Instituto de Física USP

Física V - Aula 11

Professora: Mazé Bechara

Aula 11 – Aplicação de corpo negro. Ondas eletromagnéticas.

1. Aplicação de corpo negro.

2. Um pouco sobre ondas eletromagnéticas:
   - Fontes de ondas planas, cilíndricas e esféricas e as frentes de ondas - qualitativamente.
   - A Intensidade das ondas: distribuição espacial de energia nas frentes das ondas monocromáticas.
   - As condições para se observar os padrões de interferência da luz - qualitativamente.

3. A proposta de Einstein de granulação na energia da onda eletromagnética: as *partículas da onda - os fótons.* Distinguindo a quantização de Einstein da de Planck.

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.**

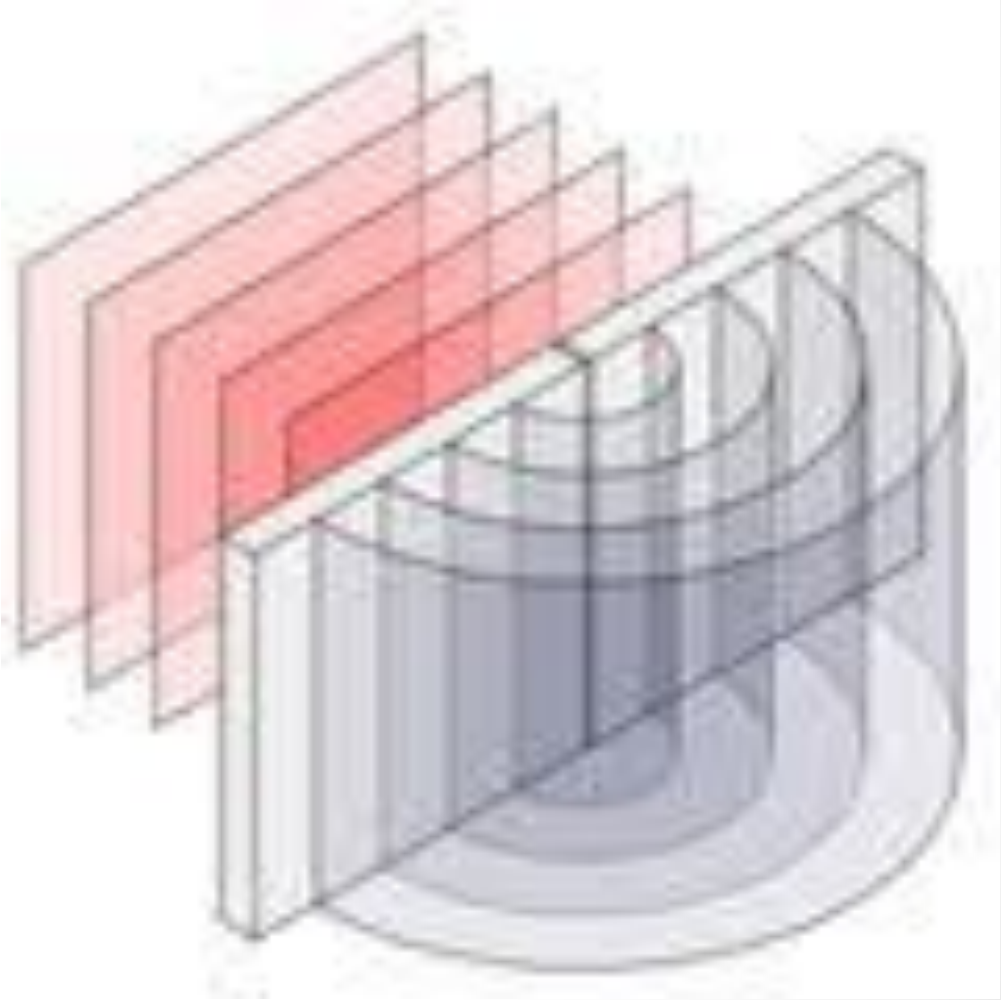
(c) A **Determine o valor da radiança total em W/m²**. Compare este número com o da resposta anterior e **comente.**

(d) **Esboce o gráfico da radiança versus o comprimento de onda**, **colocando no gráfico todos os valores numéricos determinados nos itens anteriores** e mais a intensidade no entorno do comprimento de onda mais provável. 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.

Ondas Eletromagnéticas planas e cilíndricas

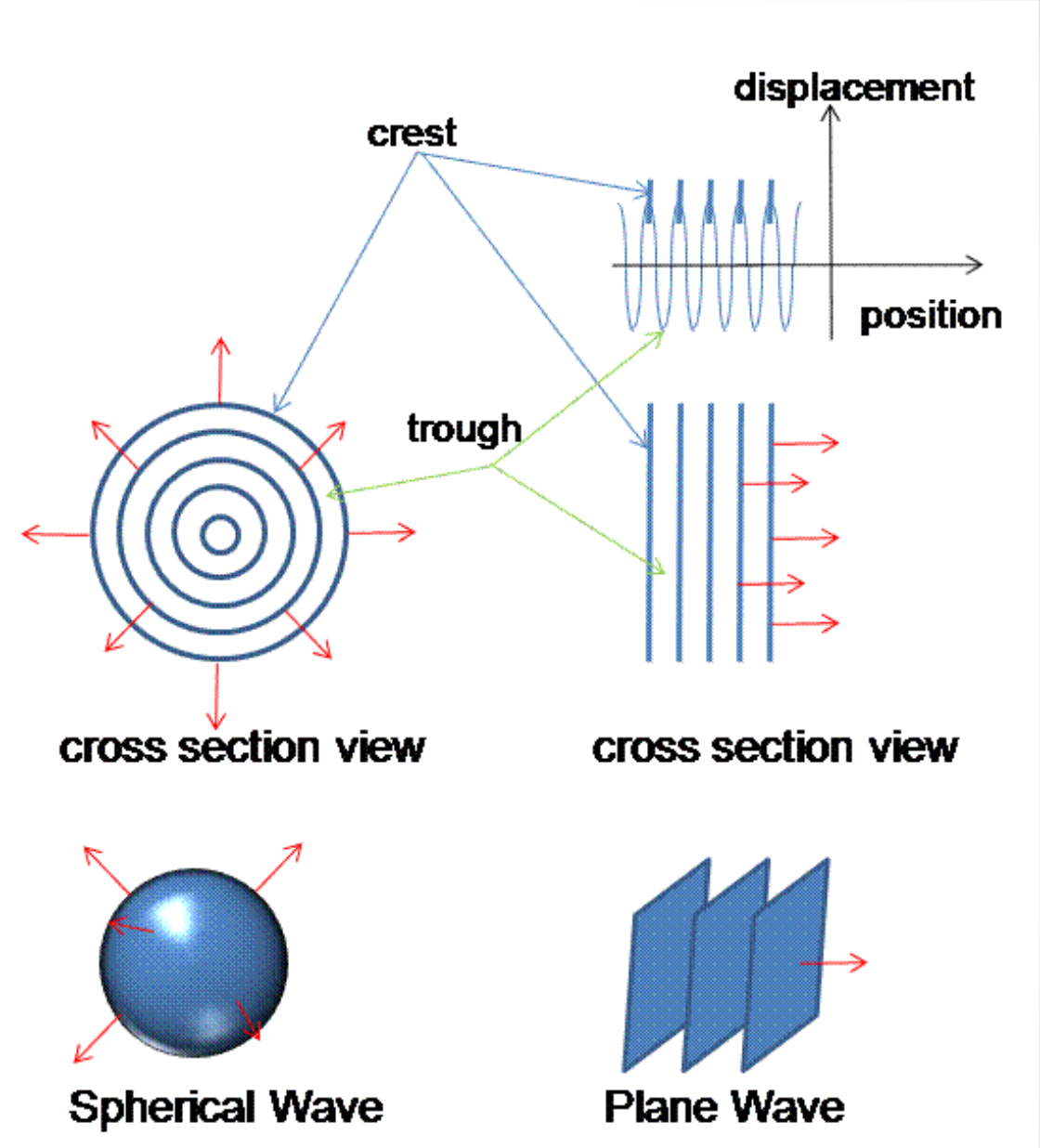


Qual a onda plana?

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.**

As ondas monocromáticas segundo Maxwell

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

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_o \cos(kx - wt)$$

$$\vec{B}(x,t) = \hat{B}_o \frac{E_0}{c} \cos(kx - wt)$$

$$\vec{c} = \frac{w}{k}\vec{i} = \lambda \nu \vec{i}$$

$$\vec{E}_o \perp \hat{B}_o \perp \vec{c}$$

$$\vec{c} \perp \vec{E}_o$$

As ondas monocromáticas segundo Maxwell

- **Para onda cilíndrica**

$$\vec{E}(r,t) = \frac{\vec{E}_o}{\sqrt{r}}\cos(kr - wt)$$

$$\vec{B}(r,t) = \hat{B}_o \frac{E_0}{\sqrt{rc}}\cos(kr - wt)$$

$$\vec{c} = \frac{w}{k}\hat{r} = \lambda \nu \hat{r}$$

$$\vec{E}_o \perp \hat{B}_o \perp \vec{c}$$

$$\vec{c} \perp \vec{E}_o$$

r é a distância ao eixo do cilindro, e $\hat{r}$ é o versor na direção perpendicular ao eixo do cilindro.

As ondas monocromáticas segundo Maxwell

- **Para onda esférica**

$$\vec{E}(r,t) = \frac{\vec{E}_o}{r}\cos(kr - wt)$$

$$\vec{B}(r,t) = \hat{B}_o \frac{E_0}{rc}\cos(kr - wt)$$

$$\vec{c} = \frac{w}{k}\hat{r} = \lambda \nu \hat{r}$$

$$\vec{E}_o \perp \hat{B}_o \perp \vec{c}$$

$$\vec{c} \perp \vec{E}_o$$

r é a distância à origem do sistema de coordenadas e $\hat{r}$ é o versor na direção radial em relação à origem.

A intensidade das fontes de luz 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):**

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

- **Para onda cilíndrica:**

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

- **Para onda esférica:**

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

Ondas eletromagnéticas: nomenclatura e 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 (no vácuo ou ar)** "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

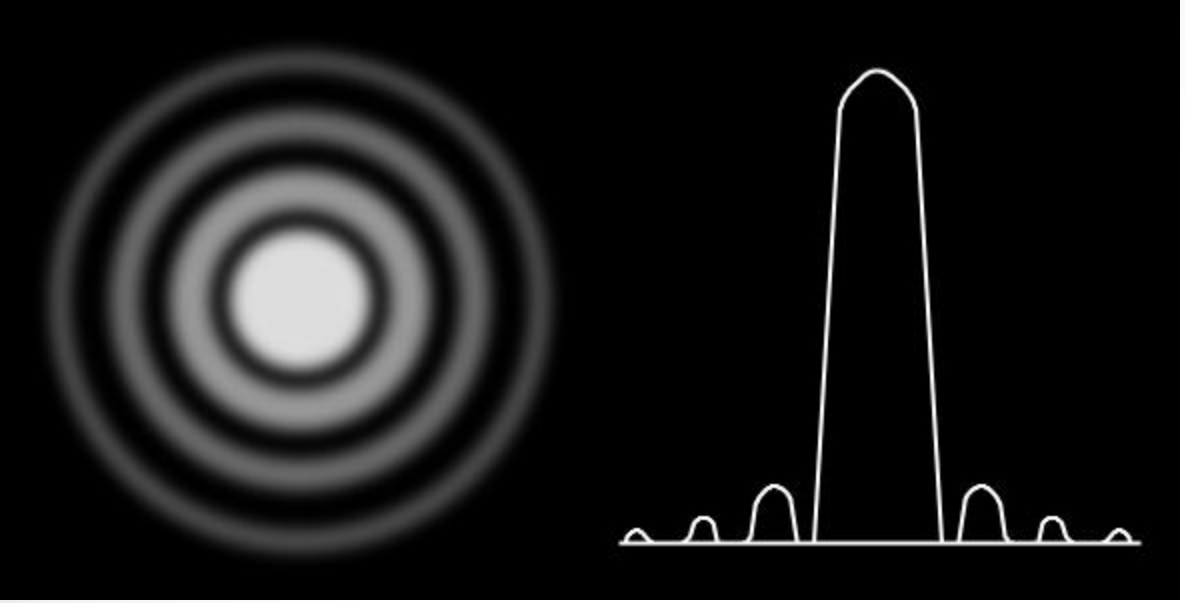
7. **A intensidade de ondas monocromáticas independe da frequencia das ondas em qualquer tipo de onda.**

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?**

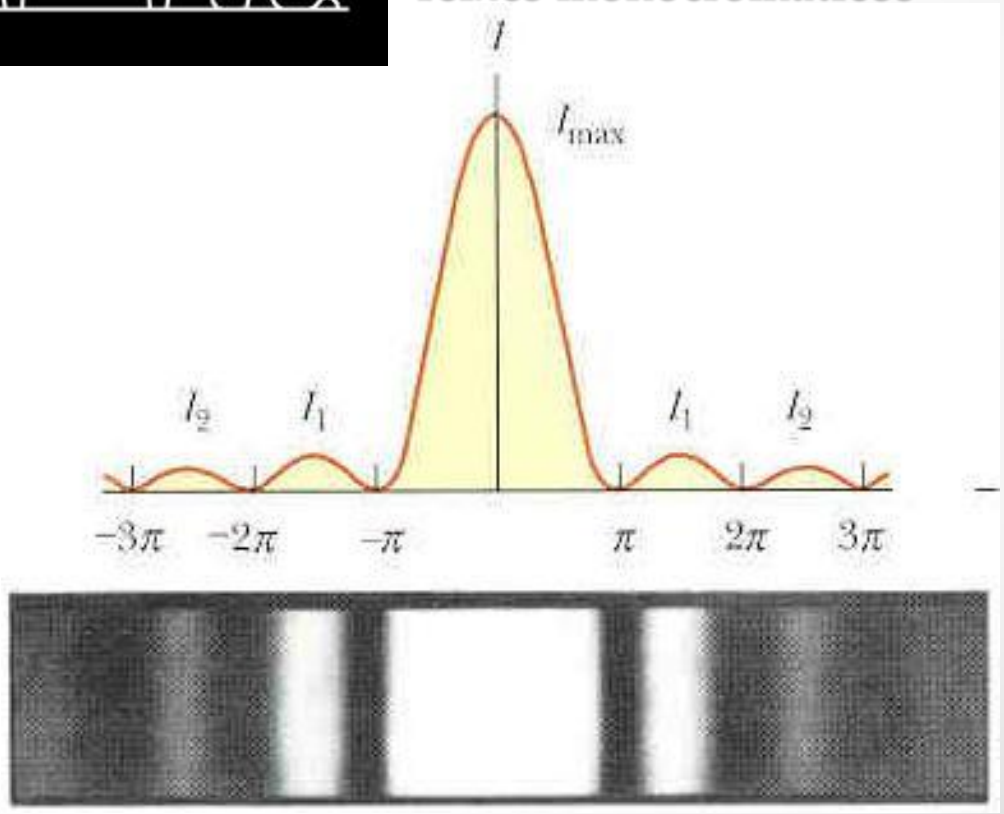
2. **A luz poderia ter natureza corpuscular com esta observação da interferência das várias fontes da sala? Justifique.**

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



A difração só é observada se o objeto difrator tiver dimensão da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz.

O efeito é mais evidente para feixes monocromáticos



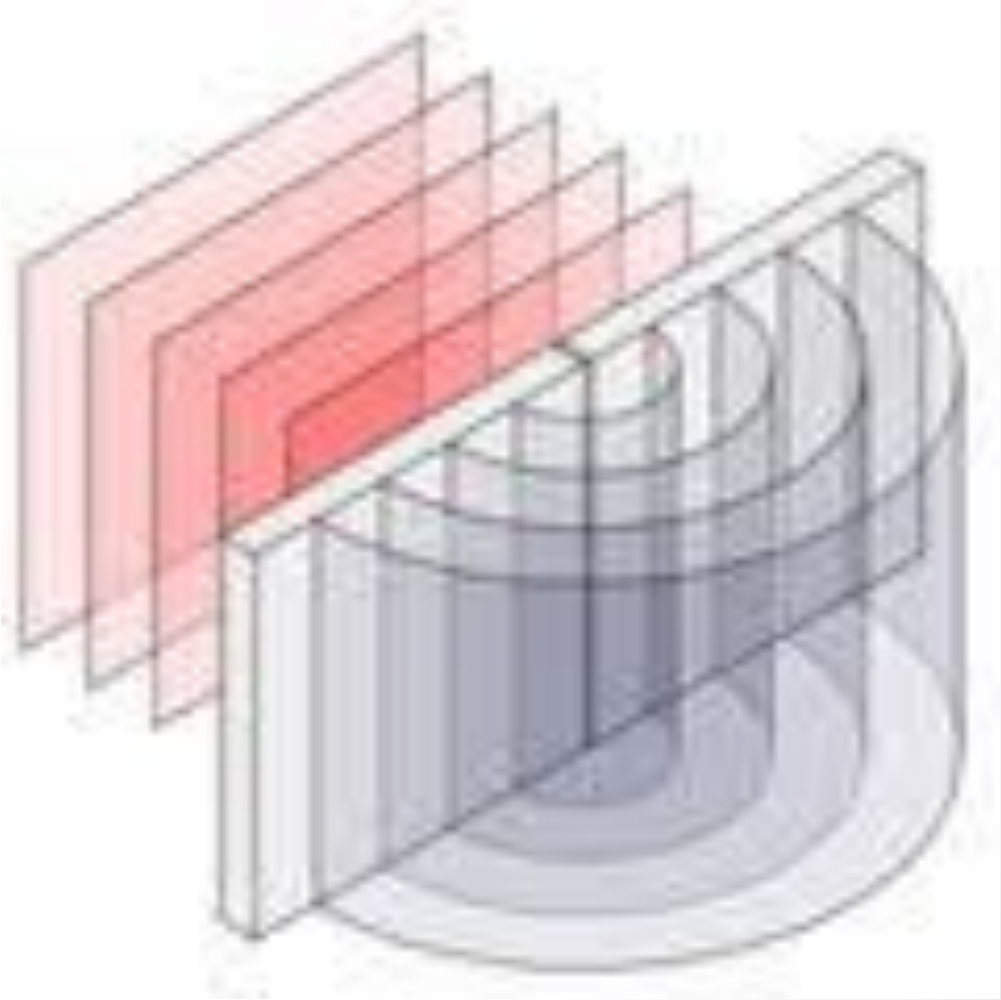
A "impressão digital" de uma onda: padrões de interferência.

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

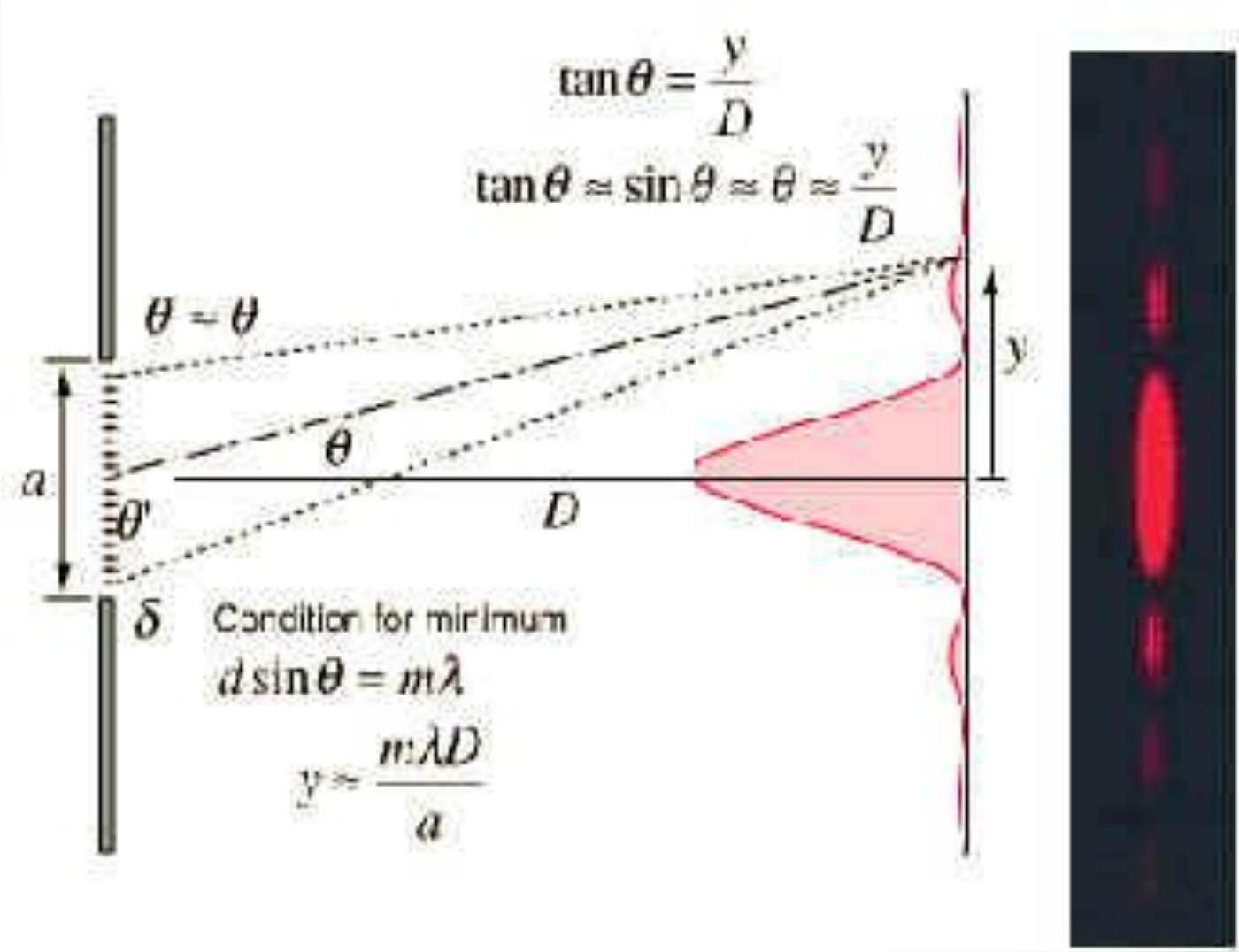
Ondas Eletromagnéticas planas e cilíndricas

Onda cilíndrica quando a espessura da fenda é muito menor do que o comprimento de onda.

Em um anteparo plano muito distante da fenda (raio de curvatura muito grande na frente de onda), a intensidade é praticamente constante.



Para se fazer a conta e se chegar na condiçao para se observar o padrão de difração: onda monocromática e largura do objeto da oradem de grandeza do comprimento de onda da luz.



Veja nos textos de Física IV.

Albert Einstein (1879 –1955) – físico alemão - prêmio Nobel de Física em 1921

Foto de Einstein por volta de 1905

ARTIGO 5

Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz

HÁ UMA profunda diferença formal entre os conceitos teóricos que os físicos formaram a respeito dos gases e de outros corpos ponderáveis e a teoria de Maxwell dos processos eletromagnéticos no assim chamado espaço vazio. Embora consideremos o estado de um corpo como completamente determinado pelas posições e velocidades de um número muito grande mas ainda assim finito de átomos e elétrons, fazemos uso de funções espaciais contínuas para determinar o estado eletromagnético de um volume no espaço, de modo que um número finito de quantidades não pode ser considerado como suficiente para a determinação completa do estado eletromagnético do espaço. De acordo com a teoria de Maxwell, a energia é considerada uma função espacial contínua para todos os fenômenos puramente eletromagnéticos, e, portanto, também para a luz, enquanto, de acordo com o ponto de vista atual dos físicos, a energia de um corpo ponderável deve ser representada como uma soma sobre os átomos e elétrons. A energia de um corpo ponderável não pode ser dividida em um número arbitrariamente grande de partes arbitrariamente pequenas, mas, de acordo com a teoria de Maxwell (ou, de modo mais geral, de acordo com qualquer teoria ondulatória), a energia de um raio de luz, emitido de uma fonte puntiforme, espalha-se continuamente sobre um volume sempre crescente.

A teoria ondulatória da luz, que opera com funções espaciais contínuas, provou-se sobremaneira adequada na

descrição de fenômenos puramente ópticos, e provavelmente nunca será substituída por outra teoria. Deve-se ter em mente, porém, que as observações ópticas referem-se a médias temporais, e não a valores instantâneos; e é bastante concebível, a despeito da confirmação experimental completa da teoria da difração, reflexão, refração, dispersão, etc., que a teoria da luz, operando com funções espaciais contínuas, leve a contradições quando aplicada aos fenômenos de emissão e transformação da luz.

De fato, parece-me que as observações da "radiação de corpo negro", fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta e outros fenômenos associados à emissão ou transformação da luz podem ser mais facilmente entendidas se admitirmos que a energia da luz é distribuída de forma descontínua no espaço. De acordo com a hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais.

Neste trabalho, desejo apresentar a cadeia de raciocínios e citar os fatos que me levaram por esse caminho, na esperança de que a abordagem aqui apresentada venha a se mostrar útil para alguns pesquisadores em suas investigações.

Do livro: O Ano Miraculoso de Einstein
cinco artigos que mudaram a face da Física

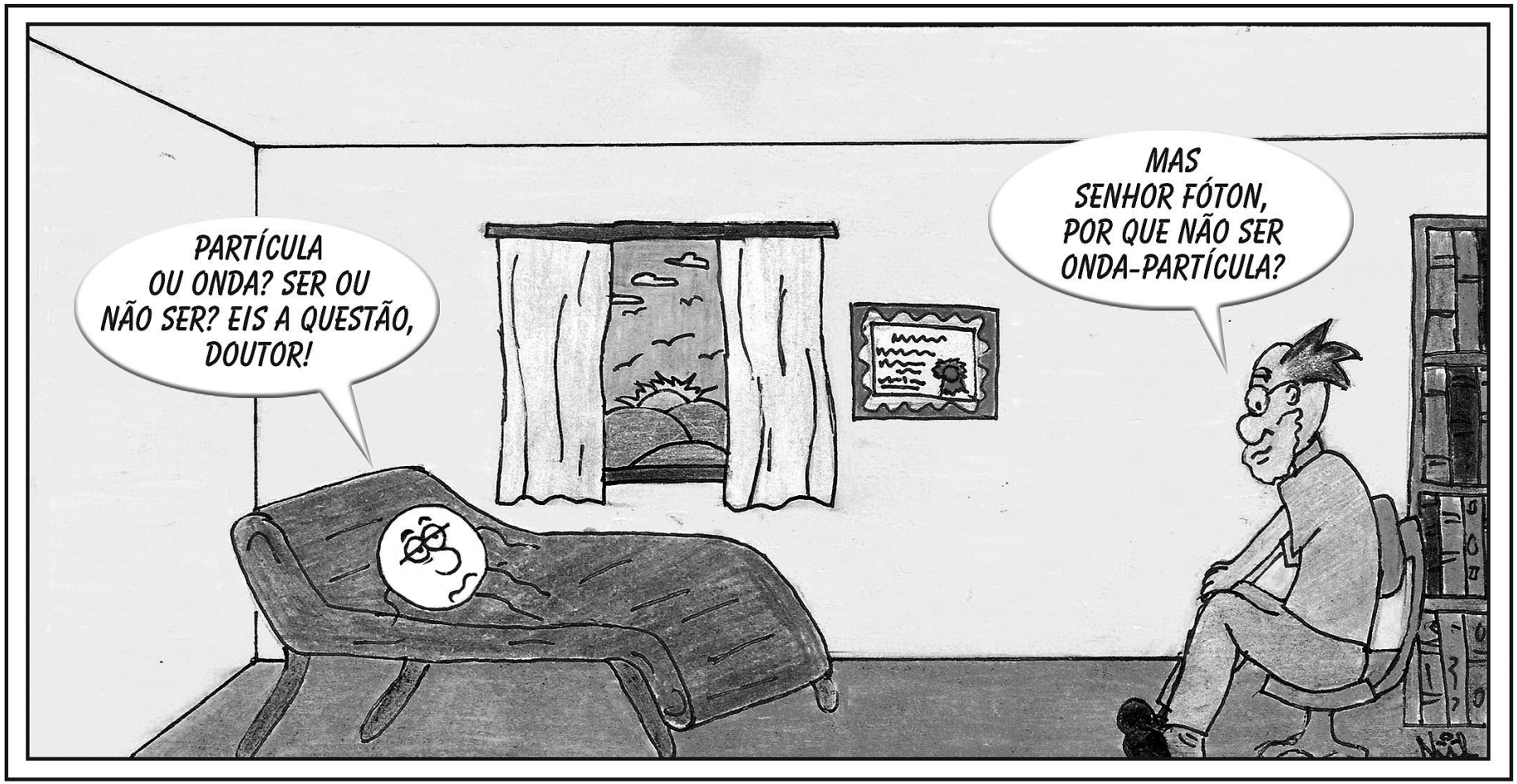


Figura do *livro de* Francisco Caruso e Vitor Oguri

Relações entre as grandezas corpusculares (ε, p) dos fótons, partículas de massa zero, e as grandezas (ν,λ) da onda eletromagnética

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = pc$$

$$\Rightarrow p = \frac{h}{\lambda}$$

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4} = pc$$

Fótons: $m_o = 0$

Planck e Eisntein e suas quantizações

- **Para Planck: a energia dos osciladores na matéria é que eram quantizadas $\varepsilon = nh\nu$ n =0,1,2,3...no interior da matéria. Assim, ao oscilar com dada frequencia, era emitida com mesma frequencia, o que acarretava a perda de energias na oscilação igual a números inteiros de frequencia, que se transformavam em energias das ondas eletromagnéticas no interior da matéria $\varepsilon = \Delta nh\nu$.**

- **Para Eisntein: a energia eletromagnética, onde quer que se encontre, independentemente de onde foi produzida, tem energia quantizada: $\varepsilon = h\nu$. Ou seja, a onda que entrou para aquecer o corpo já tinha os quanta de energia, promovendo saltos quantizados na energia dos osciladores na matéria.**