

# Origens do conceito de fóton

Vitor Oguri

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias

Instituto de Física Armando Dias Tavares

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

# Sumário

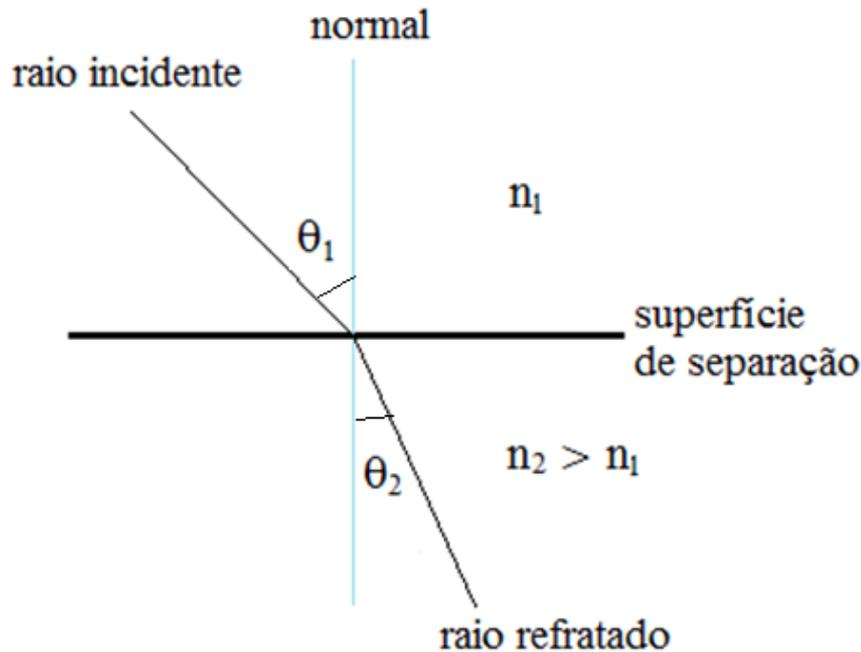
- **A Óptica Geométrica**
- **Fenômenos ondulatórios**
- **A luz como um fenômeno ondulatório**
- **A descrição eletromagnética da luz**
- **O espectro da radiação do corpo negro**
- **Einstein e a quantização da luz**
- **O efeito Compton**

# A Óptica Geométrica

- antigos gregos
  - som  $\Leftrightarrow$  audição
  - luz  $\Leftrightarrow$  visão
  - olho recebe imagens como feixes de partículas (atomistas)
  - olho envia raios contínuos de luz sobre os objetos (pitagóricos)
  - Euclides fundamenta os fenômenos luminosos na Geometria

# A Óptica Geométrica

- Snell (1621)  $\Rightarrow$  lei da refração

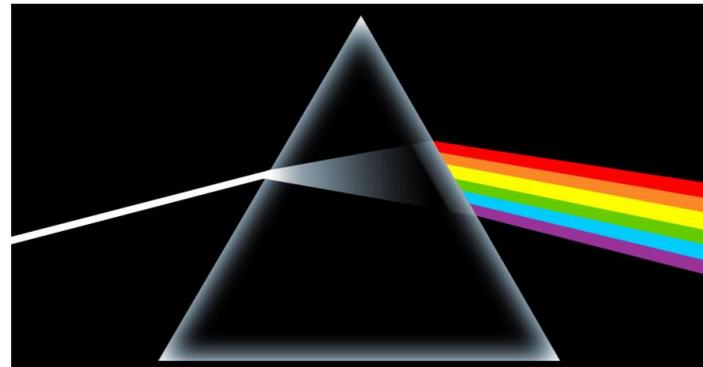


$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Fermat (1657)  $\Rightarrow$  princípio do tempo mínimo  
“A natureza sempre atua pelos caminhos e meios mais simples e mais rápidos.”
- Newton (1657): decompõe a luz solar em raios de várias cores pela refração em um prisma

# A Óptica Geométrica

“Tendo escurecido meu quarto e feito um pequeno orifício na minha cortina, para permitir a entrada de uma quantidade suficiente de luz do Sol, coloquei meu prisma próximo à entrada de luz, de forma que ela pudesse ser refratada sobre a parede oposta.”



# Fenômenos ondulatórios – equação de onda

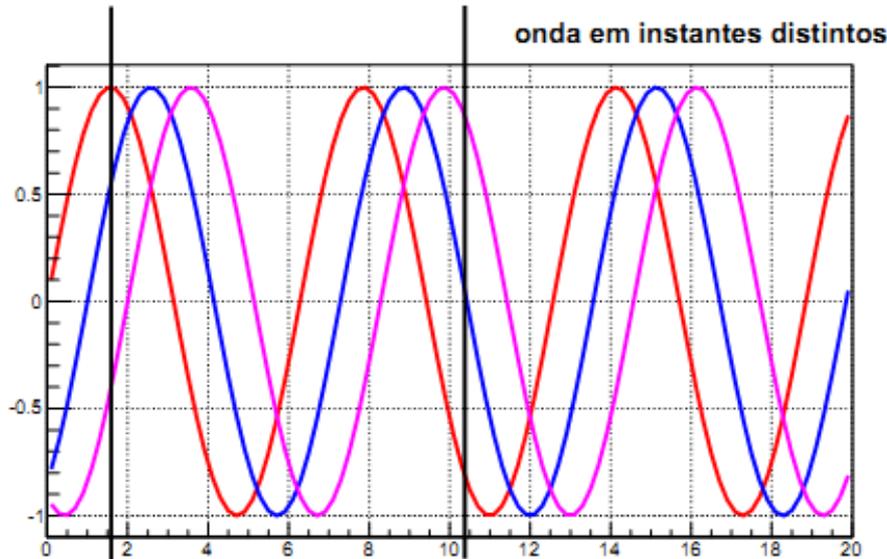
- A equação de onda de d'Alambert
  - fenômenos acústicos se caracterizam pela transferência de energia de uma região a outra em um líquido, sólido ou gás
  - **resultam da comunicação dos movimentos de vibração, em última instância, dos átomos do meio**
  - apesar da natureza discreta da matéria, o efeito pode ser descrito por alterações ou perturbações de algumas propriedades do meio, tais como: pressão de um gás, ou deslocamento dos pontos de uma corda elástica
  - **perturbações são representadas por funções contínuas da posição ( $x$ ) e do tempo ( $t$ ): funções de onda –  $\Psi(x, t)$**
  - funções de onda obedecem a equação de onda

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(x, t)$$

$v$  – velocidade de propagação

# Fenômenos ondulatórios – ondas monocromáticas

- ondas monocromáticas : perfil periódico e harmônico



$$\Psi(x, t) = A \operatorname{sen} 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \nu t \right)$$

$A$  - amplitude

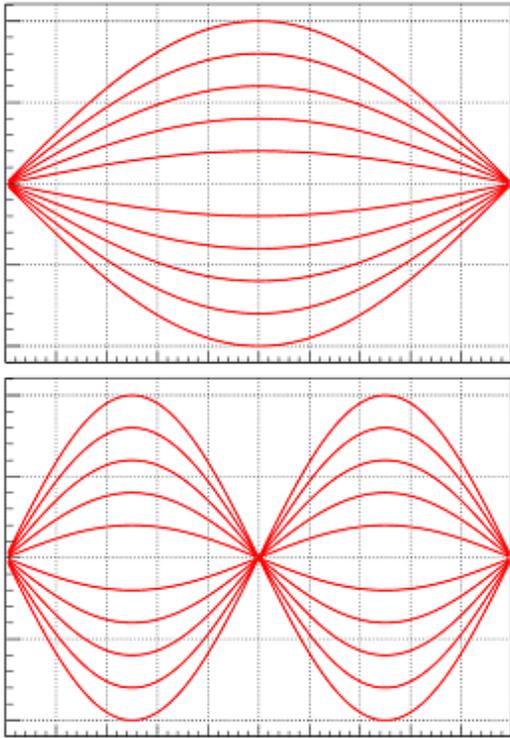
$\lambda$  - comprimento de onda

$\nu$  - frequência

- propagação no sentido positivo do eixo  $x$ , com velocidade  $v = \lambda \nu$
- intensidade da onda:  $I \sim A^2$

# Fenômenos ondulatórios – ondas estacionárias

## modos normais de vibração



$$\Psi_n(x, t) = \text{sen} \left( \frac{2\pi x}{\lambda_n} \right) \cos 2\pi\nu_n t$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \Rightarrow \quad \nu_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

$$\{\lambda_n, \nu_n\} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \text{sen} \left( \frac{2\pi}{\lambda_n} x \right) \cos 2\pi\nu_n t$$

(solução geral)

energia:  $E = \sum_{n=1}^{\infty} \epsilon_n$  → energia de cada modo

modos normais comportam-se como componentes independentes que transportam a energia de uma onda

# A luz como um fenômeno ondulatório

- som – efeito produzido por perturbações da pressão ou da densidade do ar, que fazem vibrar os tímpanos com frequências de 20 Hz a 20 kHz.

Os fenômenos ópticos ora eram considerados ondulatórios, ora corpuscular.

- Descartes (1664)
  - não acredita no vazio
  - compara a propagação da luz com a do som
  - considera a luz como uma pressão transmitida através de um meio perfeitamente elástico: o éter
  - o éter de tão rarefeito seria capaz de penetrar em todos os corpos sem ser percebido

# A luz como um fenômeno ondulatório

- polêmica sobre a natureza da luz se estende até o séc. XIX

- corpuscular x ondulatória

- Grimaldi (1665) - difração

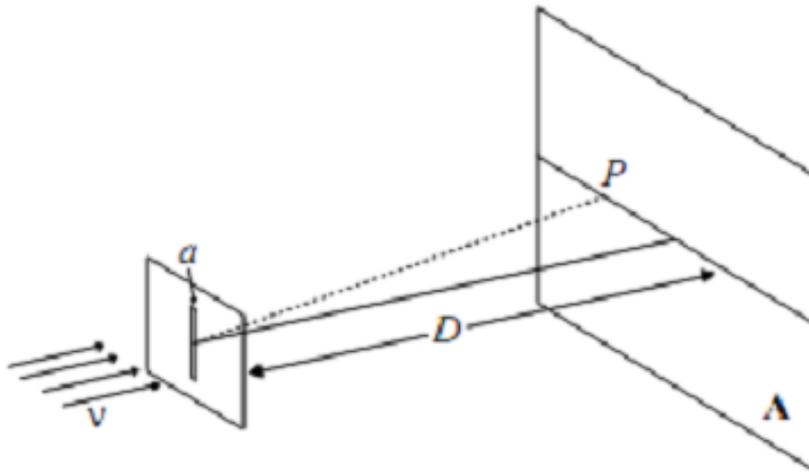
“a luz se propaga (...) não só diretamente, refrativamente e por reflexão, mas também em um certo outro modo, difrativamente.”

- séc. XIX: experimentos de difração e interferência

- o éter é resgatado pelos partidários da visão ondulatória

# A luz como um fenômeno ondulatório - difração

## Difração por uma fenda



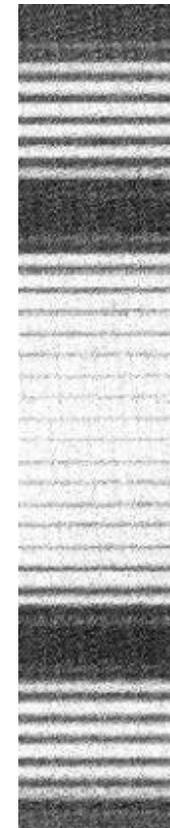
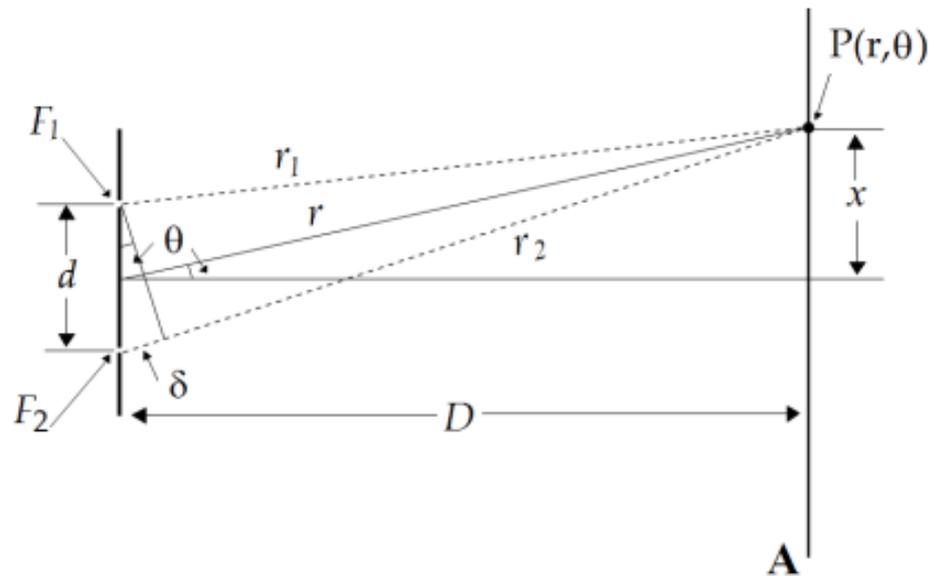
(franjas claras e escuras)



**padrão de franjas claras e escuras resulta da superposição de um grande número de ondas de mesmo comprimento de onda, que foram difratadas pela fenda, em uma dada região do espaço.**

# A luz como um fenômeno ondulatório - interferência

## Experimento da dupla fenda de Young



- O padrão de interferência resulta da superposição de ondas que alcançam o anteparo por dois caminhos
- Se a diferença de marcha ( $\delta$ ) for um múltiplo inteiro do comprimento de onda ( $\lambda$ ),

$$\delta = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

a interferência é construtiva (franjas claras)

# A descrição eletromagnética da luz

- Maxwell (1865)

- campos eletromagnéticos obedecem a equação de ondas
- **propagam-se no vácuo com velocidade da luz**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad \begin{array}{l} \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \\ \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \end{array} \quad c \simeq 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- propagam-se em um meio dielétrico com velocidade

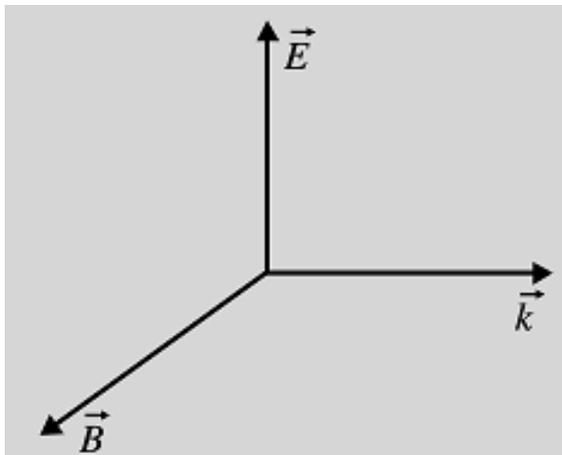
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon}}$$

- **índice de refração de um meio ( $n=c/v$ )**

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

# A descrição eletromagnética da luz

- fenômenos eletromagnéticos e ópticos têm a mesma natureza
- **ondas eletromagnéticas são transversais**

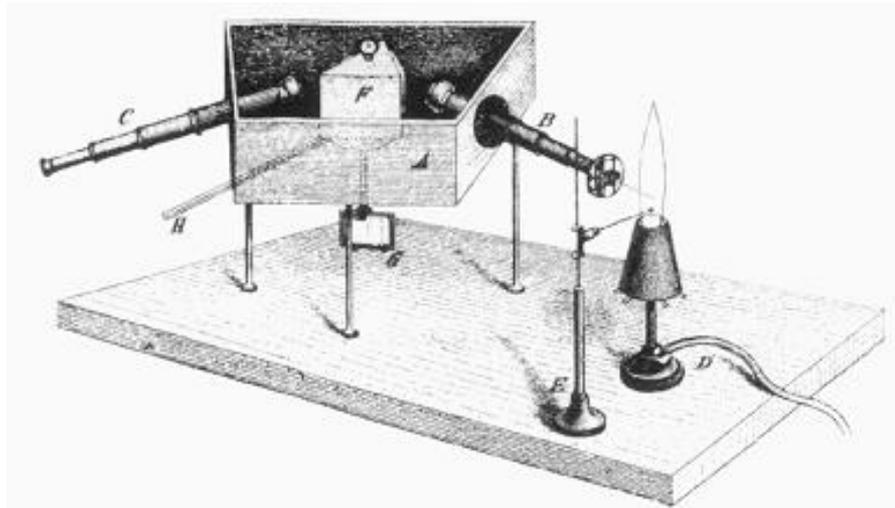


Tipo de Radiação	Frequência $\nu$ (Hz)	Comprimento de onda ( $\lambda$ )
Microondas	$10^9 - 10^{12}$	(300 – 0.3) mm
Infravermelho	$10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	(300 – 0.8) $\mu\text{m}$
Luz (visível)	$(4.3 - 5.7) \times 10^{14}$	(0.8 – 0.4) $\mu\text{m}$
Ultravioleta	$5.7 \times 10^{14} - 10^{16}$	(0.4 – 0.03) $\mu\text{m}$
Raios X	$10^{16} - 10^{19}$	(300 – 0.3) Å

- intensidade proporcional ao quadrado da amplitude
- **ondas eletromagnéticas transportam energia e momentum**
- exercem pressão ao incidir sobre uma superfície

# Espectroscopia óptica

- Kirchhoff (1860) - Espectroscopia óptica



- espectro de linhas

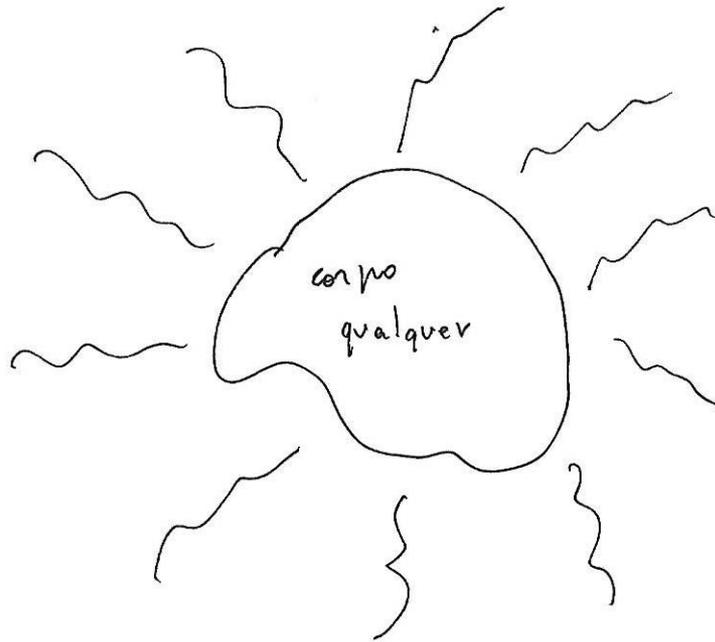


- espectro de bandas



# O espectro de radiação do corpo negro

## Radiação Térmica



radiação eletromagnética -

- incidente
- refletida
- absorvida
- transmitida
- emitida ( $T < 500^{\circ}\text{C} \Rightarrow \lambda \sim 100 \mu\text{m}$ )  
/ infravermelho (não visível)

intensidade ( $I$ )  $\sim$  densidade de energia ( $u$ )

$$\text{W/m}^2 = \text{J/s.m}^2$$

$$\text{J/m}^3$$

potência ( $P$ ) = intensidade ( $I$ ) x área ( $S$ )

# O espectro de radiação do corpo negro

- Resultados dos experimentos de Kirchhoff (1854–1859)
  - maior parte da radiação emitida por sólidos abaixo de 500°C está na região não visível (infravermelho –  $\lambda \sim 100\mu\text{m}$ )
  - perda de energia pode ser compensada por corpos vizinhos
  - em equilíbrio térmico: taxa de emissão = taxa de absorção
  - razão entre intensidade ( $I$ ) da radiação emitida e fração de energia absorvida ( $a$ ) só depende da temperatura

$$\left(\frac{I}{a}\right)_\lambda = f_\lambda(T) \leftarrow \text{função universal}$$

“Para raios de mesmo comprimento de onda e mesma temperatura, a razão do poder emissivo e de absorção é a mesma para todos os corpos.”

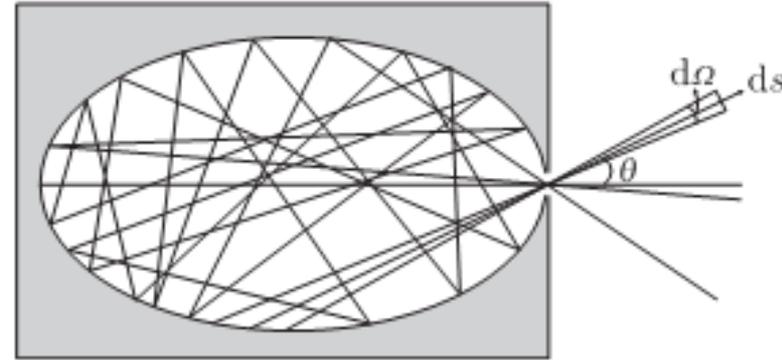
# O espectro de radiação do corpo negro

corpo negro ( $a = 1$ ) – radiador ideal

lei de Stefan (1879)-Boltzmann (1884)

$$I = \int I_{\lambda} d\lambda = \int I_{\nu} d\nu = \sigma T^4$$

$$\sigma \simeq 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$



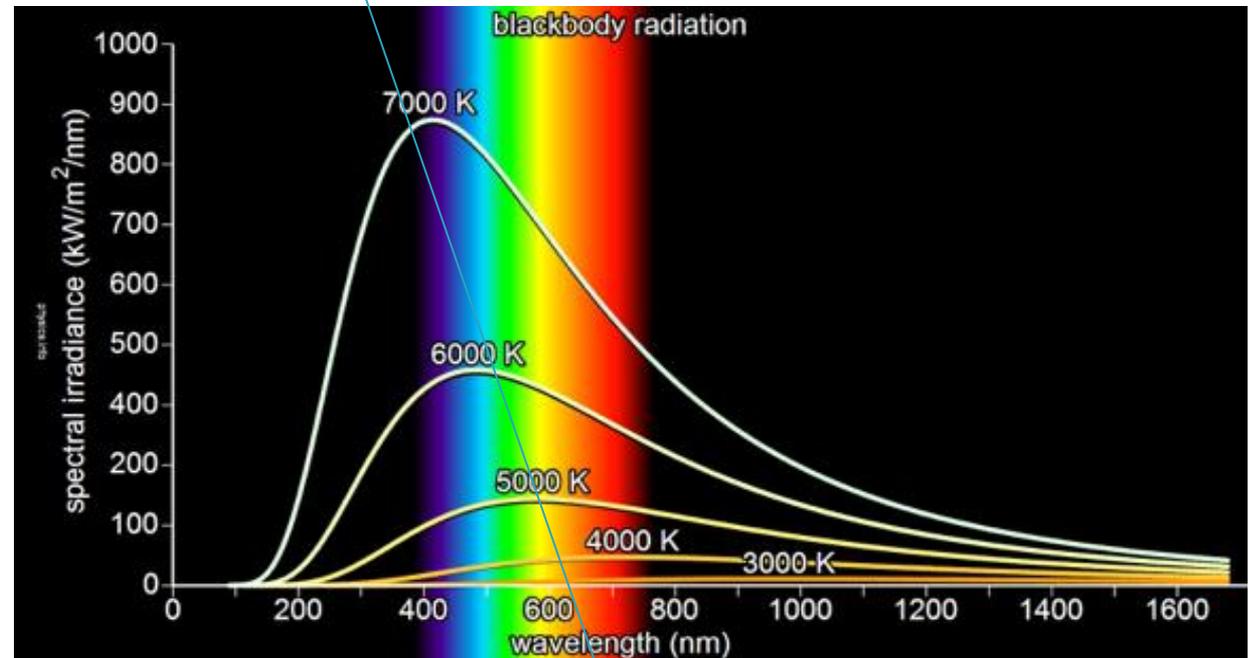
$$I = \frac{uc}{4}$$

lei de deslocamento de Wien (1896)

$$\lambda_{\text{max}} T = b$$

$$b = 0,29 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

$$T_2 > T_1 \rightarrow \lambda_{M2} < \lambda_{M1}$$



# O espectro de radiação do corpo negro

Paschen (1894): frequências altas, na faixa quase visível  
( $\nu \sim 10^{14}$  Hz,  $\lambda \sim 3\mu\text{m}$ ) e temperaturas de  $10^3$  K

lei de Wien (1896)

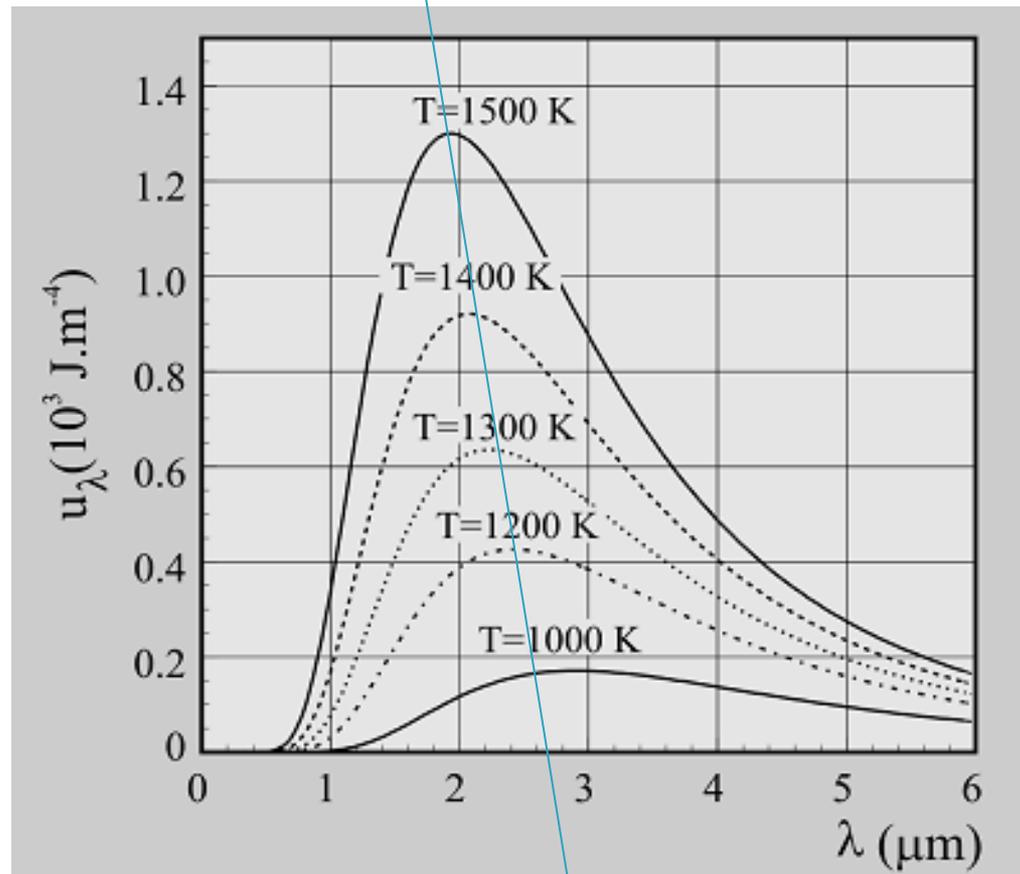
$$u_\nu \sim \nu^3 e^{-a\nu/T}$$



densidade espectral  
de energia

faixa visível

( $\nu \sim 5,5 \times 10^{14}$  Hz,  $\lambda \sim 0,55\mu\text{m}$ )

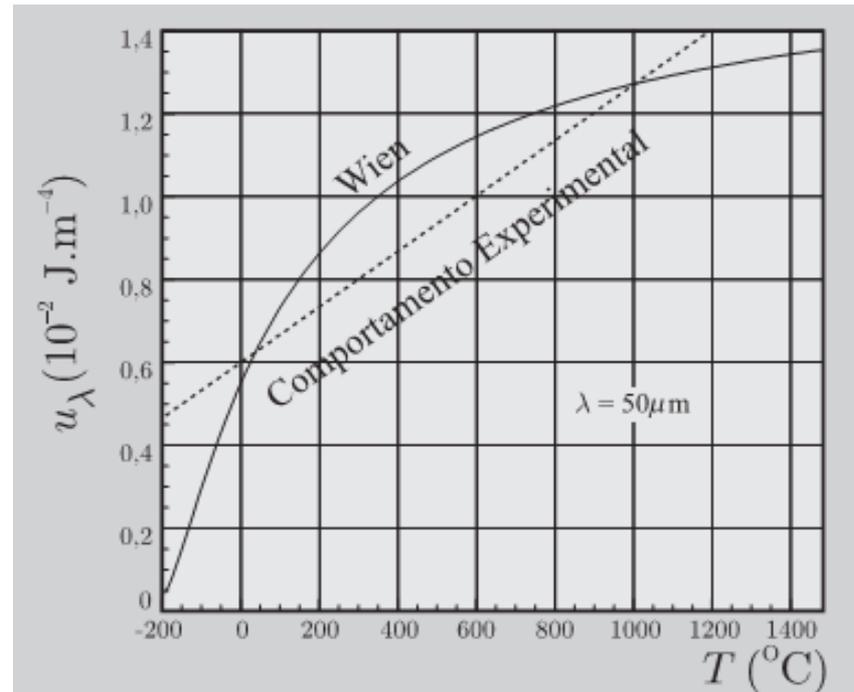


# O espectro de radiação do corpo negro

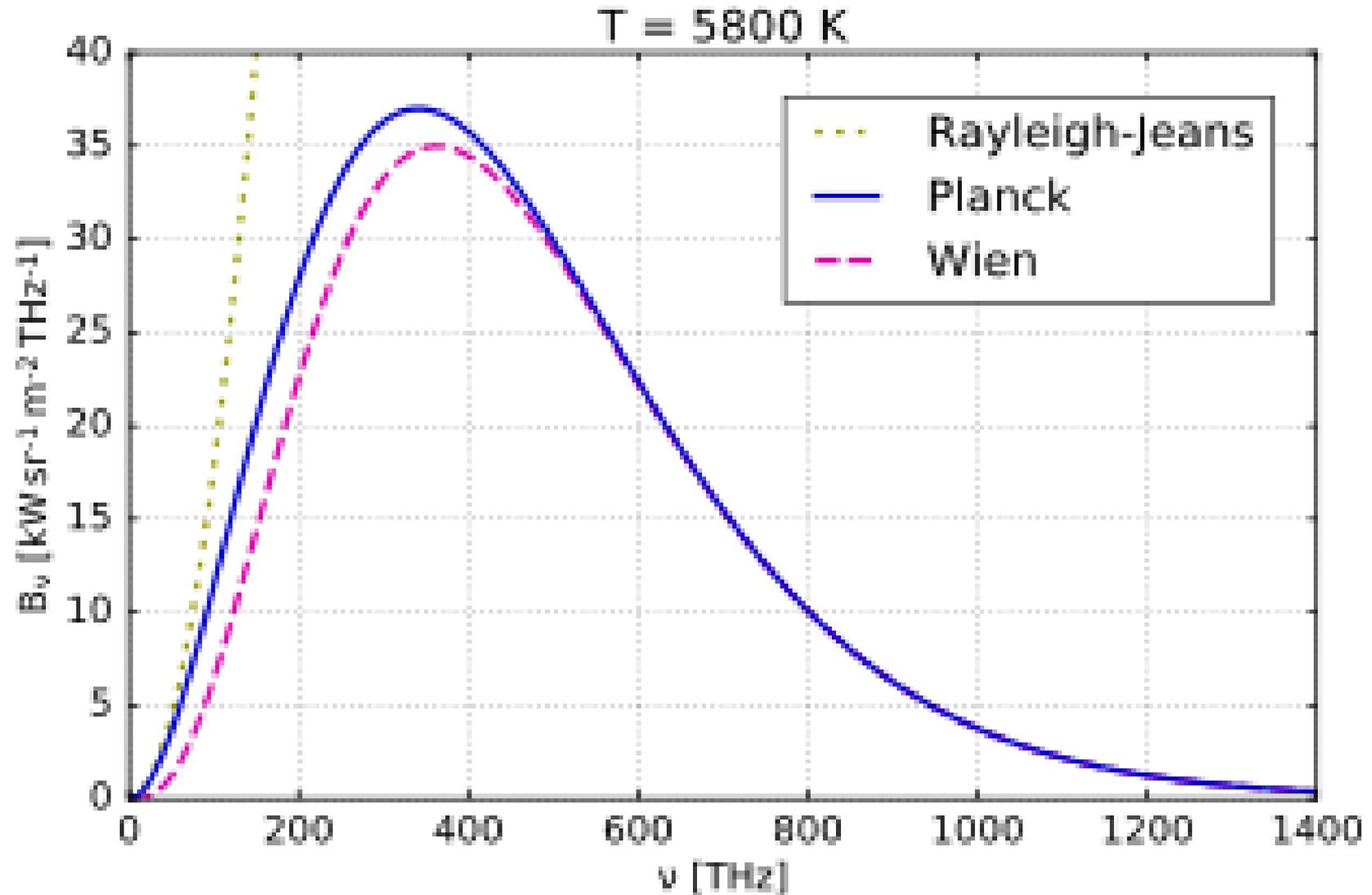
Lummer, Pringsheim, Kurlbaum e Rubens (1900):  
frequências na faixa do infravermelho ( $\nu \sim 10^{13}$  Hz,  $\lambda \sim 50\mu\text{m}$ )

lei de Rayleigh (1900)

$$u_\nu \sim \nu^2 T$$



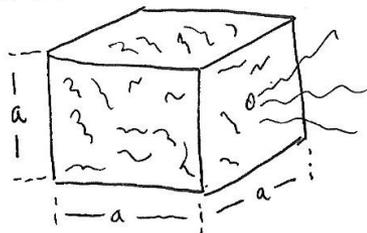
# O espectro de radiação do corpo negro



# O espectro de radiação do corpo negro

## Método de Rayleigh

cavidade



$$\Psi = A \sin k_x x \sin k_y y \sin k_z z \cos \omega t$$

$$\frac{\omega}{c} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \frac{\pi}{a} \sqrt{n^2 + l^2 + m^2} \quad (n, l, m \neq 0, 1, \dots)$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad (\nu \sim 10^{14} \text{ Hz} - \text{freq. ópticas}) \Rightarrow n, l, m \gg 1$$

nº de pontos, estados ou modos de vibração entre  $\alpha$  e  $\alpha + d\alpha$

$$dG = 2 \times \frac{1}{8} \times 4\pi \alpha^2 d\alpha = \pi \alpha^2 d\alpha = \frac{8\pi a^3 \nu^2}{c^3} d\nu$$

energia total

densidade de estados ou modos.

$\langle E \rangle$  - energia média de cada modo

$$\Rightarrow U = \int \langle E \rangle dG = \int \langle E \rangle g(\nu) d\nu$$

$$U = V \int \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \langle E \rangle d\nu$$

$U_\nu$

$$U_\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 \langle E \rangle$$

$(U/V = U_\nu)$  - densidade de energia

ondas de propagação



$$\Psi_D = A \sin(kx - \omega t) \rightarrow$$

$$\Psi_E = A \sin(kx + \omega t) \leftarrow$$

$$\frac{\omega}{c} = k$$

ondas estacionárias



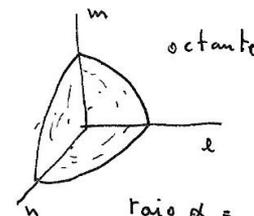
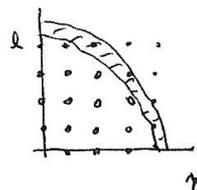
$$\Psi = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) = C \sin kx \cos \omega t$$

condições de contorno

$$\Psi(0) = 0$$

$$\Psi(L) = 0 \Rightarrow kL = n\pi \Rightarrow k_n = n\frac{\pi}{L} \quad (n=0, 1, \dots)$$

x



$$\text{raio } \alpha = \frac{\omega a}{\pi c} = \frac{2a\nu}{c}$$

# O espectro de radiação do corpo negro

- Osciladores de Planck

- osciladores das paredes da cavidade em equilíbrio térmico com a radiação eletromagnética
- perda de energia dos osciladores = absorção de energia da radiação

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \langle \epsilon \rangle$$

- lei de Wien  $\implies \langle \epsilon \rangle \sim \nu e^{-a\nu/T}$

- lei de Rayleigh  $\implies \langle \epsilon \rangle \sim T$

# O espectro de radiação do corpo negro

- entropia de Boltzmann

$$S = k \ln G$$

$G$  - número de microestados compatíveis com um macroestado ( $N, V, U$ )

$N$  - número de constituintes (partículas - osciladores) do sistema

$V$  - volume do sistema

$U$  - energia média total

$k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K (constante de Boltzmann)

$$dU = T dS - P dV \quad (1^{\text{a}} \text{ lei})$$

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_V \Rightarrow \frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_V$$

$$\frac{P}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_U$$

# O espectro de radiação do corpo negro

*quantum* de energia (Planck -1900)

N=3

M=2

$$\epsilon = \frac{U}{M} \quad (\text{elemento de energia}) \quad \langle \epsilon \rangle = \frac{U}{N} \quad (\text{energia média})$$

$$G = \frac{(N + M - 1)!}{M! (N - 1)!}$$

$$S = Nk \left[ \left( 1 + \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon} \right) \log \left( 1 + \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon} \right) - \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon} \log \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon} \right]$$

$$\frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_{N,V} = \frac{k}{\epsilon} \log \left( 1 + \frac{\epsilon}{\langle \epsilon \rangle} \right)$$

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\epsilon}{e^{\epsilon/kT} - 1}$$

$$\langle \epsilon \rangle \sim \nu e^{-a\nu/T}$$

$$\epsilon = h\nu$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

A	B	C
$\alpha$	$\beta$	—
$\beta$	$\alpha$	—
$\alpha$	—	$\beta$
$\beta$	—	$\alpha$
—	$\alpha$	$\beta$
—	$\beta$	$\alpha$
$\alpha, \beta$	—	—
—	$\alpha, \beta$	—
—	—	$\alpha, \beta$

# O espectro de radiação do corpo negro

quantum de energia (Planck -1900)

$$\epsilon = \frac{U}{M} \quad (\text{elemento de energia}) \quad \langle \epsilon \rangle = \frac{U}{N} \quad (\text{energia média})$$

$$G = \frac{(N+M-1)!}{M!(N-1)!} \approx \frac{(N+M)^{N+M}}{M^M N^N} \quad (M, N \gg 1)$$

$$\ln G = N \left[ \left(1 + \frac{M}{N}\right) \ln \left(1 + \frac{M}{N}\right) - \frac{M}{N} \ln \frac{M}{N} \right]$$

$$\langle S \rangle = \frac{S}{N} = k \left[ \left(1 + \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon}\right) - \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon} \ln \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon} \right]$$

$$\frac{1}{T} = \frac{d\langle S \rangle}{d\langle \epsilon \rangle} = \frac{k}{\epsilon} \left[ \ln \left(1 + \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon}\right) - \ln \frac{\langle \epsilon \rangle}{\epsilon} \right] = \frac{k}{\epsilon} \ln \left(1 + \frac{\epsilon}{\langle \epsilon \rangle}\right)$$

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\epsilon}{e^{\epsilon/kT} - 1}$$

$kT$  (baixas freq. - Rayleigh)

$\nu e^{-\epsilon/kT}$  (altas freq. - Wien)

$\epsilon \sim \nu$  ( $\epsilon = h\nu$ )  
 ↓  
 menor energia possível

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (\text{Planck})$$

N=3    M=2

A	B	C
$\alpha$	$\beta$	—
$\beta$	$\alpha$	—
$\alpha$	—	$\beta$
$\beta$	—	$\alpha$
—	$\alpha$	$\beta$
—	$\beta$	$\alpha$
$\alpha, \beta$	—	—
—	$\alpha, \beta$	—
—	—	$\alpha, \beta$

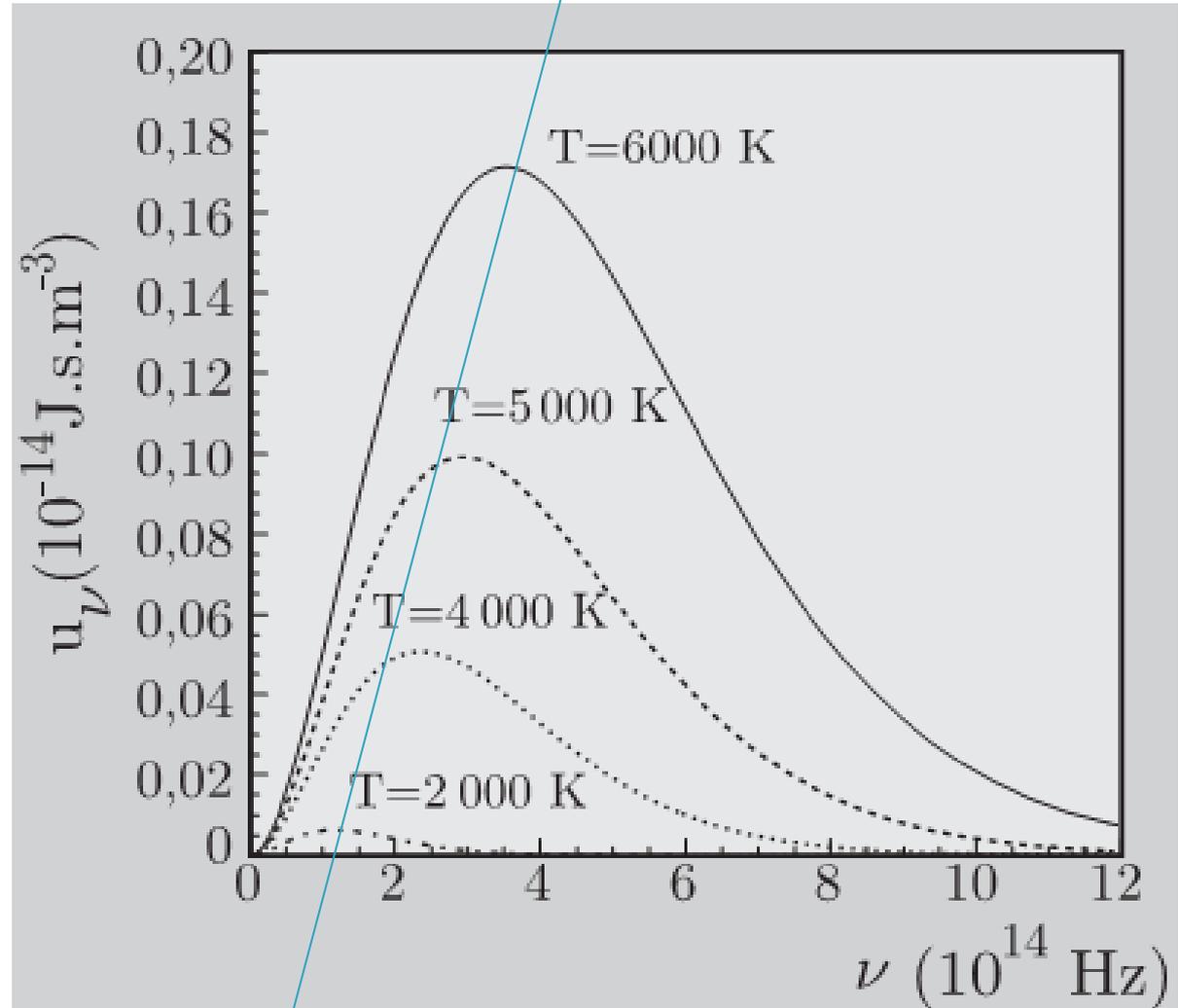
$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

# O espectro de radiação do corpo negro

- lei de Planck (1900)

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \langle \epsilon \rangle$$

$$u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3 / c^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



# O espectro de radiação do corpo negro

- **radiação cósmica**

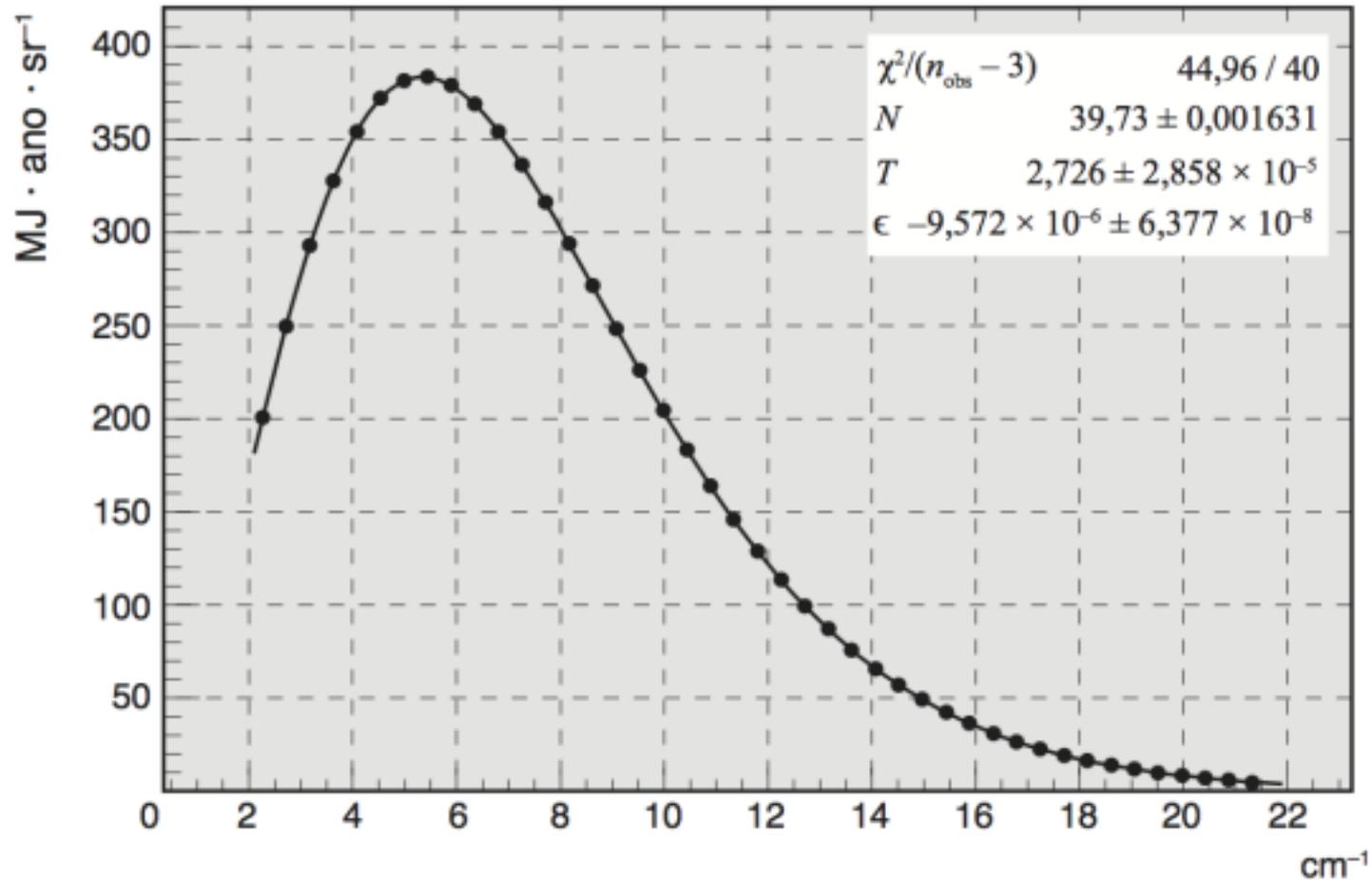
Uma das demonstrações mais impressionantes do espectro de radiação de corpo negro e da fórmula de Planck decorre da chamada *radiação cósmica de fundo*, descoberta em 1965 por Arnold Allan Penzias e Robert Woodrow Wilson. Essa é uma radiação isotrópica, na faixa de micro-ondas, que permeia todo o espaço, e que, acredita-se, se originou no início da formação de nosso Universo, com o *Big Bang*, ocorrido há cerca de 15 bilhões de anos, envolvendo a radiação e algumas partículas elementares.

Nesse cenário, após atingir um equilíbrio térmico inicial, a expansão do Universo causou o resfriamento da radiação abaixo de 3000 K. e as partículas. então. se combinaram para constituírem os primeiros átomos. A partir daí, supõe-se que houve pouca interação entre a radiação e a matéria, e, enquanto a matéria se condensou em galáxias e estrelas, a radiação continuou a se resfriar. Essa é hoje a radiação de fundo, que, após bilhões de anos, atingiu a temperatura de 2,73 K.

A distribuição de Planck pode ser ajustada à distribuição espectral da radiação cósmica de fundo correspondente à temperatura de 2,73 K, com os dados obtidos do satélite COBE (*Cosmic Background Explorer*), em 1989. Outra possibilidade interessante é utilizá-la para se estabelecer um limite para a dimensionalidade do espaço.

# O espectro de radiação do corpo negro

Radiação cósmica de fundo



# Einstein e a quantização da luz

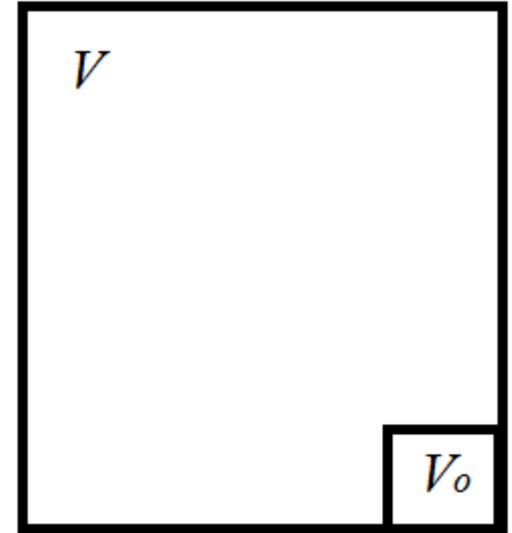
número de estados para uma partícula  $\sim V/V_0$

**número de estados para N partículas**

$$G \sim \left( \frac{V}{V_0} \right)^N$$

variação de entropia de uma gás ideal para uma variação de volume  $(V_2 - V_1)$  isotérmica

$$\Delta S = Nk \ln \frac{V_2}{V_1}$$



**variação de entropia da componente de frequência  $\nu$  da radiação de corpo negro para uma variação de volume  $(V_2 - V_1)$  isotérmica (energia  $U$  constante)**

$$\Delta S = \left( \frac{U}{h\nu} \right) k \ln \frac{V_2}{V_1}$$

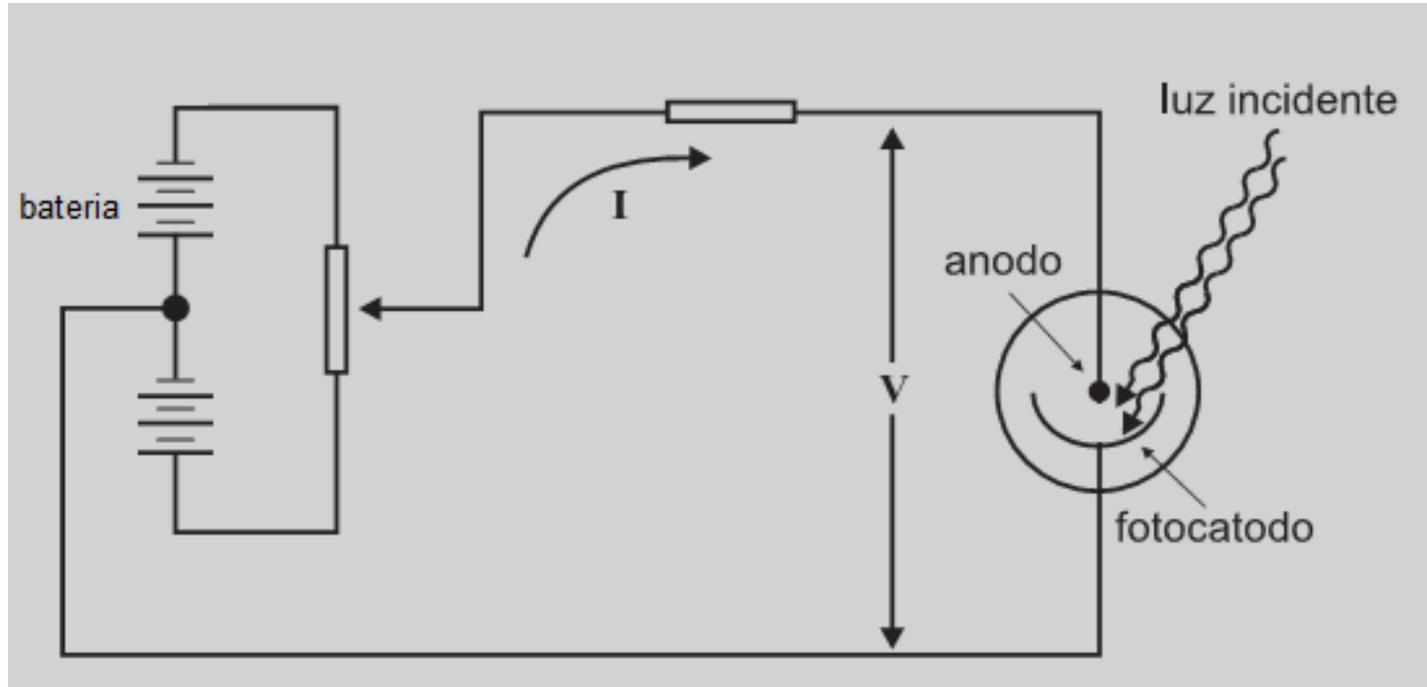
Componente de frequência  $\nu$  da radiação de corpo negro comporta-se como um gás de partículas de energia  $h\nu$  (1905).

# Einstein e a quantização da luz

- visão corpuscular da luz
- luz monocromática de frequência  $\nu$   $\leftrightarrow$  conjunto de partículas de energia  $h\nu$
- Bose (1924) – corpúsculos de luz são partículas indistinguíveis que podem compartilhar o mesmo estado quântico
- fótons e partículas de spin inteiro – bósons
- quantização da luz - > explica algumas propriedades da interação da luz com os metais, como o efeito foto-elétrico

# Efeito foto-elétrico

## Experimentos de Lenard (1902)



- a ocorrência da emissão de elétrons não depende da intensidade da luz incidente;
- a ocorrência da emissão depende da frequência da luz, mas para cada metal há um limite inferior;

# Efeito foto-elétrico

## Hipóteses de Einstein (1905)

- luz de frequência  $\nu$  constituída por *quanta* de energia  $\epsilon = h\nu$
- só há emissão se a energia transferida do fóton ao elétron for maior que a chamada função trabalho do metal ( $\Phi$ )
- aqueles que escapam emergem com energia cinética máxima

$$\epsilon_c = h\nu - \phi$$

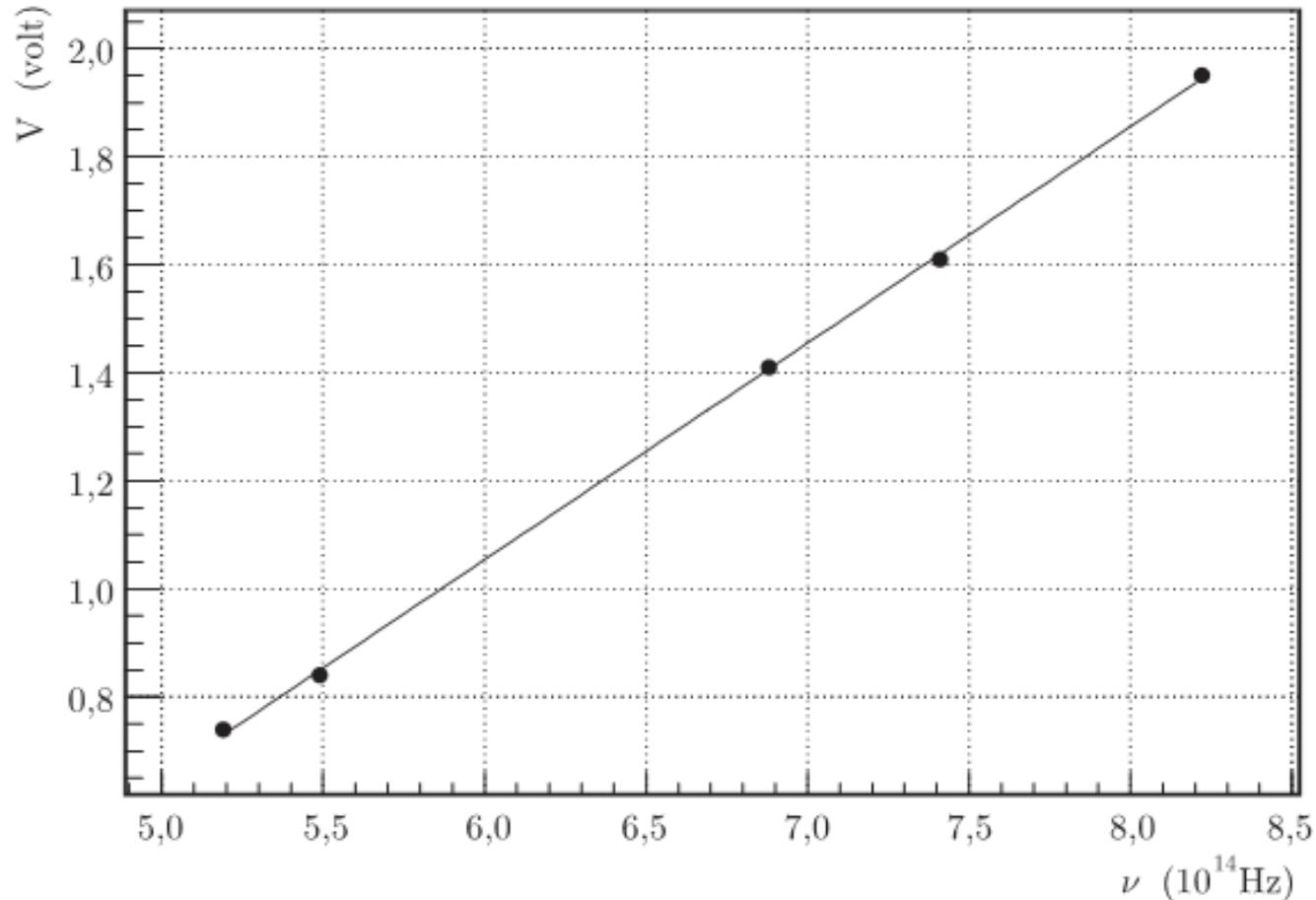
ao se aumentar a intensidade da luz, aumentando o número de fótons incidentes, aumenta-se também o número de elétrons emitidos e, portanto, a corrente, mas não a energia cinética máxima que cada elétron pode adquirir

- o potencial de corte  $V$ , necessário para deter o fluxo de elétrons, é determinado pela condição de que a energia potencial deva ser igual à energia cinética máxima dos elétrons ejetados

$$eV = h\nu - \phi$$

# Efeito foto-elétrico

## Experimento de Millikan (1914)



$$V = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \phi$$

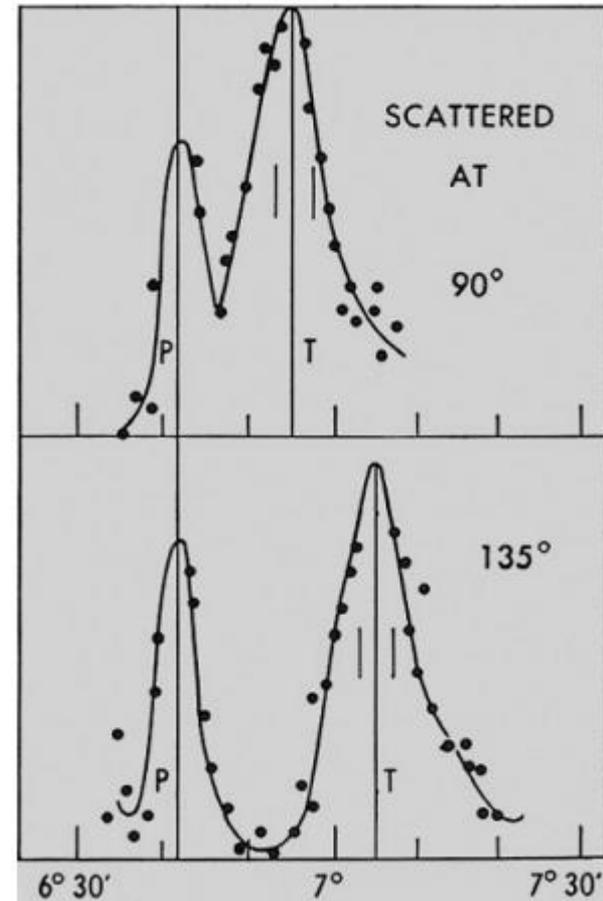
$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

# O efeito Compton

## Compton (1922)

- incide raios-X sobre um alvo de grafite
- teoria clássica -> sem alteração do comprimento de onda
- pico com comprimento de onda maior que o incidente

$$\lambda' = \lambda + A \text{sen}^2 \frac{\theta}{2}$$



# O efeito Compton

## Compton (1922)

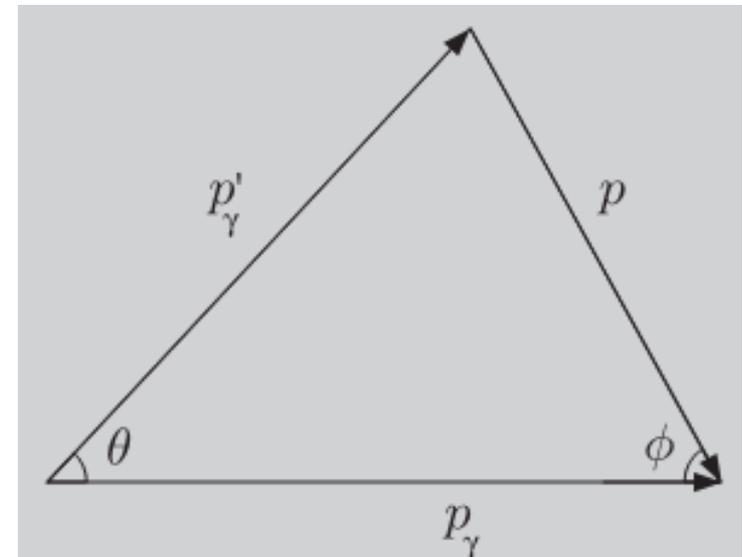
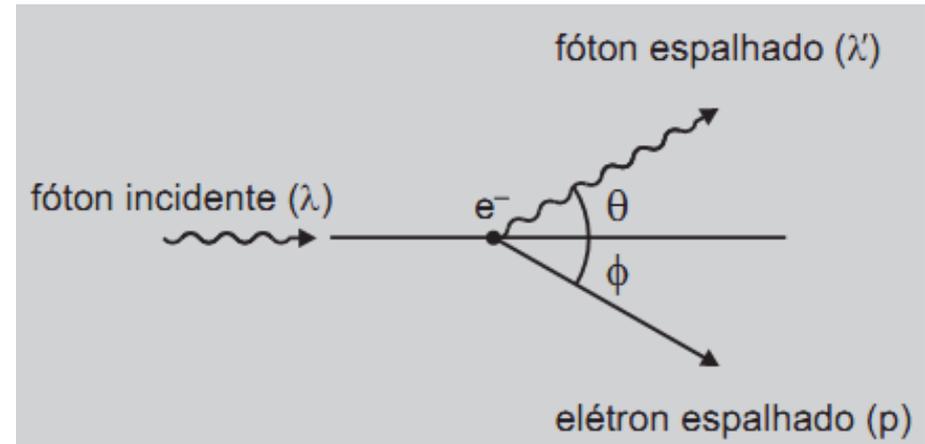
### - fóton

- $\epsilon_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  (energia)

- $\vec{p}_\gamma = \frac{\epsilon_\gamma}{c} \hat{k}$  (*momentum*)

### - leis de conservação de energia e *momentum*

$$\begin{cases} \epsilon_\gamma + mc^2 = \epsilon'_\gamma + \epsilon \\ \vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p} \end{cases}$$



# O efeito Compton

## Compton (1922)

- conservação de energia  $\epsilon_\gamma + mc^2 = \epsilon'_\gamma + \epsilon$

$$\underbrace{\epsilon^2 - m^2 c^4}_{p^2 c^2} = \epsilon_\gamma^2 + \epsilon'_\gamma{}^2 - 2\epsilon_\gamma \epsilon'_\gamma + 2(\epsilon_\gamma - \epsilon'_\gamma)mc^2$$

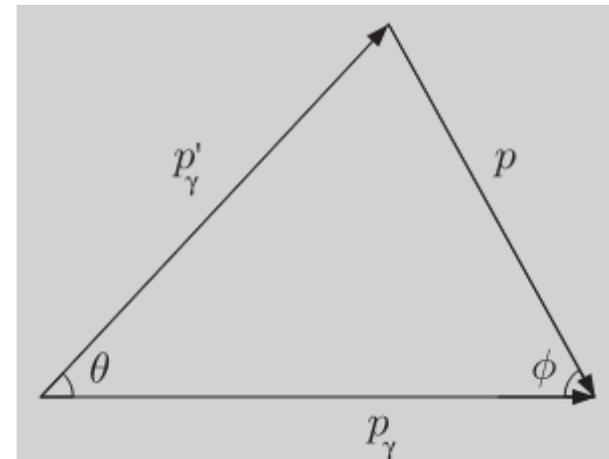
- conservação de *momentum*

$$p^2 = p'^2_\gamma + p^2_\gamma - 2p'_\gamma p_\gamma \cos \theta$$

$$p^2 c^2 = \epsilon_\gamma^2 + \epsilon'^2_\gamma - 2\epsilon_\gamma \epsilon'_\gamma \cos \theta$$

$$(\epsilon_\gamma - \epsilon'_\gamma)mc^2 = \epsilon_\gamma \epsilon'_\gamma (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) = \left( \frac{2h}{mc} \right) \text{sen}^2 \frac{\theta}{2}$$



$$\frac{1}{\epsilon'_\gamma} - \frac{1}{\epsilon_\gamma} = \frac{1}{mc^2} (1 - \cos \theta)$$

# Conclusão

- quantização da luz - > fóton
- corpo negro - > energia do fóton:  $E = h\nu$
- efeito Compton - > *momentum* do fóton:  $p = h\nu/c$

Apesar do conceito de fóton ter tido origem no espectro do corpo negro, foi o efeito Compton que exibiu a evidência experimental que convenceu a maioria da comunidade científica, nos anos de 1920, a aceitar a existência do fóton como uma das partículas elementares da natureza.

# Bibliografia

- M. H. Shamos, *Great Experiments in Physics*, Dover Pub. Inc., 1987.
- F. Caruso, V. Oguri & A. Santoro, *Partículas elementares: 100 anos de descobertas*, Editora Livraria da Física, 2ª edição, 2012.
- F. Caruso & V. Oguri, *Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos*, Elsevier Ed. Ltda, 2006.
- F. Caruso & V. Oguri, *Sobre a necessidade do conceito de fóton*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2021, vol. 43.