

# Lasers

OpE - MIB 2007/2008

## O que é um LASER?

- O laser é um dispositivo/ferramenta que permite determinar as características dos materiais
- A palavra "LASER" é um acrónimo:

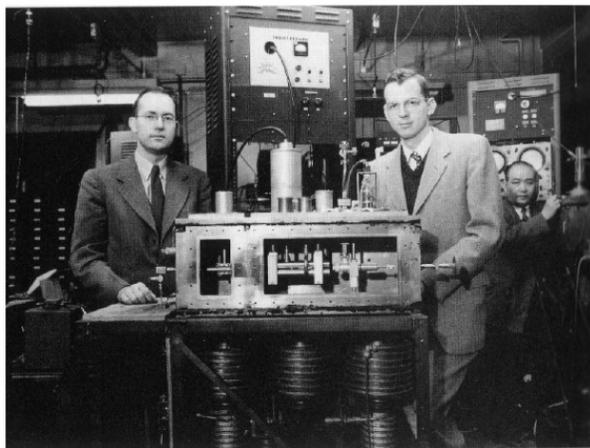
**L**ight  
**A**mplification by  
**S**timulated  
**E**mission of  
**R**adiation

**Perspectiva histórica**

- **1916:** Einstein introduz o conceito de transições quânticas  $\Rightarrow$  absorção, emissão espontânea e estimulada de luz
- **1952/54:** O precursor do laser foi o MASER: **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
  - Basov e Prokhorov, na USSR, e Townes, nos EUA, desenvolvem o conceito independentemente;
  - Gordon, Zeiger e Townes constroem o 1º MASER operacional de amónia em 1954
- **1960:** T. Maiman constrói o 1º Laser
  - Gordon Gould em 1957 baptizou o MASER óptica de LASER
  - *Curiosidade: o artigo que descrevia a demonstração do 1º laser foi recusado pela Physical Review Letters*
- **1960-1980:** a maioria dos lasers foram desenvolvidos neste período
- Antes da descoberta dos Masers e Lasers, estes já eram produzidos há muito pela Mãe-Natureza

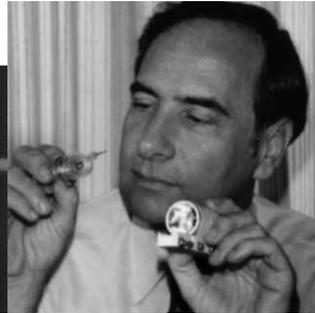
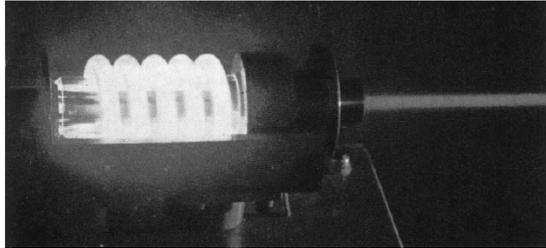
**1º Maser**

1954: Charles Townes and Jim Gordon: the NH<sub>3</sub> maser



1º Laser de Rubi

May 17, 1960: Ted Maiman's ruby laser



Masers e lasers da Mãe-Natureza

Mother Nature's natural masers & lasers

- Astrophysical masers (1965)
  - *Molecular maser action in interstellar hydrogen clouds*
  - *Pumped by UV radiation from nearby stars*
  - *OH (1670 MHz), H<sub>2</sub>O (2.2 GHz), SiO<sub>2</sub> (4.3–13 GHz)*
  - *Brightness temperatures  $\geq 10^{15}$  K; immense power outputs*
- CO<sub>2</sub> lasers in planetary atmospheres (1976)
  - *10  $\mu$ m amplification in atmospheres of Mars and Venus*
  - *Directly pumped by sunlight; low gains*
- Hydrogen recombination masers (1994–1996)
  - *Hydrogen clouds near MWC 349A & other stars (?)*
  - *ASE at 850  $\mu$ m, 450  $\mu$ m, 169  $\mu$ m, 89  $\mu$ m, 52.5  $\mu$ m*

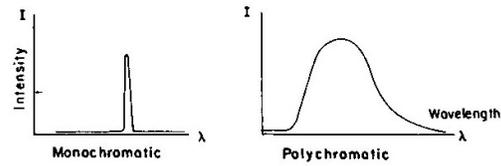
**Lasers vs Fontes de luz normais**

**Laser versus Ordinary Light Source**

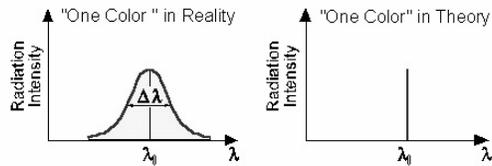
Property	Laser	Ordinary light source
Directionality	Collimated (parallel beam)	Noncollimated (light emitted in all directions)
Color	Monochromatic (one color) Comment: coherent beam (i.e., ordered in time and space)	Polychromatic (many colors) Comment: noncoherent beam (i.e., nonordered)
Power output	Can be high	Medium or low
Temporal	Can produce very short and energetic pulses	Typically long and low-energy pulses
Power density	High; can be focused to a very small spot (of diameter $d = \lambda$ )	Low; relatively large focal spot

□ **Monocromaticidade**

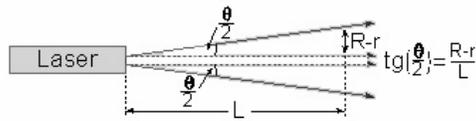
Significa "uma só cor"



Na realidade "uma cor" significa um intervalo estreito de comprimentos de onda:



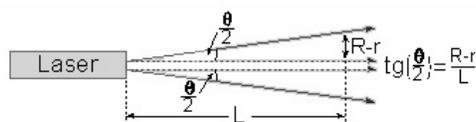
□ Direccionalidade ou Colimação



A radiação laser, ao contrário da das fontes normais, é emitida numa determinada direcção, com um feixe estreito e que permanece estreito á medida que se propaga  $\Rightarrow$  **divergência** pequena.

Para muitos casos práticos, considera-se o feixe paralelo!

• Divergência



Define-se **divergência** como o ângulo de abertura do feixe. Alguns autores consideram como ângulo de divergência metade desse valor (definição que iremos adoptar).

Relembrar a relação entre radianos e graus:

$$360^\circ = 2\pi \text{ rad}$$

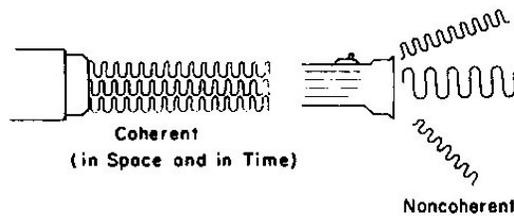
$$1 \text{ rad} = 57,3^\circ$$

$$1 \text{ mili-radiano} = 1 \text{ mrad} = 0,0573^\circ$$

Usando a relação entre minutos e graus,  $1^\circ = 60'$ , tem-se:

$$1 \text{ mrad} = 0,0573 \times 60' \cong 3,44'$$

□ Coerência



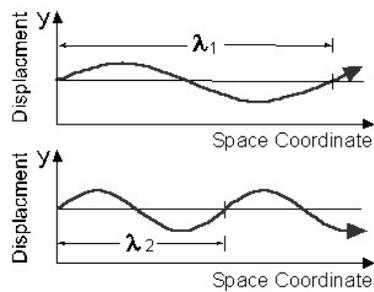
A radiação electromagnética do laser é, por natureza, um fenómeno ondulatório. **Ondas coerentes** são aquelas cuja fase relativa entre elas se mantém.

**Coerência** é um termo usado para exprimir o grau de monocromaticidade e colimação.

Todas as ondas emergentes do laser são altamente ordenadas no espaço e correlacionadas no tempo

□ Coerência - exemplo

Podem ondas com comprimentos de onda diferentes serem coerentes?

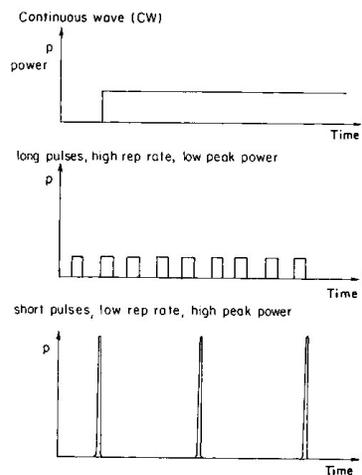


Não. Podem ter a mesma fase num ponto do espaço (ou mesmo vários), mas não conseguem mantê-la à medida que se propagam, como esquematizado na figura.

□ **Classificação dos lasers**

- **Meio activo (laser):**
  - Sólidos: laser de rubi, Nd:YAG
  - Líquidos: laser de corantes (“dye”)
  - Gasosos: CO<sub>2</sub>, Ar, excímeros (p.ex., XeF)
- **Comprimento de onda:**
  - Lasers UV
  - Lasers visível
  - Lasers IR
- **Comportamento temporal:**
  - “CW-Continuous Wave”
  - “Pulsed lasers”

• **Lasers “CW” vs. “Pulsed”**



• **Parâmetros característicos da radiação laser**

• **Energia**

Define-se como a capacidade em produzir trabalho. Exprime-se em joules (J).

• **Potência**

Se uma energia  $E$  é emitida no intervalo de tempo  $t$ , a potência radiante média (também chamada de *fluxo*) é  $P=E/t$ . Como unidade usa-se o watt (W):  $1W=1J/1s$ .

• **Densidade de potência:**

É a razão da potência radiada e da área coberta pelo feixe emitido. As unidades de  $I=P/A$  são  $W/m^2$  (sendo usual  $W/cm^2$ ). Também se designa por *irradiância*.

• **Fluência:**

Um feixe laser pode operar intermitentemente, ou a potência incidente numa dada área variar no tempo. Define-se *fluência* como a energia total fornecida dividida pela área abrangida. É, em muitos casos, o parâmetro mais importante em aplicações à medicina

• **Exemplo**

$P$  = potência (W)

$T$  = período (s)

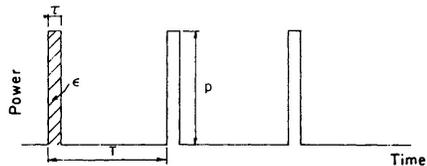
$\tau$  = largura do impulso (s)

$f = 1/T$  = frequência ou taxa de repetição (Hz ou  $s^{-1}$ )

$\epsilon = P \cdot \tau$  = energia por impulso (J)

$E = \epsilon \cdot f \cdot t$  = energia total no tempo  $t$  (J)

$P_{av} = P \cdot \tau / T = \epsilon / T = \epsilon \cdot f$  (W)



1) Um laser pulsado emite  $f_1=10$  impulsos/s (10 Hz), com uma energia de  $\epsilon_1=0,1$  J  $\Rightarrow P_1=0,1 \times 10=1$  W

2) Um laser pulsado emite  $f_2=10$  impulsos/s (10 Hz), com uma energia de  $\epsilon_2=0,01$  J  $\Rightarrow P_2=0,01 \times 10=0,1$  W

3) Um laser pulsado emite  $f_3=100$  impulsos/s (100 Hz), com uma energia de  $\epsilon_3=0,01$  J  $\Rightarrow P_1=0,01 \times 100=1$  W

Apesar de radiarem a mesma potência, o caso 1) ilustra um pequeno número de impulsos de energia elevada; ao invés, o caso 2) ilustra um número elevado de impulsos de pequena energia.

Os efeitos à exposição destes dois feixes por materiais ou tecidos não são, em geral, idênticos  $\Rightarrow$  **efeitos à exposição laser não são proporcionais à energia!!**

□ **Feixe Gaussiano**

O modo TEM<sub>00</sub> é o mais usado na maioria das aplicações lasers. **E** é radialmente simétrico, de acordo com a fórmula

$$E(r) = E(0) \exp(-r^2/w^2) \quad \begin{array}{l} r \text{ distância radial ao eixo do feixe} \\ w \text{ raio do feixe} \end{array}$$

Tal distribuição designa-se por **gaussiana**. Como  $I \propto E^2$ , a distribuição de intensidade para este modo é

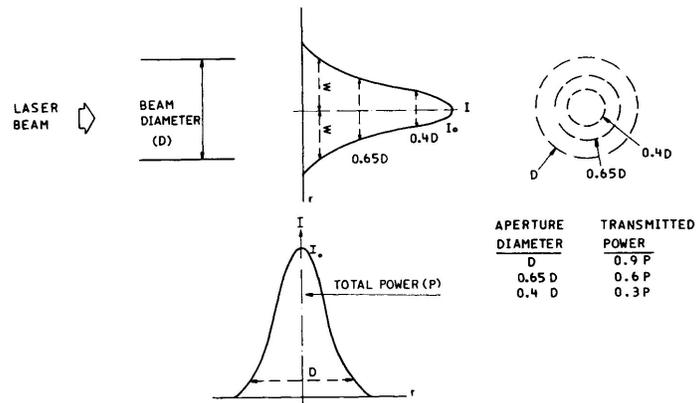
$$I(r) = I(0) \exp(-2r^2/w^2)$$

A potência óptica no interior de um círculo de raio  $r_A$  é dada pela integração de  $I(r)$  entre 0 e  $r_A$ . Assim, a potência total  $P$  resulta de integrar entre 0 e  $\infty$ . À distância radial  $r = w$ , a intensidade é  $I(0) / e^2$  ( $\sim I(0) / 10$ ). Mostra-se que a intensidade no centro do feixe  $I(0)$  vale:

$$I(0) = 2P / (\pi w^2)$$

Assim cerca de 90% da potência total  $P$  está no "spot" cujo raio é  $w$  (ou diâmetro  $2w$ ). A quantidade  $D = 2w$  define-se como **diâmetro do feixe**.

• **Feixe Gaussiano**



Uma propriedade única de um feixe de luz com distribuição gaussiana é que permanece inalterada mesmo após o feixe ser reflectido uma e outra vez entre os espelhos da cavidade laser.

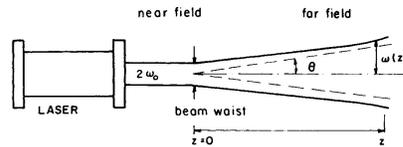
□ **Divergência do feixe laser**

À medida que o feixe laser se propaga, o seu diâmetro aumenta ⇒ **divergência do feixe**

Existe um mínimo, designado por **cintura do feixe** (“**beam waist**”), cujo raio é  $w_0$ . Seja  $z$  a distância na horizontal medida a partir do ponto onde ocorre o mínimo. Então, assumindo “grandes” distâncias (aproximação do “far-field”) mostra-se que

$$w(z) \approx (\lambda z) / (\pi w_0)$$

$$2w(z) \approx (2/\pi)(\lambda z/w_0)$$



Mostra-se que  $\theta$ , em radianos, (metade do ângulo de divergência) é dado por

$$\theta = (2/\pi)(\lambda/2w_0)$$

Aproximando  $\pi \approx 4$ , a divergência total do feixe é dada pela equação

$$2\theta = (4/\pi)(\lambda/2w_0) \approx (\lambda/2w_0)$$

De notar a analogia entre esta fórmula e aquela descrevendo a divergência da luz através de uma abertura de diâmetro  $2w_0$ .

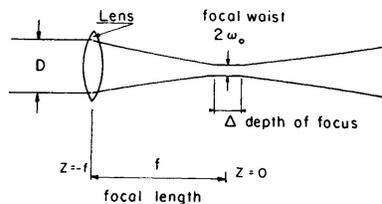
• **Exemplo**

Um laser de HeNe tem, tipicamente, um diâmetro mínimo do feixe de  $2w_0 = 1$  mm. O comprimento de onda do laser é  $\lambda = 632,8$  nm. O ângulo da divergência total é, aproximadamente, cerca de 1 mrad ( $\sim 0,06^\circ$ ). A uma distância de 10 m do laser, o diâmetro do feixe será apenas de 1cm!!

*Nota: foi esta propriedade da luz laser que permitiu medir a distância Terra-Lua com um feixe laser.*

□ **Focagem do feixe laser**

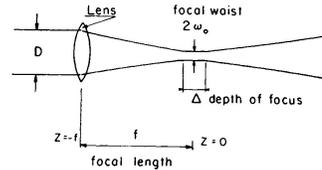
Algumas das mais importantes aplicações dos lasers envolvem focar o feixe numa pequena mancha através de uma lente, com distância focal  $f$ , que permite focar o feixe gaussiano.



As equações que descrevem a divergência de um feixe gaussiano também são válidas para  $z < 0$ . Assim, e de acordo com a figura, pode escrever

$$2w_{(z=-f)} = D = (2/\pi)(\lambda f / w_0) \quad \text{com } w_0 = w_{(z=0)}$$

$$w_0 = \lambda f / (\pi w_{(z=-f)}) = (2/\pi)(\lambda f / D)$$



Relembrar que as lentes são descritas pelo seu "f-number":  
 $f / D = f / \#$

donde o diâmetro do "spot" focal é:

$$2w_0 = (4/\pi)(\lambda f / D) \approx \lambda (f / \#)$$

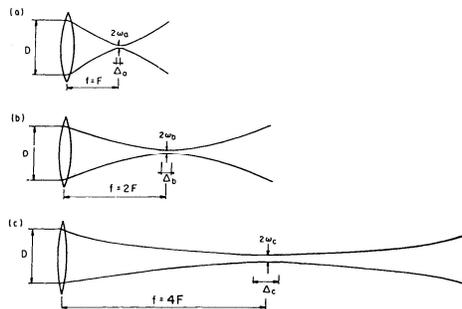
Exemplo

Um feixe laser de comprimento de onda  $\lambda$  é focado por uma lente com  $D=f \Rightarrow f/\#=1$ . Em teoria, o feixe é focado para um "spot" extremamente pequeno cujo diâmetro é igual a  $\lambda$ .

Na prática, não se consegue lentes com  $f/\#=1$ , mas mesmo assim consegue-se focar para "spots" muito pequenos, obtendo-se assim densidades de potência extremamente elevadas.

À medida que nos afastamos do "spot" focal, aumenta o diâmetro do feixe. A distância entre este ponto e aquele onde o aumento é cerca de 5% do valor mínimo, designa-se por **profundidade do foco**, sendo dada aproximadamente por

$$\Delta = (8\lambda/\pi)(f/\#)^2 \approx 2\lambda(f/\#)^2$$



Apesar de uma curta distância focal poder ser vantajosa, a margem para erro é pequena; em geral, usa-se distâncias focais maiores, com "spot" maior, menor densidade de potência, mas maior profundidade de foco  
 $\Rightarrow$  Maior flexibilidade do operador