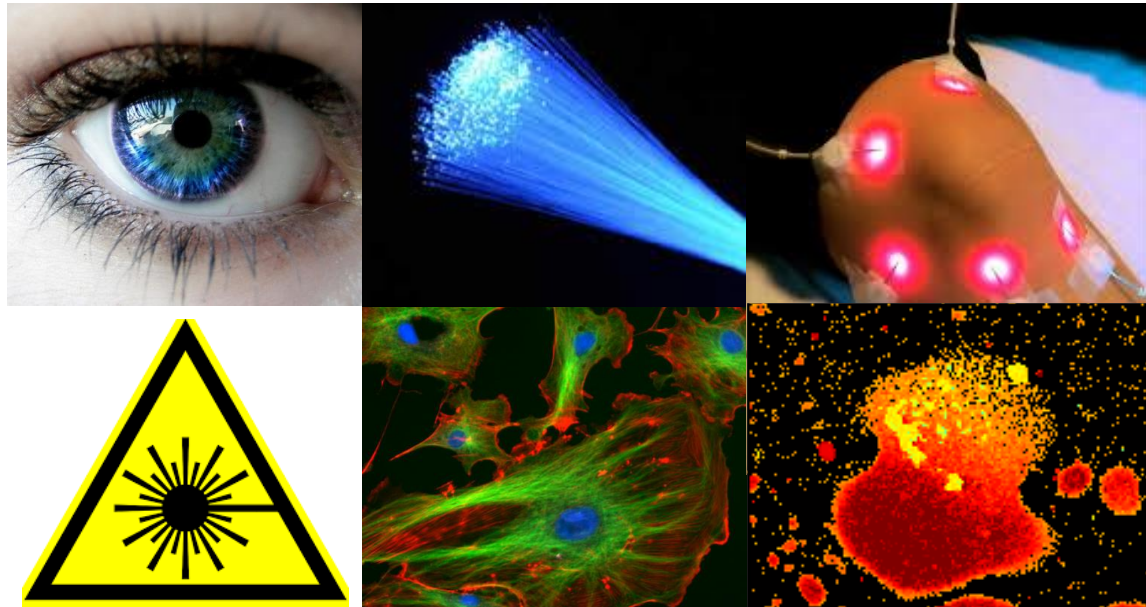
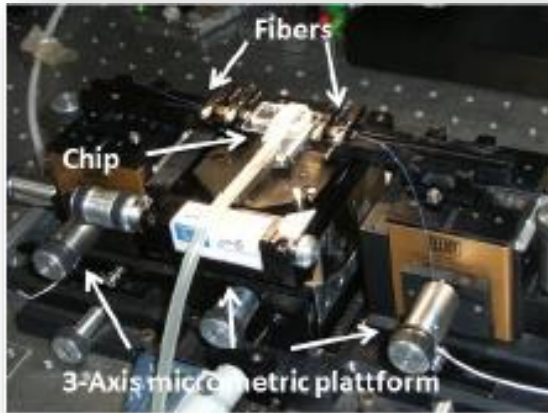


Lasers e Ótica Biomédica



Lasers e Óptica Biomédica

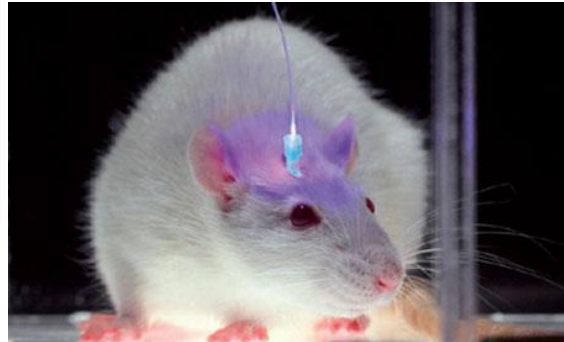
Modelos teóricos (Ondas, ótica geométrica, quântica)



Manipulação de feixes óticos
(lentes, espelhos, guias de onda)

Propriedades da Luz

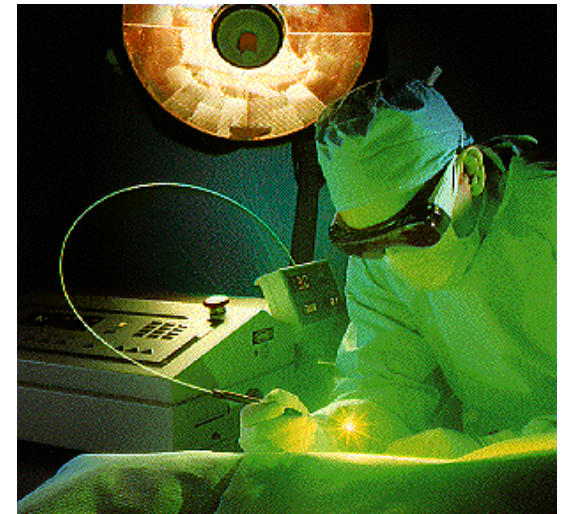
Interação radiação matéria



<http://mostlyscience.com/2014/07/optogenetics-understanding-mastery-brain-function/>

Aplicações de
diagnóstico e terapia

Tipos de Lasers



http://omlc.org/news/sep98/gallery_sep98/

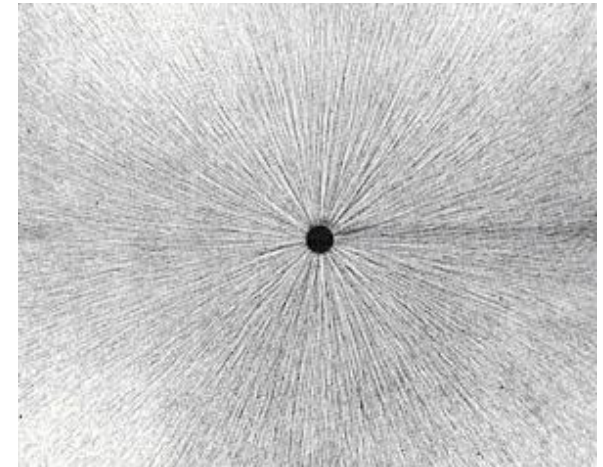
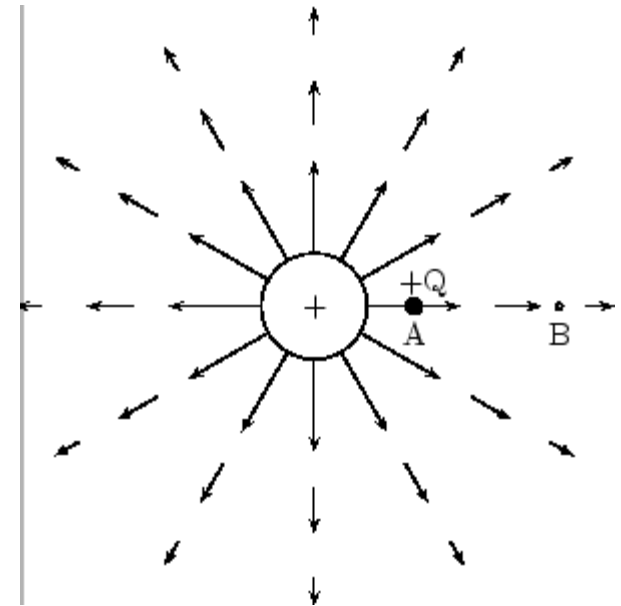
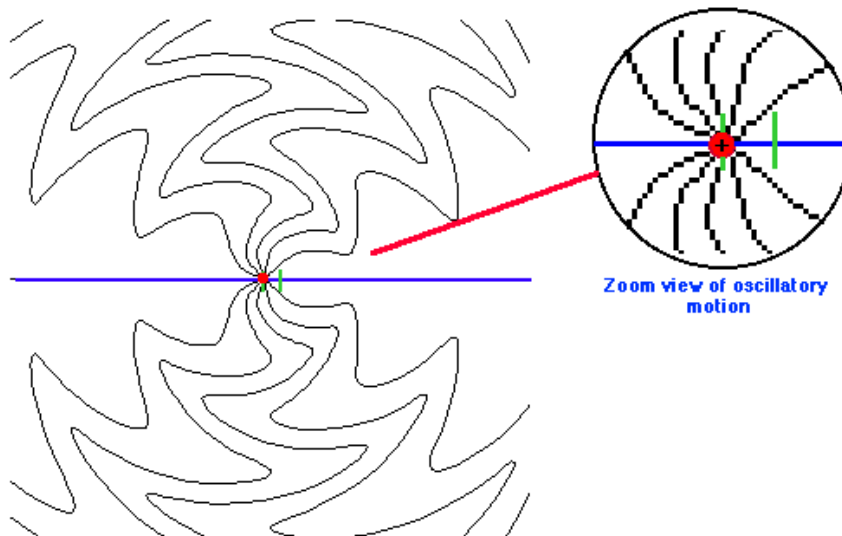
1 - Fundamentos de Óptica ondulatória

- Radiação electromagnética; natureza ondulatória da luz; emissão e propagação;
- Espectro electromagnético; energia, frequência, comprimento de onda, velocidade de fase e velocidade de grupo
- Polarização, Coerência temporal e espacial
- Natureza quântica da luz
- Fontes de Luz (corpo negro, descarga)
- Lasers

A natureza da Luz

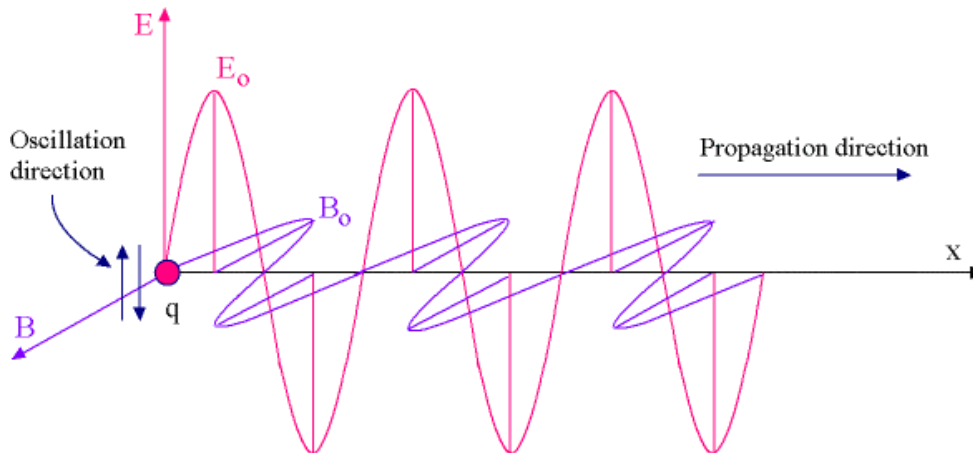
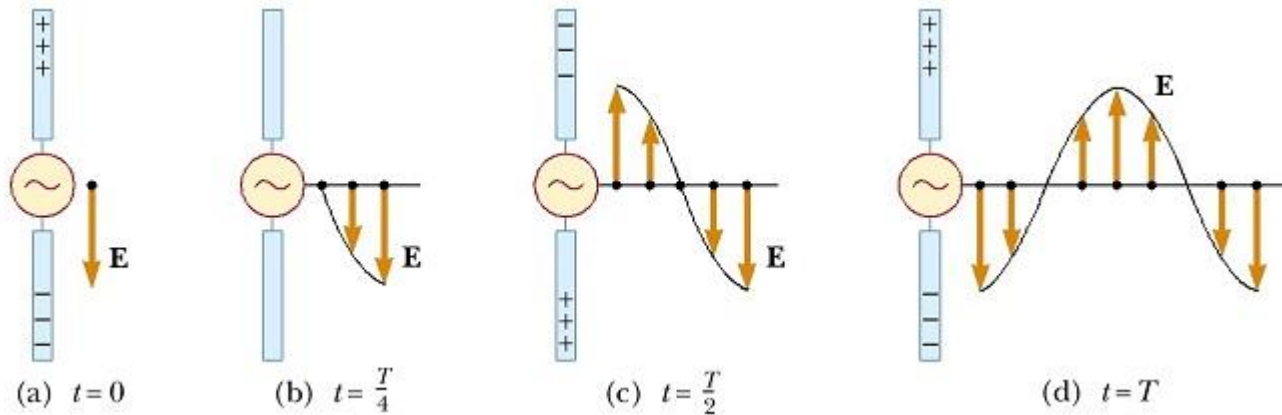
Onda electromagnética: propagação de uma perturbação em campo eléctrico de uma carga

- Carga em movimento acelerado
- Distorção das linhas de força
- Propagação de uma perturbação no campo electromagnético
- Propagação no Vazio!



A natureza da Luz

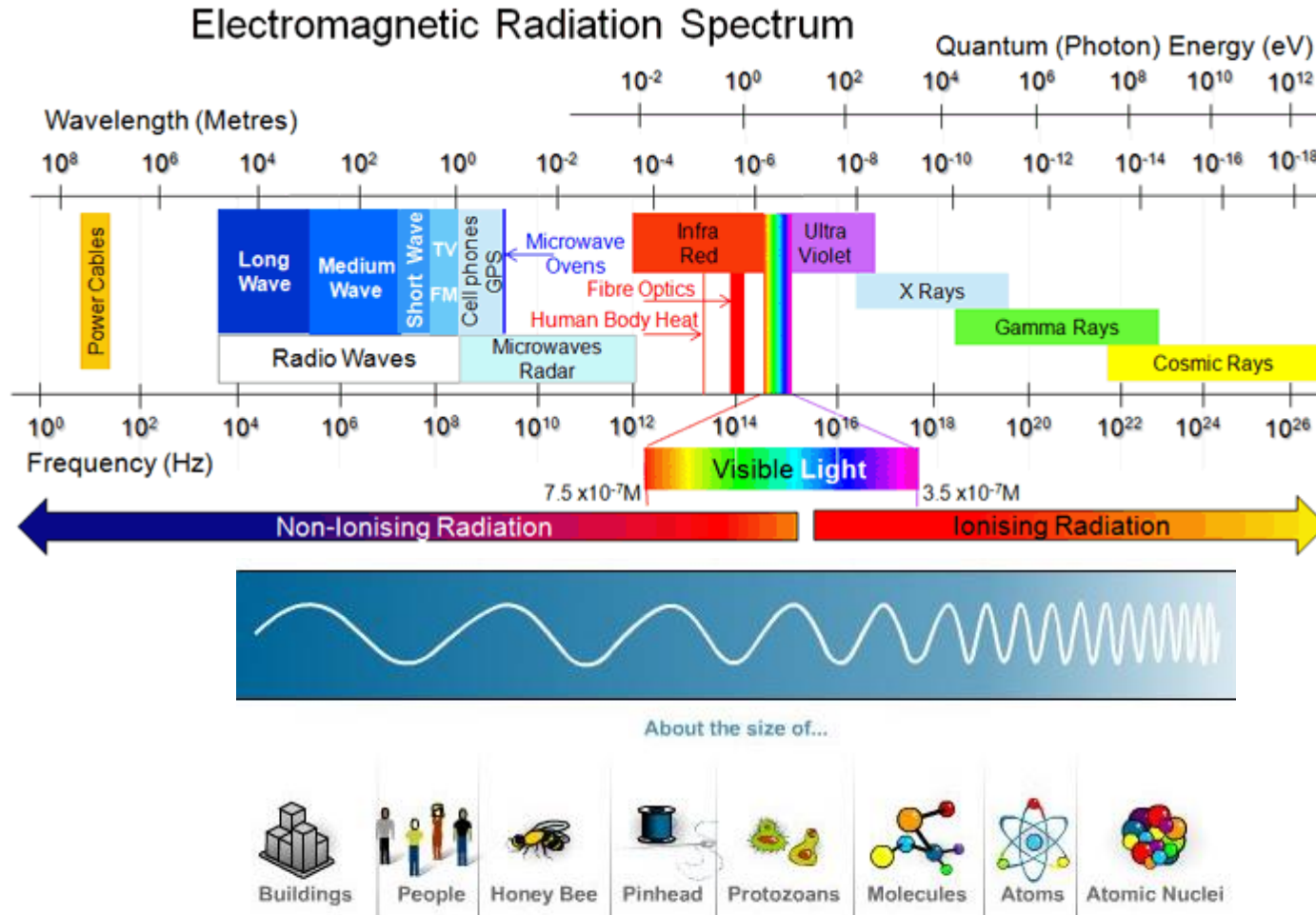
- Onda electromagnética. Geração e propagação.



Espectro Electromagnetico

Estudo da luz como onda eletromagnética . Apresenta propriedades semelhantes a outras formas de radiação eletromagnética, tais como raios-X, microondas e ondas de rádio .

λ de 1 pm (Raios γ) a 1Km (Radio)



Ondas unidimensionais

Onda como uma perturbação que se propaga, na direcção x , com velocidade constante v .

Variação no espaço e no tempo!

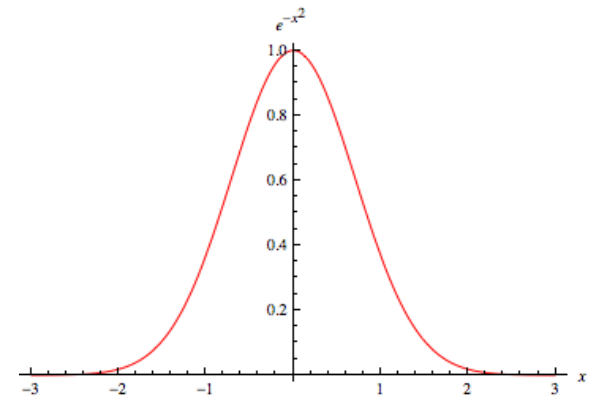
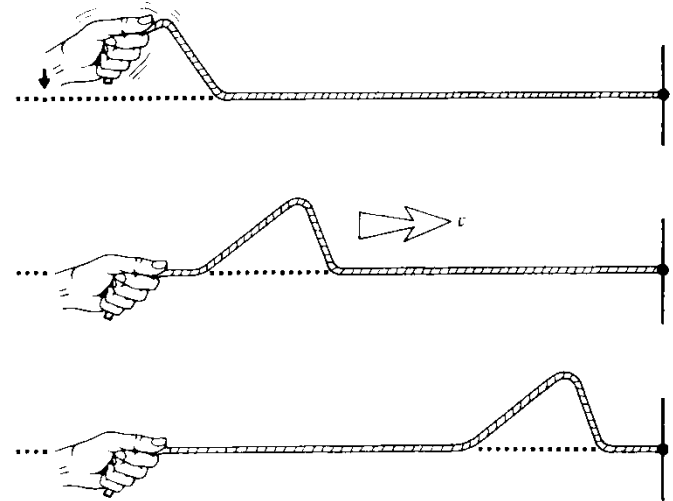
$$\psi(x, t) = f(x, t)$$

Para um instante fixo $t=0$, por exemplo:

$$\psi(x, t)|_{t=0} = f(x, 0) = f(x)$$

$f(x)$ define o perfil da onda nesse instante.

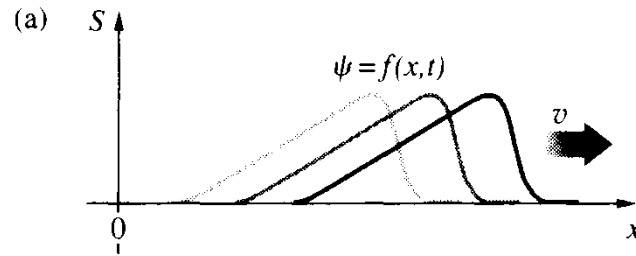
*assume-se para já que perfil é invariante no tempo



$$f(x) = e^{-ax^2}$$

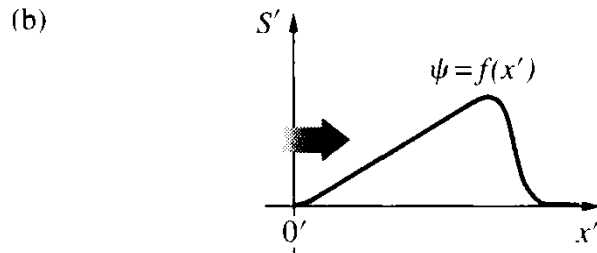
Ondas unidimensionais

Após um instante t , a perturbação deloca-se de $v.t$:



$$\psi(x, t) = f(x, t)$$

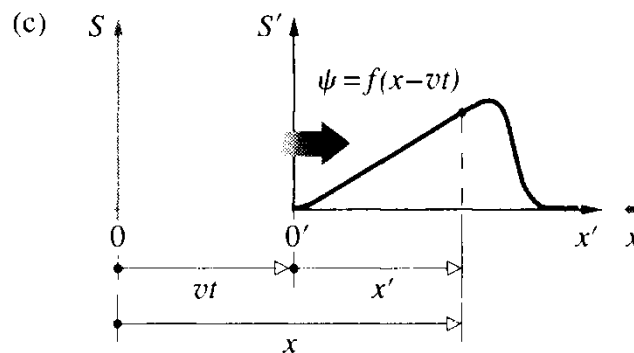
Num referencial S' que viaja com a perturbação, esta é vista como estacionária:



$$\psi = f(x')$$

Comparando S e S' :

$$x' = x - vt$$



$$\psi(x, t) = f(x - vt)$$

$$\psi(x, t) = e^{-a(x-vt)^2}$$

Equação de onda

Equação diferencial de ondas, descreve fenómenos de propagação de perturbações no espaço e no tempo, relacionando as respectivas taxas de variação:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \mp v \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Iguais taxas de variação no tempo e no espaço (a menos de uma constante de proporcionalidade v)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

Descrição de distribuição de grandezas físicas no espaço e no tempo em meios contínuos: estudo da dinâmica de processos físicos.

Eg. Campo eléctrico

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

Ondas Harmónicas

Perfil de onda representado por uma função sinusoidal:

$$\psi(x, t)|_{t=0} = \psi(x) = A \sin kx = f(x)$$

k é o numero de ondas e é necessário para manter o argumento da função sem unidades (**k x** vem em radianos).

Valor maximo de $\Psi(x) = A$, **amplitude da onda**

Para representar a propagação da perturbação : $x \rightarrow x-vt$:

$$\psi(x, t) = A \sin k(x - vt)$$

Esta função é uma solução da esquação de onda!

Fixando x, ou t, obtem-se perturbação periódica (no espaço e no tempo)

Periodicidade Espacial

O período espacial é o comprimento de onda λ (usualmente medido em nm):

$$\psi(x, t) = \psi(x \pm \lambda, t)$$

Representa a distância no espaço de uma oscilação completa da onda. Para uma perturbação sinusoidal:

$$\sin k(x - vt) = \sin k[(x \pm \lambda) - vt] = \sin [k(x - vt) \pm 2\pi]$$

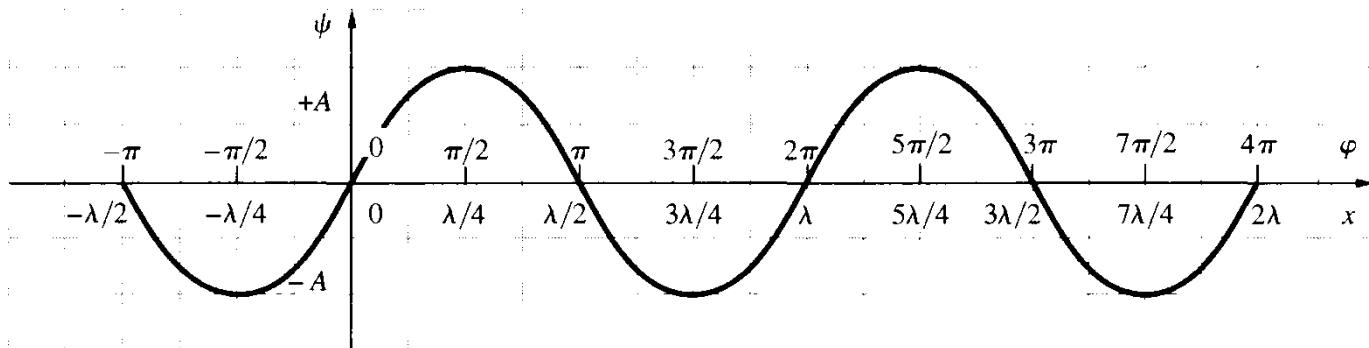
Logo

$$|k\lambda| = 2\pi \quad k = 2\pi/\lambda$$

Fase= φ

K-nº de onda (angular)
[rad/m]

$$\psi(x) = A \sin kx = A \sin 2\pi x/\lambda = A \sin \varphi$$



Periodicidade Temporal

O período temporal é o **tempo necessário para que num ponto fixo ocorra uma oscilação completa** da onda:

$$\psi(x, t) = \psi(x, t \pm \tau)$$

Para ondas sinusoidais:

$$\sin k(x - vt) = \sin k[x - v(t \pm \tau)]$$

$$\sin k(x - vt) = \sin [k(x - vt) \pm 2\pi]$$

logo:

$$kv\tau = 2\pi \longrightarrow \tau = \lambda/v$$

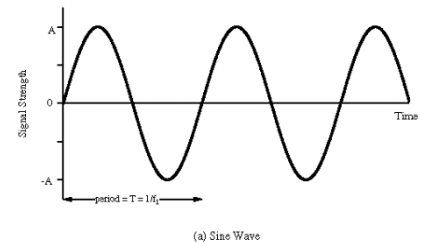
O inverso do período é frequência (numero de ondas por unidade de tempo):

$$\nu \equiv 1/\tau \longrightarrow v = \nu\lambda$$

Outras grandezas relacionadas:

$$\omega \equiv 2\pi/\tau = 2\pi\nu \quad \leftarrow \text{Frequência angular (rad/s)} \text{-----} \text{Numero de onda cm}^{-1} \rightarrow \quad \kappa \equiv 1/\lambda$$

Nº de ciclos por segundo ν
Comprimento de cada ciclo : λ
Comprimento de perturbação num segundo: $\nu\lambda$



Ondas electromagnéticas

Para ondas electromagnéticas sinusoidais (a uma dimensão):

$$E = E_0 \text{ Sen } (k(x - vt) + \varphi))$$

No vácuo $v=c \sim 3.10^8 \text{ m/s}$

$$B = B_0 \text{ Sen } (k(x - vt) + \varphi)$$

ou:

$$E = E_0 \text{ Sen } (kx - \omega t + \varphi)$$

$$B = B_0 \text{ Sen } (kx - \omega t + \varphi)$$

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

$$\frac{E}{B} = c$$

Em geral para ondas eletromagnéticas sinusoidais:

- Os campos \vec{E} e \vec{B} são sempre perpendiculares à direção de propagação.
- \vec{E} é sempre perpendicular a \vec{B}
- O produto externo $\vec{E} \times \vec{B}$ aponta na direção de propagação.
- Ambos variam sinusoidalmente e em fase

Ondas electromagnéticas: Equações de Maxwell

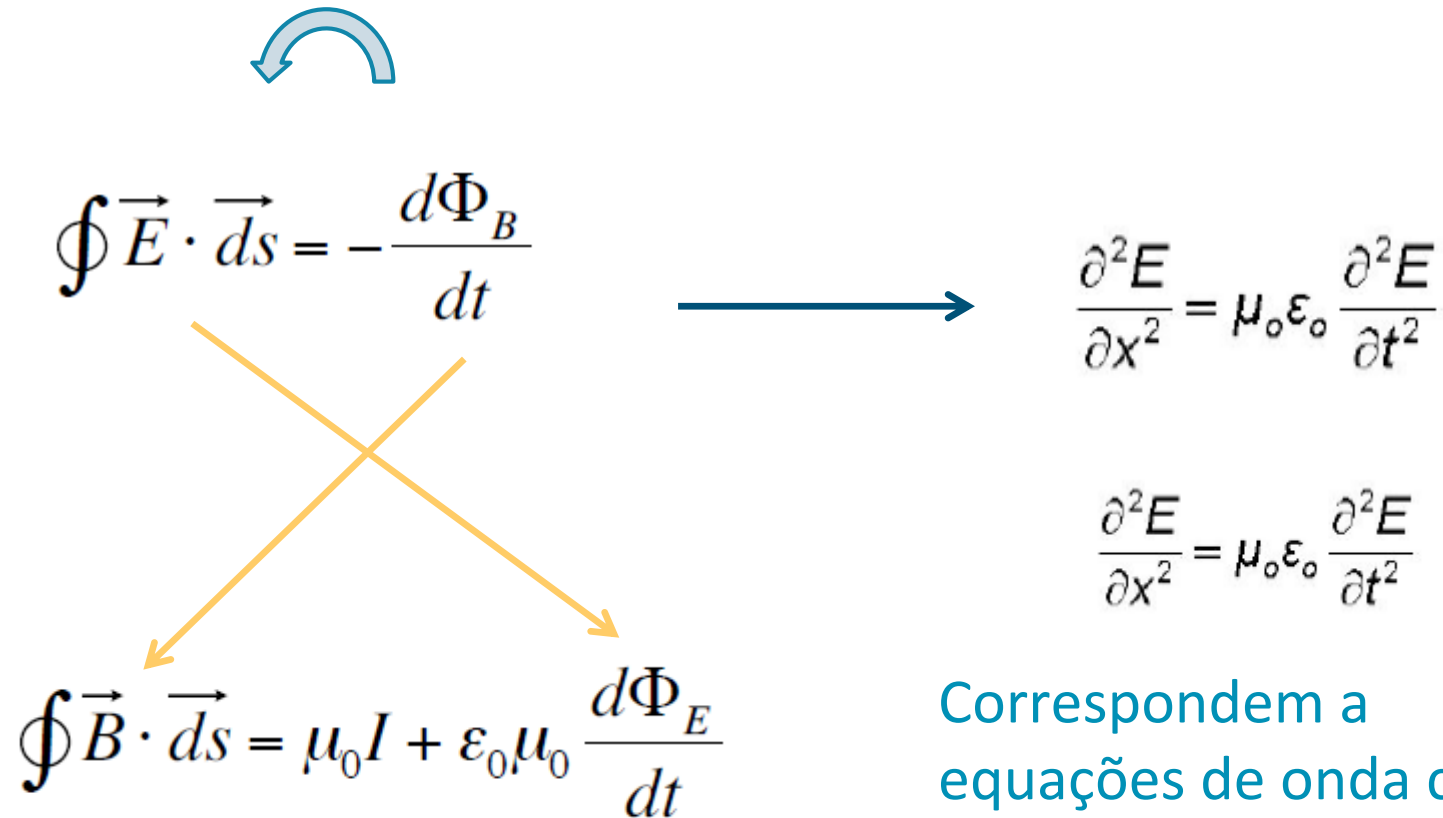
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \text{Lei de Gauss "Eléctrica"}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{Lei de Gauss "Magnética"}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{Lei de Faraday "indução"}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad \text{Lei de Ampere-Maxwell}$$

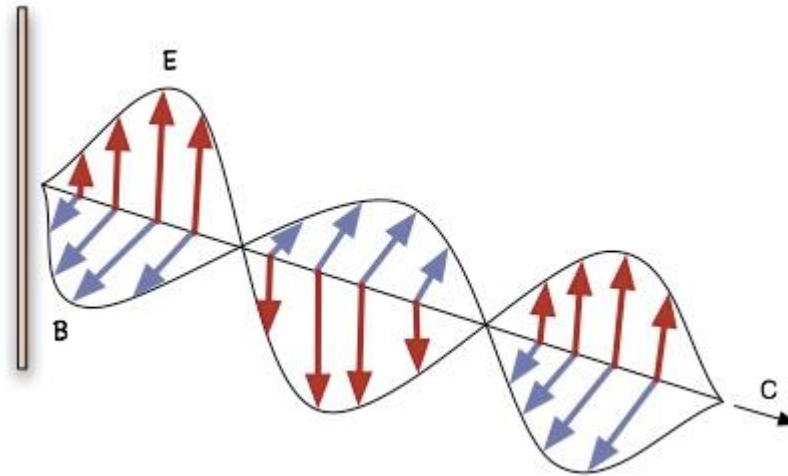
Equações de Maxwell e a propagação


$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$
$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$
$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

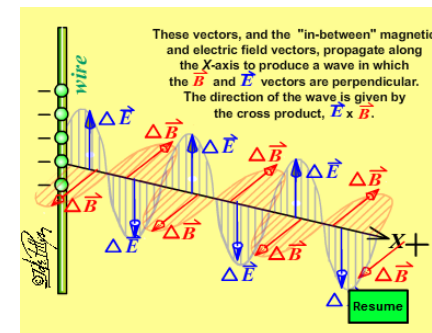
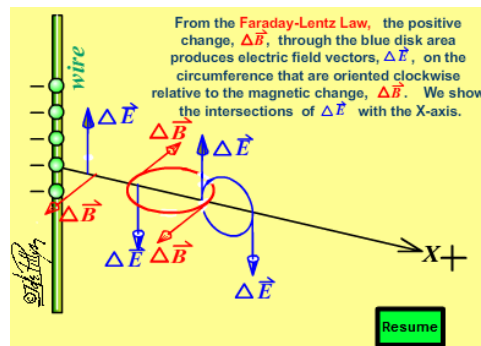
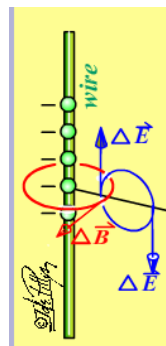
Correspondem a equações de onda com:

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

Ondas electromagnéticas



E e B estão acoplados e induzem-se mutuamente assegurando a propagação no vazio.



http://math.ucr.edu/~jdp/Relativity/EM_Propagation.html

Energia transportada por uma onda electromagnética

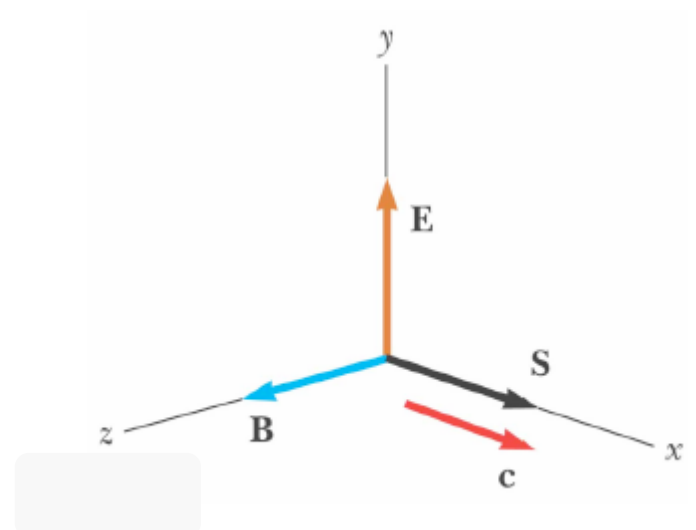
Uma onda electromagnética transporta energia e momento.

Ao propagarem-se no espaço podem transferir energia para os objectos com que interagem.

O fluxo de energia de uma onda EM, pode ser avaliado pelo seu vector Poynting:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad \text{Unidades: W/m}^2$$

$$\vec{S} = \left(\frac{\text{energia}}{\text{tempo}} \right)_{\text{inst}} = \left(\frac{\text{Potência}}{\text{area}} \right)_{\text{inst}}$$



fluxo de energia instantâneo

Energia transportada por uma onda electromagnética

Considerando os campos:

$$E(t, \mathbf{r}) = E_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$B(t, \mathbf{r}) = B_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB = \frac{1}{c\mu_0} E^2$$

A variação de S no tempo é dada por:

$$S(t) = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0 \cos^2(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = \frac{1}{\mu_0 c} E_0^2 \cos^2(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = \epsilon_0 c E_0^2 \cos^2(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}).$$

Considerando o valor médio do \cos^2 é de $1/2$

$$\langle S \rangle = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2 = I \text{ (Intensidade média)}$$

Irradiância ou “Intensidade” da radiação incidente

Quando se avalia a quantidade de luz que ilumina uma superfície, considera-se normalmente a **energia média** por **unidade de área** e de **tempo**:

O fluxo de energia de uma onda EM, pode ser avaliado pelo seu vector Poynting:

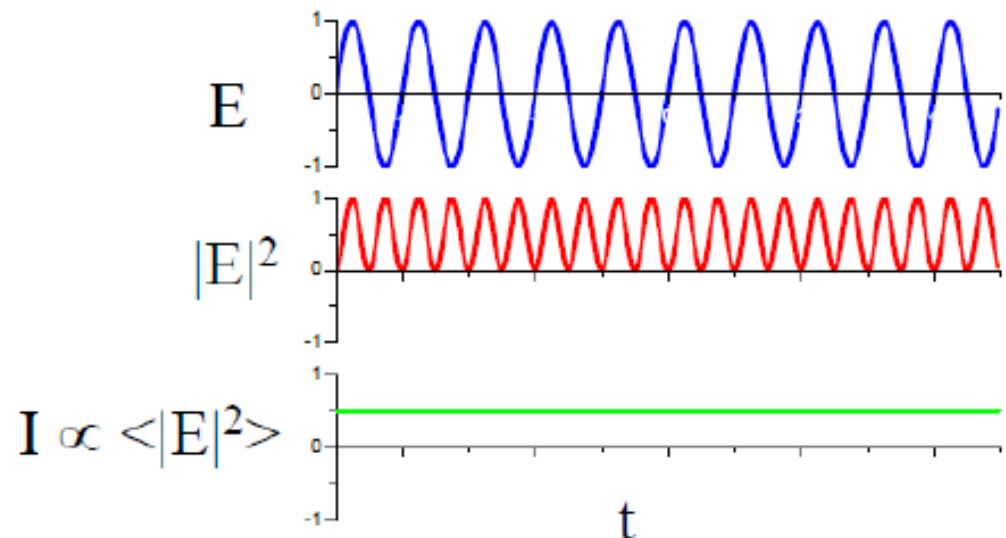
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad \text{Unidades: W/m}^2$$

$$\vec{S} = \left(\frac{\text{energia}}{\text{tempo}} \right)_{inst} = \left(\frac{\text{Potência}}{\text{area}} \right)_{inst}$$

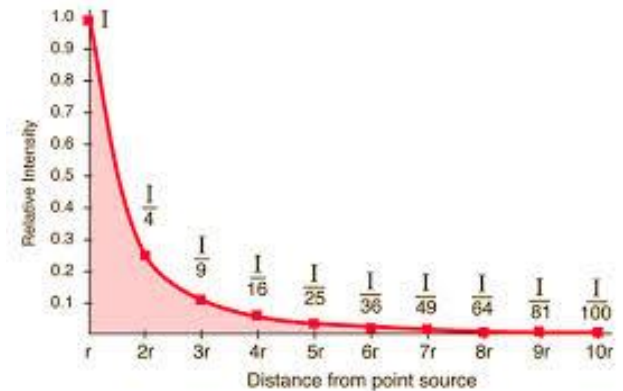
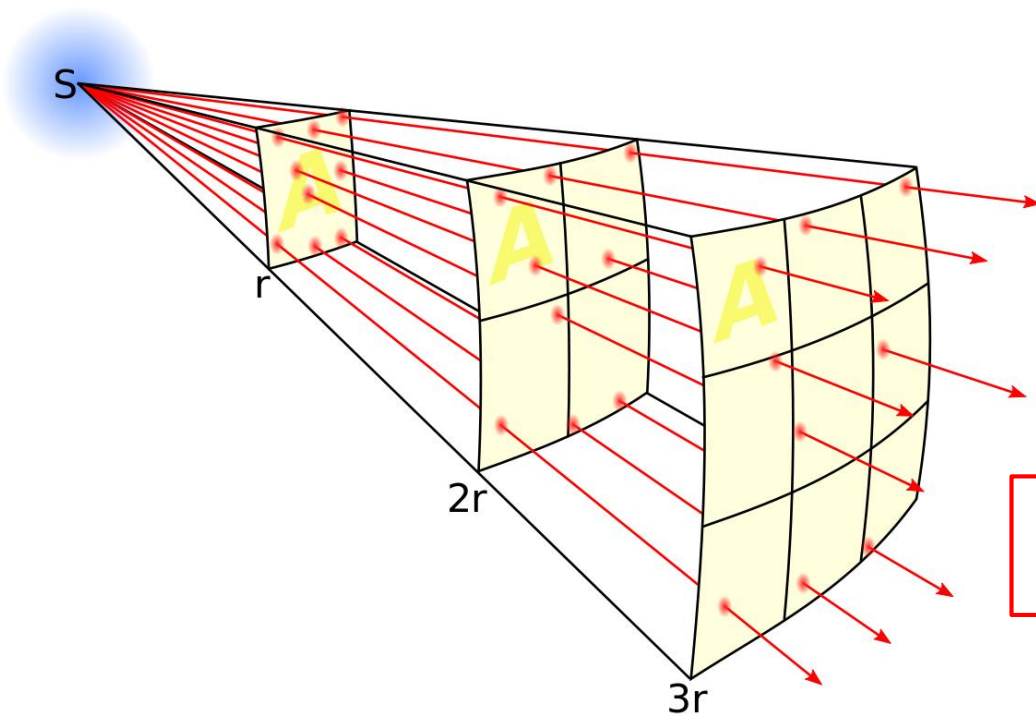
$$I = \langle S \rangle = c \epsilon_0 |\vec{E}_0 \times \vec{B}_0| \underbrace{\left\langle \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \right\rangle}_{1/2}$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{c \epsilon_0}{2} |\vec{E}_0 \times \vec{B}_0|$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{c \epsilon_0}{2} \langle E_0^2 \rangle$$



Variação da Intensidade com a distância



$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

A fluxo total de energia atravessando a superfície de cada esfera deve corresponder à energia radiada pela fonte. Como a área vai aumentando, a intensidade (potência / área) diminui na proporção inversa.

Interação da Luz com a matéria

No Vazio,

Permissividade elétrica,

$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{F/m}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E}$$

D Deslocamento Elétrico ou
“campo de indução elétrica”

Permeabilidade magnética,

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N.A}^{-2}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}$$

B “campo de indução magnética”

A velocidade de propagação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Interação da Luz com a matéria

Para descrever a propagação da luz em meios materiais, alteram-se as constantes ϵ e μ :

Implica uma velocidade de propagação diferente!!

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

Define-se o índice de refração do material n :

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_0\epsilon_0}}$$

Materials	Refractive index
Free space (vacuum)	1 (exactly)
Air (room temp, 1 atm)	1.000293
Water	1.33
Cornea (human)	1.376
Aqueous humor	1.336
Enamel (teeth)	1.62
Gray matter	1.36
Glass	1.52
Salt (NaCl)	1.54
Sapphire	1.78
Gallium phosphide (GaP)	3.5
Gallium arsenide (GaAs)	3.9
Silicon	4.2

n é uma medida do grau de interação da luz com a matéria, uma espécie de “resistência ou impedância ótica”, quanto maior n menor será a velocidade de propagação no meio.

Onda harmónica

Aproximação a onda harmónica, oscilação a uma só frequência constante: onda monocromática:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_0)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_0)$$

Diversas formas de representação

$$\psi = A \sin k(x \mp vt)$$

$$\psi = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \mp \frac{t}{\tau} \right)$$

$$\psi = A \sin 2\pi(\kappa x \mp \nu t)$$

$$\psi = A \sin(kx \mp \omega t)$$

$$\psi = A \sin 2\pi\nu \left(\frac{x}{v} \mp t \right)$$

Frequência e período espacial (comprimento de onda)

$$k = 2\pi/\lambda \quad \text{m}^{-1} \quad \text{Unidades} \quad \text{m (nm)}$$

Frequência e período temporal $v = \nu\lambda$

$$\nu \equiv 1/\tau \quad \text{Hz (s}^{-1}\text{)} \quad \text{Unidades} \quad \text{s (fs)}$$

Frequência angular

$$\omega \equiv 2\pi/\tau = 2\pi\nu \quad \text{rad/s} \quad \text{Unidades}$$

Fase e fase inicial

Considerando uma das representações da função de onda:

$$\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \varepsilon)$$

O argumento do seno é a fase φ da onda:

$$\varphi = kx - \omega t + \varepsilon$$

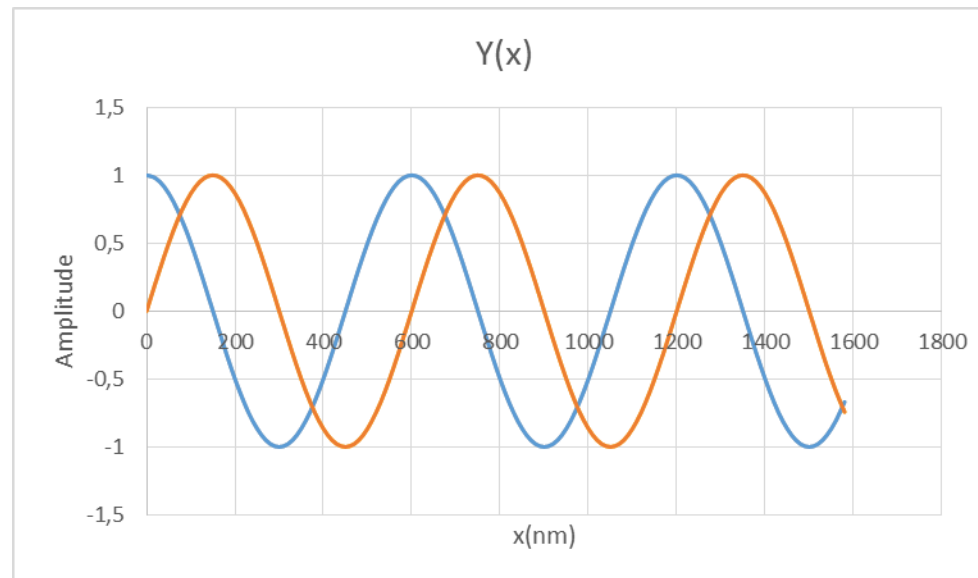
Para $t=0$

$$\varphi = \varepsilon$$

ε é a fase inicial

$$\varepsilon = 0$$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2}$$



Velocidade de fase

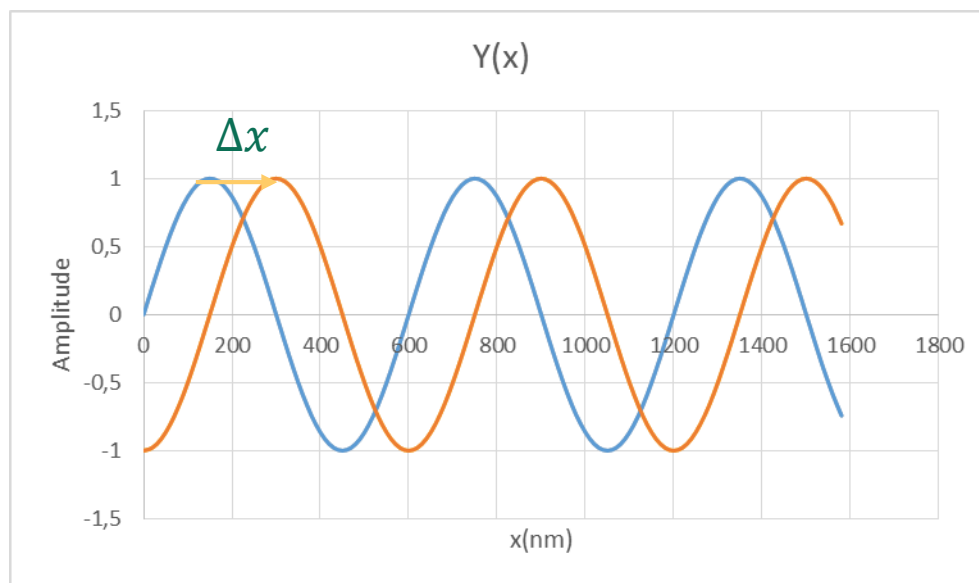
A fase da perturbação $\psi(x, t)$ é função de x e de t :

$$\varphi(x, t) = (kx - \omega t + \varepsilon)$$

$$\varphi(x, 0)$$

$$\varphi(x, 0,5 \text{ fs})$$

$$\Delta t = 0,5 \text{ fs}$$



A taxa de **variação da fase com o tempo**

$$\left| \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_x \right| = \omega$$

Eg. Oscilação de boia ancorada num ponto fixo...

A taxa de **variação da fase com a posição**:

$$\left| \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_t \right| = k$$

Eg. Taxa de variação da ondulação na superfície num dado instante.

Velocidade de fase

A velocidade de propagação da condição de fase constante:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{\varphi} = \frac{-(\partial \varphi / \partial t)_x}{(\partial \varphi / \partial x)_t}$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{\varphi} = \pm \frac{\omega}{k} = \pm v$$



A velocidade a que se move o perfil da onda ou **velocidade de fase da onda**.

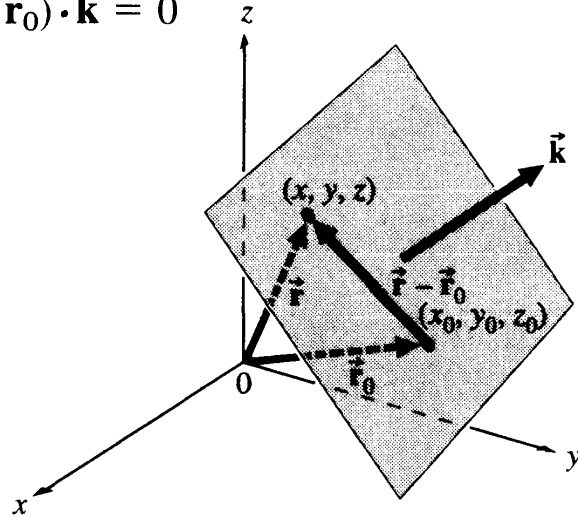
Pontos de fase constante deslocam-se no sentido ?

$kx - \omega t = \text{constante} \rightarrow \text{propagação sentido positivo } x +$
 $kx + \omega t = \text{constante} \rightarrow \text{propagação sentido negativo } x -$

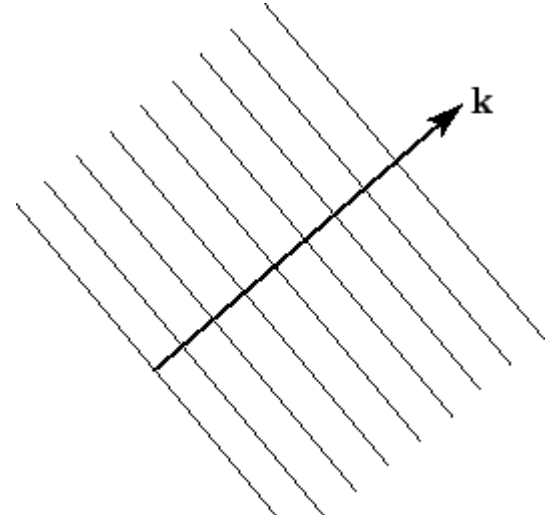
Ondas planas

Superfícies de igual fase são planos paralelos, perpendiculares à direção de propagação.

$$(\vec{r} - \vec{r}_0) \cdot \vec{k} = 0$$



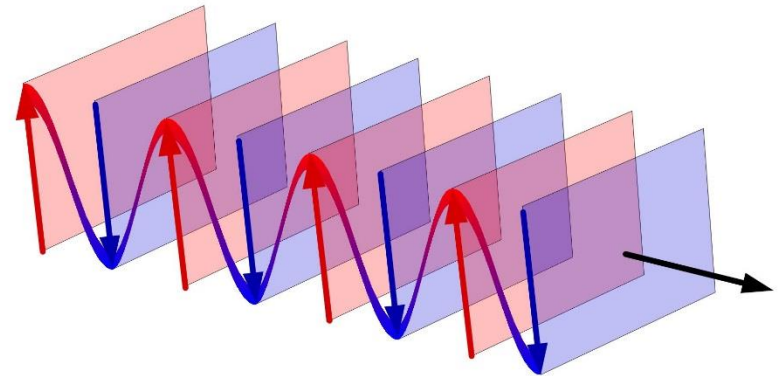
$$\vec{k} \cdot \vec{r} = \text{constant} = a$$



$$\psi(\vec{r}) = A \sin(\vec{k} \cdot \vec{r})$$

$$\psi(\vec{r}) = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r})$$

$$\psi(\vec{r}) = A e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$$

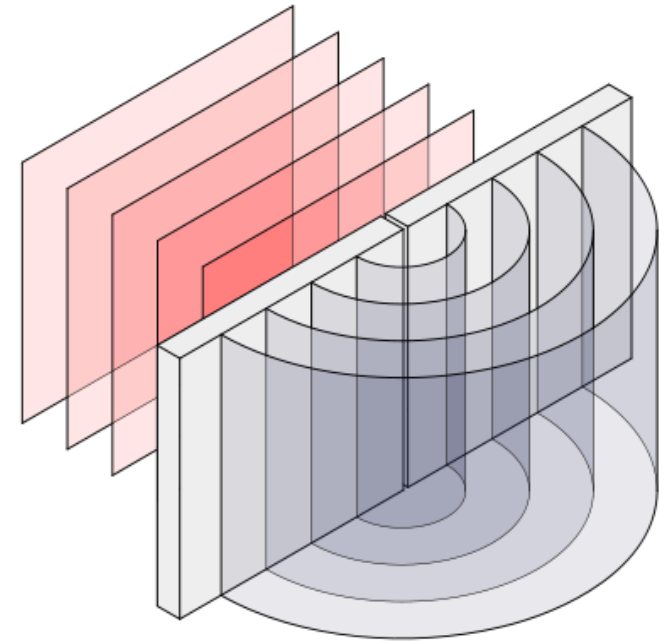
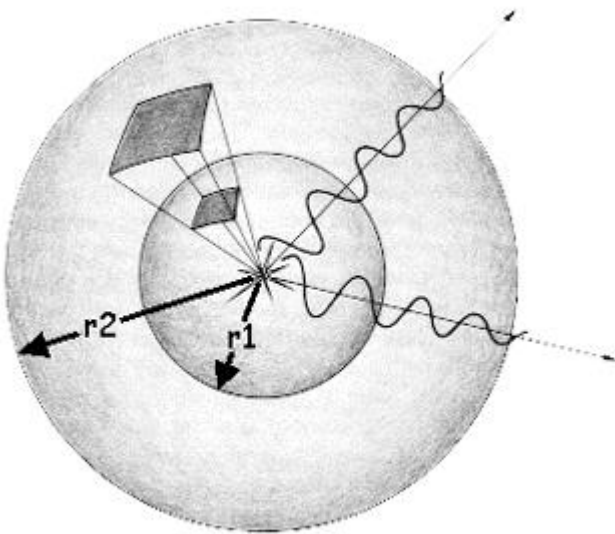


Ondas Esféricas e Cilíndricas

As superfícies de igual fase podem ser esféricas, cilíndricas...

$$\psi(\vec{r}) = \psi(r, \theta, \phi) = \psi(r) \quad \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (r\psi) \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \psi(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right)$$



$$\psi(r, t) = \left(\frac{\mathcal{A}}{r} \right) \cos k (r \mp vt)$$

$$\psi(r, t) \approx \frac{\mathcal{A}}{\sqrt{r}} \cos k (r \mp vt)$$

Velocidade de grupo

A velocidade de fase só faz sentido para ondas monocromáticas. Quando há mais de uma componente espectral, tem de se definir a **velocidade de grupo**.

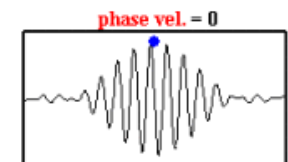
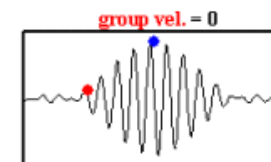
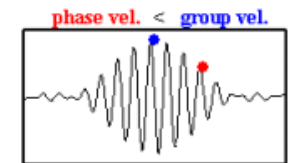
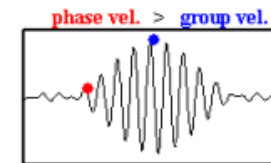
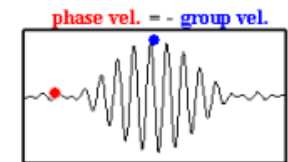
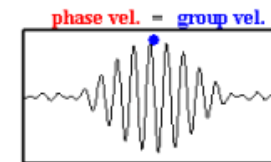
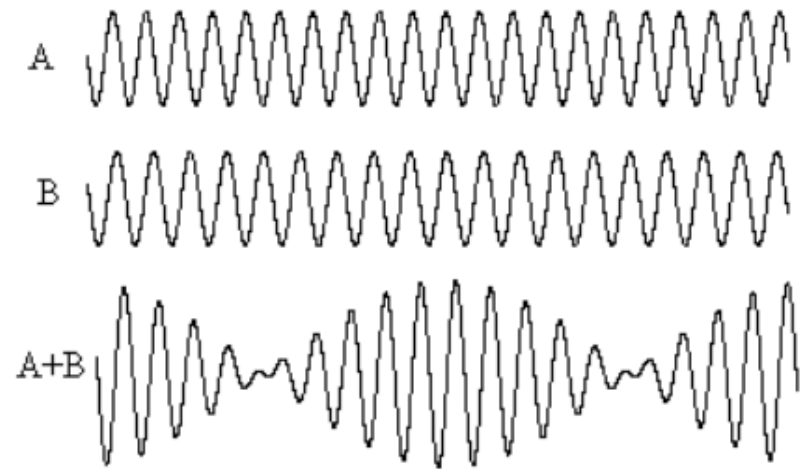
$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

Em meios com dispersão $n(\omega)$

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n} - \frac{ck}{n^2} \frac{dn}{dk}$$

$$v_g = v_p \left[1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk} \right]$$

A **Informação** viaja à velocidade de grupo.

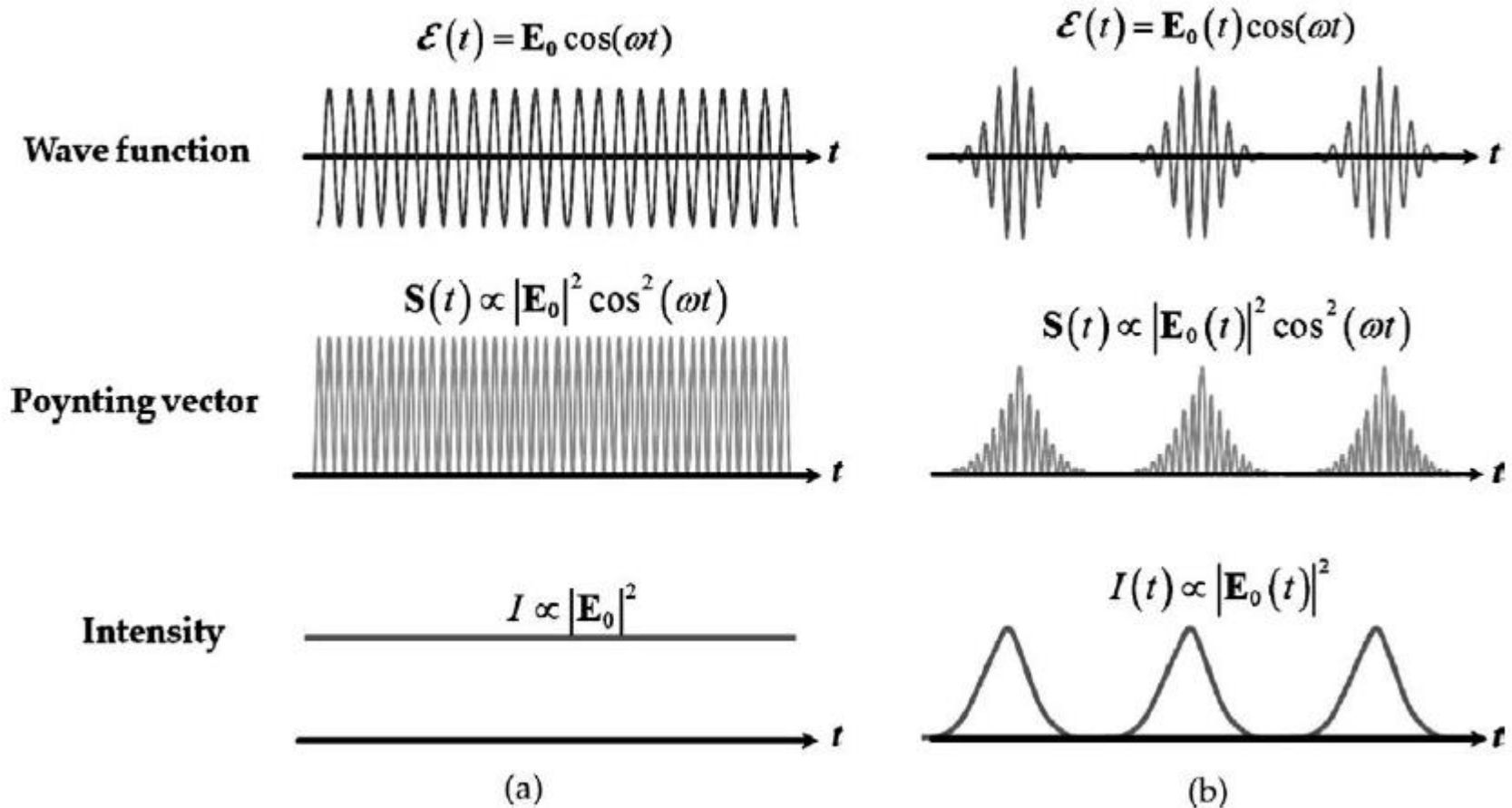


isvr

http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-further-dispersive.htm

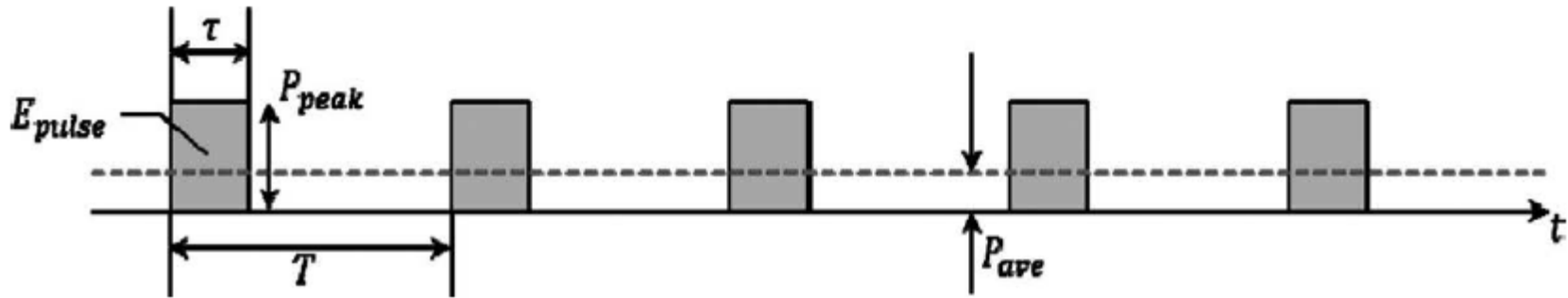
Irradiância ou “Intensidade” da radiação incidente ‘Pulsada’

Se a amplitude máxima do campo também variar no tempo, podemos ter propagação de impulsos (cujas velocidade é a velocidade de grupo):



Potência de pico vs Potência média (ou Irradiância P/Area)

Quando a radiação é pulsada há duas formas de considerar a Potência ou Irradiância incidente.



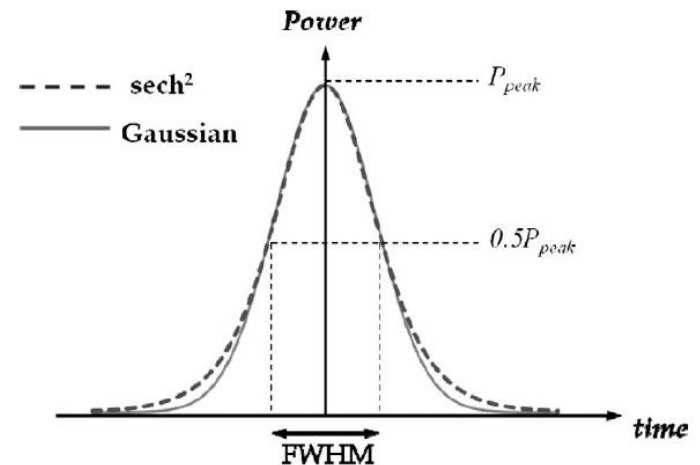
$$P_{ave} = P_{peak} \tau R = E_{pulse} R$$

Outros fatores a ter em conta (focagem):

$$I_0 = \frac{\pi E_L D^2}{4 \tau_L f^2 \lambda^2} \times \frac{1}{(M^2)^2} = \frac{I'_0}{(M^2)^2}$$

D-diâmetro do feixe

http://www.calctool.org/CALC/phys/optics/pulsed_source



Laser YAG Pulsado

Energia = 200 mJ

$\tau_{\text{pulso}} = 8 \text{ ns}$

$R = 20 \text{ Hz}$

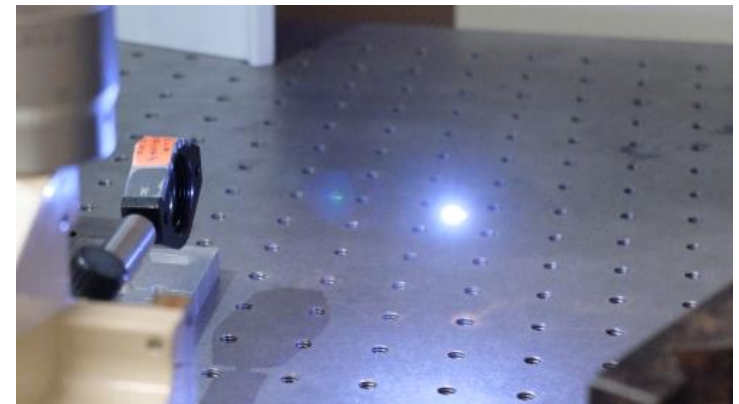
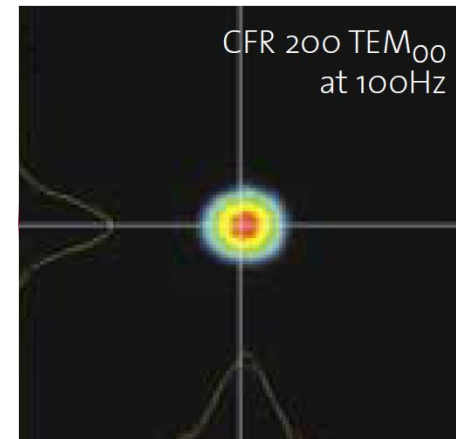
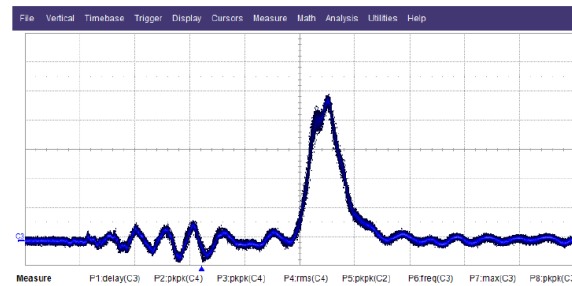
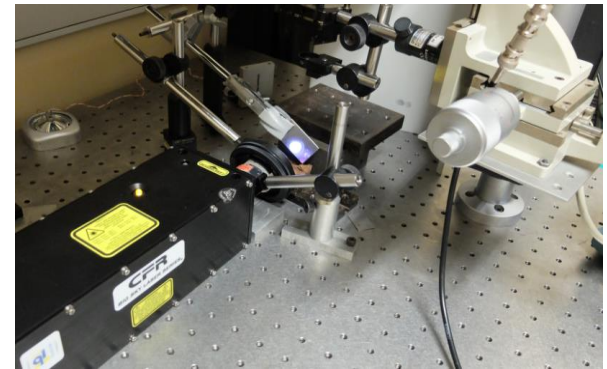
Diâmetro do feixe = 6 mm

$M^2 \sim 6$

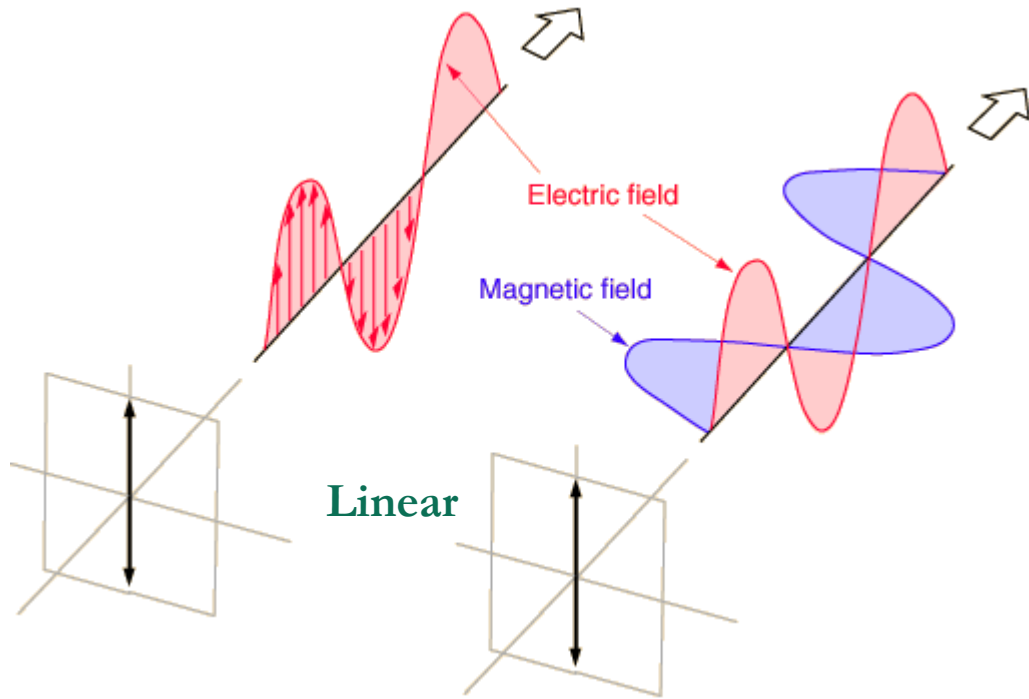
$P_{\text{pico}} ?$

$P_m ?$

E usando uma lente de $f=100 \text{ mm}$?

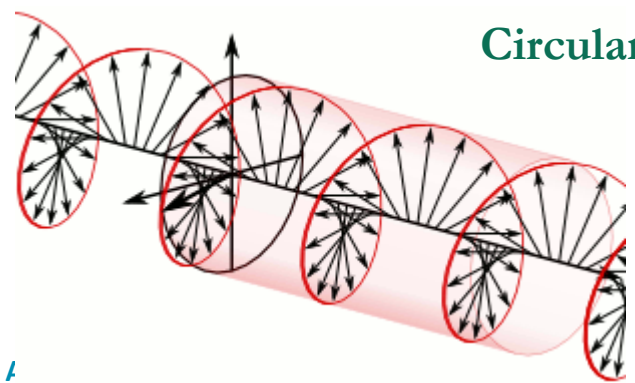


Polarização

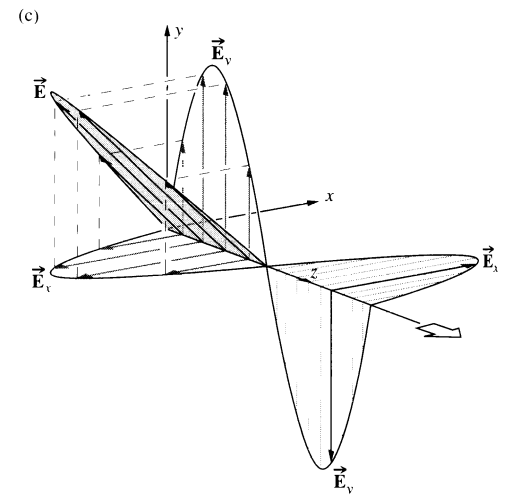


Quando E_x e E_y estão desfasados (polarização circular ou elíptica):

Circular ou elíptica



Quando E_x e E_y estão em fase:



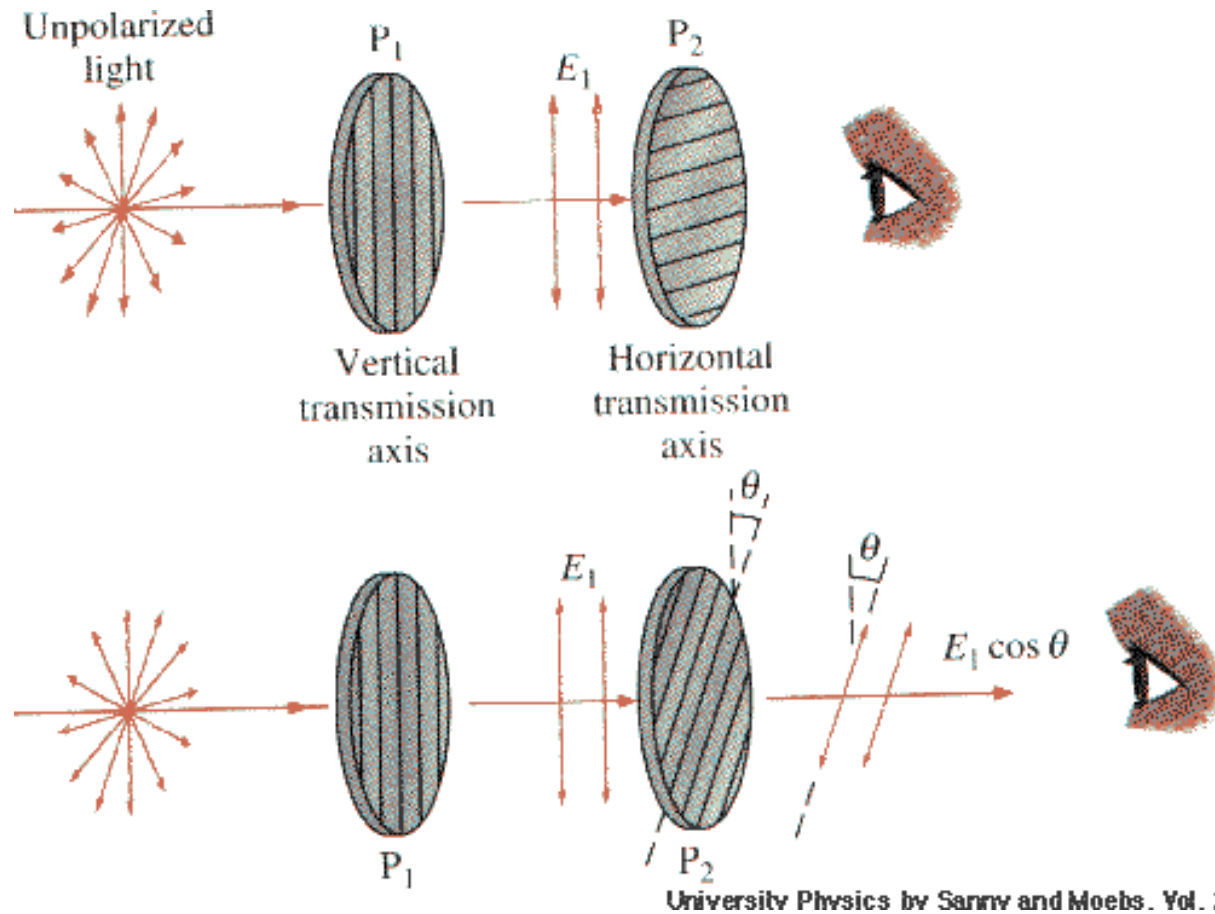
$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{i} E_{0x} \cos (kz - \omega t)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{j} E_{0y} \cos (kz - \omega t + \varepsilon)$$

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t)$$

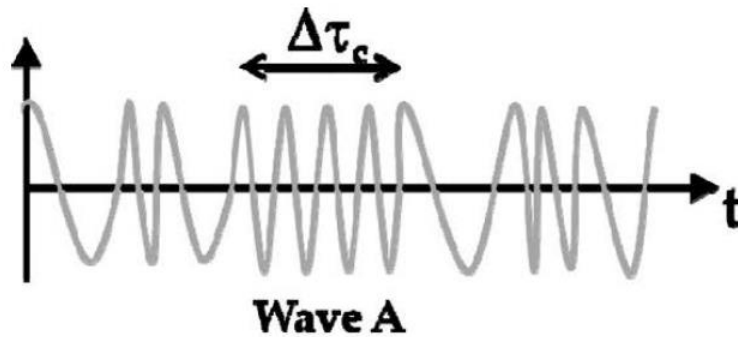
$$\vec{E} = (\hat{i} E_{0x} + \hat{j} E_{0y}) \cos (kz - \omega t)$$

Polarizadores (lei de Malus)

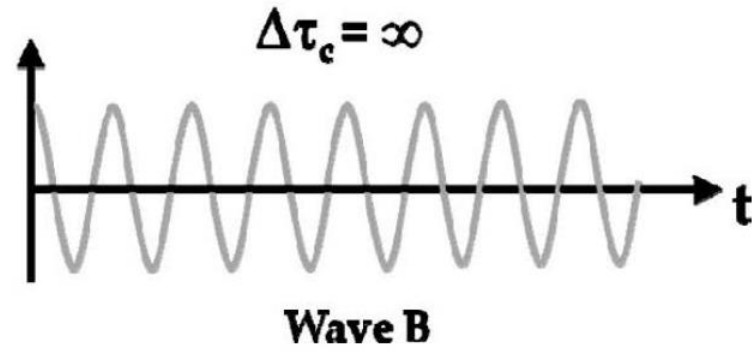


$$I(\theta) = \frac{c\epsilon_0}{2} E_{01}^2 \cos^2 \theta$$

Coerência Temporal



(a)



(b)

Tempo de coerência $\Delta\tau_c$

Intervalo durante o qual a onda mantém uma relação de fase **estável (previsível)**

Comprimento de coerência, Δl_c comprimento ao longo do qual a relação de fase se mantém previsível

$$\Delta l_c = c \Delta\tau_c$$

Depende da natureza da fonte (extensão física, largura espectral...)

$$\Delta\nu \approx \frac{1}{\Delta\tau_c}, \quad \Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{c \Delta\tau_c} = \frac{\lambda^2}{\Delta l_c}$$

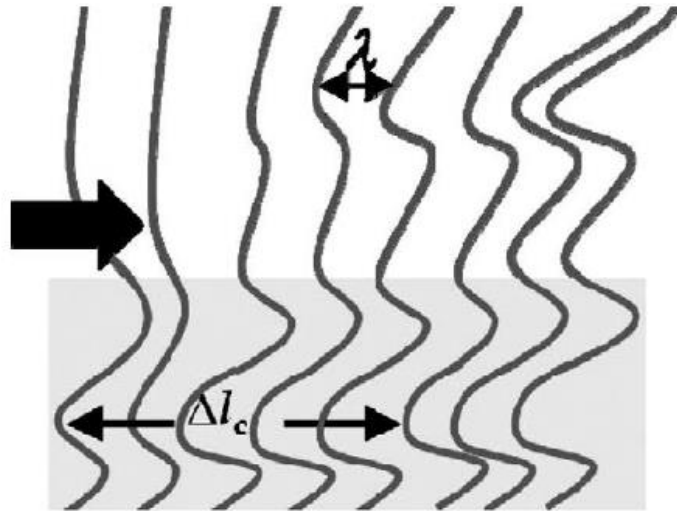
Calcular Δl_c para:

Luz solar,

LED ($d\lambda \sim 20$ nm)

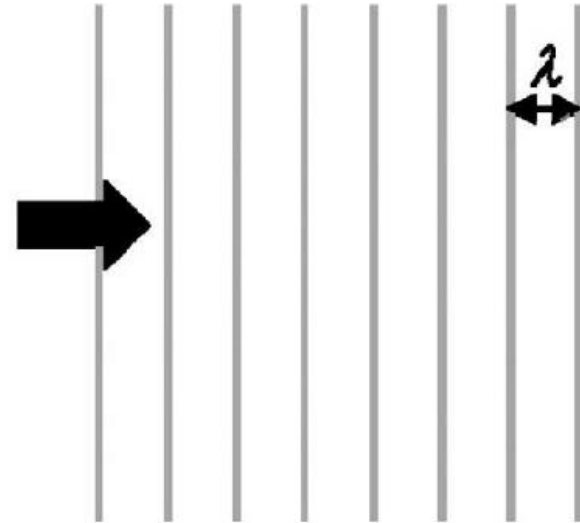
Laser DFB ($d\nu \sim 10$ kHz)

Coerência Espacial



Wave A

(a)

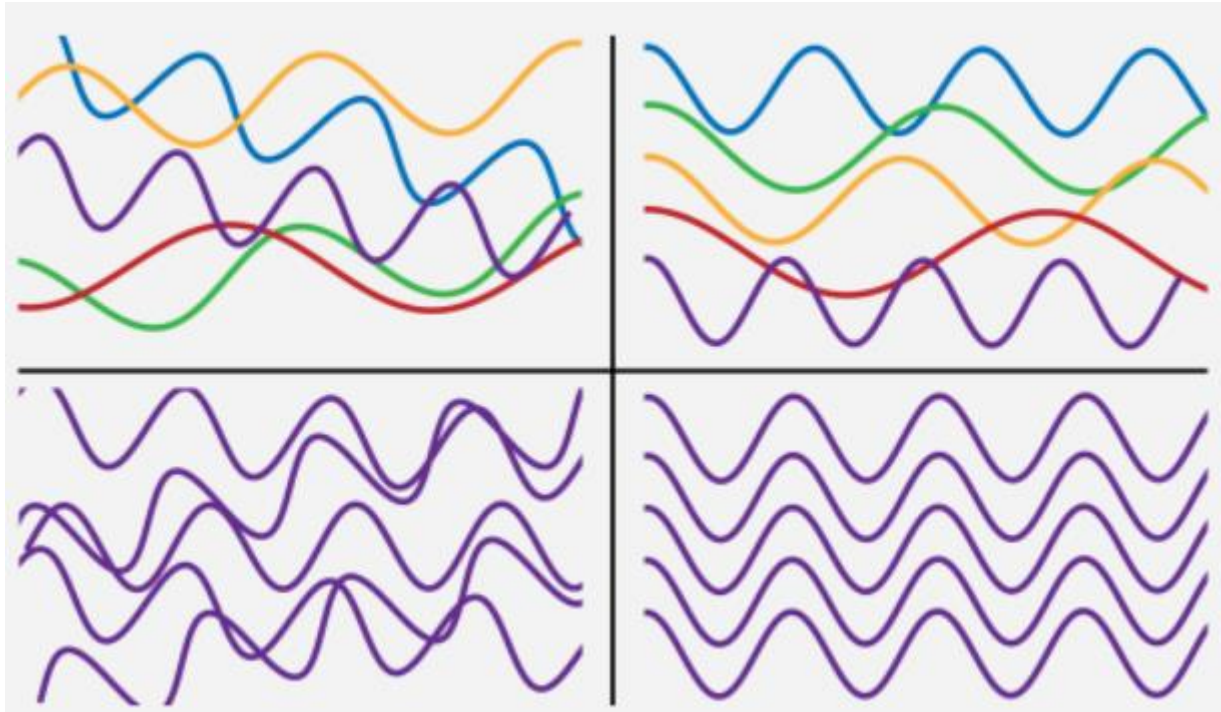


Wave B

(b)

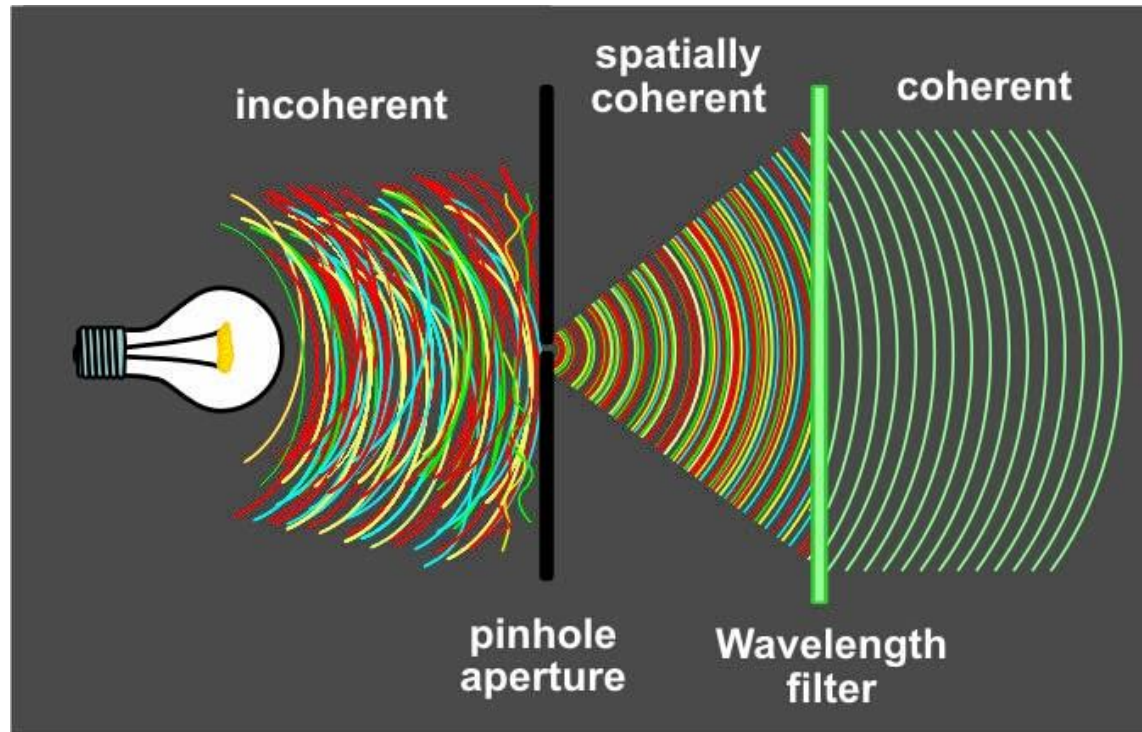
Avalia o grau de uniformidade (transversal à direção de propagação) da fase ao longo do espaço, num determinado espaço de tempo.

Coerência Espacial/Temporal



<http://interactive.quantumnano.at/advanced/molecular-beams/coherence/#navbar>

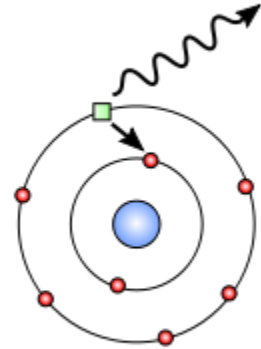
Coerência Temporal/Espacial



Partícula vs. Onda

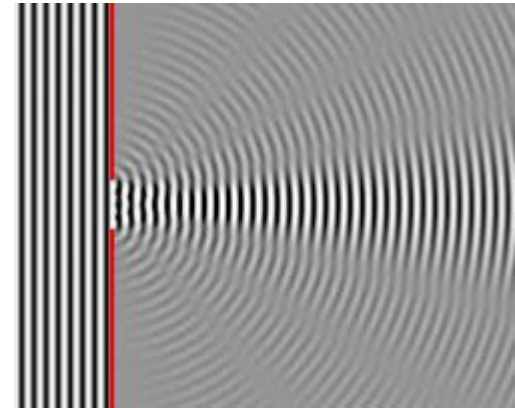
- **Fenómenos que implicam carácter corpuscular**

- Emissão e absorção de luz (quantidades de energia discreta).
- Efeito fotoelétrico
- Trocas de energia



- **Fenómenos que implicam carácter ondulatório**

- Interferência
- Difracção



Natureza quântica da luz

- **Plank: Emissão de luz de forma descontinua**

- **Quanta de energia ou fotões**

- Energia do fotão $E = h \nu$ ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)

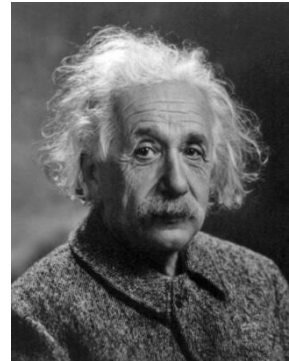
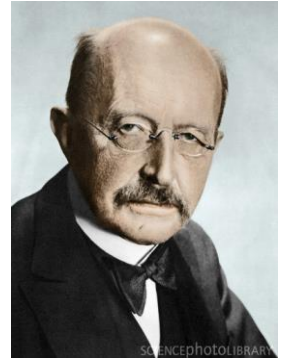
- Einstein: energia de uma partícula $E = mc^2$

- De Broglie: comprimento de onda associado a uma partícula:

$$\lambda_0 = c/\nu = h / mc$$

- Fotões não tem massa, podem sobre por-se! Não obedecem a princípio de exclusão de Pauli (electrões).

- Dois feixes luminosos podem cruzar-se sem interagir (ao contrario de dois electrões que interactuam entre si)



Dualidade onda - partícula

❑ *Propagação da luz*

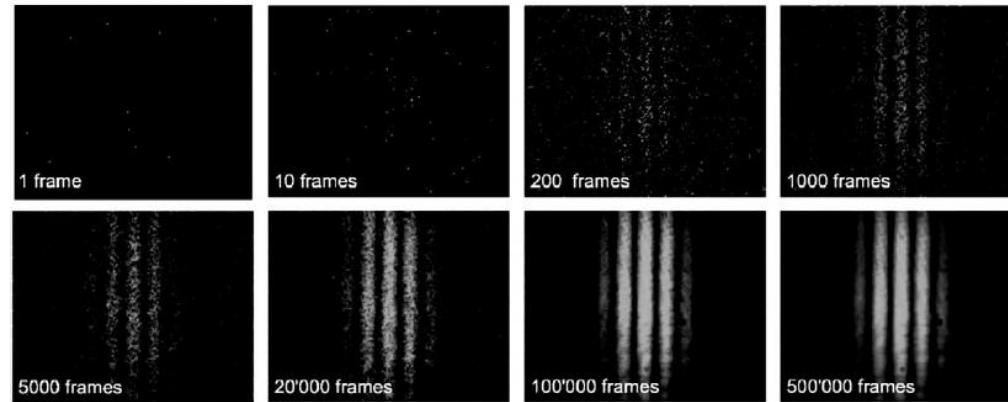
A propagação da luz é governada pela sua natureza ondulatória.

❑ *Interação luz - matéria*

A troca de energia entre luz e matéria é caracterizada pelas suas propriedades corpusculares.

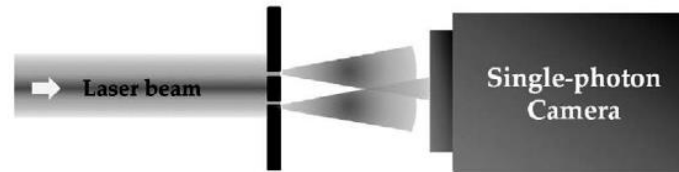
Esta dualidade onda-partícula é uma propriedade geral da matéria. Por exemplo, electrões (e outras “partículas”) também se propagam como ondas e trocam energia como partículas.

Fotão/Onda



Energia

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$



Densidade de Fluxo

$$E \text{ (in eV)} = E \text{ (in J)} / e$$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \frac{I(\mathbf{r})}{h\nu}$$

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E \text{ (in eV)} = \frac{1.24}{\lambda \text{ (in } \mu\text{m)}}$$

momento

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$$

Fluxo médio

$$\Phi = \int_A \Phi_0(\mathbf{r}) dA = \frac{P}{h\nu_0}$$

Fontes óticas

Spectra From Common Sources of Visible Light

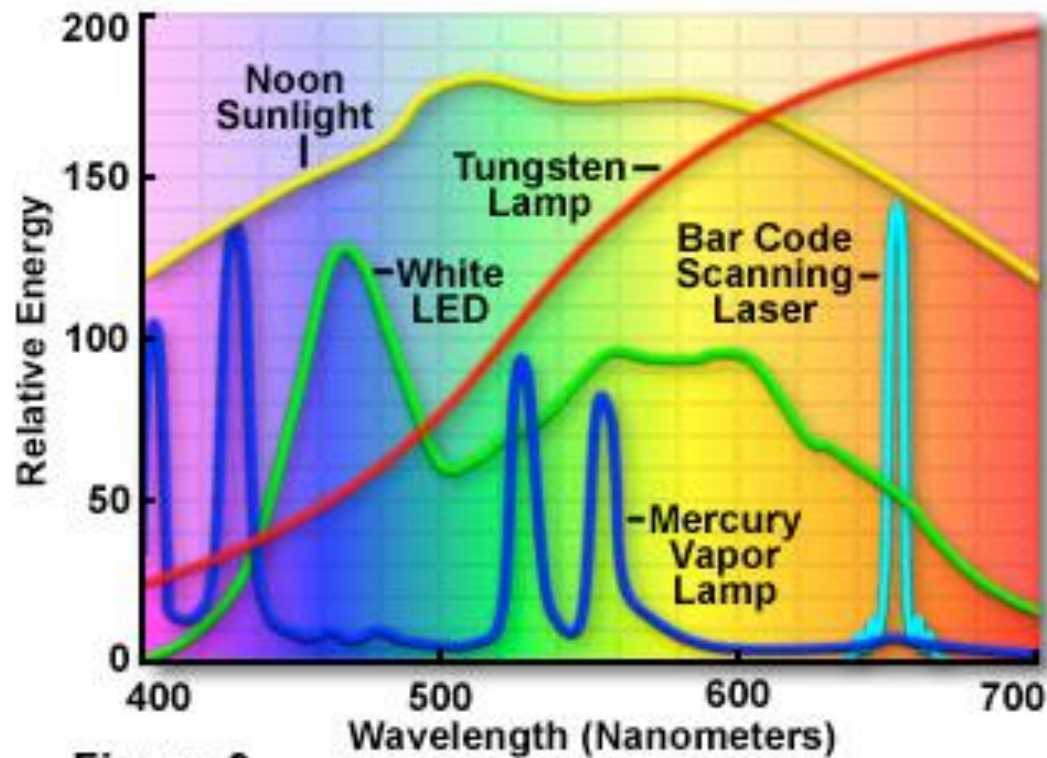


Figure 3

Térmicas

Lâmpadas descarga

LEDs

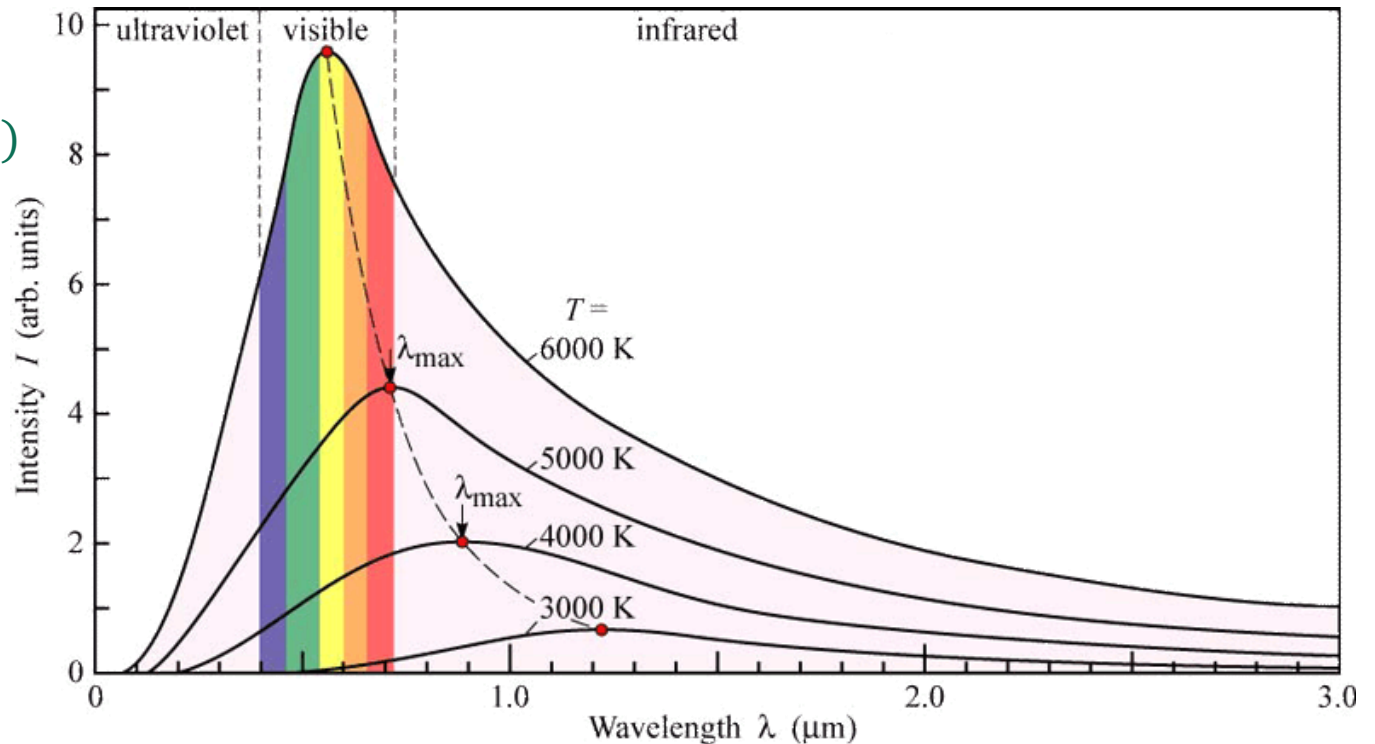
Lasers

Fontes térmicas

Um corpo denso (solido) aquecido emite radiação com potência proporcional à sua temperatura

$$\frac{P}{A} = \varepsilon \sigma T^4 \quad j/(m^2 \cdot s)$$

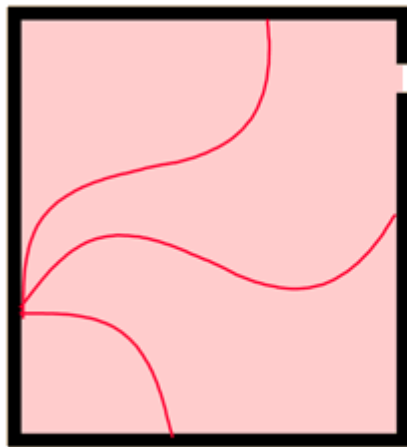
$$\lambda_{peak} T = const$$



$$\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$$

Corpo negro

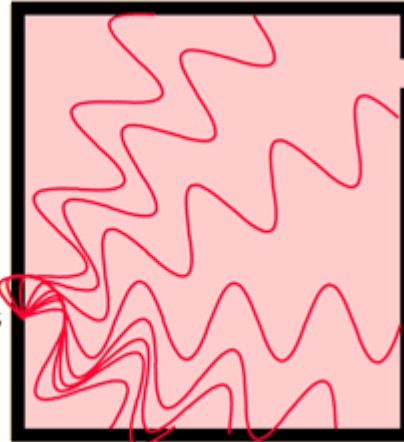
Corpo negro ideal, equiparado a cavidade que **absorve toda a energia incidente** reemitindo-a sob a forma de radiação característica do sistema



Number of modes
per unit frequency
per unit volume

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

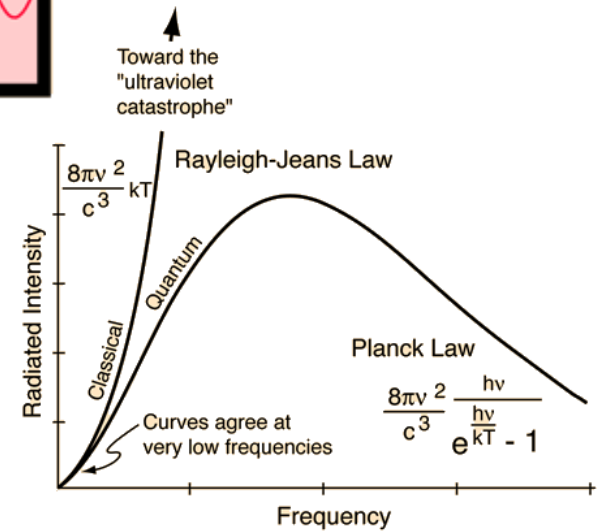
For higher frequencies
you can fit more modes
into the cavity. For
double the frequency,
four times as many
modes.



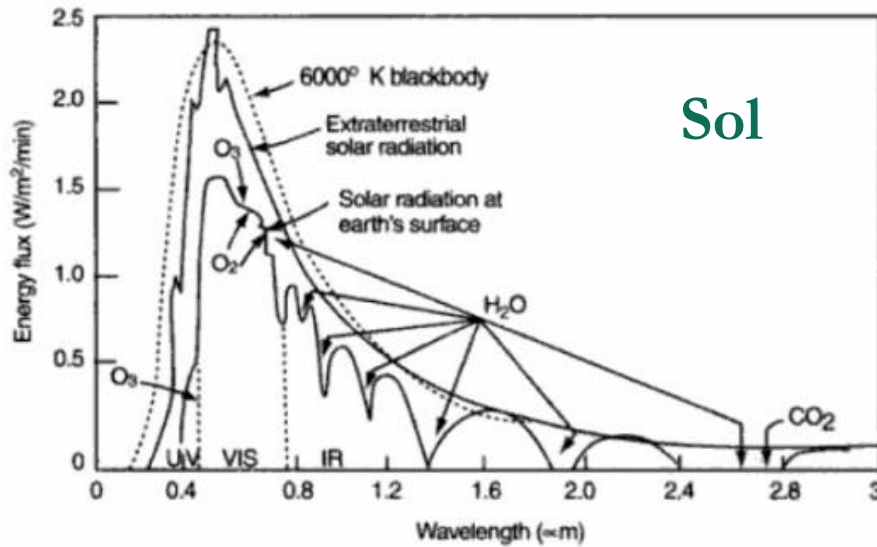
$$E \propto kT$$

Quantização da energia introduz uma
probabilidade associada cada modo

$$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



Espectro fontes térmicas



Sol

Fontes extensas
Grande largura espectral
Divergentes
Muito Baixa coerência

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/>

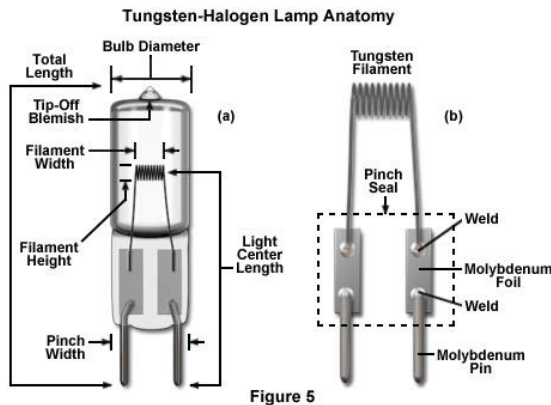


Figure 5

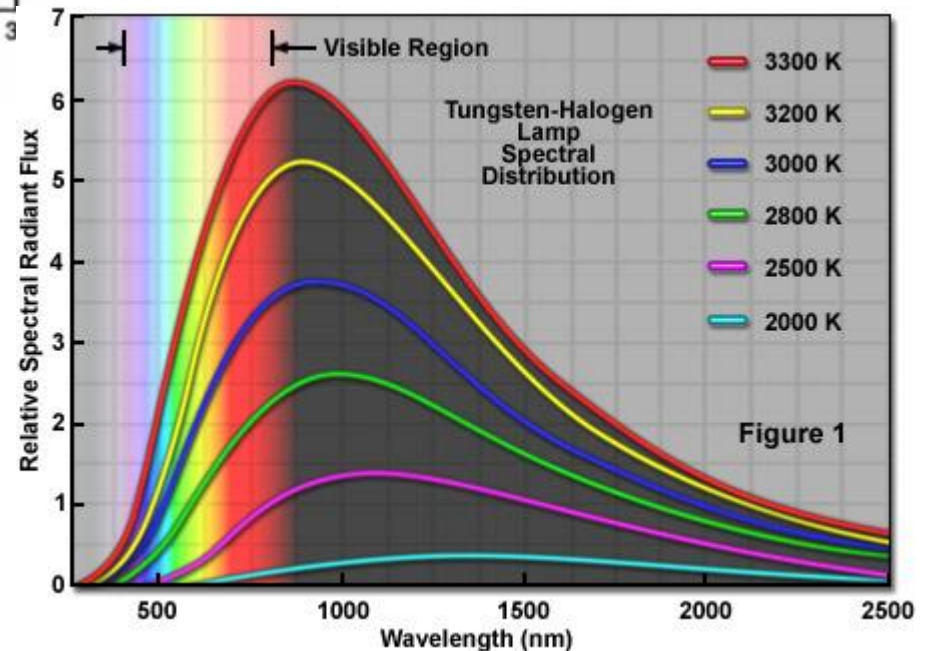
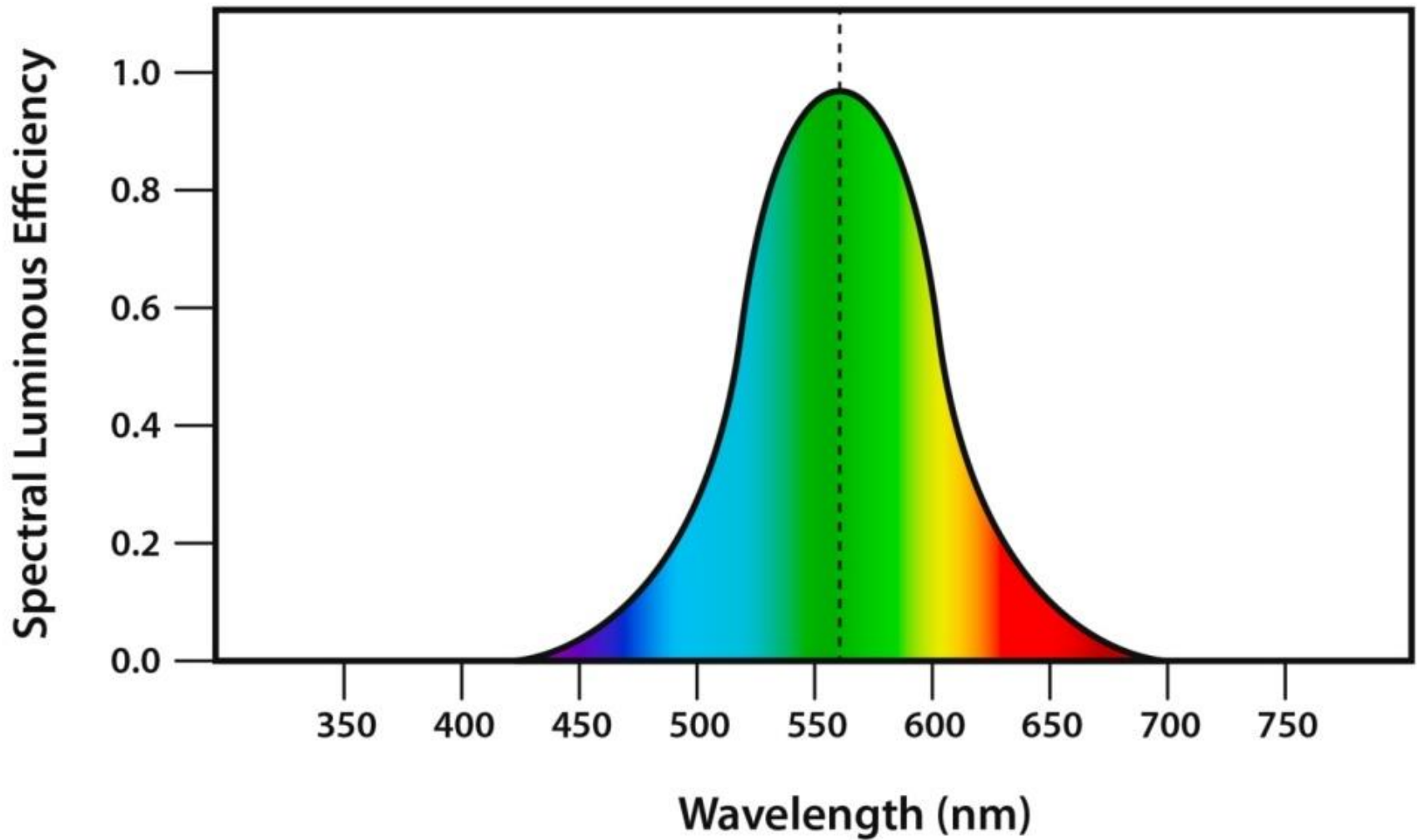
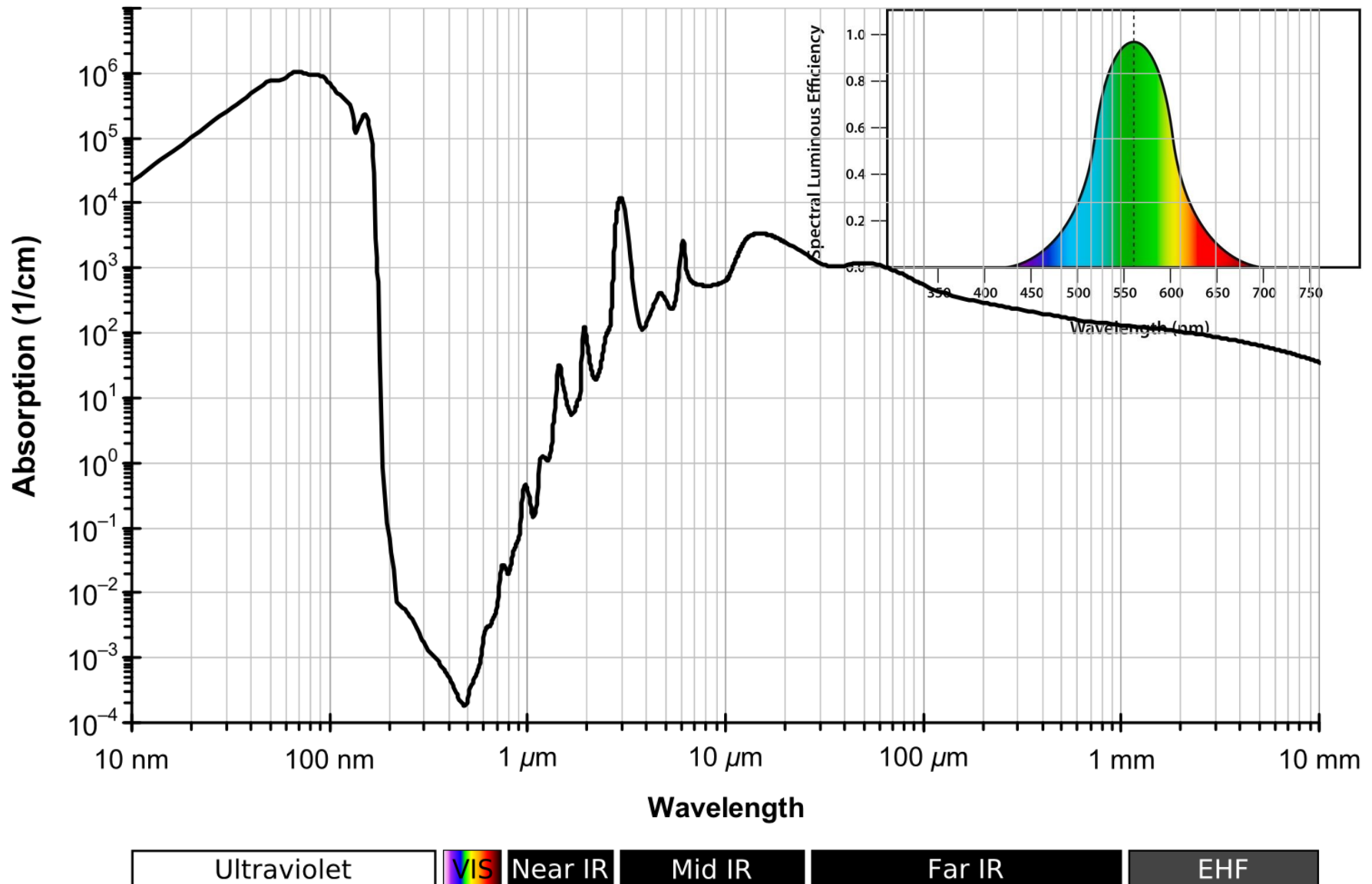


Figure 1

Apenas 12 a 20% visível!

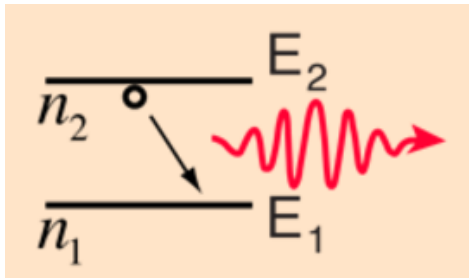
Sensibilidade espectral olho humano





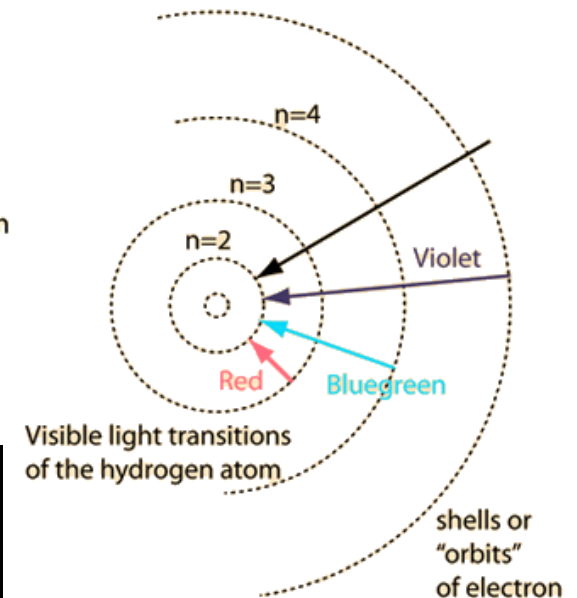
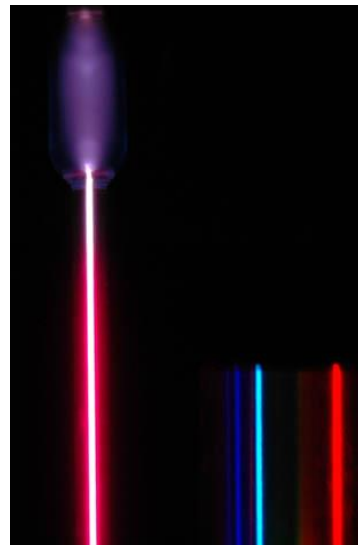
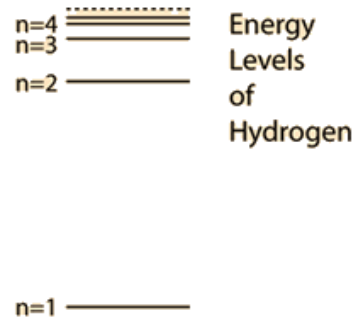
Lâmpadas de descarga

No caso dos materiais excitados serem gases rarefeitos, a interação entre átomos ou moléculas individuais é residual, a emissão ocorre a comprimentos de onda bem definidos (pelos respectivos níveis atômicos de energia)

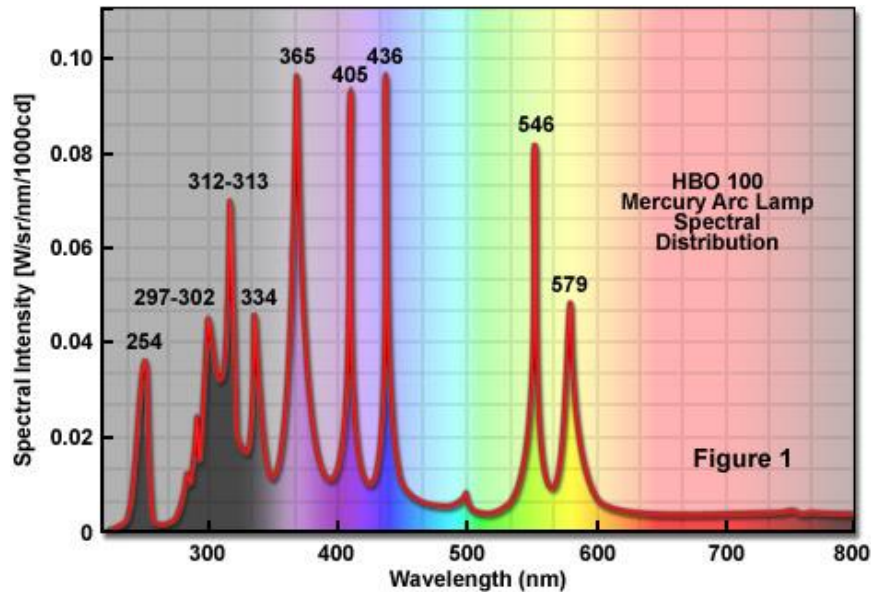


$$E_{\text{photon}} = h\nu = E_2 - E_1$$

$$h\nu = \frac{Z^2 m e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right] = -13.6 Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right] eV$$

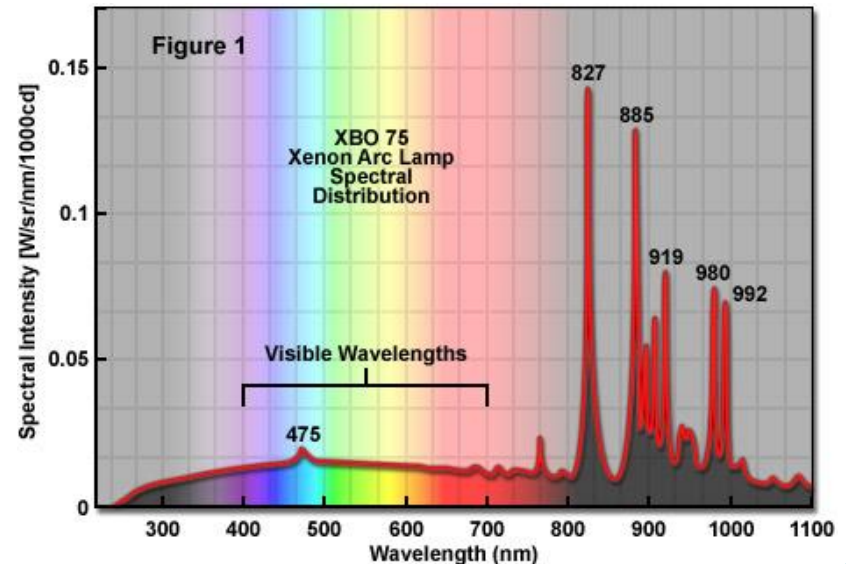


Lâmpadas de descarga



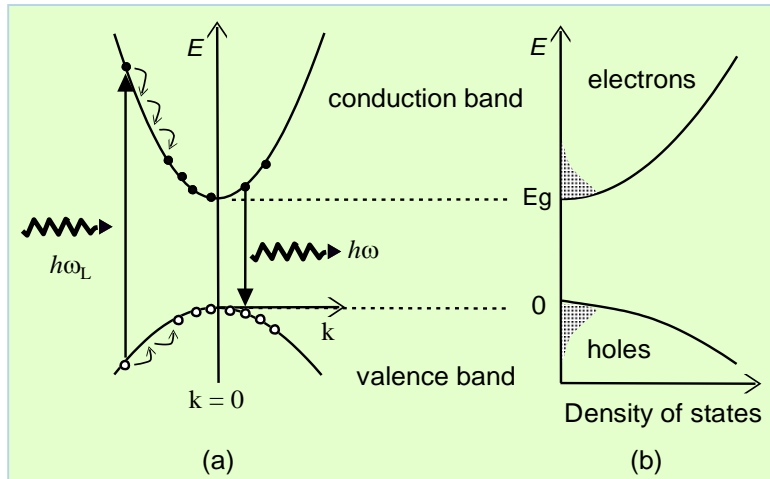
Fontes extensas/pode ter dimensão + reduzida
Várias riscas espectrais bem definidas + bandas contínuas
Divergentes
Baixa coerência

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/>



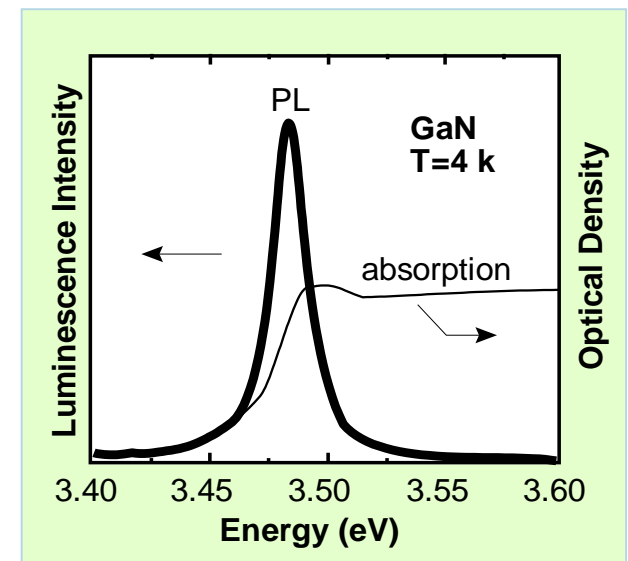
Luminescência

FONTES LED



- Proximidade de átomos em rede cristalina introduz bandas de energia
- Absorção seguida de rápido relaxamento do extremo da banda para energia $\sim E_g$
- Alargamento spectral $\Delta\lambda$ (~ 20 nm) (distribuição de Boltzman)

Electroluminescência. Excitação por polarização de junção semiconductora



$$\hbar\omega = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*}$$

Composition	E_g (eV)	λ_g (nm)
Si	1.11	1100
GaAs	1.43	870
AlAs	2.15	580
CdTe	1.44	860
CdS	2.42	510
PbTe	0.29	4300

Luminescência

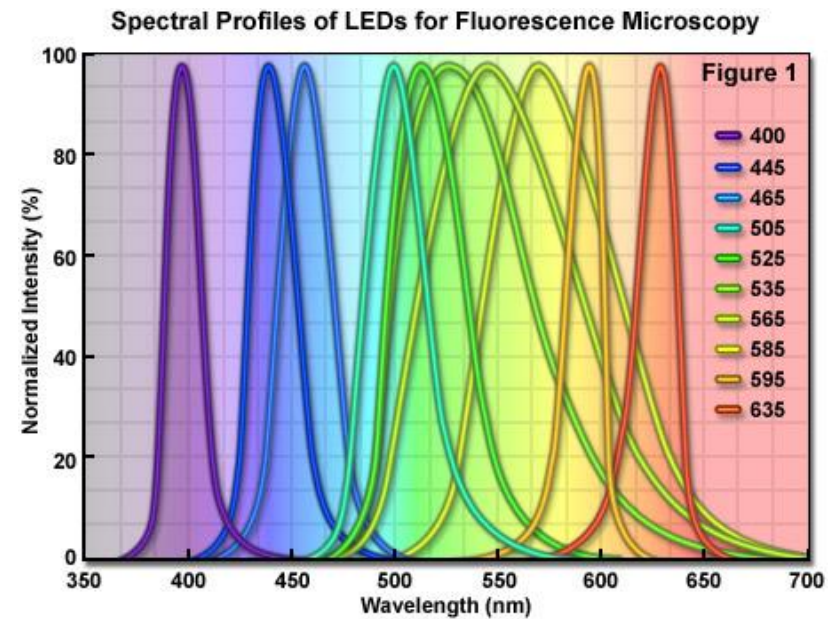
FONTES LED

Espectro de banda relativamente reduzida

Fonte pouco extensa

Relativamente pouco divergentes

Baixa coerência



Sources in increasing coherence

- Bright cloudy sky (least spatially coherent)
- Fluorescent tube lamp
- Frosted incandescent bulb
- Sun during clear weather
- Clear incandescent bulb
- Clear incandescent bulb w/noncoil filament (aquarium bulb)
- LED
- Electric welding arc 50ft away
- Laser (coherence-leng in MMs, up to a few Meters)
- Starlight (coherence leng 1000s KM)

Fontes LASER

(Ligth Amplification by Stimulated Emission of radiation)

Propriedades das fontes LASER

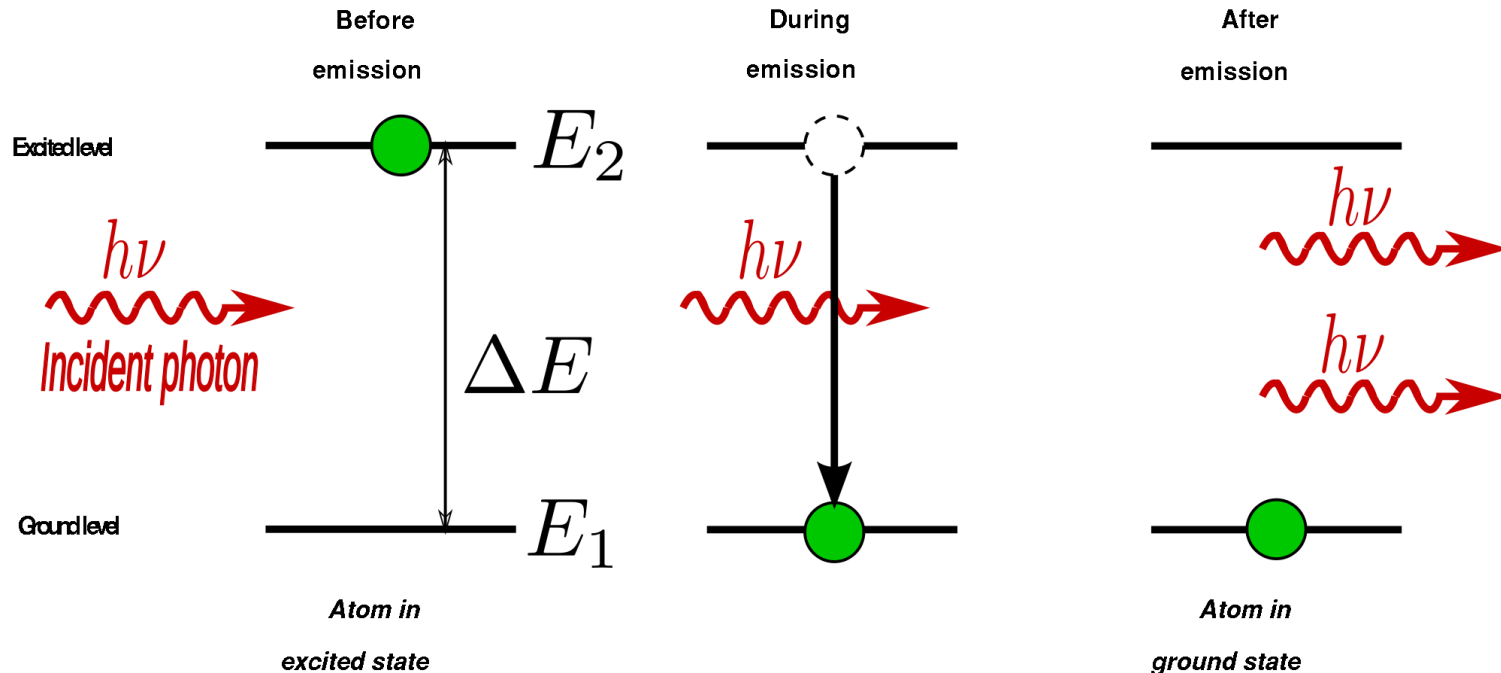
- Quase monocromática (de alguns *nm* a menos de *1 pm*)
- Pode ter divergência muito reduzida (quase colimado ~ 1 mrad)
- Elevada Coerência ($L_c \sim km$)

Qual a origem destas propriedades.?

Quais os requisitos para termos oscilação laser?

Laser

Absorção, emissão espontânea e Emissão estimulada



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Emissão estimulada introduz a coerência. Fótons com características idênticas de fase, comprimento de onda e polarização.

Requisitos para operação LASER

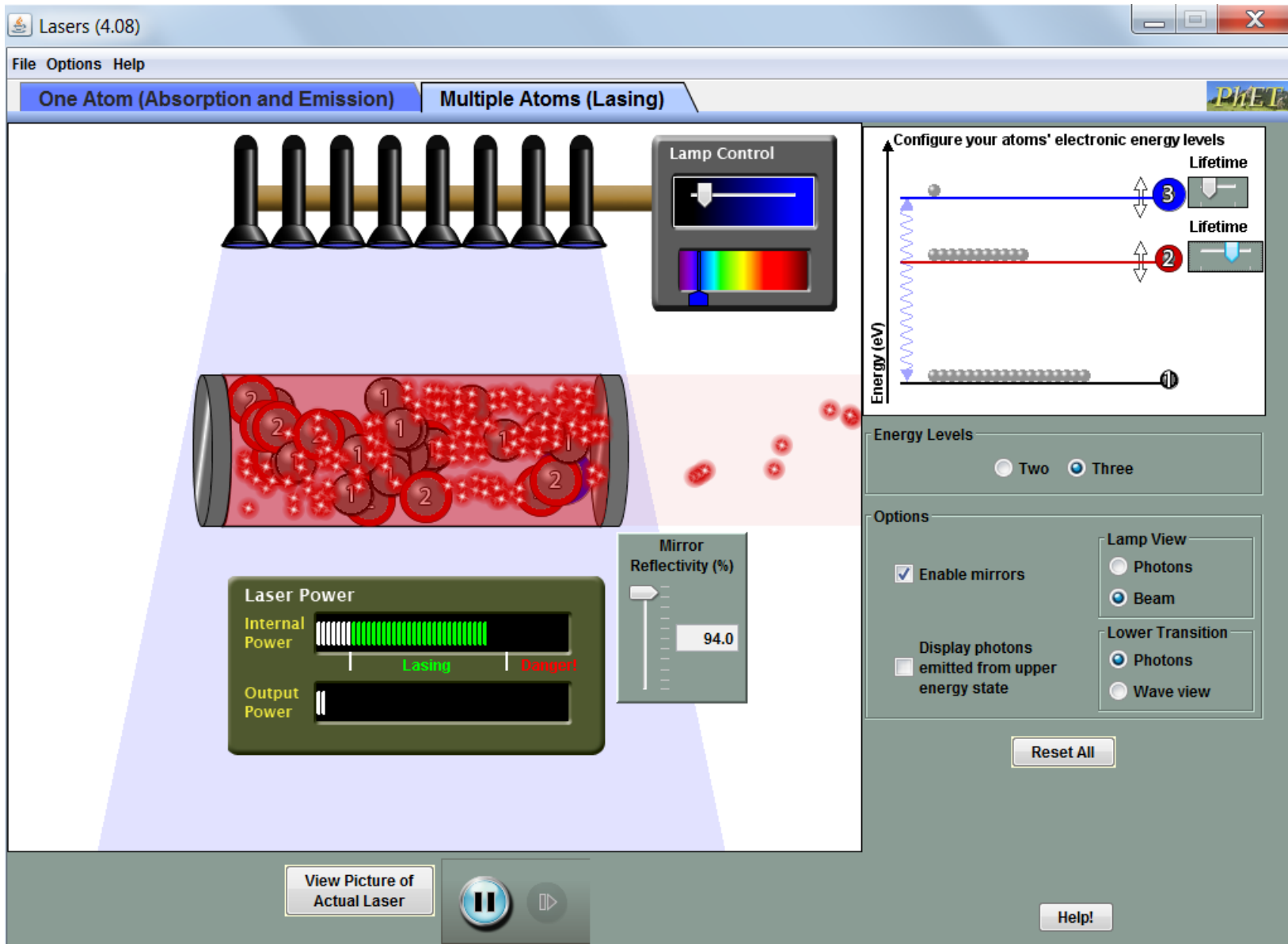
- Emissão estimulada
- Inversão de população
- Realimentação (feedback)

Fonte de excitação externa

Ganho

Tempo de vida dos níveis de energia

Vamos construir um LASER



Vamos construir um LASER

Descarregue a aplicação JAVA:

<https://drive.inesctec.pt/s/Hymp8LXNTEabDPs>

Utilize a tab “1 atom” para perceber:

- os conceitos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.
- a diferença entre sistemas de 2 e 3 níveis
- a influência dos tempos de vida na dinâmica do sistema

Utilize a Tab “Multiple atoms”, para entender os conceitos de:

- Inversão de população
- Ganho
- Realimentação ou “feedback

- 1. Coloque o LASER em modo de emissão estável.**
- 2. Coloque o LASER em modo de emissão instável até explodir!**

Conteúdos e bibliografia

Niemz Markolf H.; Laser-tissue interactions. ISBN: 978-3-540-72191-8 (Laser-tissue interactions : fundamentals and applications)

Tsia Kevin K. 340; Understanding biophotonics. ISBN: 978-981-4411-77-6

Hecht Eugene; Optics. ISBN: 0-201-11611-1

			<i>Tsia chaps</i>	<i>Niemz</i>	<i>Hecht</i>
10/2	Semana 1	Propriedades da Luz, e Fontes de luz: Lasers, LEDs, descarga. Fontes de Luz e suas propriedades: térmicas, descarga e LEDs	1.1-5, 1.10		2 3 8.1-2