Instituto de Física
USP

Física V - Aula 10

Professora: Mazé Bechara

Material para leitura – na Xerox do IF

1. *Produção e Transformação de Luz;* Albert Einstein (1905); Artigo 5 do Livro "O ano Miraculoso de Einstein" (tradução dos 05 artigos de Einstein publicados em 1905). ***Introdução de leitura indispensável***

2. ***A Natureza do Fóton*; Serge Reynaud; Scientific American Brasil – tradução da edição francesa da revista. (Xerox colorida).**

3. ***Contando Fótons de Luz;* Jean-Michel Courty e Nicolas Treps; Scientific American Brasil – tradução da revista francesa. (Xerox colorida).**

Aula 10 – Aplicação de corpo negro. Ondas eletromagnéticas. A natureza dual da radiação eletromagnética - os fótons.

1. Quando quantização de Planck coincide com Física clássica.
2. A Lei de deslocamento de Wien a partir da radiança espectral de Planck. A frequencia mais provável (que não é a frequencia do comprimento de onda mais provável).
3. A lei de Stefan Boltzmann a partir da radiança espectral de Planck.
4. Aplicação de corpo negro.
5. Um pouco (revisão?) sobre ondas eletromagnéticas:
    1. Fontes de ondas planas, cilíndricas e esféricas e as frentes de ondas.
    2. A Intensidade das ondas: distribuição espacial de energia nas frentes das ondas monocromáticas.
    3. Ascondições para se observar os padrões de interferência da lkuz.

A dedução da relação da densidade volumétrica espectral - *feita em aula)*

- A **densidade volumétrica da energia eletromagnética por unidade de elemento de comprimento de onda** em função do comprimento de onda:

$$\rho_T(\lambda) \equiv < \frac{dU_{EB}(\lambda)}{dVd\lambda} > = \frac{dN(\lambda)}{dVd\lambda} < \varepsilon_{EB} > = \frac{dN(\lambda)}{dVd\nu}\left|\frac{d\nu}{d\lambda}\right| < \varepsilon_T > = \frac{8\pi}{\lambda^4} < \varepsilon_T >$$

$\frac{dN(\lambda)}{dVd\lambda}$ é **o número de ondas estacionárias com comprimento de onda λ dentro de dλ** por unidade de volume e de dλ .

$< \varepsilon_T >$ é a **energia média da onda estacionária = média da energia de oscilação no material.**

Resultados de Planck

$$<\varepsilon_T>=\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}=\frac{h\frac{c}{\lambda}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

$$R_T(\nu)=\frac{2\pi\nu^3}{c^2}\frac{h}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \qquad R_T(\lambda)=\frac{2\pi c^2}{\lambda^5}\frac{h}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

- **Observações importantes: 1. a radiança espectral do corpo negro é contínua; 2. quando $h\nu \ll kT$, os resultados de Planck coincidem com os clássicos para a energia média de oscilador unidimensional (kT de Boltzmann) e para a radiança do corpo negro (expressão de Rayleigh-Jeans).**

Resultados de Planck

- **1. Qual a grandeza física que você conhece que tem a unidade de h: energia ×segundos?**

- **2. Será que esta grandeza h é de valor pequeno ou grande comparado com as grandezas de mesma unidade que você conhece no mundo macroscópico? (h = $6,62\times10^{-34}$J.s = h = $4,1410^{-15}$eV.s)**

Valores das energias kT, comprimentos de ondas e as energias correspondentes hν

T(K)	kT(eV)	λ(angstrons)	hν(eV)	ν (Hz)
300	0,0256	1000	12,4	3×10^{15}
1500	0,130	5000	2,5	6×10^{14}
3000	0,259	10^5=10μm	0.12	3×10^{13}
6000	0,518	5×10^6=500 μm	0,002	6×10^{11}

Cuidado: kT é a energia média de oscilação unidimensional na estatística clássica. Cada oscilador da matéria tem enrgia nhν, segundo Planck ***(Einstein vai dar um novo e importante significado ao hν! Aguarde.)***

A lei de Stefan-Boltzmann a partir da radiança espectral de Planck.

Discutido em aula. Mostre!

- **A radiança total é a integral da espectral. Geometricamente é a área sob a curva em termos da temperatura**, e portanto vale:

$$R_T = \int_0^\infty R_T(\nu)d\nu = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3}T^4 = 5{,}6705\times 10^{-8}T^4\,\frac{W}{m^2}$$

- ***Observação: Foi usado o resultado da integral (tabela):***

$$\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$$

A lei de deslocamento de Wien a partir da radiança espectral de Planck.

Discutido em aula. Mostre!

- Determinação do **comprimento de onda mais provável**, ou seja, **no máximo da radiança espectral.**

$$\frac{\partial R_T(\lambda)}{\partial \lambda} = 0$$

- **Cuidado:** se chega em **equação transcedental (não tenha medo de nome feio!)**, **que só tem solução numérica.**

$$5\frac{[e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1]}{\frac{hc}{\lambda kT} e^{\frac{hc}{\lambda kT}}} = 1 \Rightarrow \frac{hc}{\lambda kT} = 4{,}966 \Rightarrow \lambda_{+p} T = \frac{hc}{4{,}966k} = 2{,}8998 \times 10^{-3} mK$$

$$\nu(\lambda_{+p}) = c / \lambda_{+p} = 1{,}04 \times 10^{11} (Hz/K) T$$

FAÇA - *frequencia mais provável a partir da radiança espectral de Planck.*

- **Determinação da frequencia mais provável**, ou seja, no máximo da radiança espectral.

$$\frac{\partial R_T(\nu)}{\partial \nu} = 0$$

- **Cuidado: se chega em equação transcedental** (não tenha medo de nome feio!)

$$\nu_{+p} = 0{,}59 \times 10^{11} (Hz/K) T \qquad \nu(\lambda_{+p}) = c/\lambda_{+p} = 1{,}04 \times 10^{11} (Hz/K) T$$

- ***Ou seja, a frequencia mais provável não é a frequencia do comprimento mais provável! Entenda o significado físico!***

Radiação do corpo negro - Aplicação

Uma lâmpada de filamento de tungstênio de 40W em funcionamento normal tem uma temperatura de 3300K.

(a) Determine o comprimento de onda mais provável emitido pela lâmpada. Diga o seu entendimento conceitual desta grandeza.

(b) Determine numericamente a radiança nesse comprimento de onda **no sistema universal. Escreva corretamente a unidade.**

(c) A **Determine o valor da radiança total em W/m^2**. Compare este número com o da resposta anterior e **comente.**

(d) Esboce o gráfico da radiança versus o comprimento de onda, **colocando no gráfico todos os valores numéricos determinados nos itens anteriores**. Indique também no gráfico a região de luz visível.

(e) **Seria essa lâmpada um sistema eficiente para sua função de iluminar?** De onde vem tal energia da lâmpada? Como se paga por ela? Justifique.

(f) **A partir dos dados determine a área do filamento de tungstênio** da lâmpada em questão.

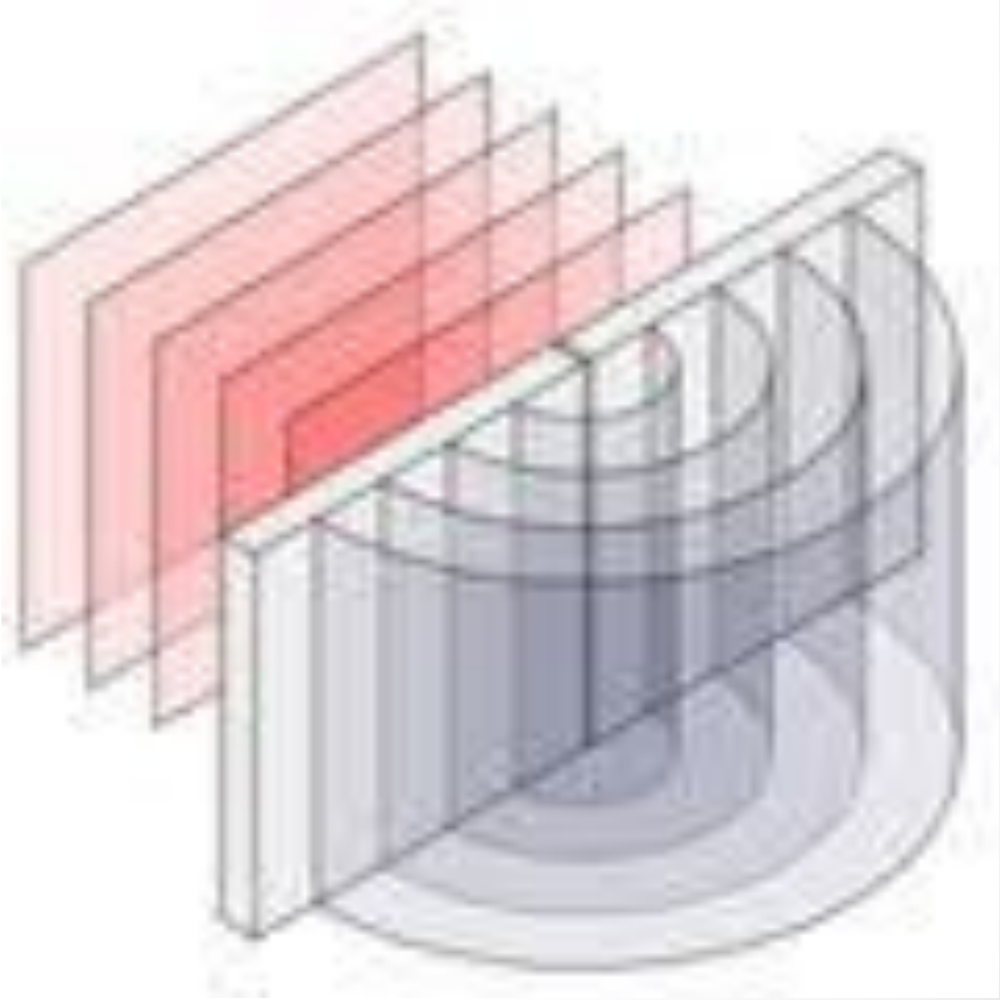
(g) Você já observou essa lâmpada quando a tensão da casa não está regular? Que cor o filamento tem? O que indica sobre o comprimento de onda mais provável. Justifique.

Ondas Eletromagnéticas planas e cilíndricas

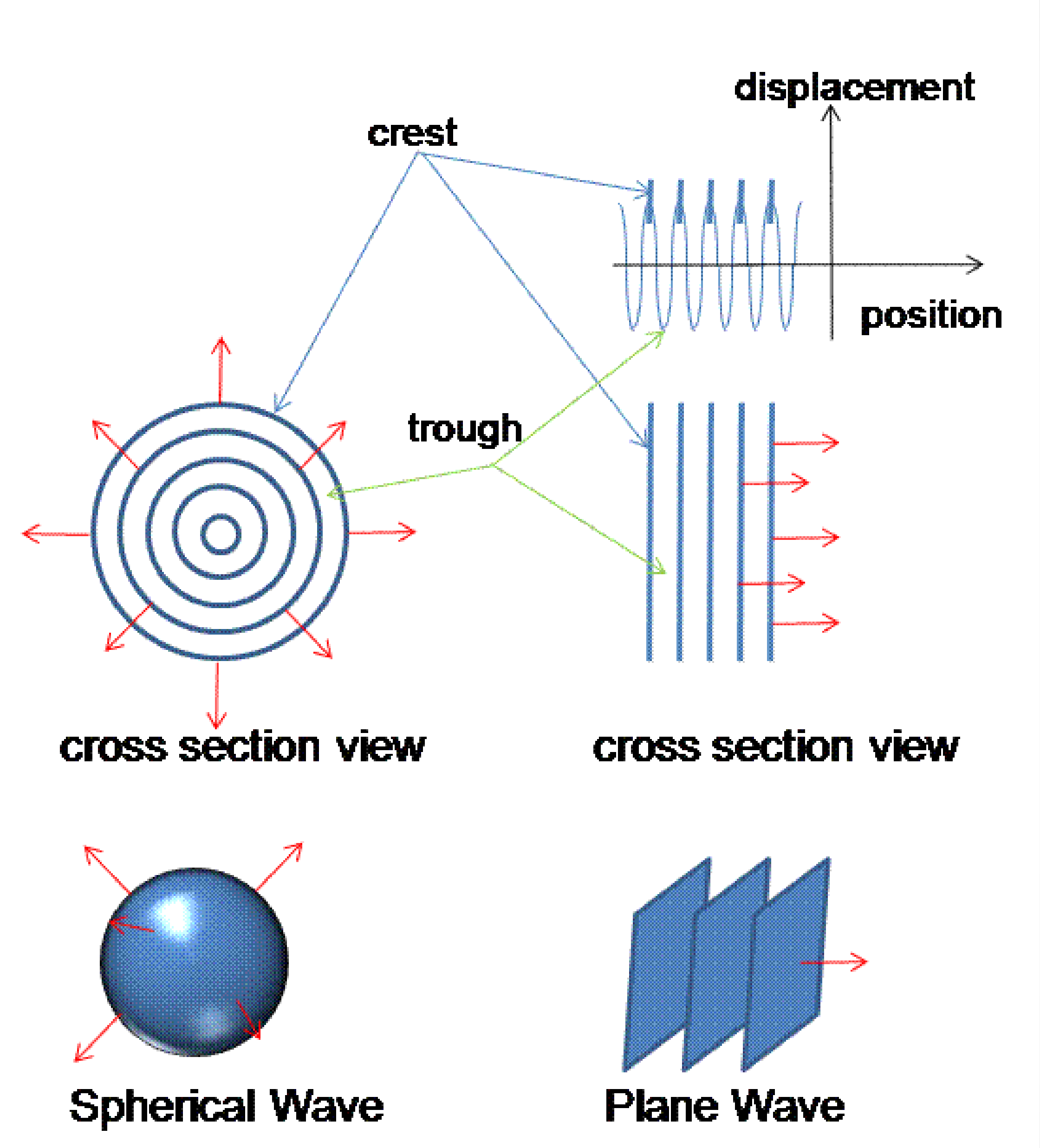
Qual a onda plana?

Qual a onda cilíndrica?

O que são as superfícies planas e cilíndricas dos desenhos?



Qual das ondas: plana, cilíndrica, ou esférica, melhor representa um [feixe de luz]()? Por que?



(Re)visão de ondas eletromagnéticas

1. Quais as grandezas que representam uma onda eletromagnética? Escreva estas grandezas no caso de uma onda monocromática, explicitando de que variáveis dependem.

2. Escreva a intensidade da uma onda plana monocromática. Esta intensidade é diferente para onda não monocromática? Explicite a dependência da intensidade no espaço, tempo e com a frequência. Justifique.

3. Idem para onda esférica. Justifique.

4. Idem para onda cilíndrica. Justifique.

Questões sobre ondas eletromagnéticas

1. Olhe para o teto. As várias lâmpadas são fontes de ondas eletromagnéticas? De que tipo: plana cilíndrica esférica ou outra? Há interferência das ondas das várias fontes da sala de aula?

2. Como se pode mostrar experimentalmente a interferência dessas fontes na sala de aula?

3. Você tem como <u>provar</u> o caráter ondulatório da luz aqui na sala de aula com estas fontes? Com outras fontes? Justifique.

4. A luz poderia ter natureza corpuscular com a observação da interferência? Justifique.

Ondas eletromagnéticas: resultados para a intensidade

1. Frentes de onda: superfícies nas quais o módulo dos campos elétrico e magnético da onda têm o mesmo módulo. Segue a simetria da fonte.

2. As intensidade são, portanto, uniformes e contínuas nas frentes de onda. Assim também a energia se distribui uniforme e continuamente sobre a superfície da frente de onda.

3. A energia gerada na fonte se propaga com velocidade c “chegando” às frentes de onda a mesma energia por unidade de tempo.

Ondas eletromagnéticas: resultados para a intensidade

4. Assim, na frente de onda plana a intensidade é a mesma em todas as frentes de onda, já que as áreas nas quais a energia se distribui são iguais.

5. Nas ondas cilíndricas, a intensidade cai com o inverso da distância à fonte, porque a energia se distribui sobre a área $2\pi rh$, onde r é a distância à fonte.

6. A Intensidade das ondas esféricas cai com o inverso da distância ao quadrado à fonte, já que a energia eletromagnética gerada deve se distribuir na área de uma superfície esférica $4\pi r^2$.

Ondas eletromagnéticas: resultados para a intensidade

7. **A intensidade de ondas monocromáticas independe da frequencia das ondas.**

A intensidade das fontes de luz de mesma potência segundo Maxwell

$$I = < \frac{\left|\vec{E}(\vec{r},t)\times\vec{B}(\vec{r},t)\right|}{\mu_o} >_t = \frac{E_o^2(r)}{2\mu_o c}$$

- **Para onda plana (feixe):**

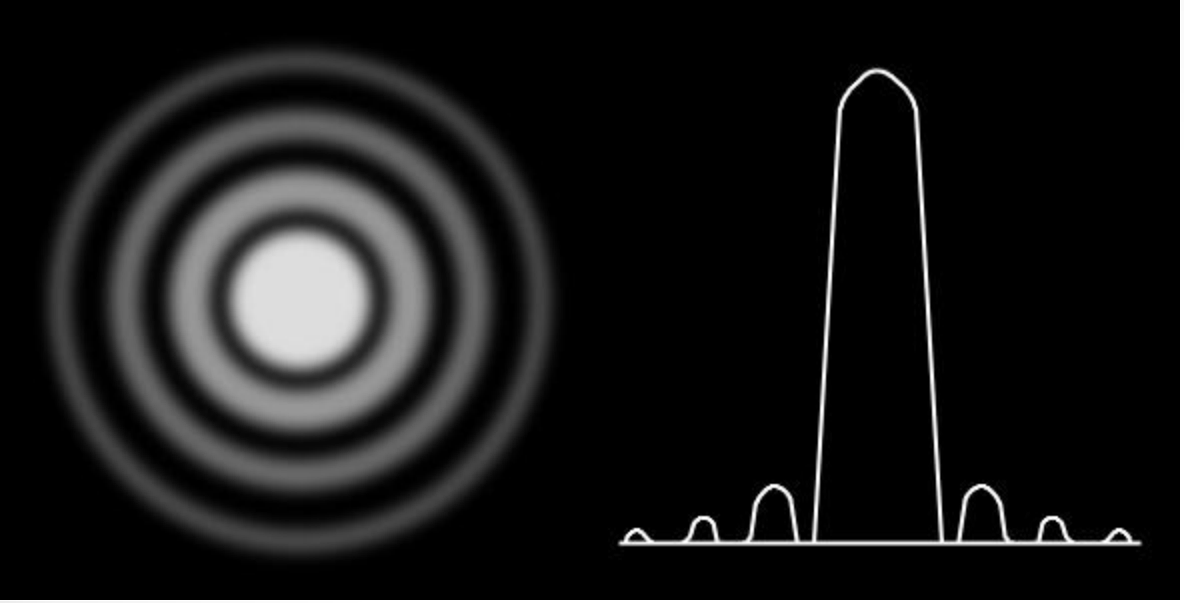
$$E = E_o = cte \quad \Rightarrow \quad I == \frac{E_o^2}{2\mu_o c}$$

- **Para onda cilíndrica:**

$$E(r) = \frac{E_o}{\sqrt{r}} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{E_o^2}{2\mu_o c r}$$

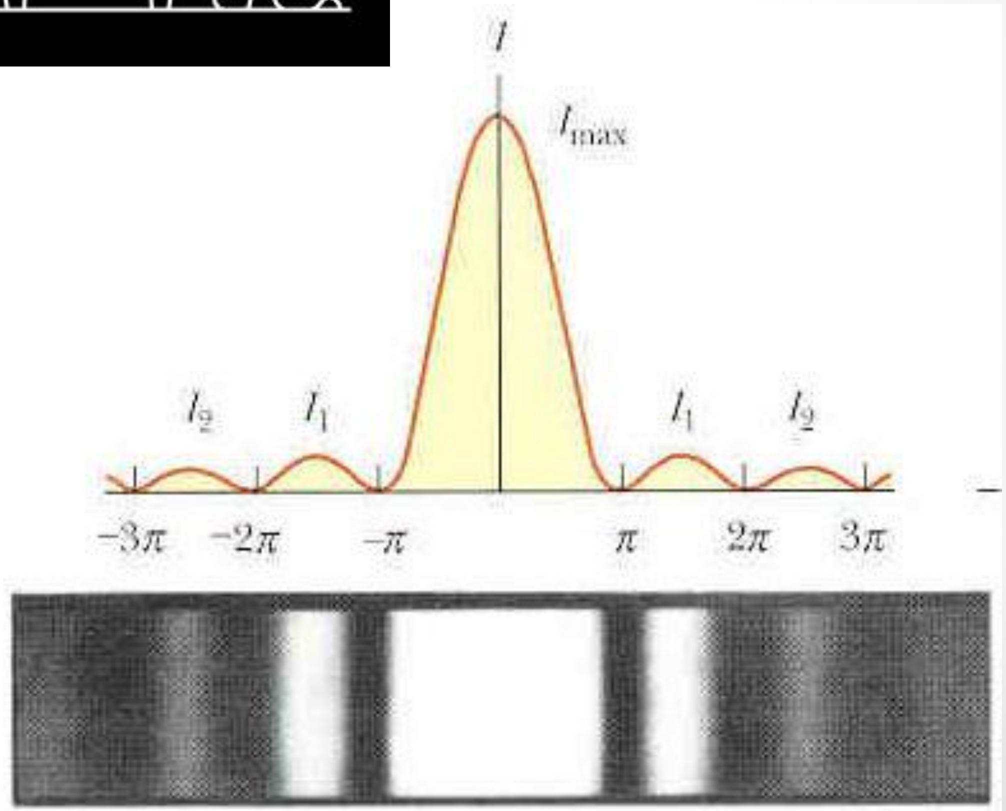
- **Para onda esférica:**

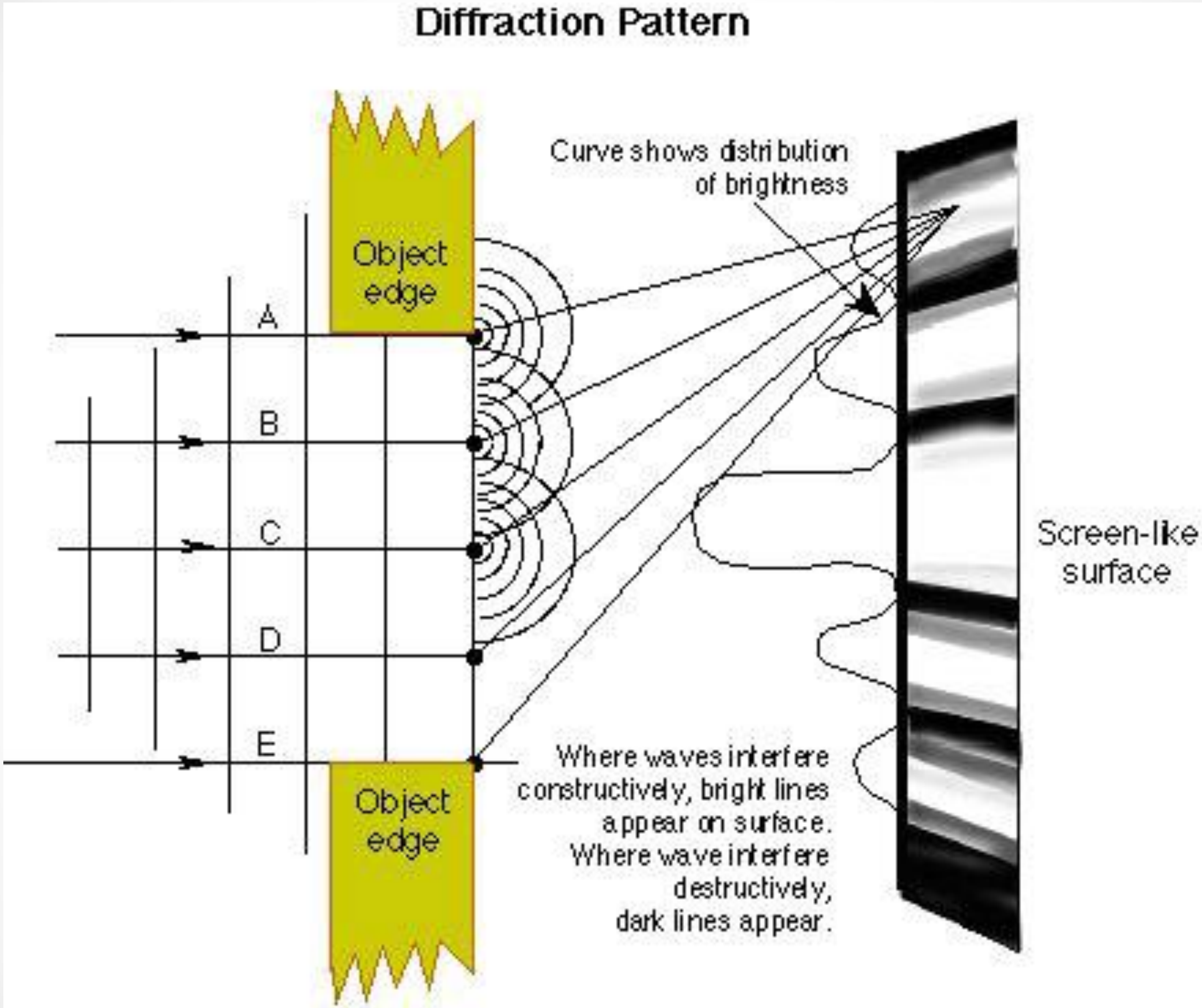
$$E(r) = \frac{E_o}{r} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{E_o^2}{2\mu_o c r^2}$$



A “impressão digital” de uma onda: padrões de interferência.

Nas figuras são mostrados os padrões de difração de OEM, por um orifício circular (acima) e por uma fenda vertical (ao lado).




Diffraction Pattern
Object edge
A
B
C
D
E
Object edge
Curve shows distribution of brightness
Screen-like surface
Where waves interfere constructively, bright lines appear on surface. Where wave interfere destructively, dark lines appear.