

Física Geral I • FIS0703

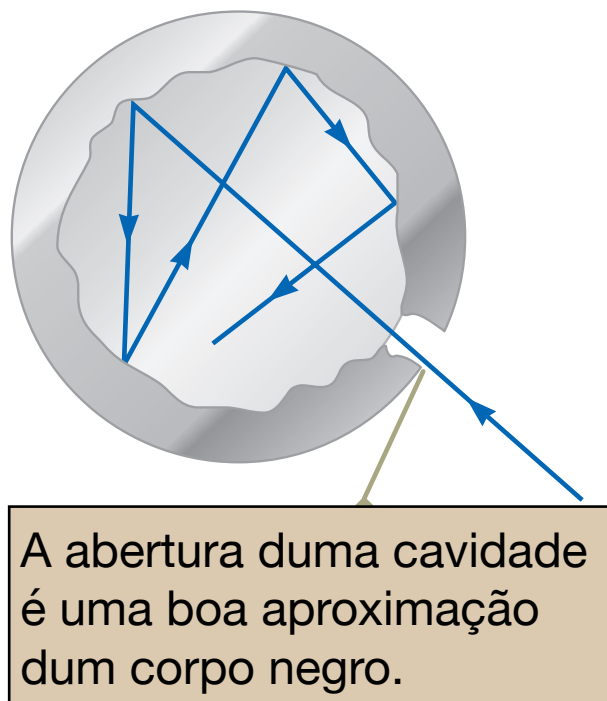
Aula 23

12/12/2016

Física quântica

A radiação do corpo negro

- ▶ Todos os corpos emitem **radiação eletromagnética**.
- ▶ A origem desta radiação é a aceleração de **partículas carregadas** nos átomos na superfície devido ao movimento térmico. As partículas têm uma distribuição da energia que produz um **espectro contínuo** de radiação.
- ▶ A radiação emitida pela abertura duma cavidade tem as características da radiação dum corpo negro — elas dependem apenas da **temperatura**, mas não do material da cavidade.



- A radiação na cavidade é parcialmente refletida nas paredes (absorção e emissão por pequenos osciladores), e ondas estacionárias são estabelecidas.
- Cada modo das ondas estacionárias tem uma certa energia, o que determina a distribuição da energia da radiação que escapa pela abertura sobre os vários comprimentos de onda.

O espectro da radiação de corpo negro

Resultados de muitas medições do espectro da radiação de cavidade:

- Potência total emitida

$$P = \sigma A e T^4$$

Lei de Stefan-Boltzmann

Área da superfície

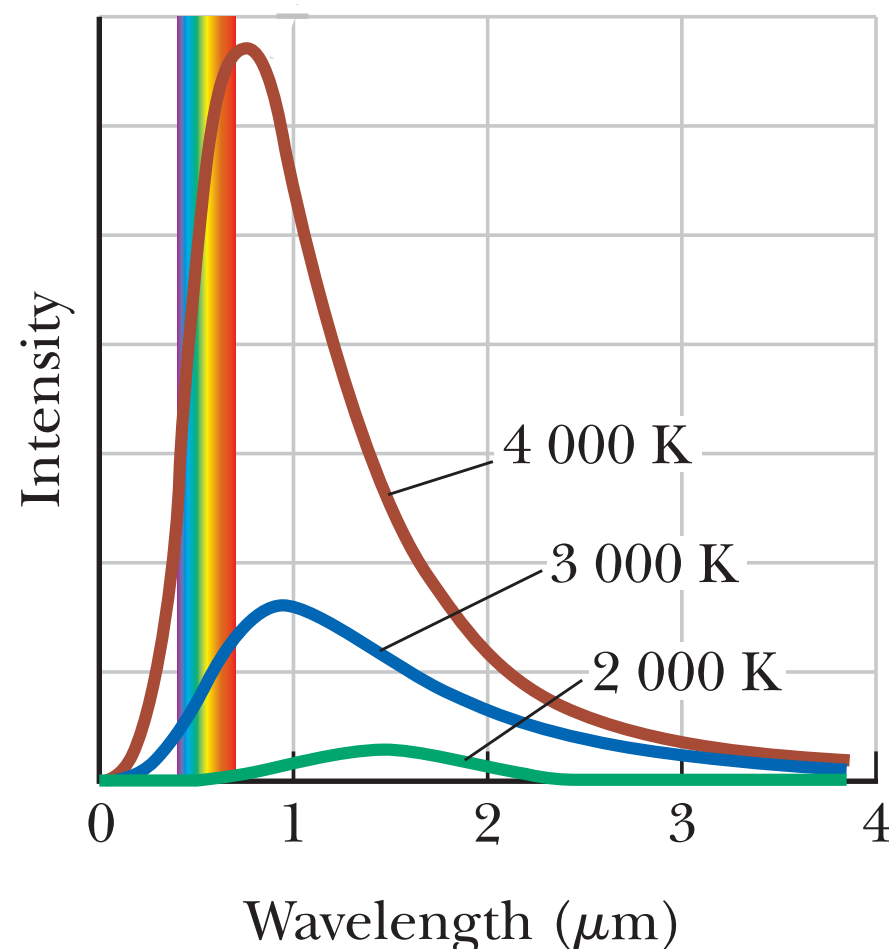
Temperatura

Para corpo negro: $e = 1$
 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

- Comprimento de onda da intensidade máxima

$$\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Lei de Wien

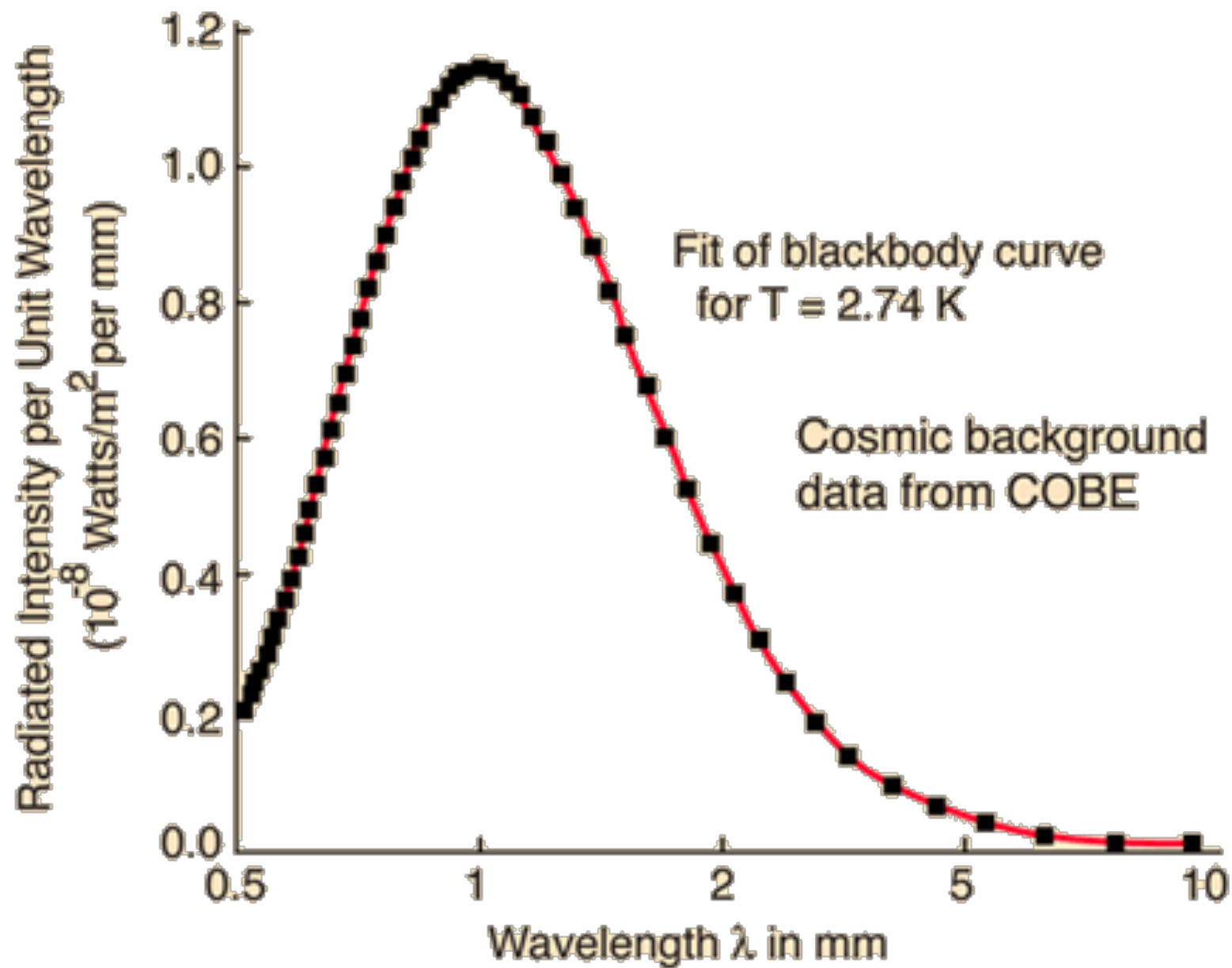


Exemplo: estrelas com maior temperatura de superfície têm uma cor mais azul.



A radiação cósmica de fundo

Um dos melhores exemplos da radiação dum corpo negro é a [radiação de fundo](#) que vem do cosmo de todas as direções com igual intensidade (um resíduo do “*Big Bang*”). O espectro medido coincide perfeitamente com o espectro dum corpo negro à temperatura de $T = 2.74$ K.



A catástrofe do ultravioleta

Como podemos explicar o espectro observado da radiação do corpo negro?

Definição da **intensidade** de radiação: $I(\lambda, T)d\lambda$... a potência/área emitida entre λ e $\lambda + d\lambda$.

A teoria clássica (eletromagnetismo + termodinâmica) prevê para a intensidade da radiação:

Intensidade
medida



The graph shows Intensity on the y-axis and Wavelength (Comprimento de onda) on the x-axis. A blue curve represents experimental data, peaking at a certain wavelength and then decaying. A red curve represents the Rayleigh-Jeans theory, which follows the experimental data at long wavelengths but diverges to infinity as the wavelength approaches zero. A label points to the red curve with the equation $I(\lambda, T) = \frac{2\pi ck_B T}{\lambda^4}$.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ck_B T}{\lambda^4}$$

Lei de Rayleigh-Jeans

- ▶ Para $\lambda \rightarrow \infty$: **boa concordância** entre teoria e experiência
- ▶ Para $\lambda \rightarrow 0$: **grandes diferenças**

Pior ainda:

A lei de Rayleigh-Jeans prevê que a energia emitida por um corpo negro tende para **infinito** quando $\lambda \rightarrow 0$.

A este resultado deu-se o nome “**catástrofe do ultravioleta**”.

A teoria de Planck

- ▶ Na **teoria clássica**, cada modo de oscilação das ondas estacionárias e.m., em equilíbrio térmico, tem a mesma energia média: $k_B T$ (contém um fator 2 devido às duas polarizações).
- ▶ Quando $\lambda \rightarrow 0$, o **número de modos** num intervalo $d\lambda$ tende para infinito.
- ▶ Isto é a origem da **divergência** da intensidade na fórmula de Rayleigh-Jeans.

Max Planck (1900) propôs uma teoria para explicar o espectro da radiação do corpo negro:

Planck admitiu que

- A **energia** dos osciladores nas paredes, que absorvem e emitem radiação, é **quantizada**.

$$E_n = nhf \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

As energias possíveis dum oscilador com **frequência** f

h ... constante de Planck

n ... número quântico

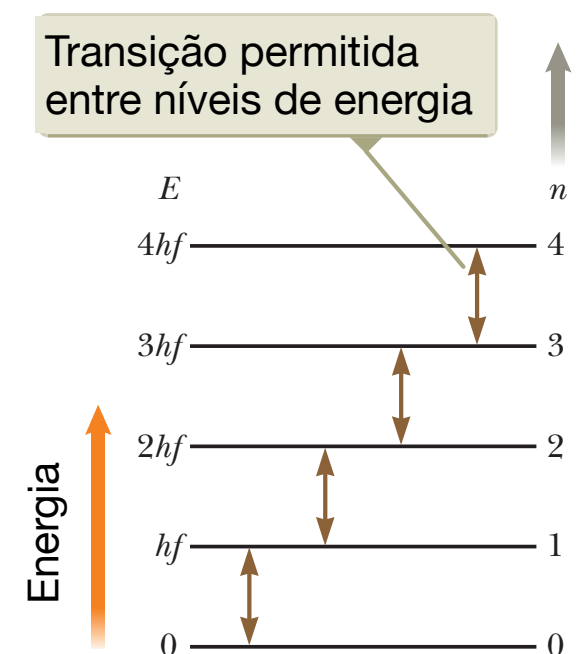
A cada valor de n corresponde um **estado quântico** diferente.

- Um oscilador absorve ou emite energia em **transições** entre estados quânticos diferentes.

A diferença das energias dos estados é emitida em forma de um **quantum de energia**.

$$E = hf \quad \text{Energia dum quantum de radiação}$$

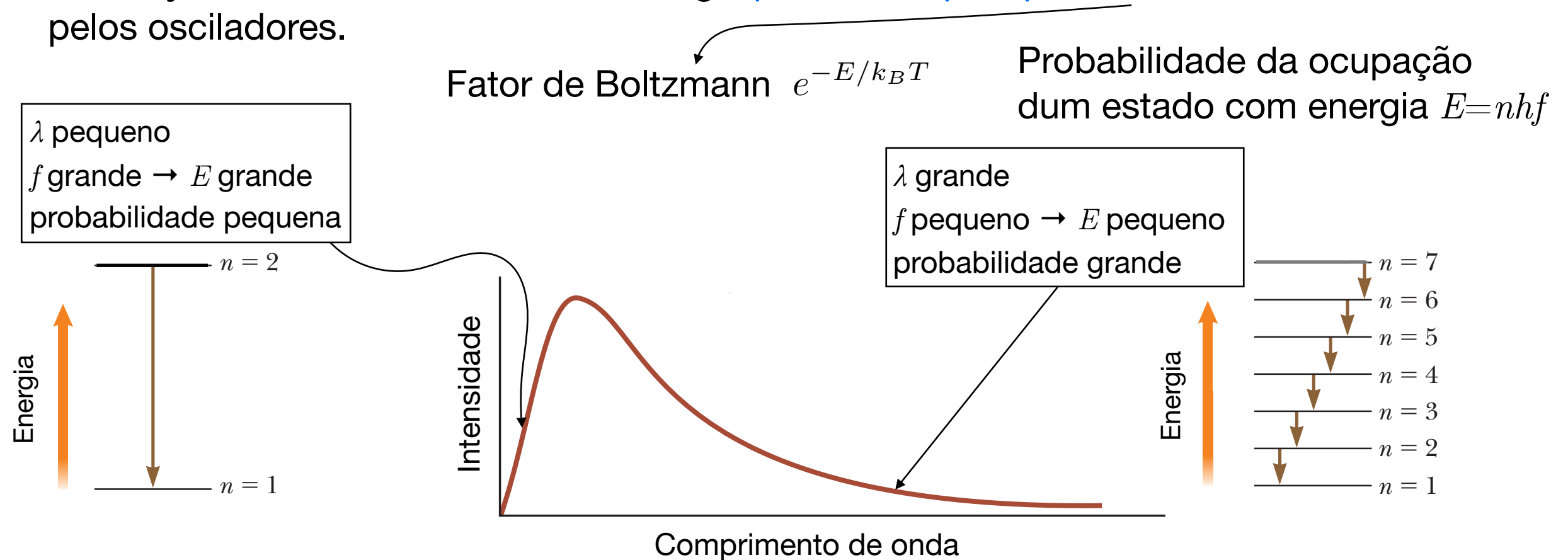
Diagrama de níveis de energia



A teoria de Planck

Como é que esta teoria consegue evitar a catástrofe do ultravioleta?

- A energia média dum modo de oscilação (onda estacionária com determinado c.d.o.) é a diferença média entre os níveis de energia **ponderada pela probabilidade da sua emissão** pelos osciladores.



$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)}$$

A fórmula de Planck
(concorda muito bem com os dados)

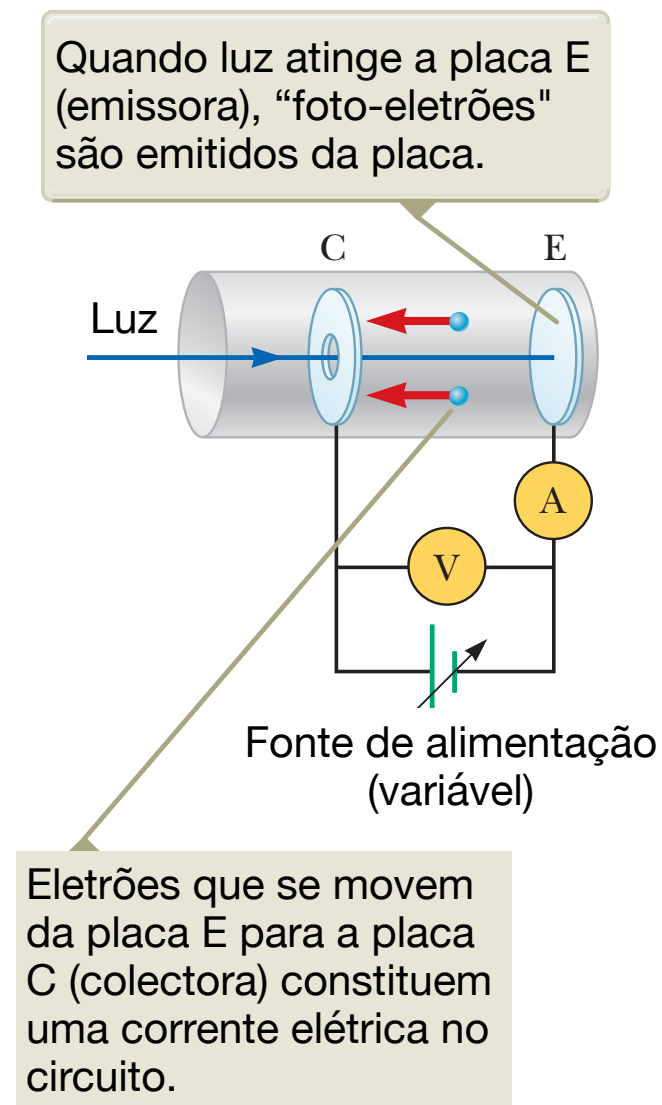
$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

A constante de Planck
(ajustada para reproduzir os dados)

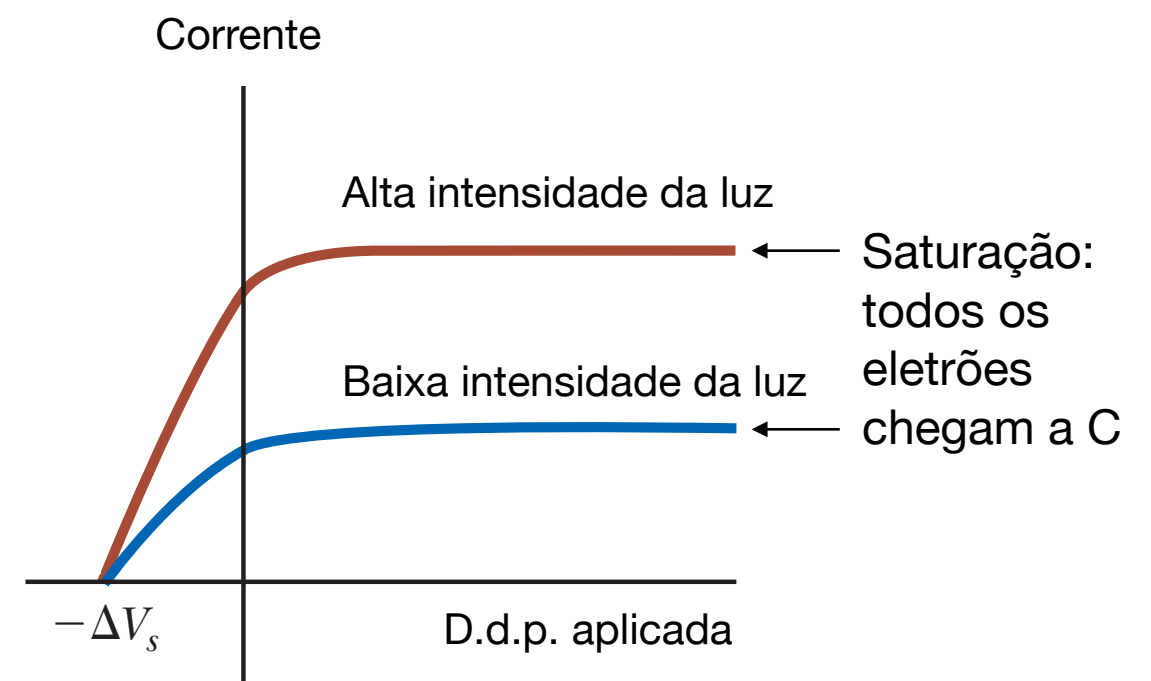
O efeito fotoelétrico

No final do século XIX descobriu-se (acidentalmente) que luz ultravioleta incidente a uma placa metálica é capaz de a “electrizar”, i.e., a placa torna-se eletricamente carregada.

Dispositivo para estudar o efeito fotoelétrico



Resultado de medições



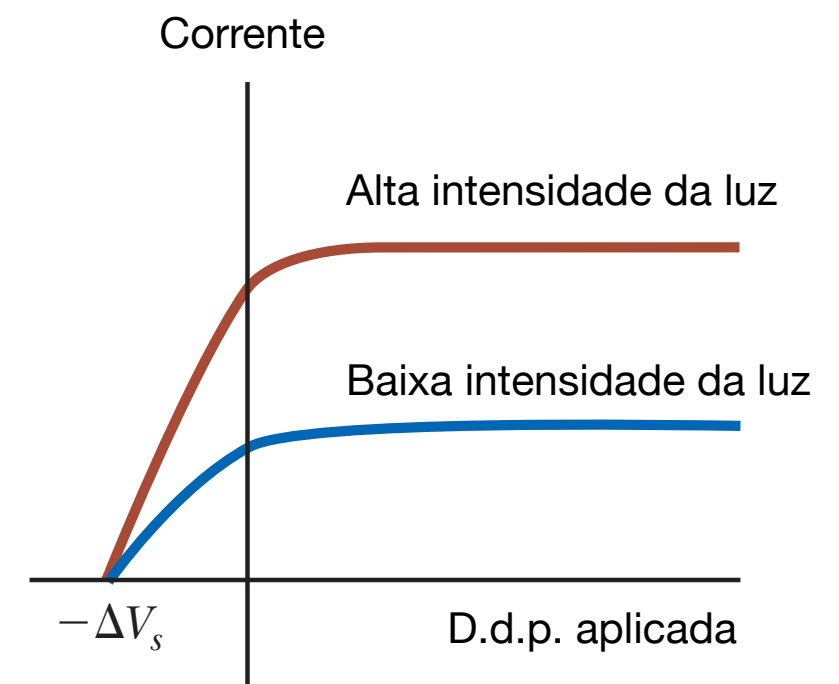
- ▶ Maior intensidade da luz: mais eletrões são emitidos.
- ▶ D.d.p. positiva: C atrai eletrões, muitos eletrões emitidos por E chegam a C (até a saturação)
- ▶ D.d.p. negativa: C repele eletrões, parte dos eletrões emitidos por E não chegam a C.
- ▶ D.d.p. = $-\Delta V_s$: até os eletrões mais energéticos não chegam a C (“*stopping potential*”).

O efeito fotoelétrico

Resultado de medições

A energia cinética máxima dos eletrões é $K_{\max} = e\Delta V_s$

A medição de ΔV_s permite então determinar K_{\max} .



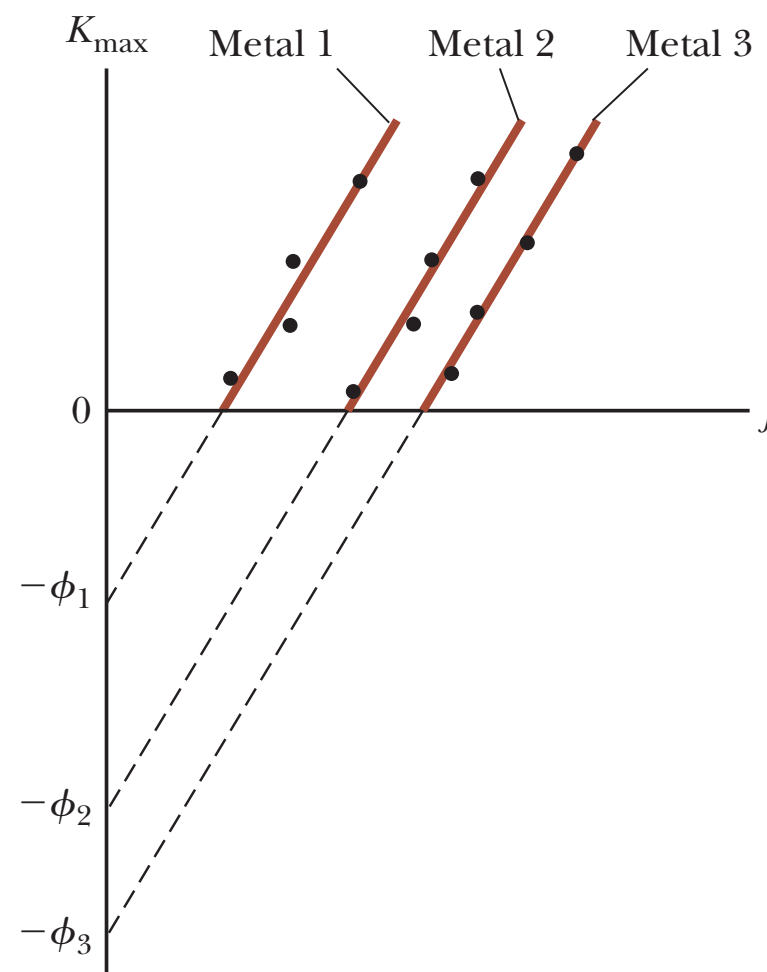
Problemas:

- ▶ **Teoria clássica:** energia é absorvida pelos eletrões de modo contínuo. K_{\max} devia aumentar com a intensidade da luz.
Experiência: K_{\max} é independente da intensidade da luz.
- ▶ **Teoria clássica:** quando a intensidade da luz é baixa, algum tempo devia passar até os eletrões têm absorvido energia suficiente para escapar do metal.
Experiência: eletrões são emitidos imediatamente ($< 10^{-9}$ s) após iluminação do metal, mesmo com luz de baixa intensidade.

O efeito fotoelétrico

Mais problemas:

- **Teoria clássica:** elétrons deviam ser emitidos para qualquer frequência da luz, se a intensidade for suficiente.
Experiência: existe uma **frequência limiar** (cujo valor depende do material), abaixo da qual nenhum elétron é emitido, mesmo para luz com grande intensidade.
- **Teoria clássica:** K_{\max} é independente da frequência da luz, depende apenas da intensidade.
Experiência: K_{\max} aumenta com a frequência da luz, não depende da intensidade.



O efeito fotoelétrico

A explicação do efeito fotoelétrico por Einstein (1905):

- ▶ Luz emitida por qualquer fonte consiste num **fluxo de quanta**, mais tarde chamados **fotões**. (Extensão das ideias de Planck.)
- ▶ Cada fotão tem a energia $E = hf$ e a velocidade $c = 3.00 \times 10^8$ m/s (no vazio).
- ▶ Na absorção de luz por um eletrão, é um único fotão que transfere toda a sua energia para o eletrão (não é um processo contínuo).
- ▶ Uma maior intensidade de luz significa um fluxo de mais fotões por unidade de tempo.

$$K_{\max} = hf - \phi$$

A energia cinética máxima de eletrões que conseguem sair do metal (sem perder mais energia no caminho em colisões com átomos ou outros eletrões)

ϕ é chamada a “função de trabalho”

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ϕ para alguns metais

Metal	ϕ (eV)
Na	2.46
Al	4.08
Fe	4.50
Cu	4.70
Zn	4.31
Ag	4.73
Pt	6.35
Pb	4.14

O efeito fotoelétrico

Como é que a teoria de Einstein resolve os problemas encontrados:

- ▶ **Experiência:** K_{\max} é independente da intensidade da luz.
Teoria: $K_{\max} = hf - \phi$ é independente da intensidade da luz.
- ▶ **Experiência:** elétrons são emitidos imediatamente ($< 10^{-9}$ s) após iluminação do metal, mesmo com luz de baixa intensidade.
Teoria: quando um fóton é absorvido, o elétron é emitido instantaneamente.
- ▶ **Experiência:** existe uma frequência limiar (cujo valor depende do material), abaixo da qual nenhum elétron é emitido, mesmo para luz com grande intensidade.
Teoria: um fóton tem de ter uma energia mínima igual a ϕ (\rightarrow frequência mínima) para a emissão dum fóton. Fótons com menor energia (mesmo muitos) não têm efeito.
- ▶ **Experiência:** K_{\max} aumenta com a frequência da luz, não depende da intensidade.
Teoria: um fóton com maior frequência tem mais energia, por isso elétrons com maior energia cinética são emitidos.

Frequência de corte: $f_c = \frac{\phi}{h}$ Comprimento de onda de corte: $\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{\phi/h} = \frac{hc}{\phi}$
É útil usar o valor $hc = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$

Existem muitas **aplicações do efeito fotoelétrico**: foto-multiplicadores, CCD's, ...

O efeito de Compton

Da teoria de Einstein sabemos a relação entre **momento linear e energia** duma partícula.

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

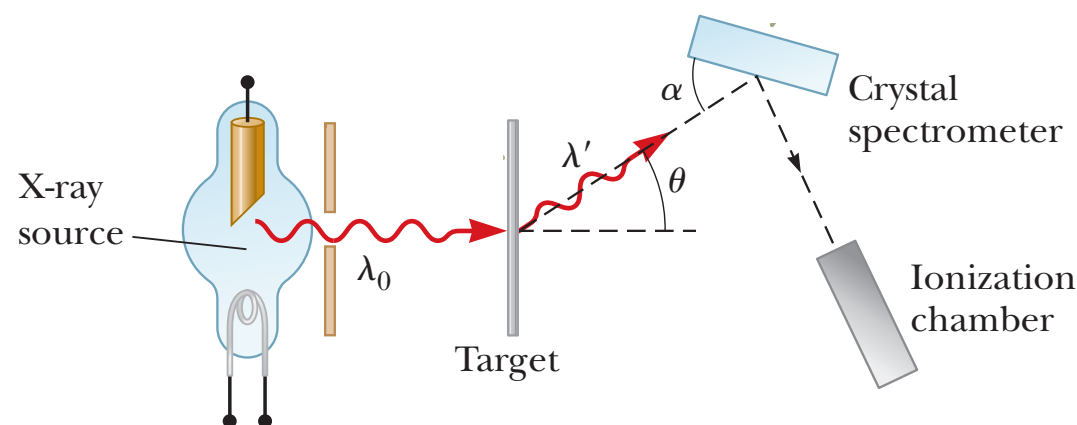
Para partículas sem massa: $m = 0 \longrightarrow E = pc \longrightarrow p = \frac{E}{c}$

Energia dum fóton: $E = hf$

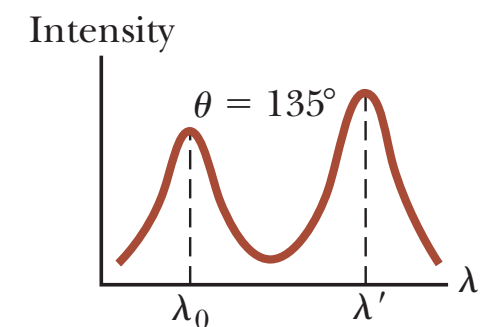
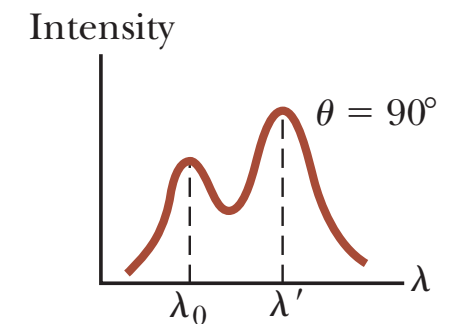
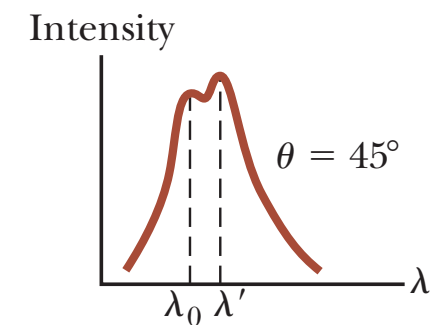
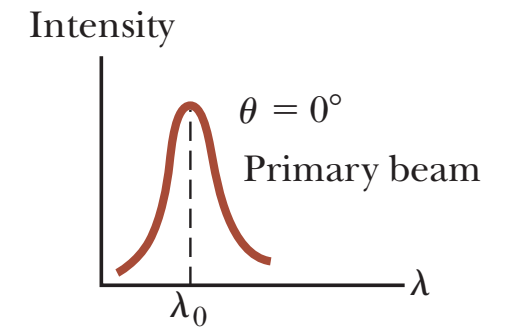
Momento linear dum fóton: $p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$

É possível verificar se um fóton realmente tem este momento linear?

Arthur Compton (1922) efetuou uma série de experiências em que mostrou que a teoria clássica da luz não consegue explicar a dispersão de raios-X de elétrons.



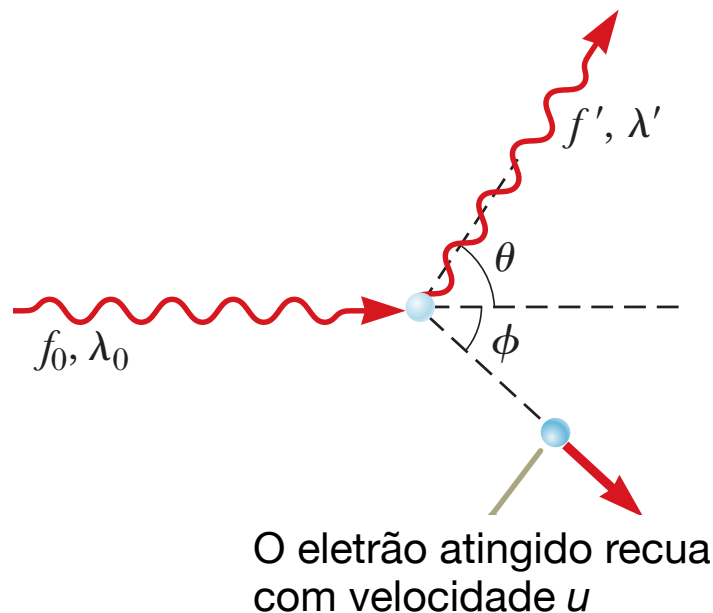
A teoria clássica prevê uma **distribuição de frequências f'** (devido ao efeito de Doppler na absorção e re-emissão da radiação por elétrons em movimento)



Observação: um valor λ' para cada ângulo θ .

O efeito de Compton

Para explicar estas observações, Compton tratou luz como partículas que colidem elasticamente com os elétrons do alvo.



Conservação da energia cinética

$$\frac{hc}{\lambda_0} = \frac{hc}{\lambda'} + K_e$$

$$\frac{hc}{\lambda_0} = \frac{hc}{\lambda'} + (\gamma - 1)m_e c^2 \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

Conservação do momento linear

$$\frac{h}{\lambda_0} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + \gamma m_e u \cos \phi \quad (2)$$

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - \gamma m_e u \sin \phi \quad (3)$$

Componente x:

Componente y:

Das equações (1), (2) e (3) podemos eliminar u e ϕ , o que resulta em

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

O desvio de Compton

Concorda com as observações!

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 0.00243 \text{ nm}$$

O comprimento de onda de Compton do elétron

Um fóton comporta-se realmente como uma partícula na dispersão de Compton.