

Física IV

2020


Professor: Valdir Guimarães

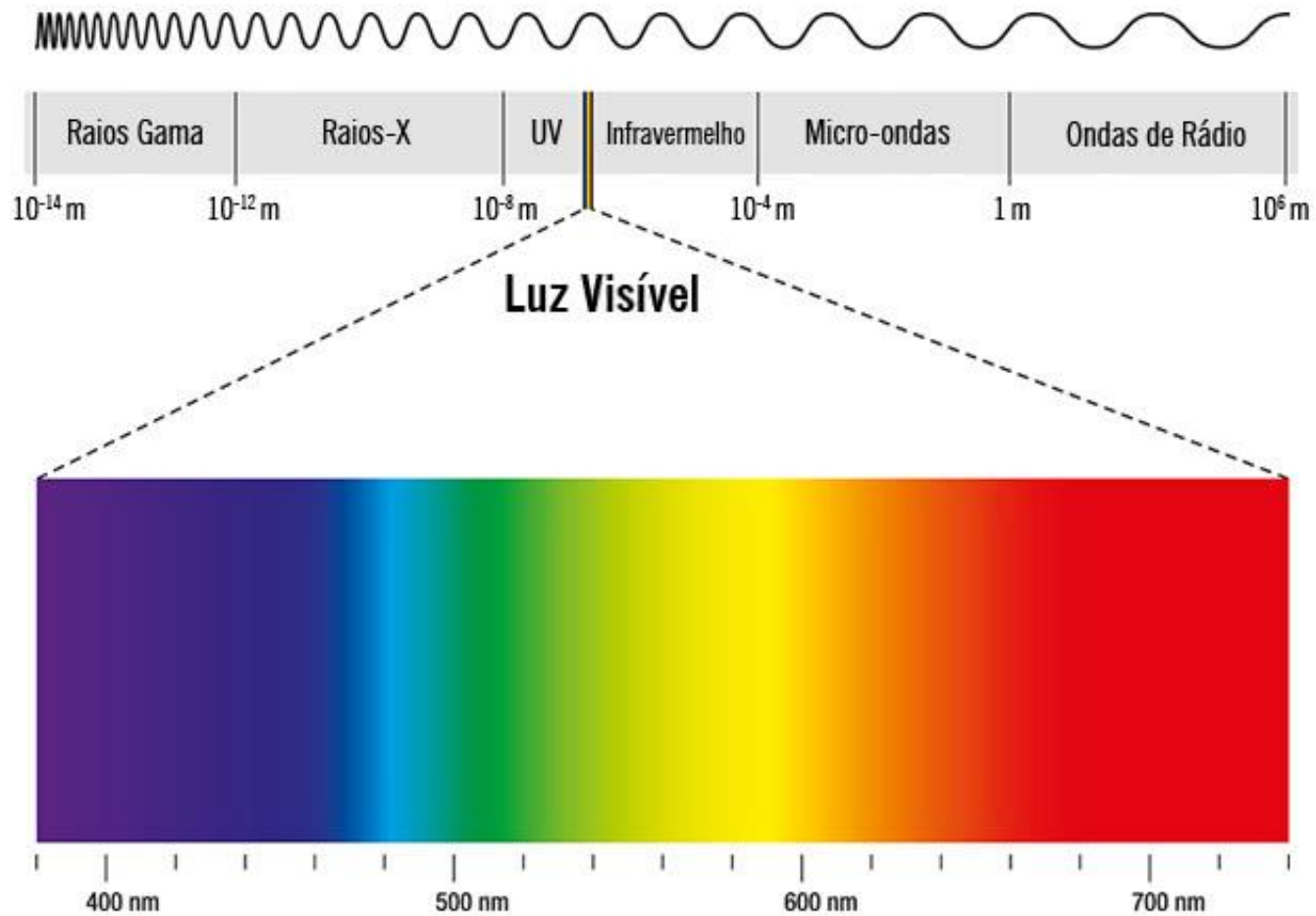
E-mail: valdir.guimaraes@usp.br

Aula-12: Fótons - raio-x - espalhamento compton

1880 a 1910: Alguns fenômenos estavam sendo observados que não conseguiam ser explicados pela mecânica clássica.

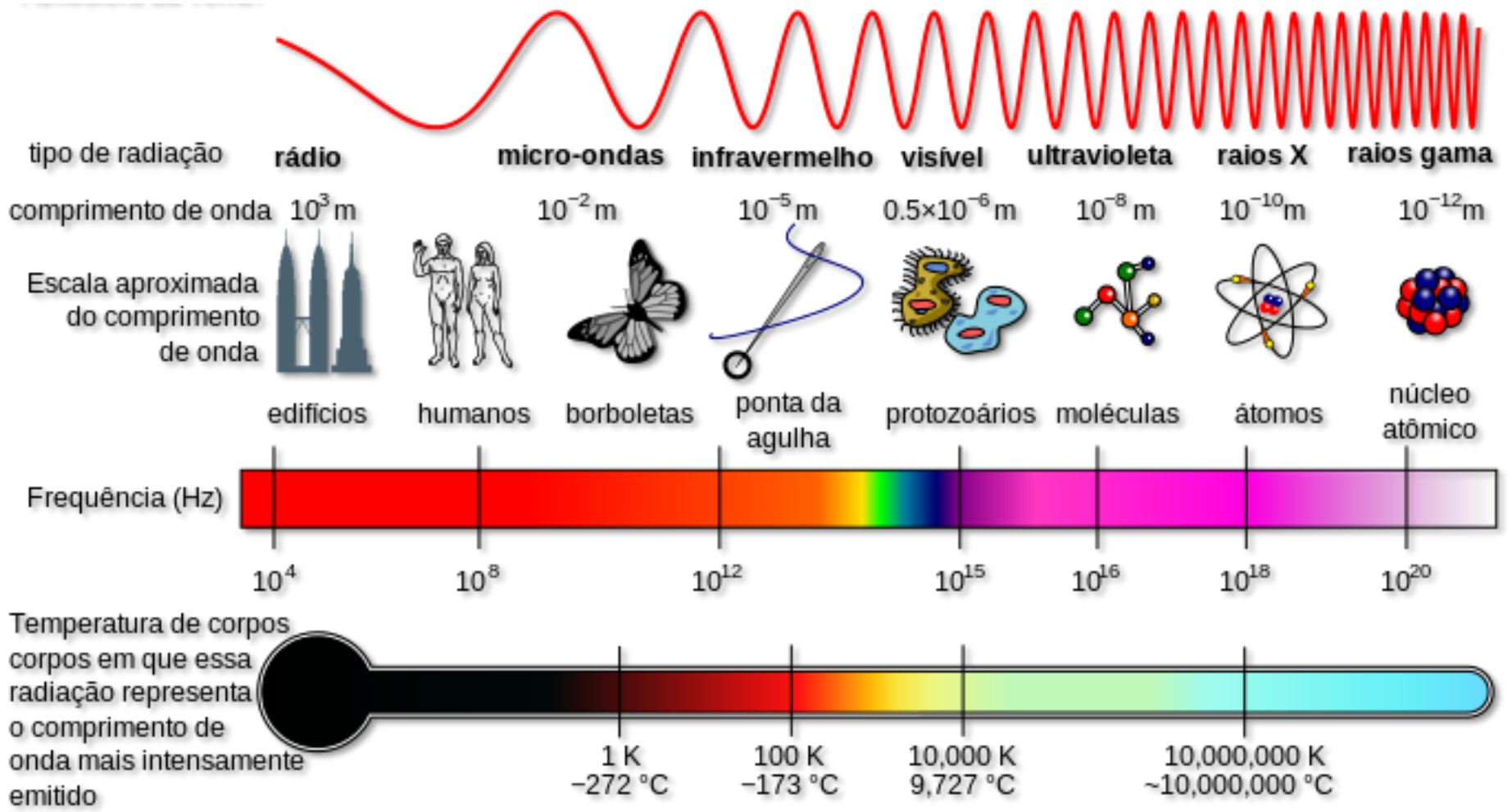
A maioria desses fenômenos estavam relacionados a radiação (luz).

- Emissão de radiação por matéria quente
- Efeito fotoelétrico
- Raio-x – espalhamento compton** 
- Espectro de linhas de átomos.



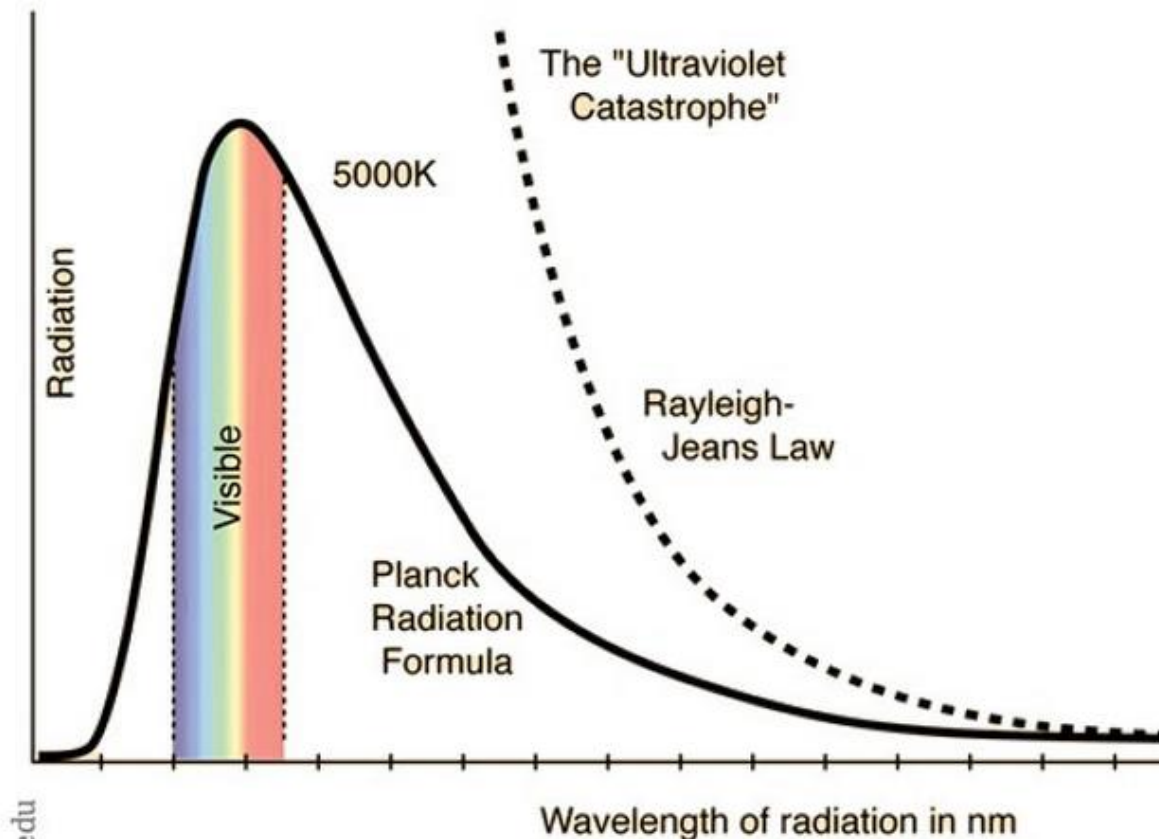
- Luz Visível** entre 400 e 700 nm
- Ondas de Radio: 1 m
- Microonda: 1 mm

- Radiação Infravermelha: 1 μ m
- Radiação Ultravioleta: 100 nm
- Raio-X: 1 nm
- Raios-Gamma: 10^{-3} nm



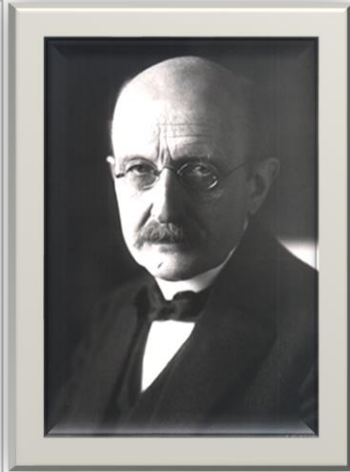
Catastrofe ultravioleta

- ❑ Quando o gráfico desta equação foi feito, verificou-se que os dados experimentais só eram razoavelmente bem ajustados na região correspondente a valores muito grandes de λ . Para $\lambda \rightarrow 0$, porém, obtinha-se que $I \rightarrow \infty$!
- ❑ Este comportamento ficou conhecido com “**Catástrofe do Ultravioleta**”.



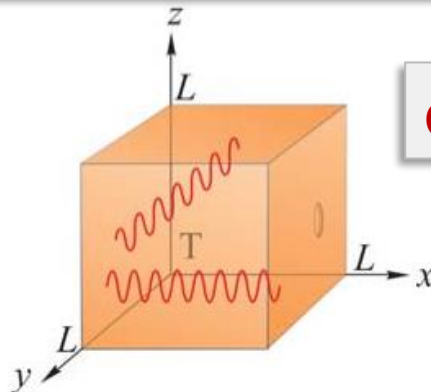
Proposta de Planck -> quantização da energia

- ❑ Em 1900, o físico alemão Max Planck apresentou uma equação que ele obteve ajustando de forma empírica os dados experimentais.
- ❑ Planck propôs que a irradiação deveria corresponder à emissão pelos osciladores das paredes internas do corpo negro mas considerando que os osciladores não irradiam em todos os comprimentos de onda mas em apenas algumas bem específicas.

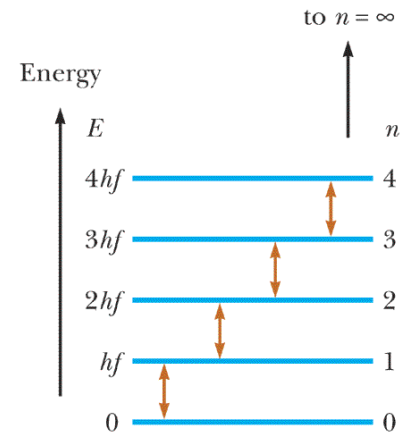


Max Planck
(1858 – 1947)

$$E = n \frac{hc}{\lambda} = nh\nu$$



Quantização da energia



: Cavidade ressonante cúbica perfeitamente condutora a uma temperatura T .

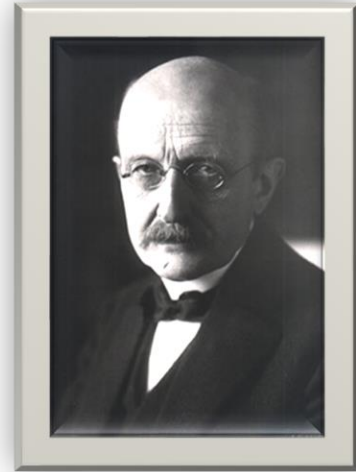
Proposta de Planck -> quantização da energia

- Max Planck propôs então que ao invés de integração deveríamos fazer uma soma das contribuições discretas de energia.

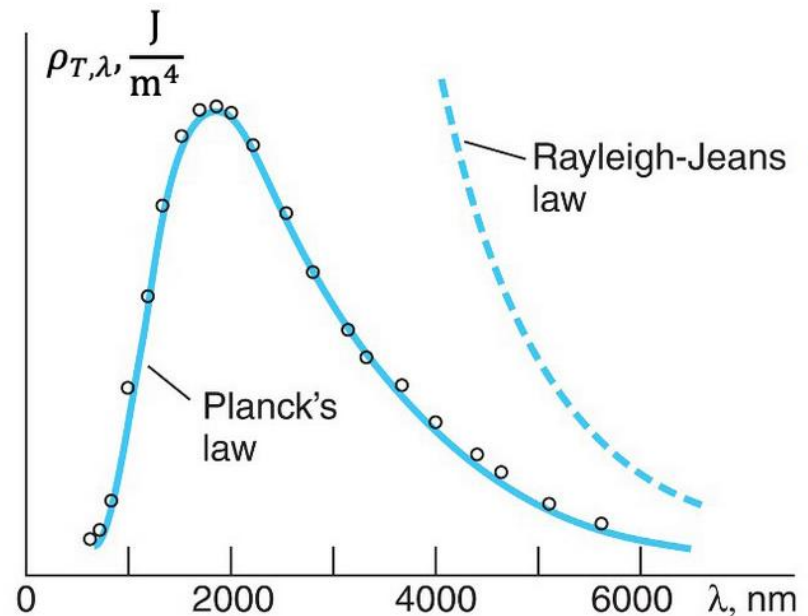
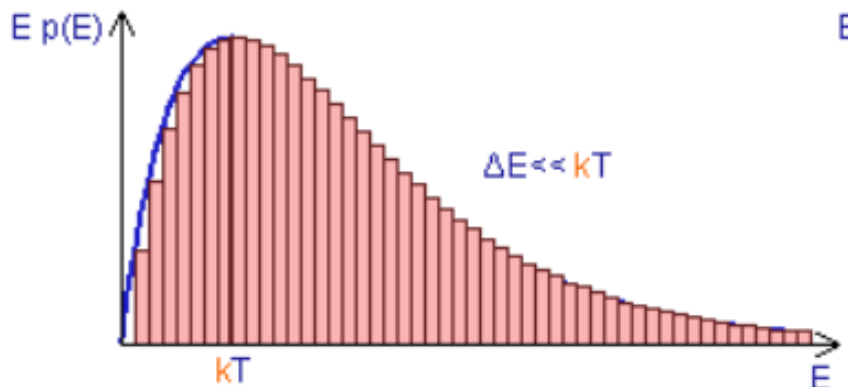
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1)}$$

A constante de normalização foi a constante “h”

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

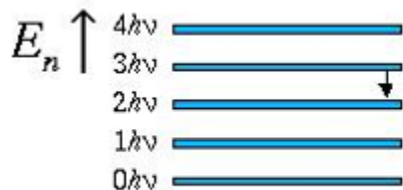


Max Planck
(1858 – 1947)



Teoria de Einstein para o fotoelétrico

Planck (1900), quantização do osc. harmônico: $E_n = nh\nu$
 explica a radiação de corpo negro

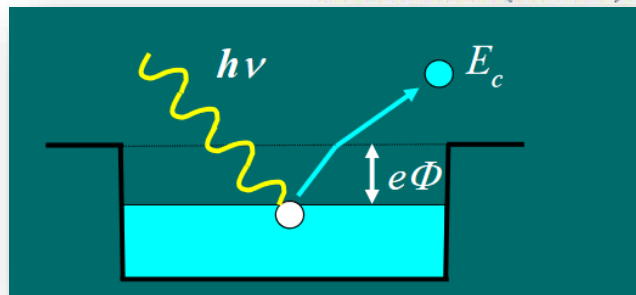


$$E_{(n+1)} - E_n = h\nu$$

h - constante de Planck
 (6.6262×10^{-34} Js)

Metal	ϕ (eV)
Na	2,28
Al	4,08
Cu	4,70
Ag	4,73
Fe	4,50

Einstein (1905), fóton: $E_f = h\nu$



Conservação de energia:

$$E_c^{max} = h\nu - e\phi$$

E_c^{max} : energia cinética máxima dos eletrons

h : constante de Planck

ν : frequência da onda incidente

e : carga do eletron

Φ : Função trabalho em volts

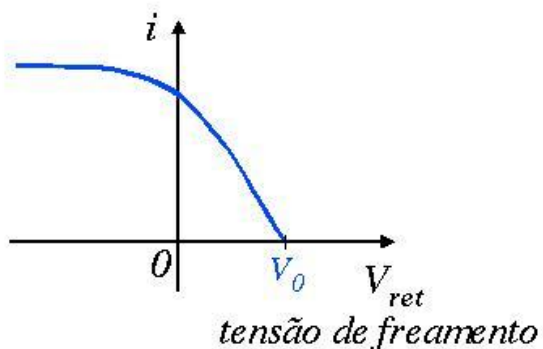
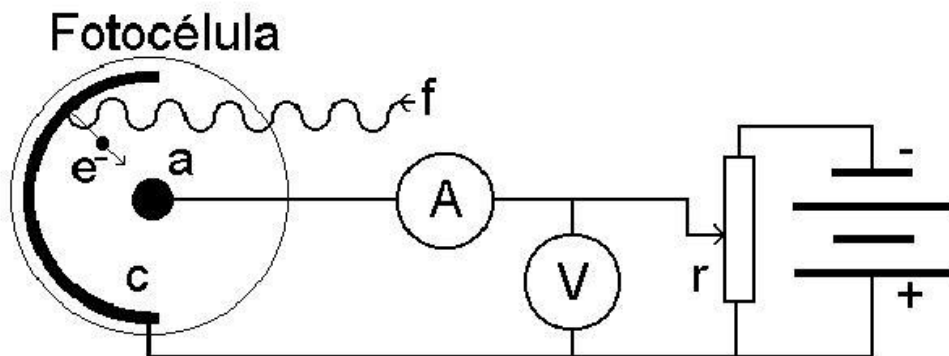
I – não varia com a intensidade (amplitude) ✓

II – não tem atraso ✓

III – depende da frequência. ✓

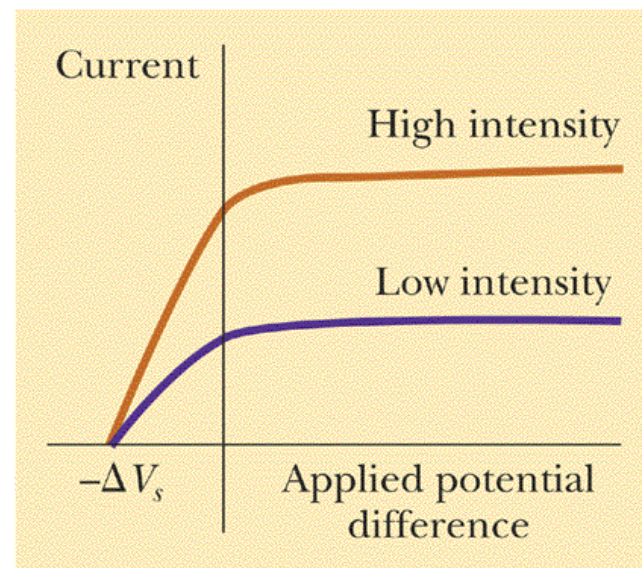
Energia máxima dos fotoelétrons

Como medir a energia cinética máxima dos fotoelétrons

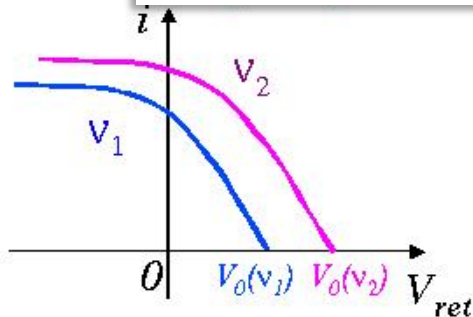


$$E_c^{max} = eV_0$$

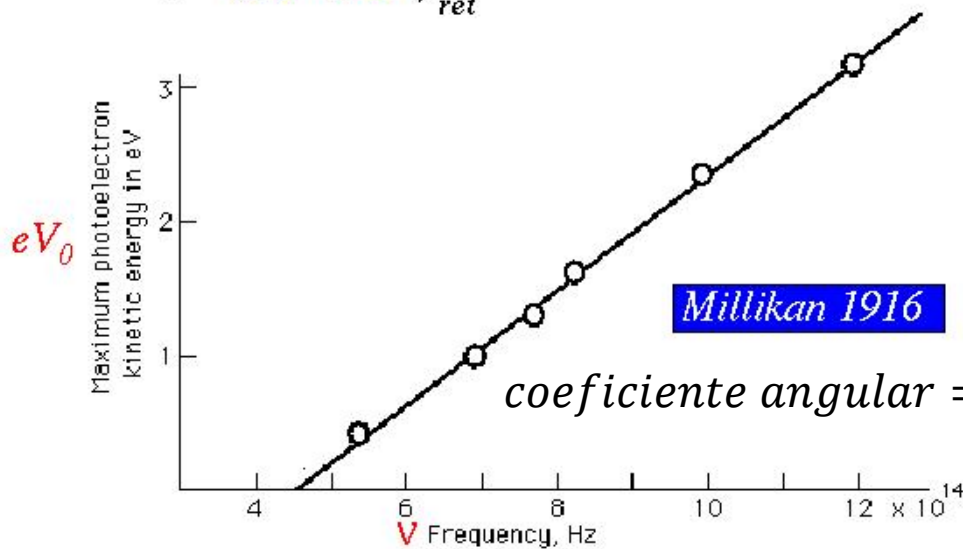
Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 28.6



comprovação das ideias do Einstein



$$eV_0(\nu) = h\nu - e\phi$$

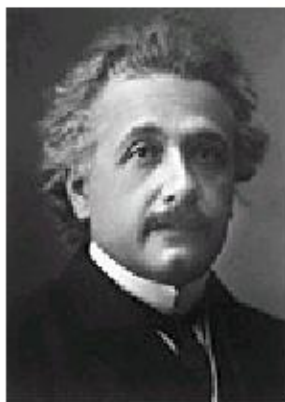


$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$



Efeito fotoelétrico

<http://www.nobel.se/physics/laureates/>



Prêmio Nobel de Física 1921

"pelos seus serviços para a Física Teórica, e especialmente pela sua descoberta da lei do **efeito fotoelétrico**"

Albert Einstein

(1879- 1955)



Prêmio Nobel de Física 1923

"pelo seu trabalho sobre a carga elementar e sobre o **efeito fotoelétrico**"

Robert Andrews Millikan

(1868- 1953)

fóton

- ❑ Einstein propõe a ideia do Fóton
- ❑ A lei de Planck relaciona a energia do fóton com seu comprimento de onda ou frequência.

E = energia do fóton

h = constante de Planck = 6.625×10^{-34} J.s

c = velocidade da luz

λ = comprimento de onda

$$E = h\nu$$

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2$$



*energia
de repouso*

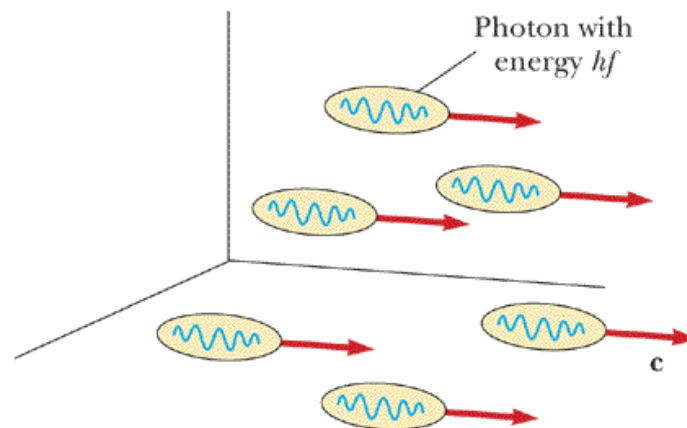
*energia
cinética*

$$E_0^2 = 0$$



$$E^2 = p^2 c^2$$

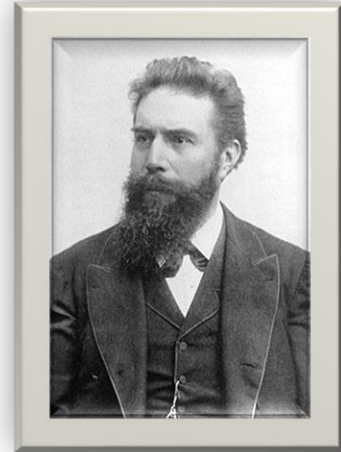
$$E = pc$$



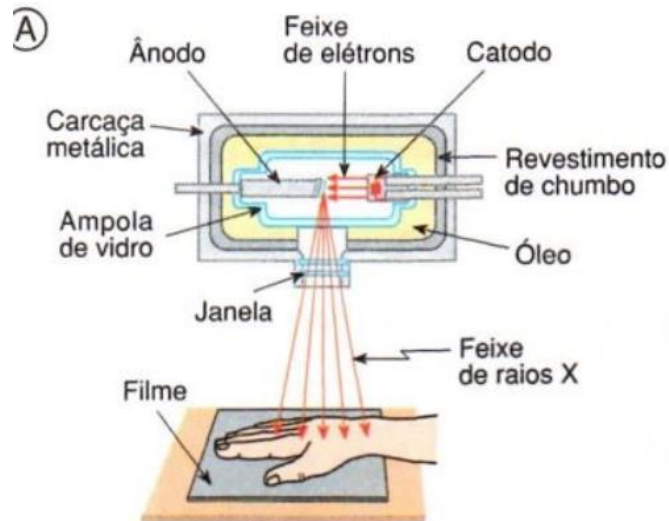
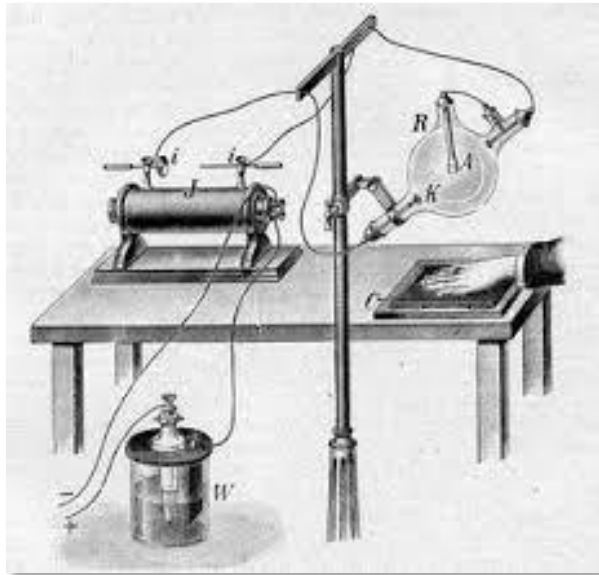
- ❑ Veja que fóton não é uma partícula pois não tem massa de repouso.
- ❑ No entanto, fóton se comporta como partícula por ter momento.

Produção de fótons

- ❑ Fótons se comportam como partículas
 - ❑ O efeito fotoelétrico: evidência convincente da absorção de fótons.
 - ❑ Mas e a emissão (produção) de fótons? Raio-X.
-
- ❑ Raio-X foram produzidos pela primeira vez em 1895 por Wilhelm Rontgen. **Primeiro a receber o premio Nobel.**
 - ❑ Devido a natureza desconhecida desses raios penetrantes ele foi chamado de raio-X
 - ❑ Raio-X corresponde a uma radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 0.1 a 10 Angstrom



Willian Rontgen
(1845 – 1923)



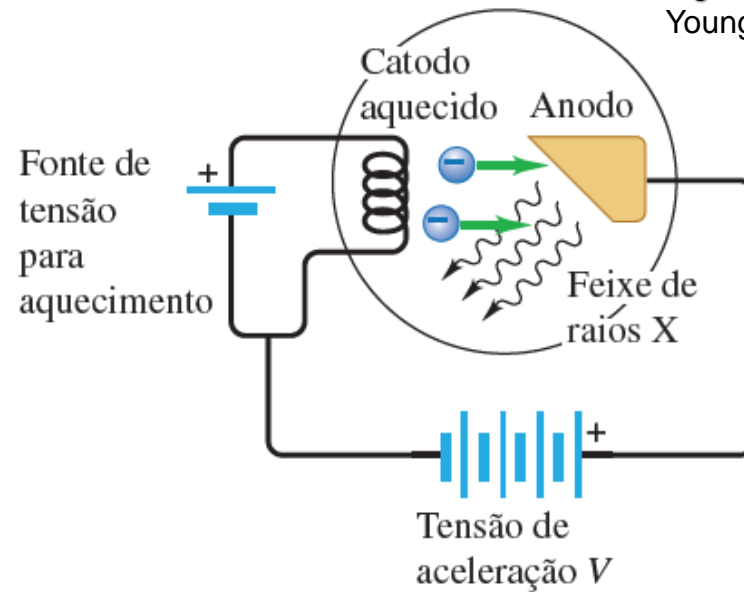
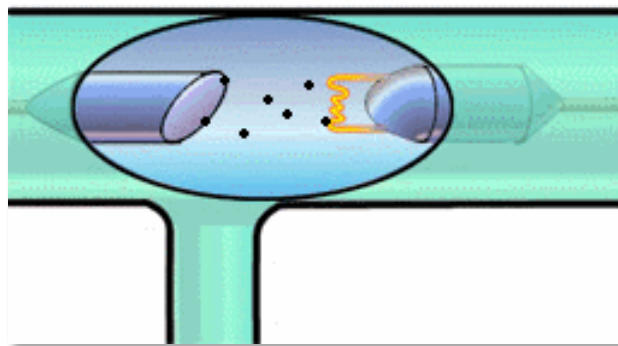
Aparelho utilizado por Rontgen



Raio-X da mão da esposa de Rontgen

Produção de raio-X

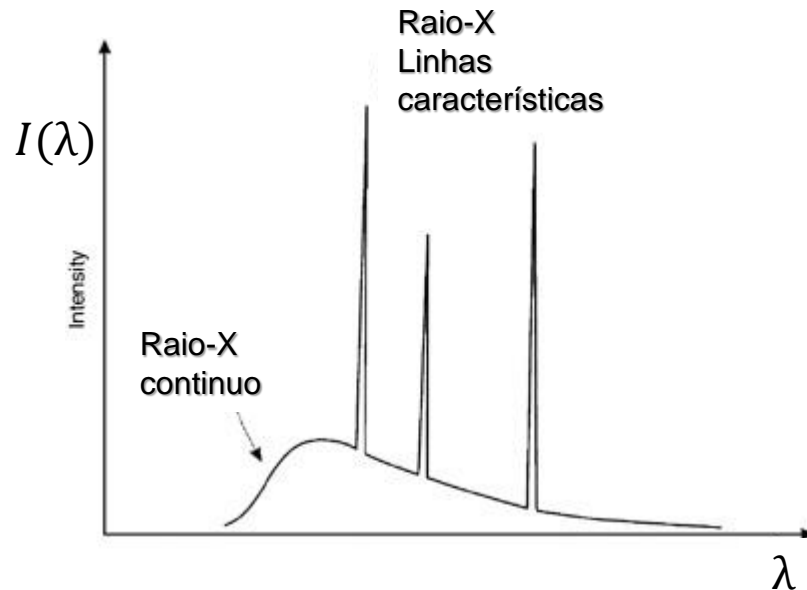
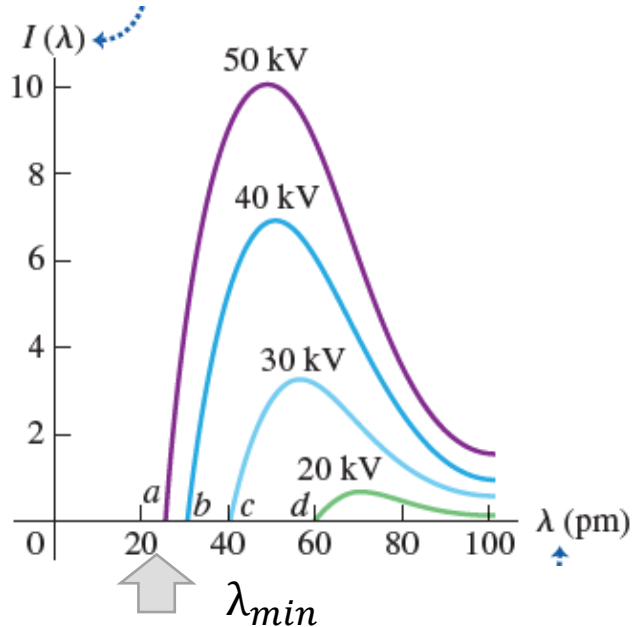
Figura extraída do livro Física-IV 14e
Young & Freedman Sears & Zemansky



- ❑ O filamento de tungstênio é aquecido pela passagem de corrente ($I < 80 \text{ mA}$) e emite elétrons.
- ❑ Elétrons são acelerados por uma diferença de potencial ($V = 20 \text{ kV}$ ou 30 kV) entre o filamento (catodo) e um eletrodo de Cobre (ânodo).
- ❑ Ao atingirem o ânodo de cobre os elétrons são freados bruscamente, emitindo radiação e ionizando os átomos de cobre.
- ❑ O processo é como um efeito fotoelétrico invertido.
- ❑ Radiação eletromagnética emitida tem vários comprimentos de onda.

Espectro de raio-X

Figura Física-IV 14e Young & Freedman Sears & Zemansky



- Existe um comprimento de onda mínimo para o qual começa a produção de raio-X
- Comprimento de onda mínimo \rightarrow frequência Máxima

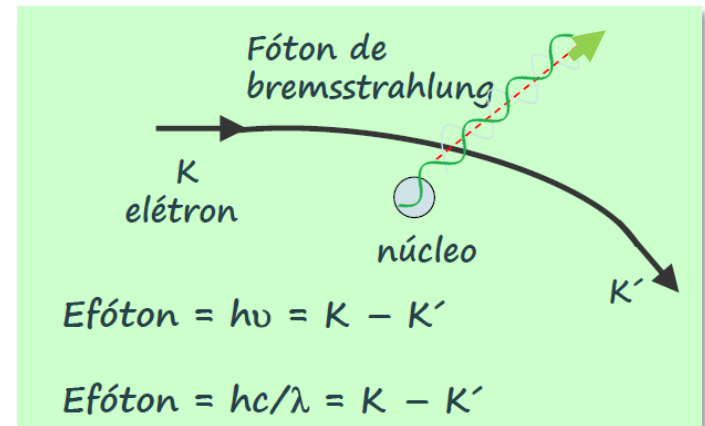
Mecânica clássica: as ondas eletromagnéticas produzidas quando um elétron colide com o anodo podem ser análogas às ondas sonoras produzidas com o bater de dois pratos. Essas ondas incluem sons de todas as frequências. Por analogia as ondas deveriam ser emitidas em todas as frequências, conseqüentemente, todos os comprimentos de onda.

- Mecânica clássica não consegue explicar esse mínimo no comprimento de onda
- Mecânica clássica não consegue explicar as linhas características.

Fótons de Bremsstrahlung

Ideia do fóton: Um elétron possui carga “-e” e ganha energia cinética “eV” quando acelerado por uma diferença de potencial “V”. O fóton mais energético (maior frequência e menor comprimento de onda) é produzido se o elétron é freado totalmente quando atinge o anodo, de modo que toda a energia cinética do elétron é usada para produzir um fóton,

Bremsstrahlung = quanto energia cinética do elétron (sendo freado) é convertida em fótons.



Quando toda energia cinética do elétron é transformada em fóton

$$E_{\text{eletron}} = eV = h\nu_{\text{max}} = hc/\lambda_{\text{min}}$$

Energia máxima do elétron

Fóton com máxima energia

Mínimo comprimento de onda do fóton

Sirius



Laboratório Nacional
de Luz Síncrotron



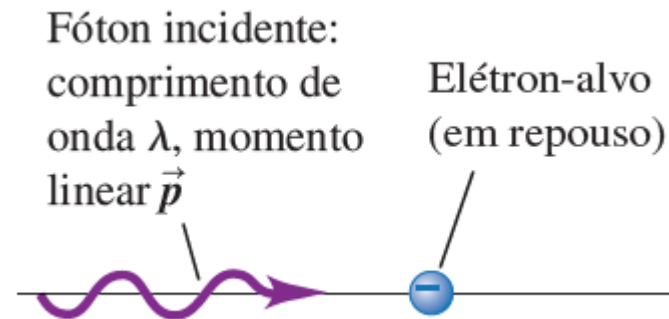
<https://www.lnls.cnpem.br/sirius/projeto-sirius/>

LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON – Campinas – São Paulo. O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) é responsável pela operação da única fonte de luz síncrotron da América Latina. Com instalações abertas, o LNLS oferece uma infraestrutura extremamente sofisticada para pesquisadores acadêmicos e industriais, brasileiros e estrangeiros.

A luz, ou radiação, síncrotron é um tipo de radiação eletromagnética que se estende por uma faixa ampla do espectro eletromagnético – luz infravermelha, ultravioleta e raios X. A luz síncrotron é produzida quando partículas carregadas (tipicamente elétrons), aceleradas a velocidades próximas à velocidade da luz, tem sua trajetória desviada por campos magnéticos ou são freadas.

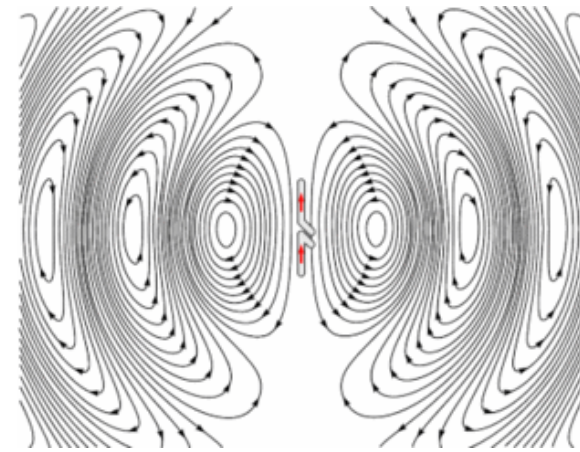
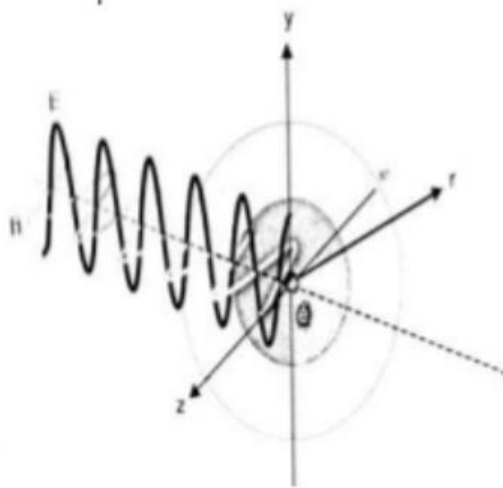
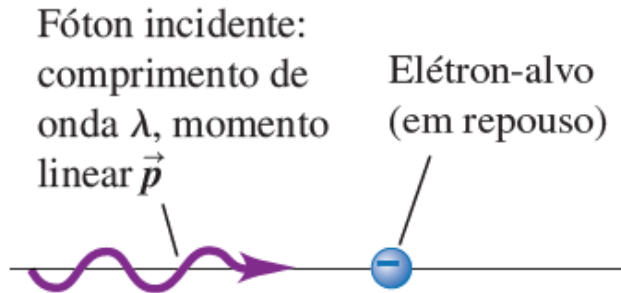
Espalhamento compton

- ❑ Já vimos como os fótons são absorvidos: efeito fotoelétrico.
- ❑ Já vimos como os fótons (raio-x) são produzidos: luz síncrotron, bremsstrahlung.
- ❑ Vamos agora ver seu comportamento após a luz ser produzida e antes que seja eventualmente absorvida.
- ❑ Podemos analisar essa questão considerando o espalhamento da luz.
- ❑ Esse espalhamento se chama espalhamento Compton.



Explicação clássica

Figura extraída do livro Física-IV 14e
Young & Freedman Sears & Zemansky



https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Dipole_xmting_antenna_animation_4_408x318x150ms.gif

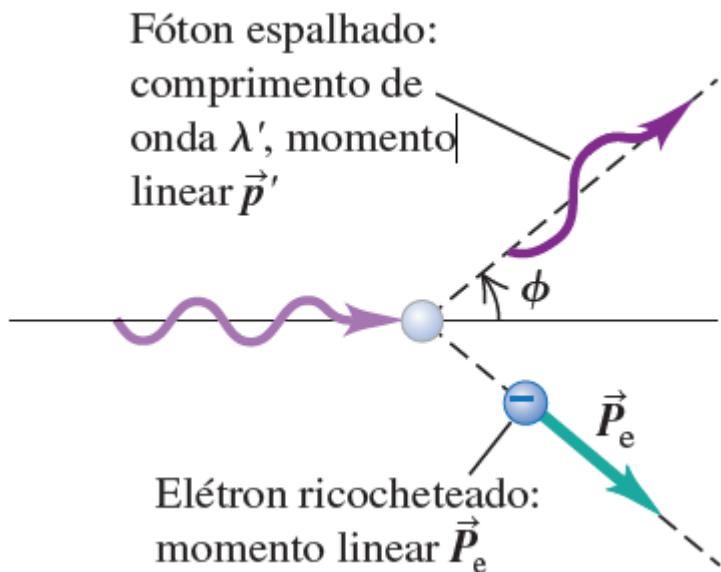
Mecânica clássica:

- Parte da energia da onda de luz seria absorvida pelo elétron, que oscilaria.
- Campo elétrico oscilando, elétron oscilante
- O elétron que oscila agiria como uma antena em miniatura irradiando de volta a energia adquirida como ondas espalhadas em várias direções e sentidos.
- A frequência com que o elétron oscila seria a mesma que a da luz que nele incide, e a luz irradiada de volta teria a mesma frequência que as oscilações do elétron.
- Então, no modelo de onda, a luz espalhada e a luz incidente têm a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda.**

Explicação fóton

Modelo de fóton

- ❑ O processo de espalhamento seria como uma colisão de duas partículas,
- ❑ O fóton incidente e um elétron que está inicialmente em repouso.
- ❑ O fóton incidente perde parte de sua energia e momento linear para o elétron, que recua como resultado de seu impacto.
- ❑ O fóton é espalhado em vários ângulos em relação à direção da luz incidente, mas possui menos energia e momento linear menor que o fóton incidente
- ❑ Esse espalhamento se chama espalhamento Compton.



Espalhamento Compton

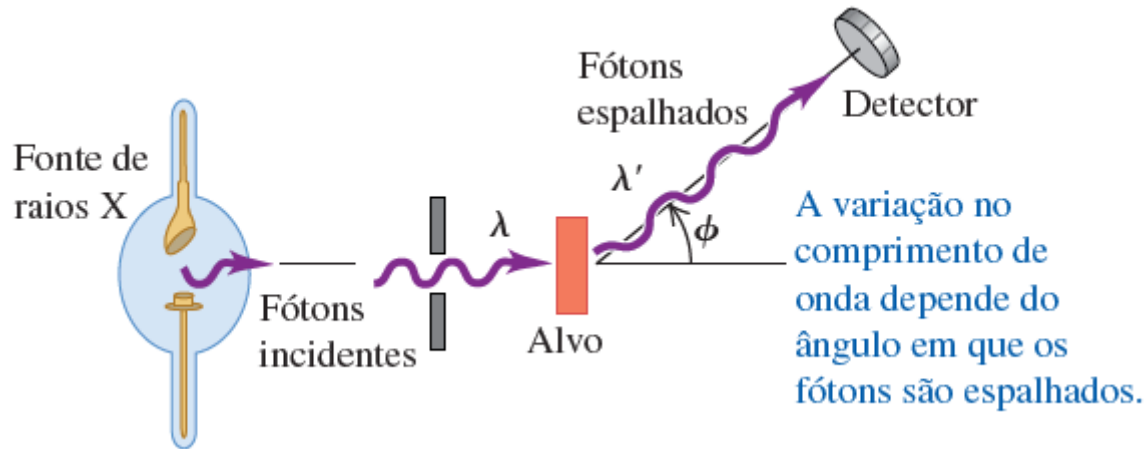
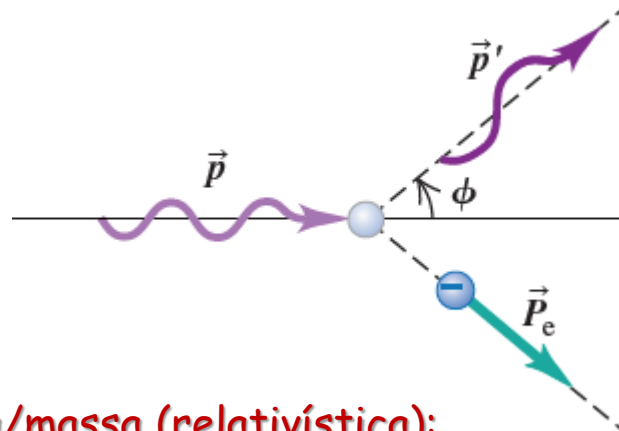


Figura extraída do livro Física-IV 14e
Young & Freedman Sears & Zemansky

- ❑ Experimento para testar as previsões foi realizado em 1922 pelo físico americano Arthur H. Compton.
- ❑ Ele disparou um feixe de raios X em direção a um alvo sólido e mediu o comprimento de onda e a radiação espalhada a partir do alvo.
- ❑ Compton descobriu que uma parte da radiação espalhada possuía frequência menor (comprimento de onda maior) que a radiação incidente.
- ❑ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento.
- ❑ Mecânica clássica previa erroneamente que a onda de luz espalhada deveria ter a mesma frequência.

Colisão de um fóton com momento p num elétron em repouso:



Conservação da energia/massa (relativística):

$$E_{\text{foton}_i} + E_{\text{elétron}_i} = E_{\text{foton}_f} + E_{\text{elétron}_f}$$

$$pc + mc^2 = p'c + E_e$$

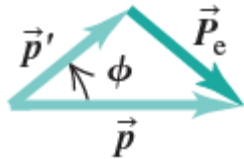
energia de repouso
do elétron

Energia final do elétron

$$E_e^2 = (mc^2)^2 + (p_e c)^2$$

$$(I) \quad (pc - p'c + mc^2)^2 = E_e^2 = (mc^2)^2 + (p_e c)^2$$

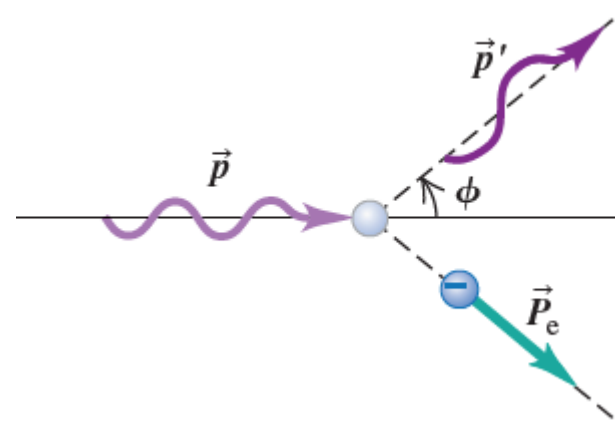
Conservação do momento



$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e$$



$$\vec{p}_e = \vec{p} - \vec{p}'$$



$$p_e^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \phi \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I)

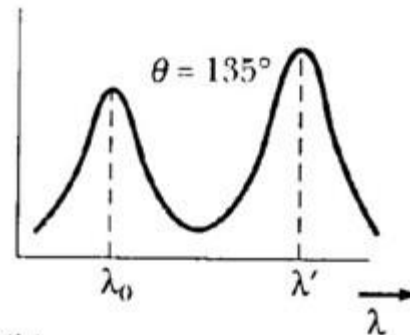
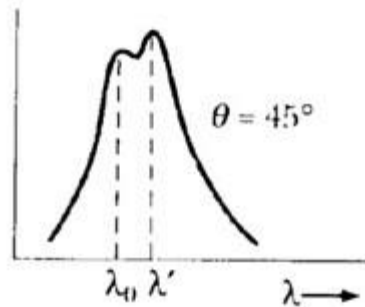
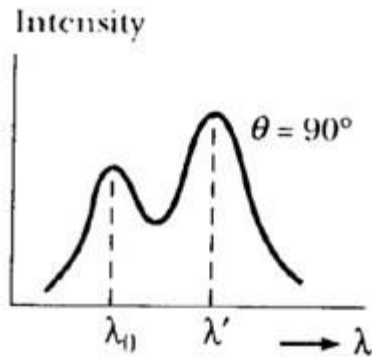
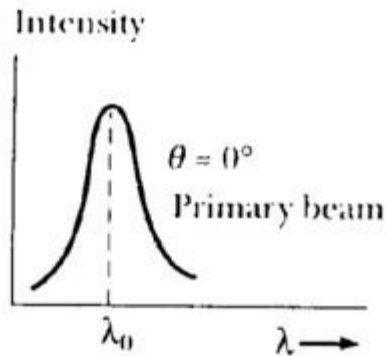
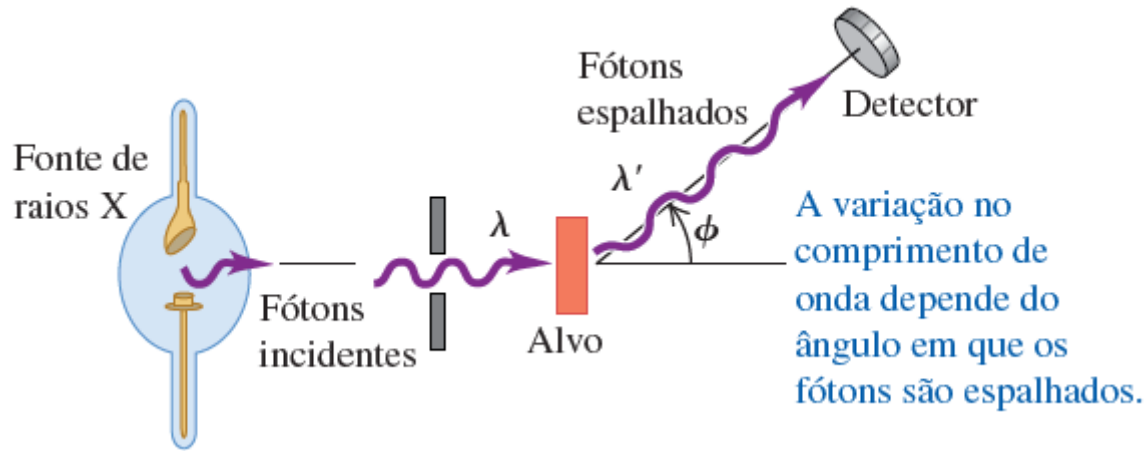
$$\frac{mc}{p'} - \frac{mc}{p} = 1 - \cos \phi$$

Usando que: $p = \frac{h}{\lambda}$ e $p' = \frac{h}{\lambda'}$

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi)$$

$$\frac{h}{mc} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg})(3,0 \times 10^8 \text{ m/s})} = 2,426 \times 10^{-12} \text{ m}$$

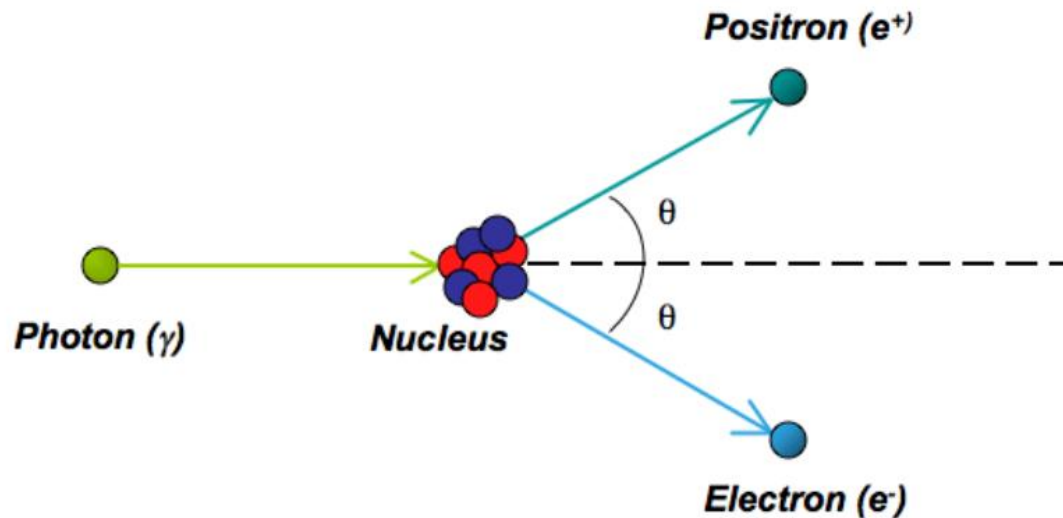
Espectro de espalhamento compton



(b)

Criação de pares

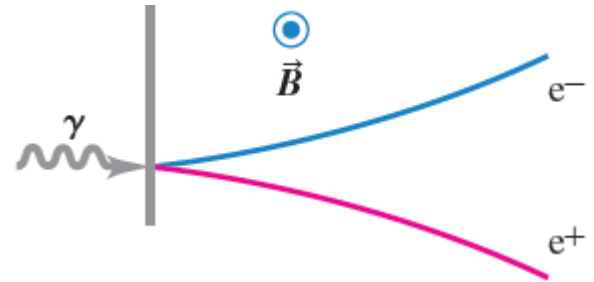
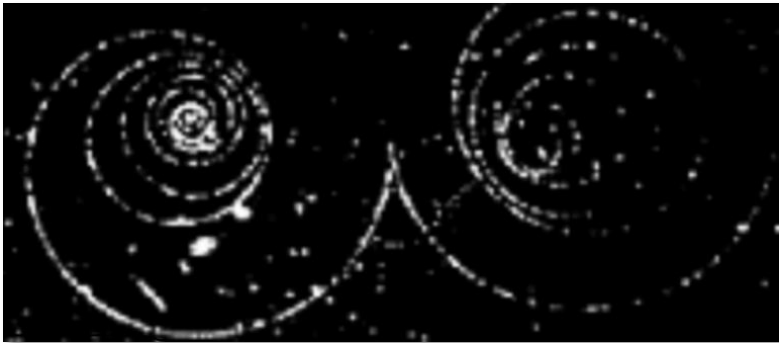
- ❑ Outro efeito que pode ser explicado apenas pela teoria do fóton envolve os raios gama.
- ❑ Radiação eletromagnética com maior frequência e maior energia.



- ❑ Se um fóton de raio gama é atirado em direção a um alvo, ele pode não se espalhar.
- ❑ O fóton pode desaparecer completamente e dar origem a duas outras partículas: um elétron e um pósitron (uma partícula que tem a mesma massa de repouso m que um elétron, mas possui uma carga positiva $+e$)
- ❑ Esse processo, chamado de produção de par, foi observado pela primeira vez pelos físicos Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini em 1933.

Câmara de bolhas

- ❑ 1931, Carl Anderson estava investigando raios cósmicos numa câmara de nuvens.
- ❑ Quando uma partícula de alta energia penetra na câmara, deixa um rastro de condensação.
- ❑ Como essas partículas são carregadas eletricamente é possível curva-las com um campo magnético aplicado externamente,
- ❑ Numa de suas infinitas medidas, Anderson percebeu que uma partícula curvou ao contrário dos elétrons.



- ❑ Depois de 6 mil fotos, Anderson tomou coragem para divulgar seus resultados: ele havia detectado um espantoso elétron positivo – o pósitron.
- ❑ Ganhou em Nobel em 1936 por essa descoberta.

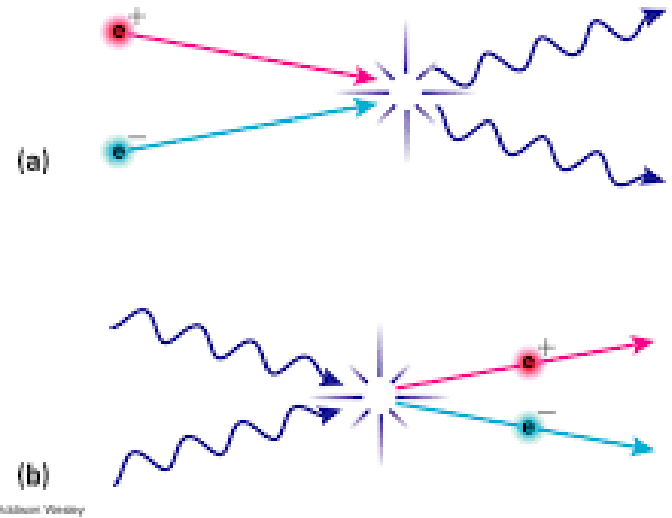
Como fazer seu próprio detector de partículas

<https://www.youtube.com/watch?v=CpIJWs-yng>



Criação de pares

- Criação e aniquilação de pares
- Fótons de alta energia produz pósitoon e eletron.
- Pósitoon é a antipartícula do elétron.
- Antipartículas não sobrevivem muito tempo.
- Elas se unem a partículas gerando raios-gamma



Qual menor energia do fóton para criar o par pósitoon-eletron?

A menor energia do fóton seria quando o positron e eletron são produzidos em repouso.

Conservação da energia/massa (relativística):

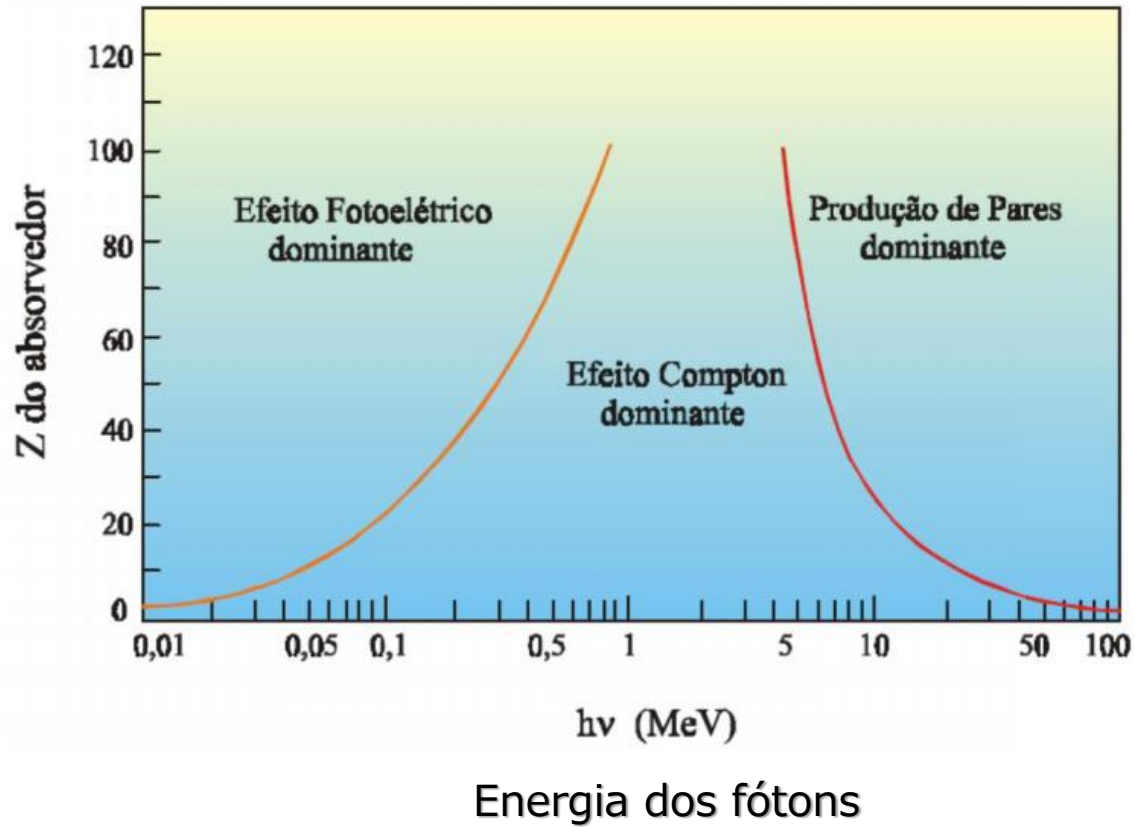
$$E_{foton} = E_{positron} + E_{elétron}$$

$$E_{min_foton} = m_{o_e}c^2 + m_{o_e}c^2$$

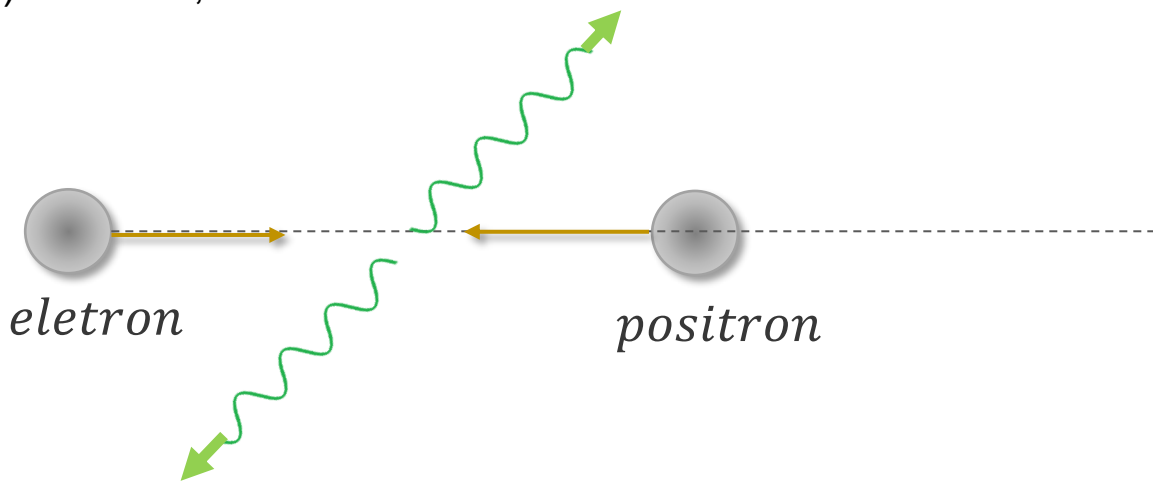
$$E_{min_foton} = 2m_{o_e}c^2 = 2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$$

Interação da radiação com a matéria

Interação da radiação com matéria



Um elétron e um pósitron com mesma velocidade colidem frontalmente um como outro se aniquilando e produzindo dois fótons. Encontre as energias, os comprimentos de onda e as frequências dos fótons se a energia cinética do elétron e do pósitron forem: (a) ambas desprezíveis; (b) ambas 5,000 MeV



energia cinética do elétron

Antes (elétrons)

Depois (fótons)

$$(K + mc^2) + (K + mc^2) = E + E$$

energia de repouso do elétron