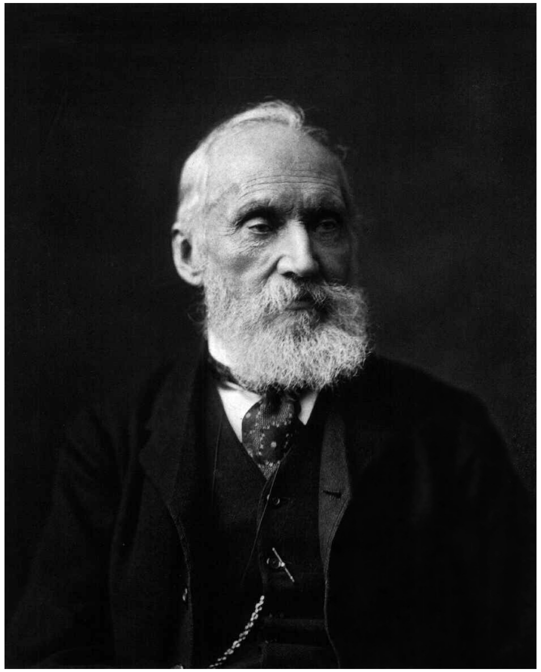
Aula 7
Fótons e ondas de matéria I

Física Geral F-428

No início do século XX, a maioria dos físicos acreditava que a Física estava completa, descrita através da Mecânica Clássica, do Eletromagnetismo de Maxwell e da Termodinâmica.



Lord Kelvin

Em 1900, Lord Kelvin, em palestra à Sociedade Britânica para o Progresso da Ciência, diz: “não há mais nada novo para ser descoberto em Física agora. Tudo que falta são medidas mais precisas....algumas casas decimais a mais...”

Exceto.... ‘duas nuvens’ no horizonte...

1) Explicar a **radiação do corpo negro**, e a catástrofe do ultravioleta...
2) Explicar o porquê da **não detecção do éter** luminífero, especialmente a ‘falha’ do experimento de Michelson & Morley...

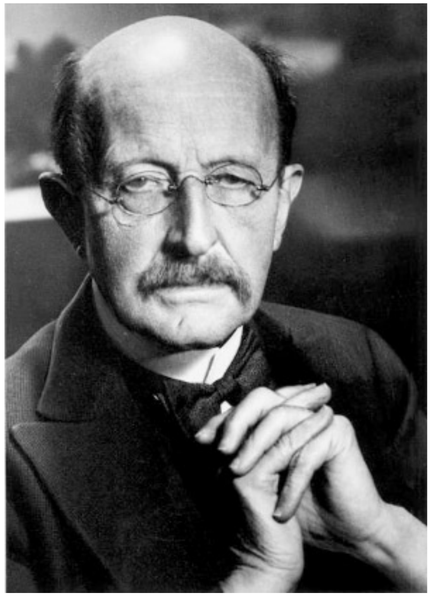
*Essas duas nuvens resultaram na **Mecânica Quântica** e na **Relatividade Restrita!***

O que se sabia em 1900:

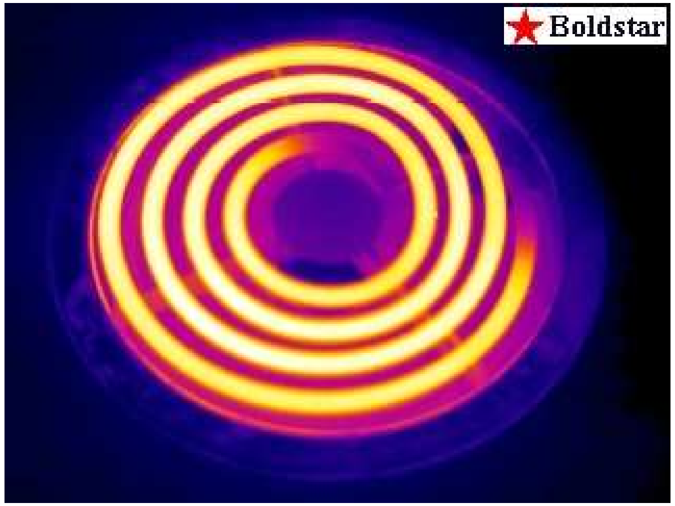
- Nosso Universo $\Rightarrow$ sistema solar e estrelas da nossa galáxia;
- Ninguém sabia como o Sol produzia sua energia;
- Nada era sabido sobre a estrutura de átomos e núcleos;
- Duas forças eram conhecidas: as responsáveis pelas interações gravitacionais e pelas interações eletromagnéticas;
- Ninguém antecipava as mudanças na Física que estavam por vir nos próximos anos.

A radiação do corpo negro

Até agora estudamos fenômenos em que a luz é encarada como onda eletromagnética. Entretanto, há casos em que a explicação convencional da teoria eletromagnética de Maxwell não é satisfatória.

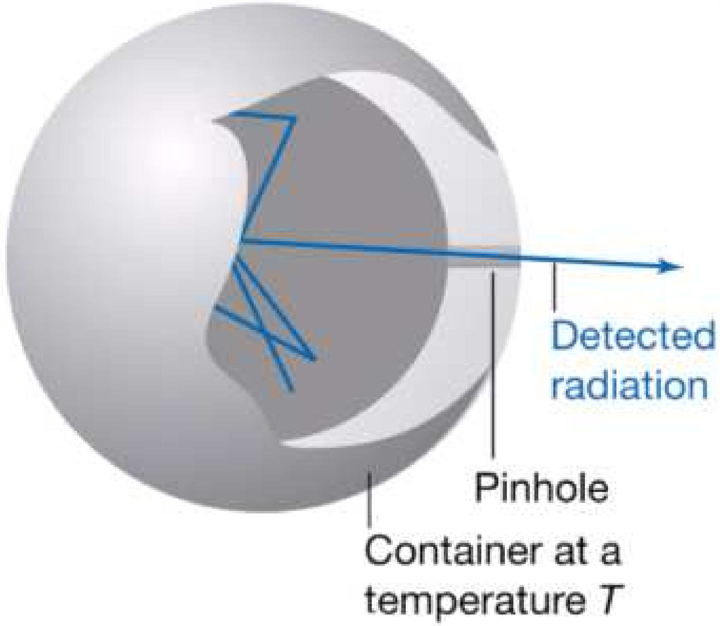


Max Planck



Material aquecido a ~4000-7000 K emite no visível

Corpo Negro



A radiação do corpo negro

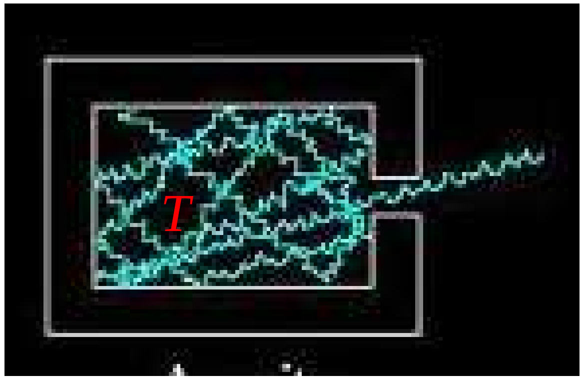
- Resultado clássico para o cálculo da radiância espectral (***Lei de Rayleigh-Jeans***):

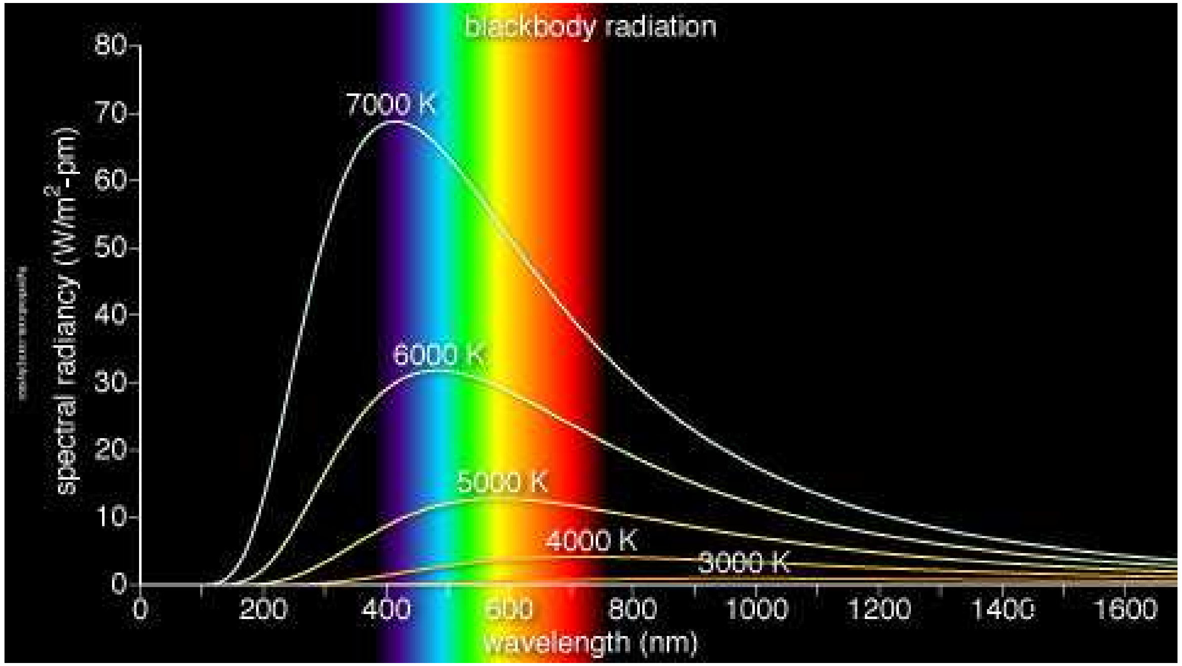
$$S(\lambda) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

Radiância espectral S(λ): *quantidade de energia radiada por unidade de área, por unidade de tempo, por intervalo de comprimento de onda.*

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} J / K$$

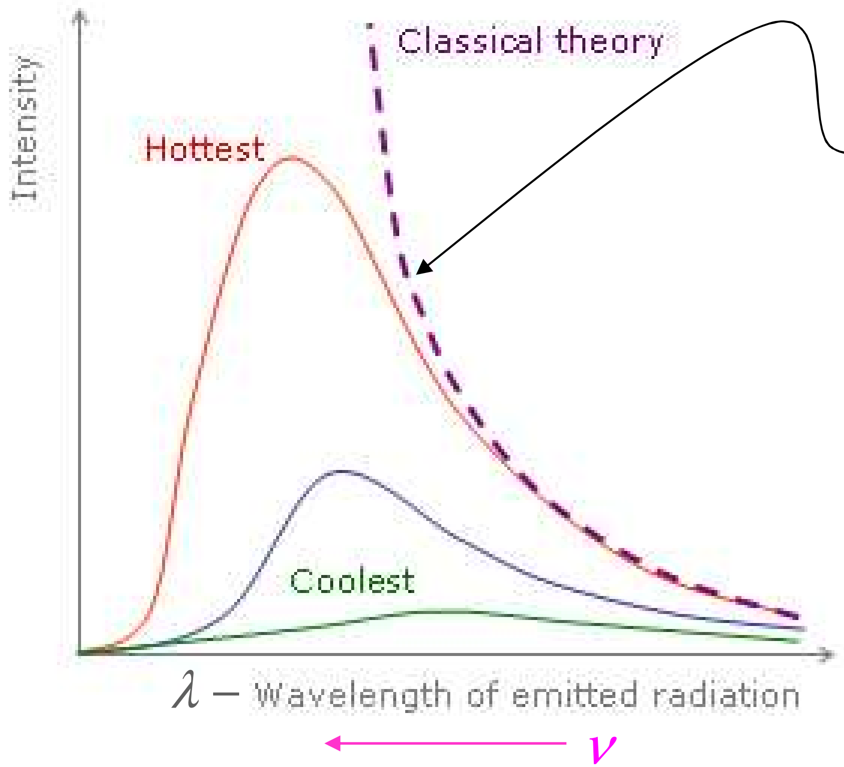
(Constante de Boltzmann)



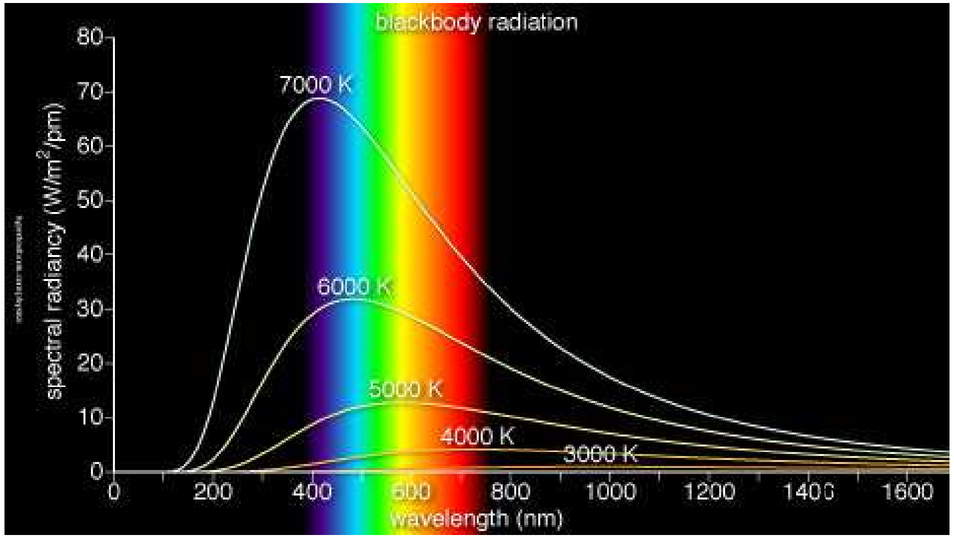


A radiação do corpo negro

$$S(\lambda) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$



A lei de Rayleigh-Jeans concorda com os resultados experimentais para comprimentos de onda longos. Para comprimentos de onda curtos ⇒ "catástrofe do ultravioleta!"



corpo negro

A radiação do corpo negro

- Em 1900, Planck postulou uma expressão para a radiação emitida por uma cavidade mantida a temperatura ***T***, em função da sua frequência (ou do comprimento de onda λ). Além de descrever as suas observações, esta fórmula reproduzia também o resultado clássico da radiância espectral:

$$\boxed{S_P(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5}\left(\frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1}\right)}$$

(***Lei da radiação de Planck***)

Comparando esta expressão com resultados experimentais para várias temperaturas, Planck determinou o valor da constante h como:

$$\boxed{h = 6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\,s}}$$

(***constante de Planck***)

A radiação do corpo negro

$$S_P(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1}$$

Dois limites importantes:

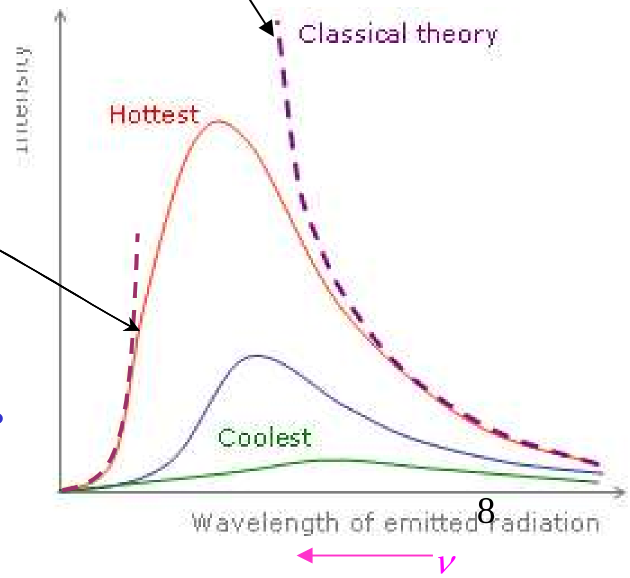
i) $\dfrac{h\nu}{k_B T} << 1 \quad \Rightarrow \quad S_P(\lambda) \approx \dfrac{2\pi k_B c T}{\lambda^4}$

$$\exp(hc/\lambda k_B T) \approx 1 + hc/\lambda k_B T$$

Neste limite, a expressão de Planck recai na lei de Rayleigh-Jeans da radiação.

ii) $\dfrac{h\nu}{k_B T} >> 1 \quad \Rightarrow \quad S_P(\lambda) \approx \dfrac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \exp\left(-\dfrac{hc}{\lambda k_B T}\right)$

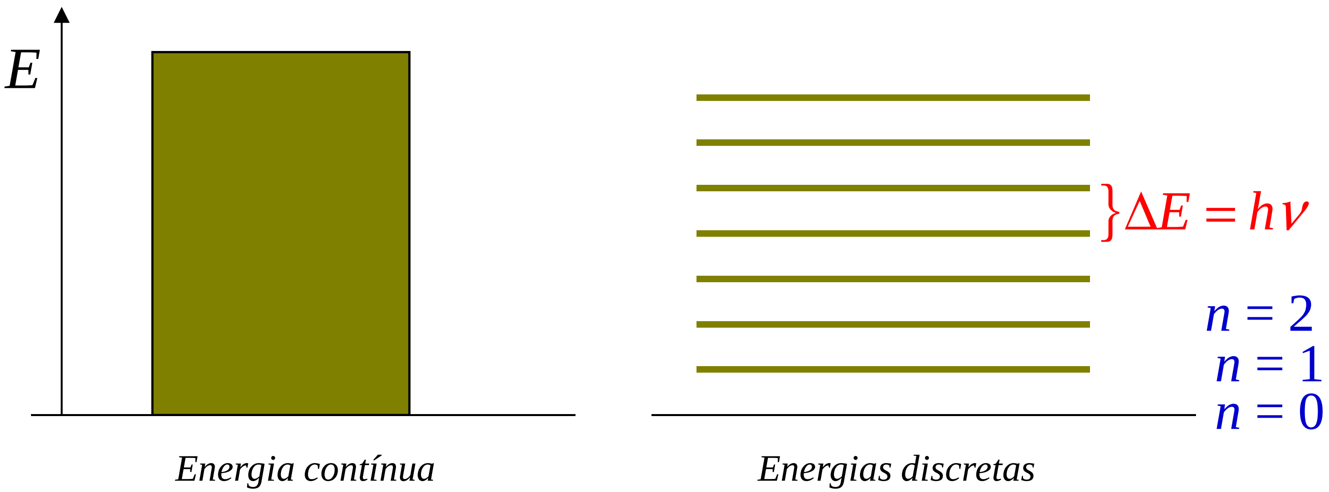
Neste limite, a expressão de Planck não tende a infinito, mas tende exponencialmente a zero.



A radiação do corpo negro

- Para obter sua lei de radiação, Planck fez a hipótese de que a emissão e a absorção da energia radiada pelos osciladores das paredes não se dava em quantidades contínuas, mas sim, em quantidades discretas, na forma de "quanta de energia" ***E= hν.***

- Isso indicava que o movimento dos osciladores nas paredes da cavidade (que geram o campo elétrico) deveria apresentar apenas valores discretos (***quantizados***) de energia, e não contínuos, como se acreditava: $\boxed{E_n = nh\nu \qquad n = 0, 1, 2, \ldots}$

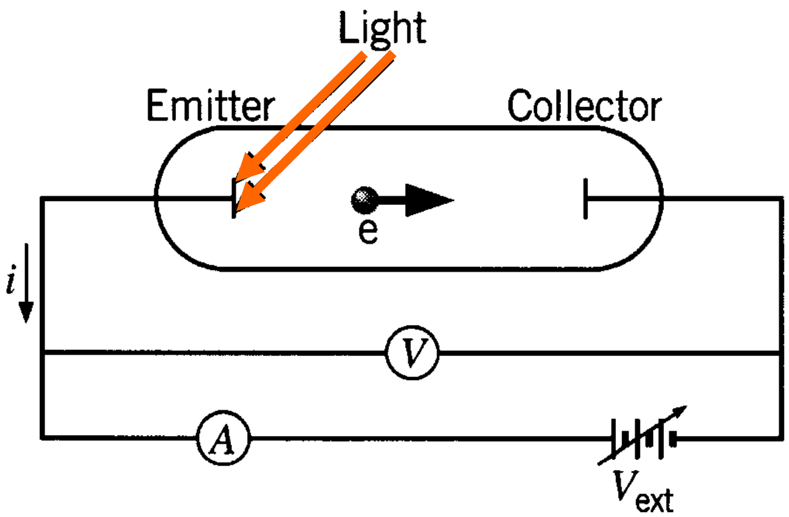


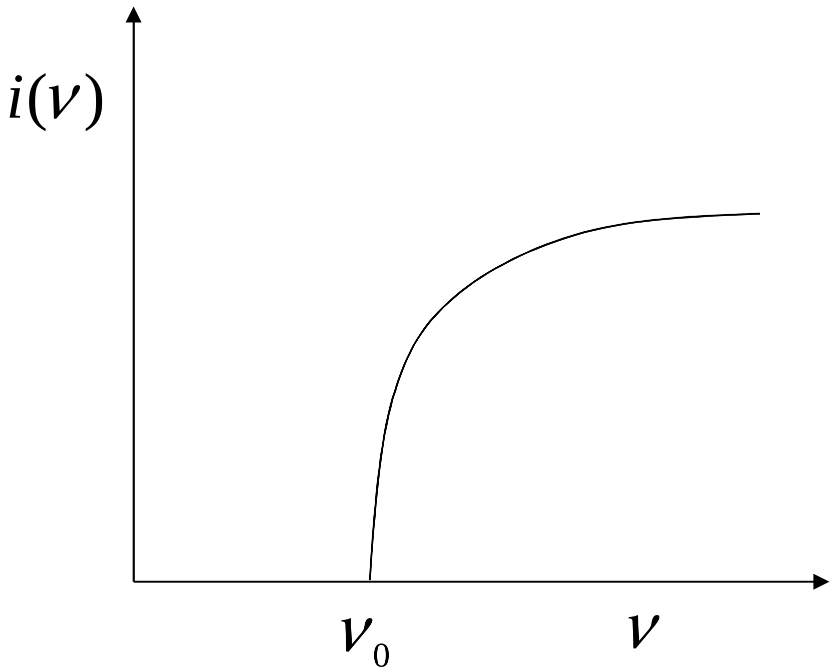
A radiação do corpo negro

Max Planck acreditava que a sua hipótese era apenas um **artifício matemático**, e que o fenômeno de radiação do corpo negro ainda viria a ser explicado de uma outra forma. Ele mesmo tentou obter uma outra explicação, por muitos anos, sem sucesso.

O efeito fotoelétrico

•Observado por Heinrich Hertz (1887), Wilhelm Hallwachs (1888) e outros.

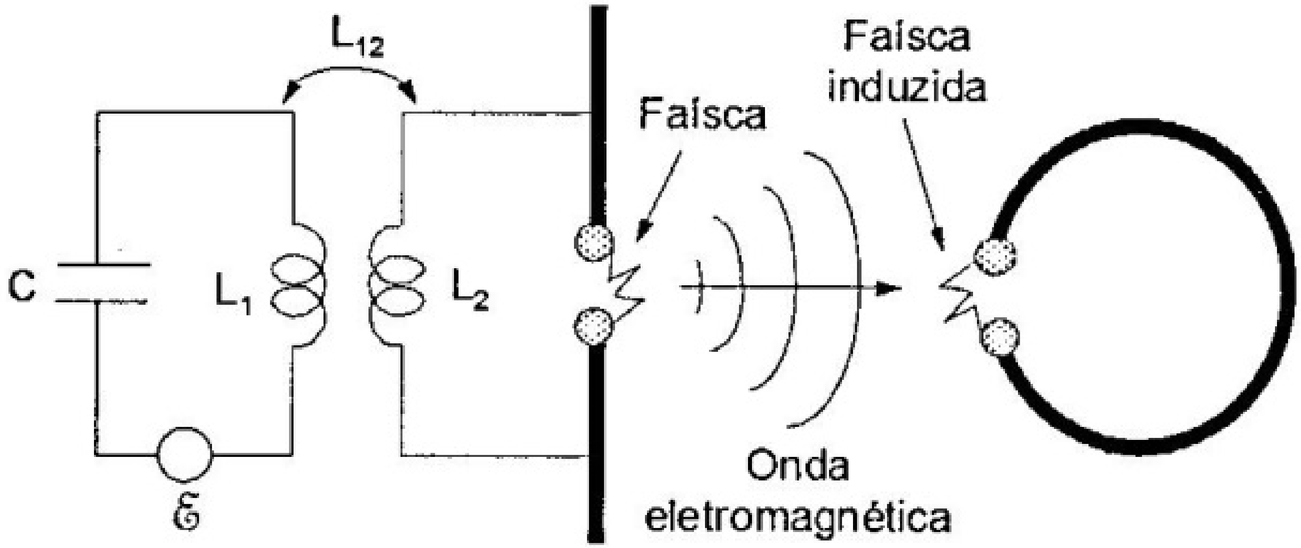




- Ocorre a emissão de elétrons de uma placa metálica, quando iluminada por radiação eletromagnética. Os ***fotoelétrons*** emitidos, e a corrente por eles gerada, só existem acima de um limiar de frequência ν_0 , independente da intensidade da radiação.

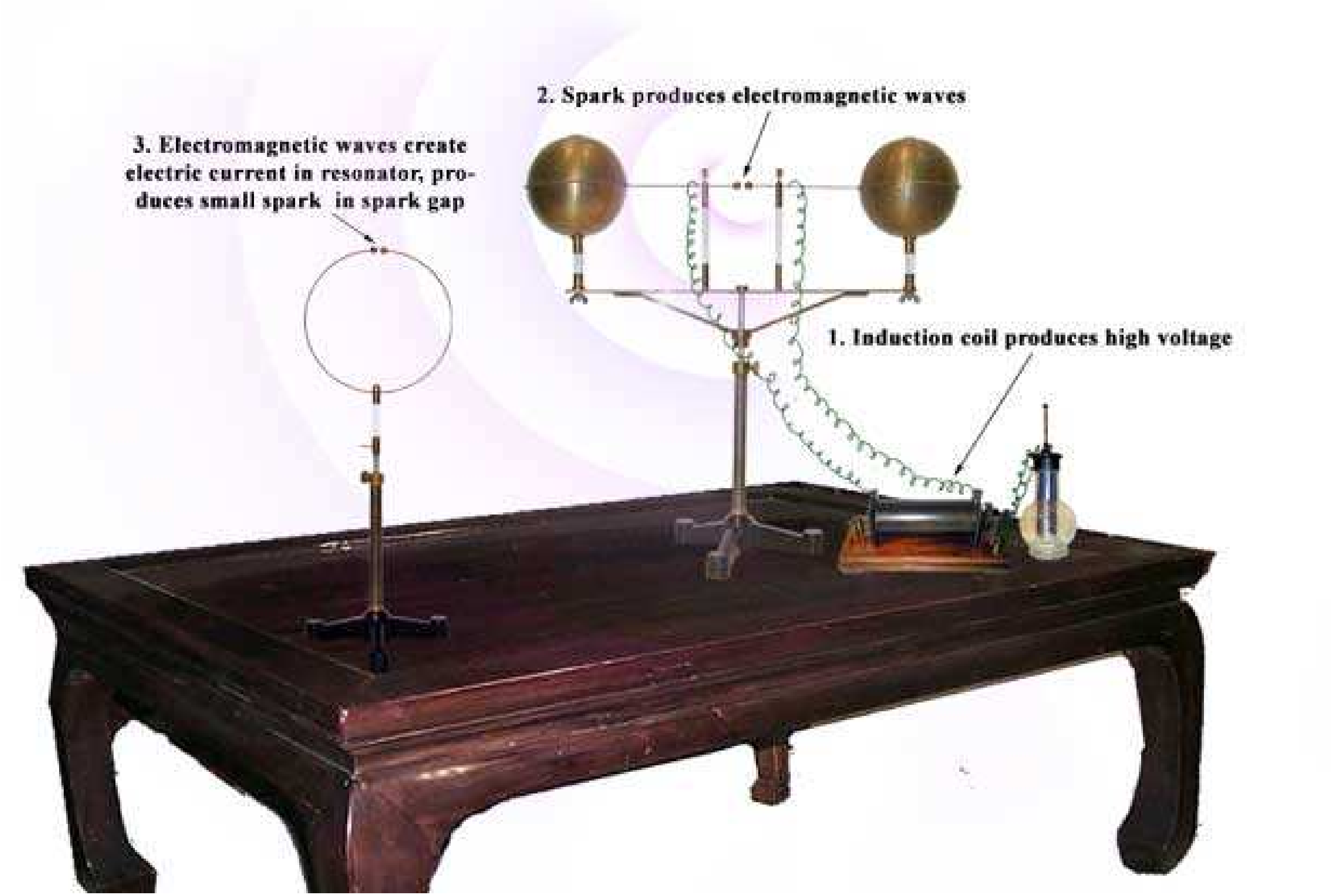
O experimento de Hertz

(1885-1889)



(Descoberta das ondas de rádio)

A confirmação experimental veio com Heinrich Hertz



O efeito fotoelétrico

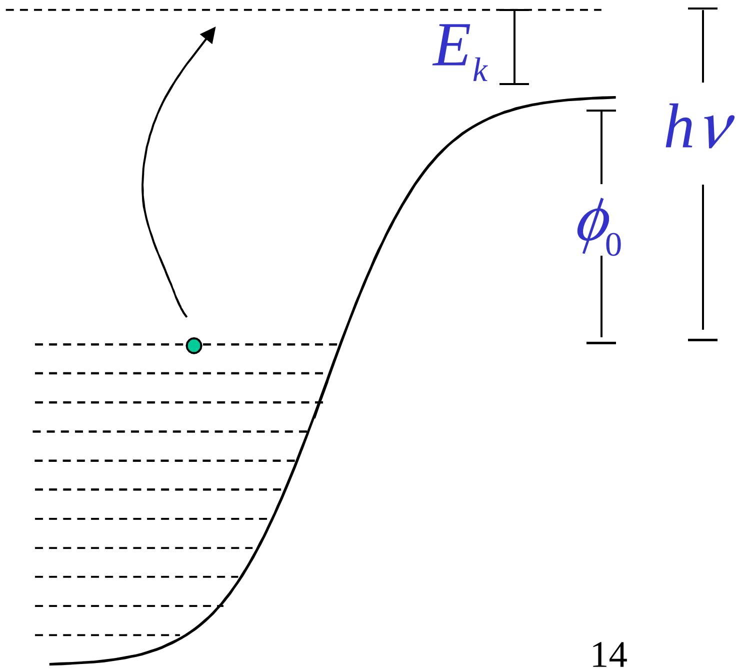
•Cada elétron requer uma energia mínima ϕ para sair do metal. Assim, se fornecermos uma energia $E = h\nu$ o fotoelétron sairá com uma energia cinética:

$$\boxed{E_k = E - \phi}$$

Einstein em 1905, quando publicou sua teoria do efeito fotoelétrico – Prêmio Nobel em 1921.

Assumindo que a absorção de energia de um elétron se dê através da absorção de um quantum, $h\nu$, teremos:

$$\boxed{E_k = h\nu - \phi}$$



Como diferentes elétrons necessitam diferentes energias para saírem, vamos definir o mínimo de ϕ como ϕ_0 , chamada ***função trabalho do metal.***

O efeito fotoelétrico

$$\boxed{E_k = h\nu - \phi}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{E_{k\,max} = h\nu - \phi_0}$$

$$\Downarrow$$

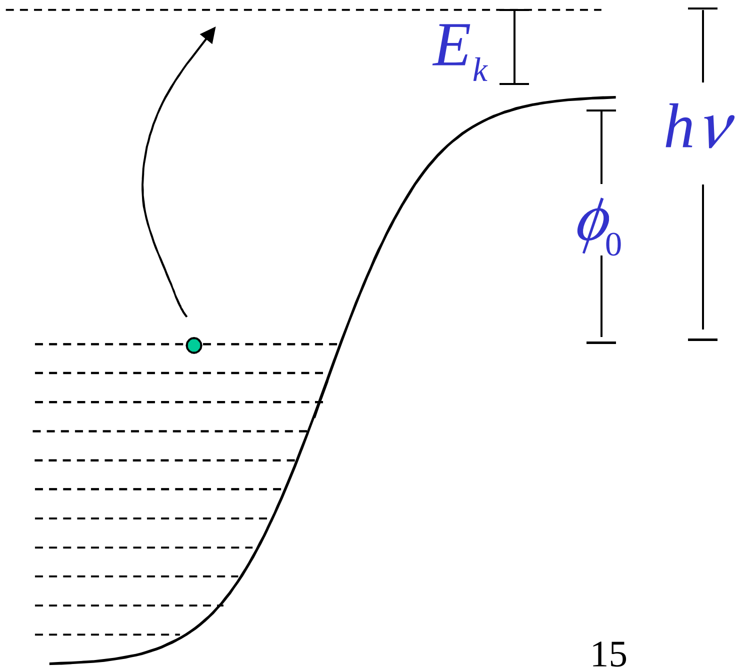
$$\boxed{E_{k\,max} = 0 \quad \Rightarrow \quad h\nu - \phi_0 = 0}$$

$$\Downarrow$$

Não há emissão de fotoelétrons
para frequências abaixo de:

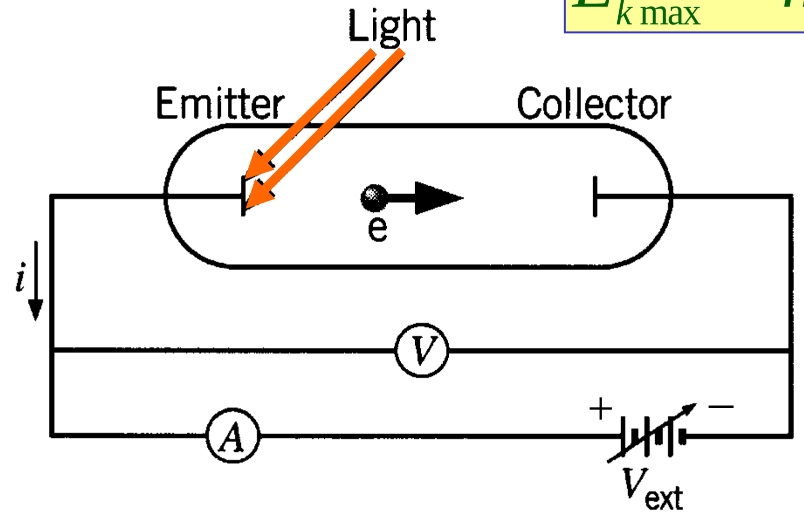
$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h}$$ ***=> frequência de corte***

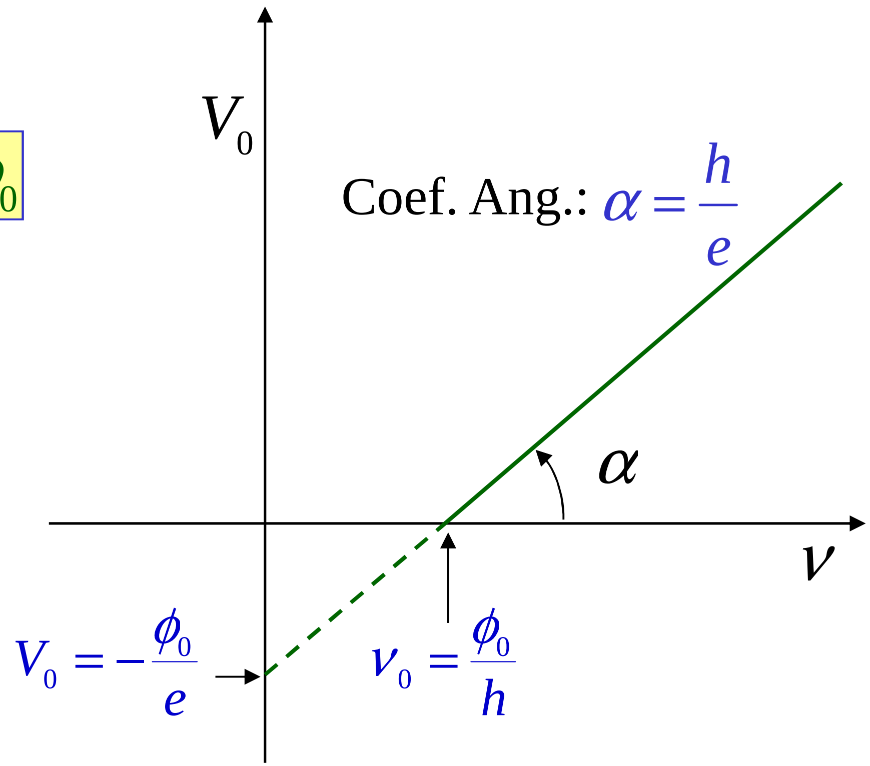
Einstein em 1905, quando publicou sua teoria do efeito fotoelétrico – Prêmio Nobel em 1921.



O efeito fotoelétrico

$$E_{k\,max} = h\nu - \phi_0$$

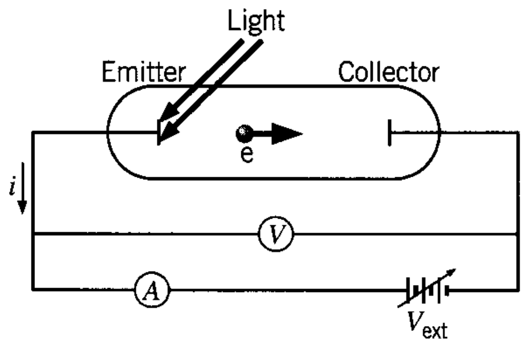




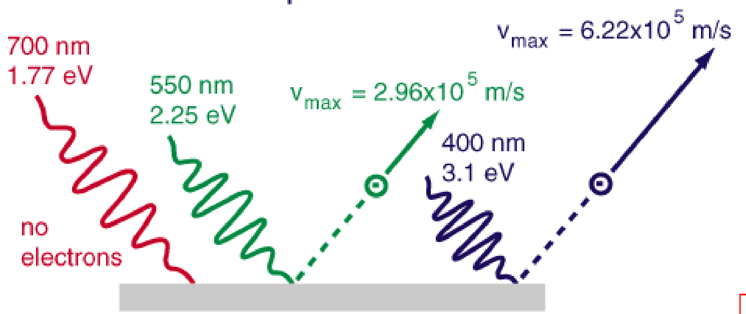
E_{kmax} pode ser medida pelo circuito acima, pois os elétrons são freiados por V. Assim, podemos zerar a corrente para um certo valor V_0 (***potencial de corte***):

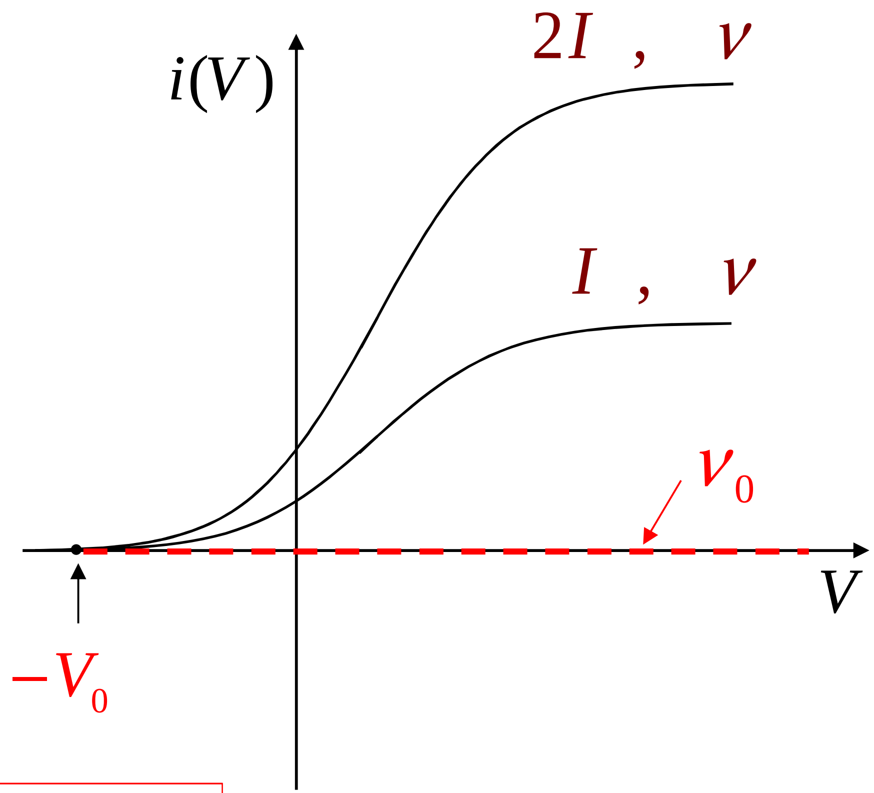
$$E_{k\,max} = eV_0 \quad \Rightarrow \quad eV_0 = h\nu - \phi_0 \quad \Rightarrow \quad V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\phi_0}{e}$$

O efeito fotoelétrico



$E_{photon} = h\nu$



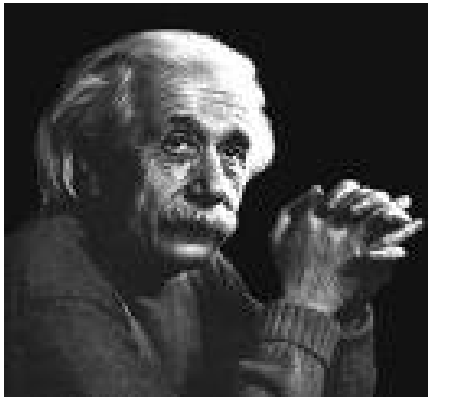


Potássio: são necessários fótons de 2.0 eV para ejetar elétrons

Unidade de energia
1eV≡ 1,6×10^{-19}J

O que independe da intensidade (I) da radiação incidente são os valores de V_0 e ν_0; não o valor da corrente depois de estabelecida!

O fóton



• A partir do conceito do quantum de energia, $h\nu$, e da fórmula da energia de uma partícula relativística com massa de repouso $m_0 = 0$, podemos escrever:

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 = p^2 c^2 \Longrightarrow \boxed{E = h\nu = p\,c}$$

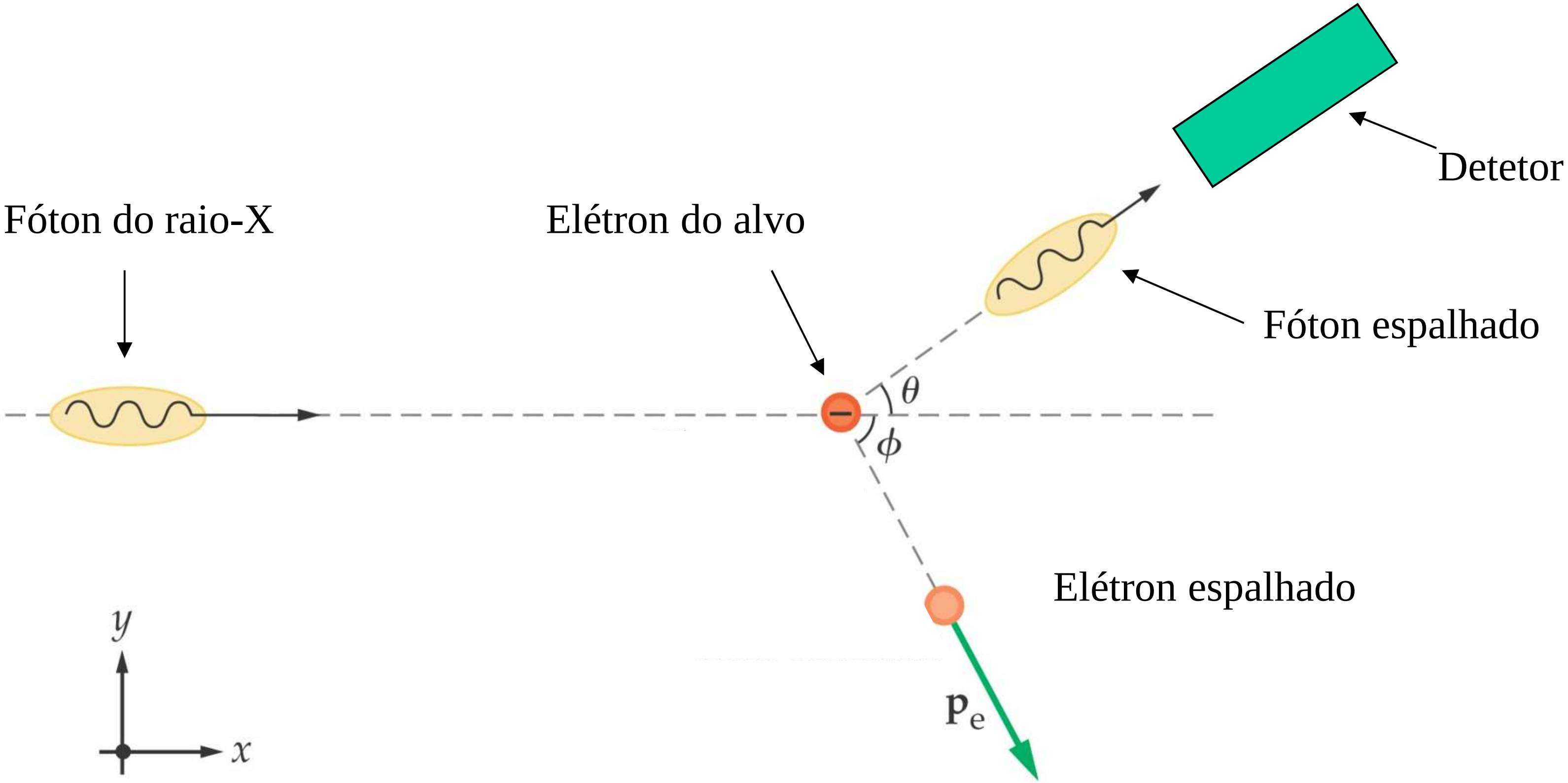
Portanto, o *momento linear* do quantum $h\nu$ é :

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{ou} \quad p = \hbar k \; ; \quad \text{onde} \quad \hbar \equiv \frac{h}{2\pi} \approx 1.05 \times 10^{-34}\, Js$$

$$\Longrightarrow \begin{cases} \vec{p} = \hbar \vec{k} \\ E = \hbar \omega \end{cases}$$

O efeito Compton

• Em 1916, Einstein propôs que o fóton teria um momento linear $p = h/\lambda$. Esta ideia foi confirmada experimentalmente por Arthur Compton (1923), ao incidir raios-X sobre um alvo de carbono:

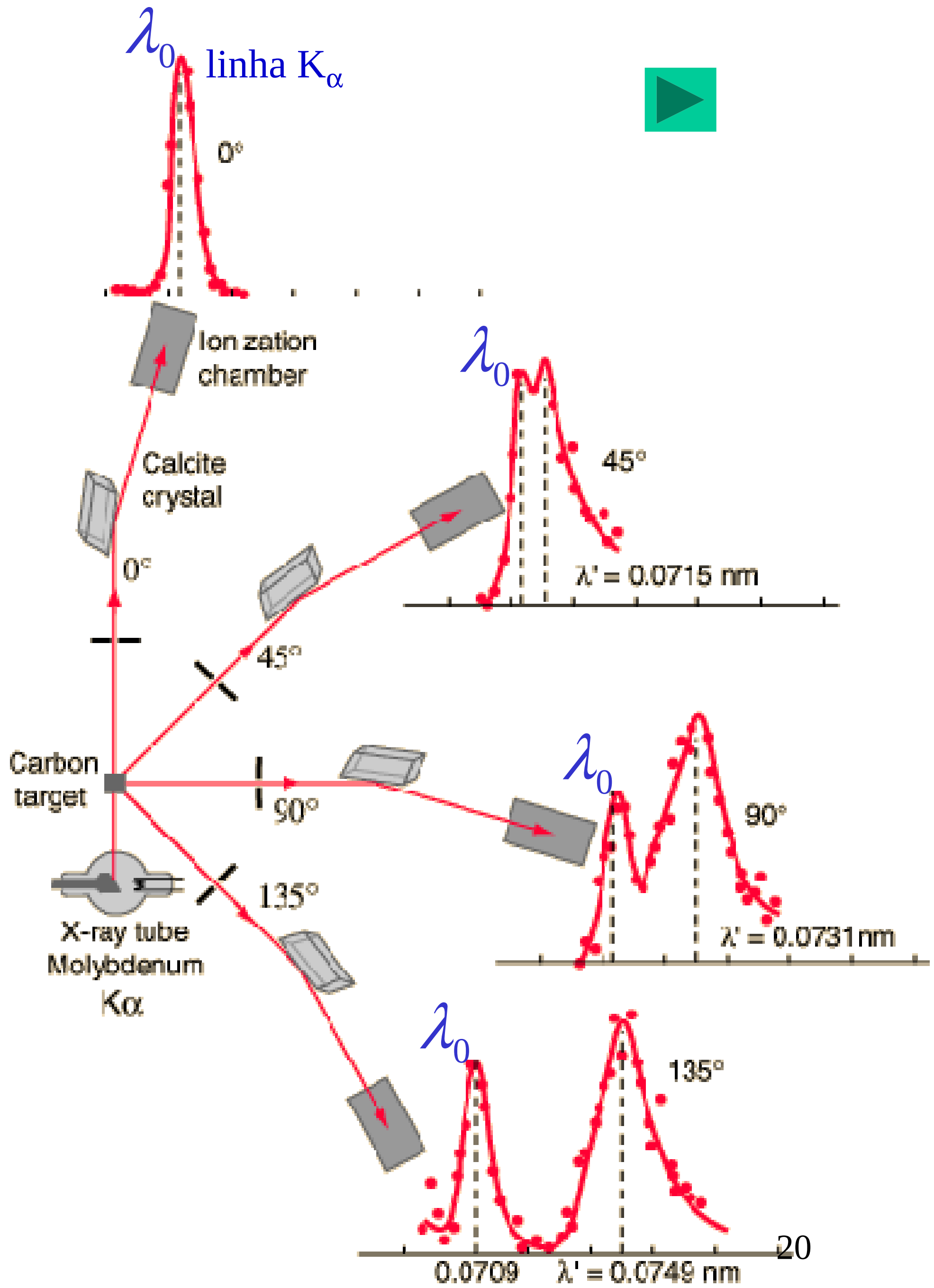


compton

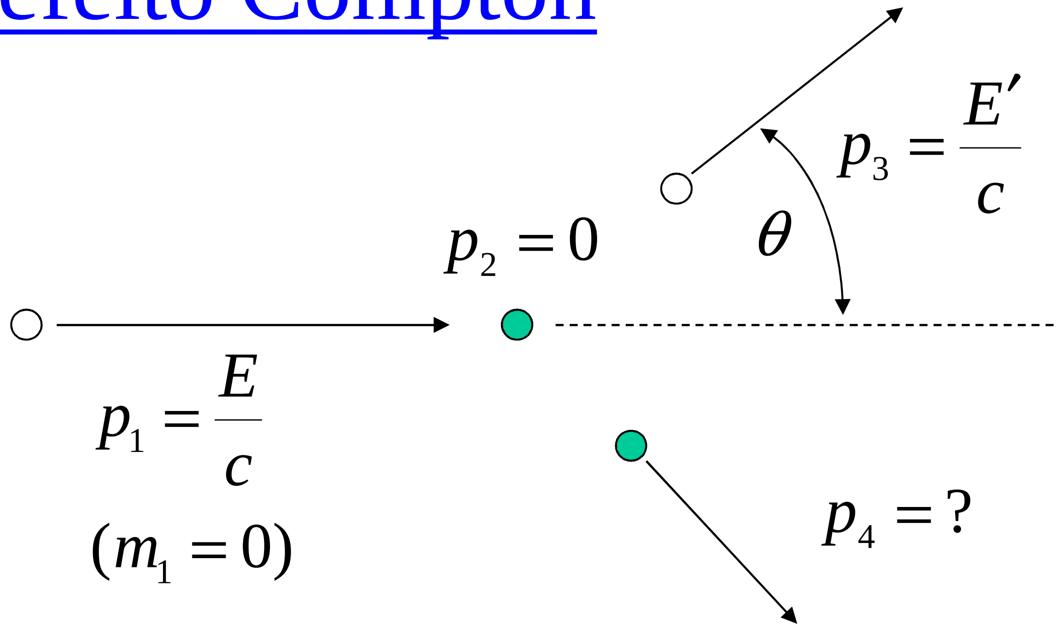
O efeito Compton

Classicamente esperaríamos somente um pico de $\lambda = \lambda_0$ da radiação incidente; entretanto, aparece outro pico...

A explicação é baseada no fato do fóton carregar momento linear ($\vec{p}$) e energia (E).



O efeito Compton



$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4$$

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4$$

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

$$\vec{p}_1 - \vec{p}_3 = \vec{p}_4 \Longrightarrow p_4^2 = p_1^2 + p_3^2 - 2 p_1 p_3 \cos\theta$$

$$E + m_0 c^2 = E' + \sqrt{p_4^2 c^2 + m_0^2 c^4} \Longrightarrow (E - E' + m_0 c^2)^2 = p_4^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

$$\Longrightarrow \boxed{\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_0 c^2}(1 - \cos\theta)}$$

O efeito Compton

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_0 c^2}(1-\cos\theta)$$

Como: $E = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$, podemos escrever:

$$\lambda' - \lambda = \frac{hc}{m_0 c^2}(1-\cos\theta) \longrightarrow \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta)$$

$$\longrightarrow \boxed{\Delta\lambda = \lambda_c(1-\cos\theta)} \quad ; \text{ onde: } \lambda_c \equiv \frac{h}{m_0 c} \approx 2{,}43\times 10^{-12}\ \text{m}$$

é o ***comprimento de onda de Compton*** da partícula espalhadora.

- Se o elétron que espalha a radiação estiver fracamente ligado ao átomo de carbono, $m_0 = m_e$. Mas se é o átomo como um todo que espalha o fóton, então $m_0 = M$, onde M é a massa do átomo. Como isso sempre ocorre, são sempre detectados dois picos (para $\theta > 0$) porque:

$$M >> m_e \Rightarrow \Delta\lambda_{at} << \Delta\lambda_e$$

Resumo da aula:

- Planck e o espectro da radiação de um corpo negro: introdução do conceito de estados quantizados de energia para os osciladores nas paredes, e de emissão/absorção de quanta de luz de energia $E=h\nu$;

- Einstein e a explicação do efeito fotoelétrico: $h\nu = E_{cin} + \phi$ (conceitos de quantum de luz, frequência/comprimento de onda de corte, potencial de corte);

- Compton e o espalhamento de raios-X em alvo de carbono:
  $\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = h/mc\,(1-\cos\theta)$. Os quanta de radiação têm momento.

  Comprimento de onda Compton do elétron

- O nome 'fóton' para o quantum de energia $h\nu$ só foi introduzido por G. Lewis em 1926 .