

Potência $\propto \gamma^4$



Razão entre a energia emitida pelos lobos frontal/traseiro