

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

## FÍSICA MODERNA I

---

### AULA 07

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**  
**Pelletron – sala 220**  
**rizzutto@if.usp.br**

**1o. Semestre de 2015**

**Monitor: Gabriel M. de Souza Santos**

Página do curso:

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=5215>

**18/03/2015**

# Bremsstrahlung e Efeito fotoelétrico

## Produção de raios X:

❑ Elétrons desacelerados na matéria produzem espectro contínuo de radiação

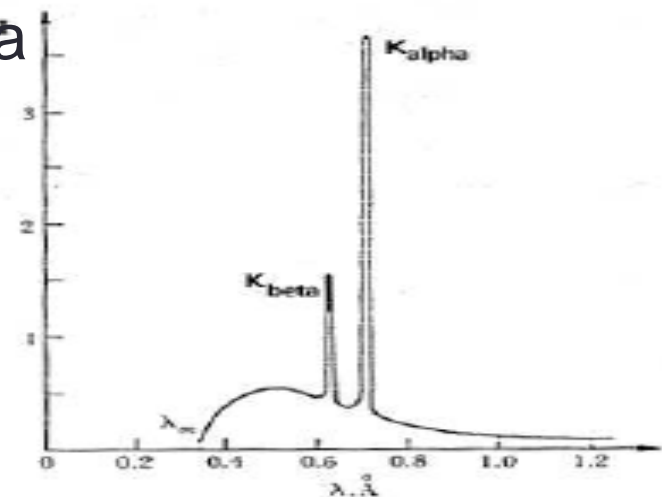
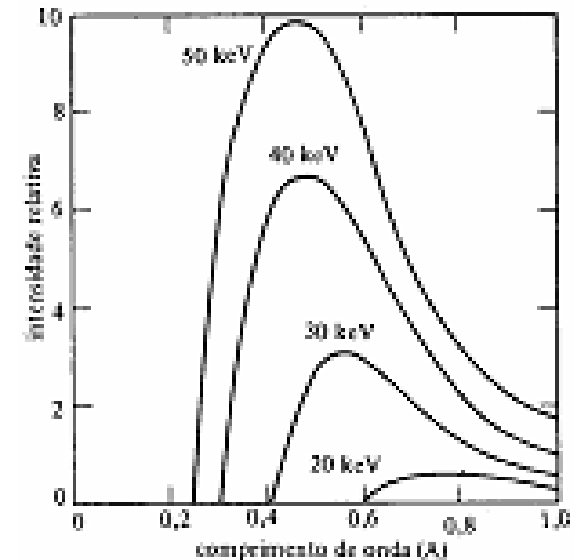
❑ Além do espectro contínuo temos picos característicos que são devido ao choque dos elétrons com os elétrons do átomo do material e arrancá-los – por decorrência há emissão de raios X característicos

❑ Alvo de Molibidênio  $E_{\alpha} = 17.47\text{keV}$

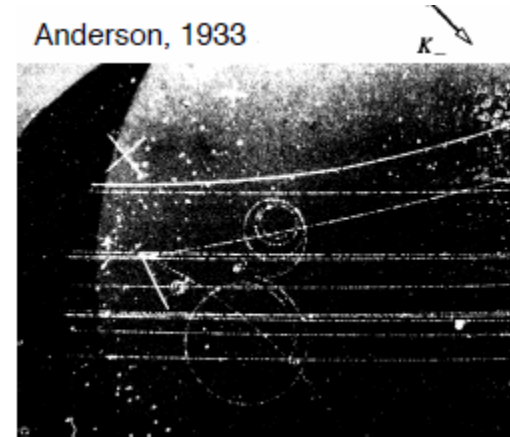
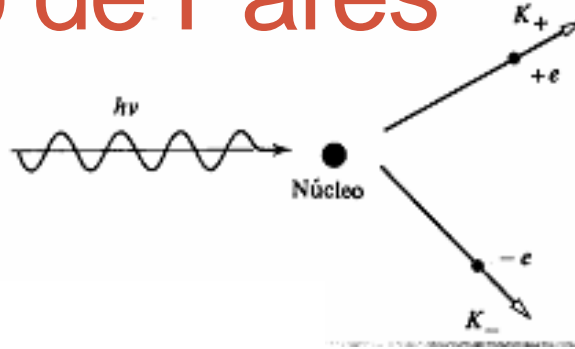
$E_{\beta} = 19.61\text{keV}$

$E_{\beta} > E_{\alpha}$  logo  $\lambda_{\alpha} > \lambda_{\beta}$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$



# Produção de Pares



□ Este fenômeno é observado e é denominado por produção de pares.

□ Se um fóton pode criar um elétron, deve-se também criar uma carga positiva para balancear a conservação de carga

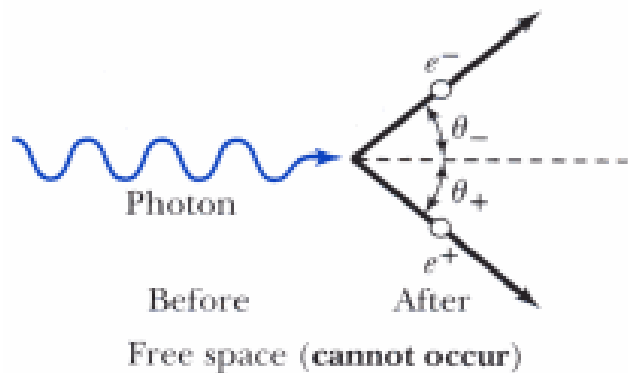
□ Em 1933 C.D. Anderson observou um elétron de carga positiva ( $e^+$ ) em uma radiação cósmica – Partícula foi chamada de pósitron e já tinha sido previsto por Dirac

□ O pósitron tem a mesma massa do elétron ( $m=0,511\text{MeV}/c^2$ ), mas carga oposta.

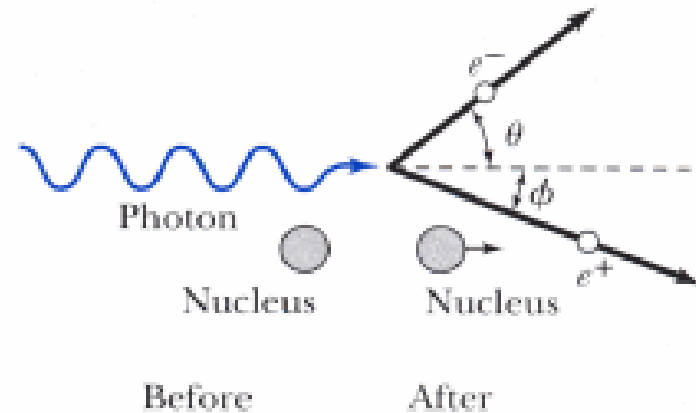
□ Ele é observado quando raios gamas (fótons) de alta energia passam através da matéria  $\gamma \longrightarrow e^+ + e^-$

# Produção de Pares

□ A única maneira desse processo conservar momento e energia é se o núcleo atômico estiver presente no processo de interação e absorver parte da energia e momento do fóton.



(a)



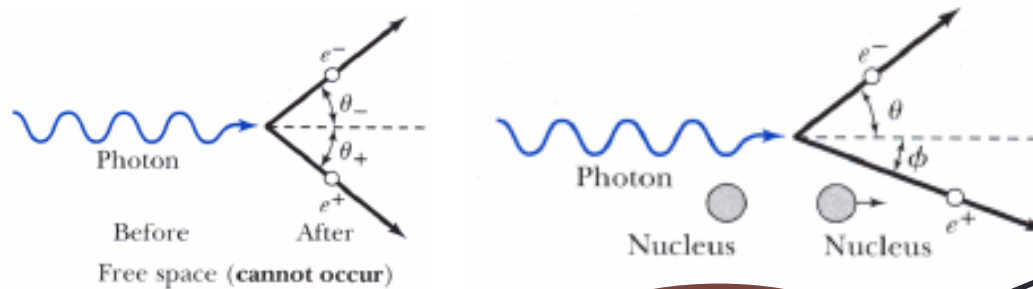
Se um núcleo está próximo, o núcleo pode absorver momento linear suficiente para permitir que o processo ocorra.

$e^+$  é conhecido como pósitron e é encontrado da na natureza através da detecção de raios cósmicos e em produtos radioativos de vários elementos radioativos

Vivem pouco pois interagem com os  $e^-$

# Produção de Pares

□ Se um fóton pode criar um elétron, deve-se também criar uma carga positiva para balancear a conservação de carga



$$h\nu = E_+ + E_- + K_{\text{núcleo}}$$

$$h\nu = (m_0c^2 + K_+) + (m_0c^2 + K_-)$$

$$h\nu = 2m_0c^2 + K_+ + K_-$$

Muito pequena por causa da grande massa do núcleo

Onde K são as energias cinéticas do  $e^-$  e do  $e^+$

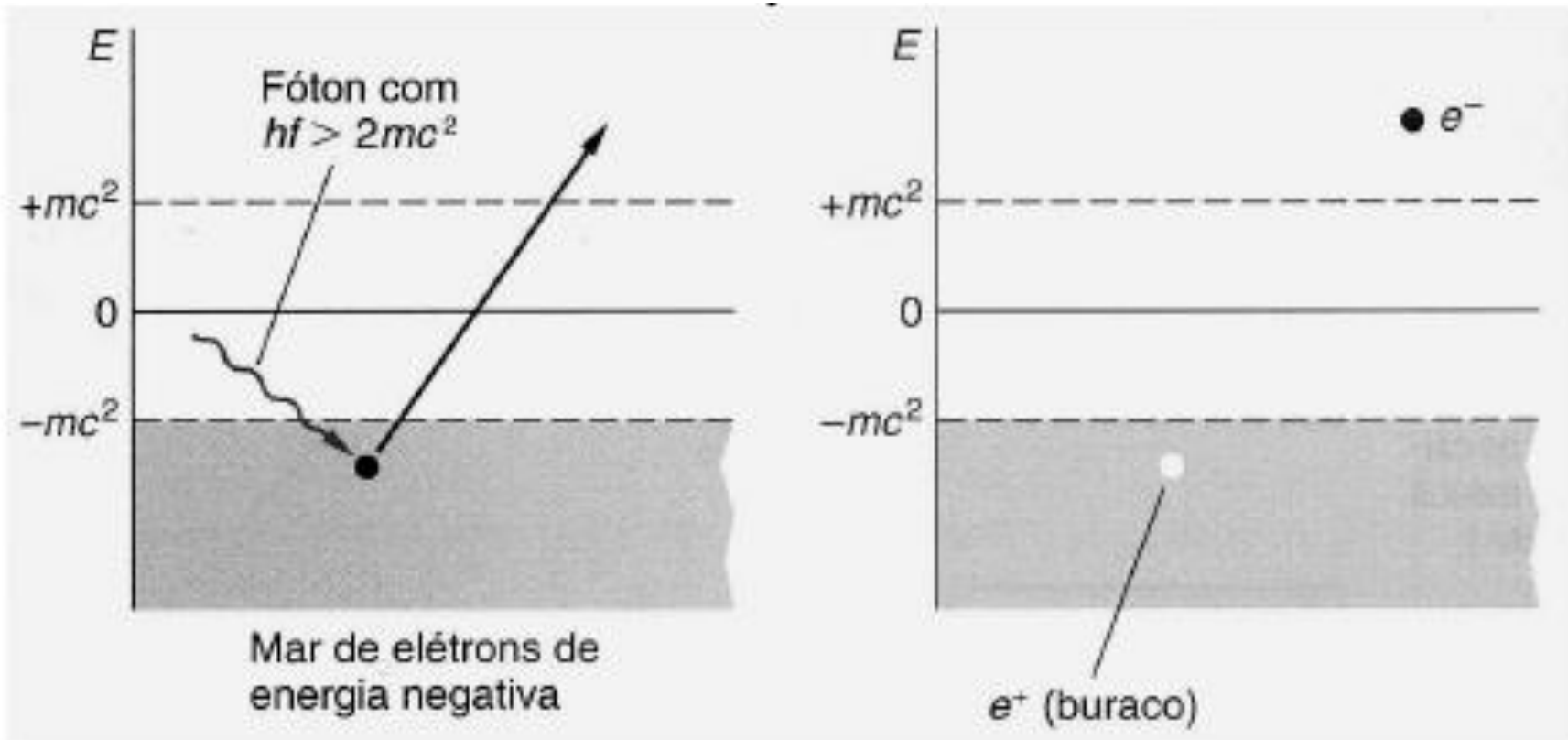
□ A energia do fóton deve ser de no mínimo igual a  $2m_e c^2$  para criar as massas :

$$h\nu > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$



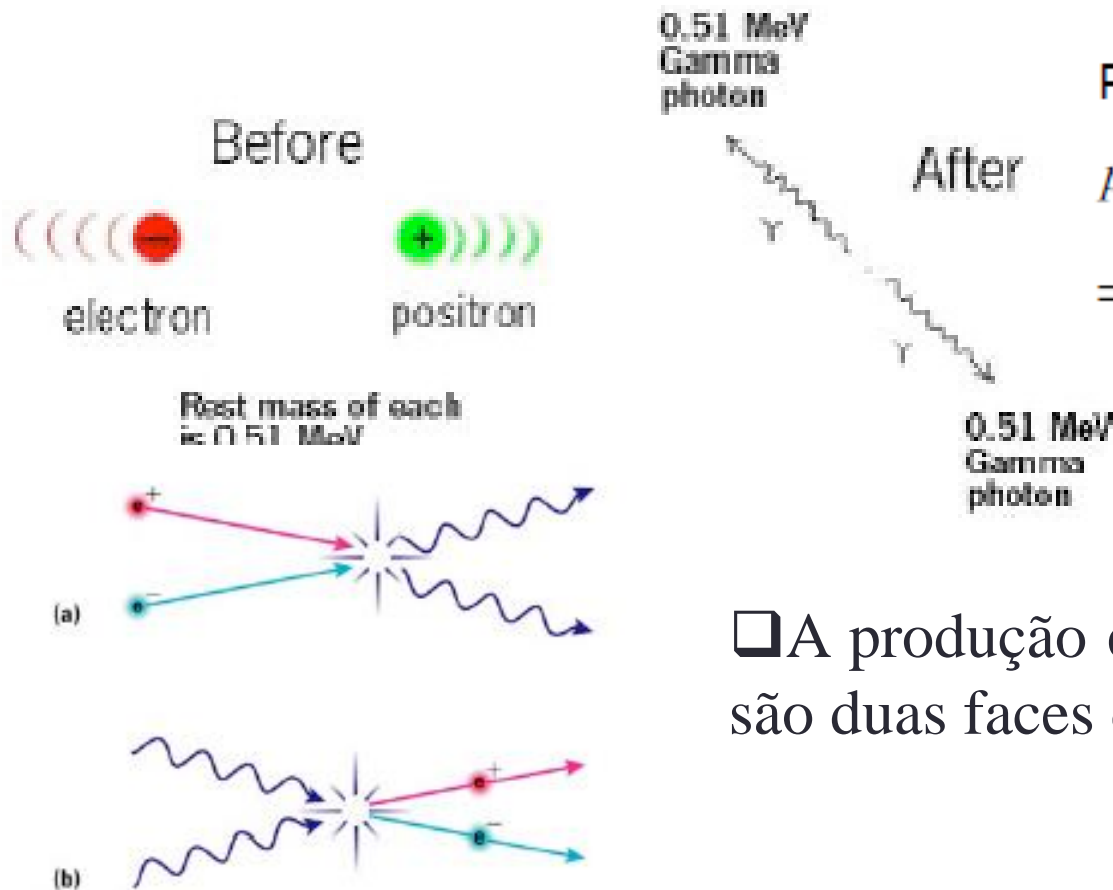
# Produção de Pares

□ Interpretação de Paul Dirac: Existe um “mar de elétrons” que pode ser “excitado” e criar um elétron deixando um “buraco” que é o pósitron



# Aniquilação de Pares

- Da mesma maneira que podemos criar um par elétron-pósitron o processo inverso pode acontecer:
- Um elétron e um pósitron se aproximam por pouco tempo ( $10^{-10}$ s) e podem se aniquilar e produzir fótons



Par  $e^+$ ,  $e^-$  em repouso  $\Rightarrow$

$$P_{\text{inicial}} = P_{\text{final}} = 0 \Rightarrow \frac{hv_1}{c} = \frac{hv_2}{c}$$

$$\Rightarrow E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = m_0c^2$$

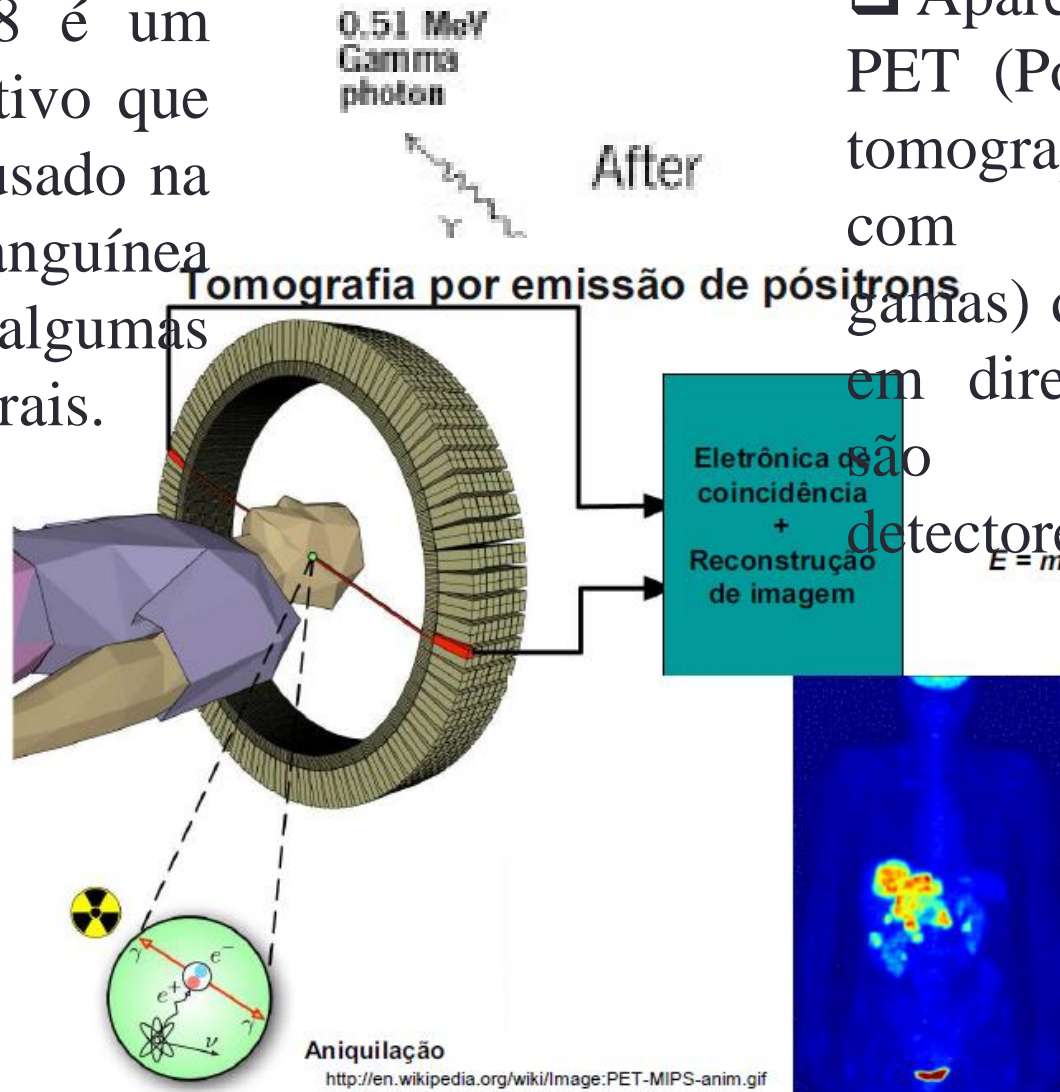
- A produção e a aniquilação de pares são duas faces de um mesmo processo

# Aniquilação de Pares

□ Na aniquilação são produzidos fótons de direção opostas

□ O Flúor 18 é um núcleo radioativo que emite  $e^+$  e é usado na corrente sanguínea para estudar algumas doenças cerebrais.

□ Aparelho chamado PET (Pósitron emission tomography) trabalha com fótons (raios gama) que são emitidos em direções opostas e são medidos por detectores cintiladores



Aniquilação

<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:PET-MIPS-anim.gif>



# Exercício

❑ A análise de uma fotografia de câmara de bolha mostra a criação de um par elétron-pósitron quando fótons atravessam a matéria. As trajetórias do elétron e do pósitron têm curvaturas opostas no campo magnético uniforme  $B=0,20\text{Weber/m}^2$ , ( $\text{Wb}=\text{Tm}^2$ ) sendo seus raios ( $r$ ) ambos iguais a  $2,5 \times 10^{-2}\text{m}$ .

❑ Qual a energia e o comprimento de onda do fóton que produziu o par?

❑ O momento  $p$  do elétron é dado por:  $p = eB_1$

❑ A energia relativística é dado por:

$$E^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2$$

$$pc = 8 \times 10^{22} \times 3 \times 10^8 \frac{\text{kgm}}{\text{s}} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$pc = 2,4 \times 10^{13} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}$$

$$pc = 2,4 \times 10^{13} \text{J} = 2,4 \times 10^{13} \times 6,24 \times 10^8 \text{eV}$$

$$pc = 1,5 \times 10^8 \text{eV} = 1,5 \text{MeV}$$

$$p = 1,6 \times 10^{19} \times 0,20 \times 2,5 \times 10^2 \text{CTn}$$

$$p = 8,0 \times 10^{22} \text{As} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{A}} \text{m}$$

$$p = 8,0 \times 10^{22} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{m}$$

# Exercício

□ Logo a energia é dado por:  $E_-^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2$

$$E_-^2 = (1,5)^2 + (0,51)^2 MeV^2$$

$$E_- = 1,6 MeV$$

□ A energia relativística do pósitron tem o mesmo valor de energia do elétron:  $E_+ = 1,6 MeV$

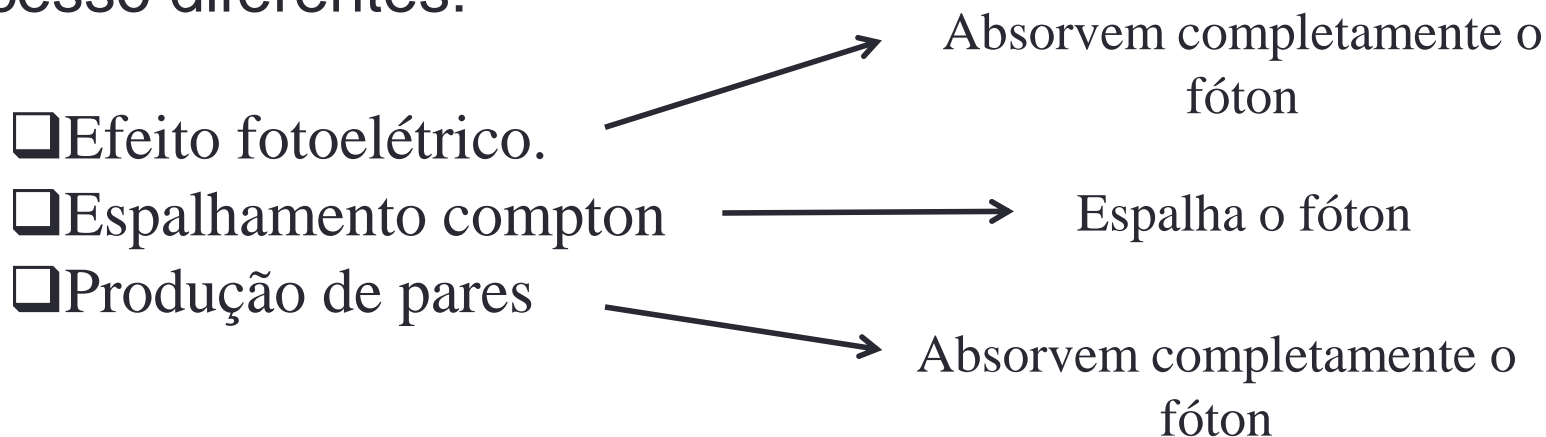
□ A energia do fóton era:  $h\nu = 1,6 + 1,6 = 3,2 MeV$

□ O comprimento de onda do fóton era:  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240 eV \cdot nm}{3,2 \times 10^6 eV} = 3,9 \times 10^{-4} nm$$
$$\lambda = 3,9 \times 10^{-13} m$$

# Interação de fótons com a matéria

❑ Como vimos os fótons podem interagir com a matéria por três processos diferentes:



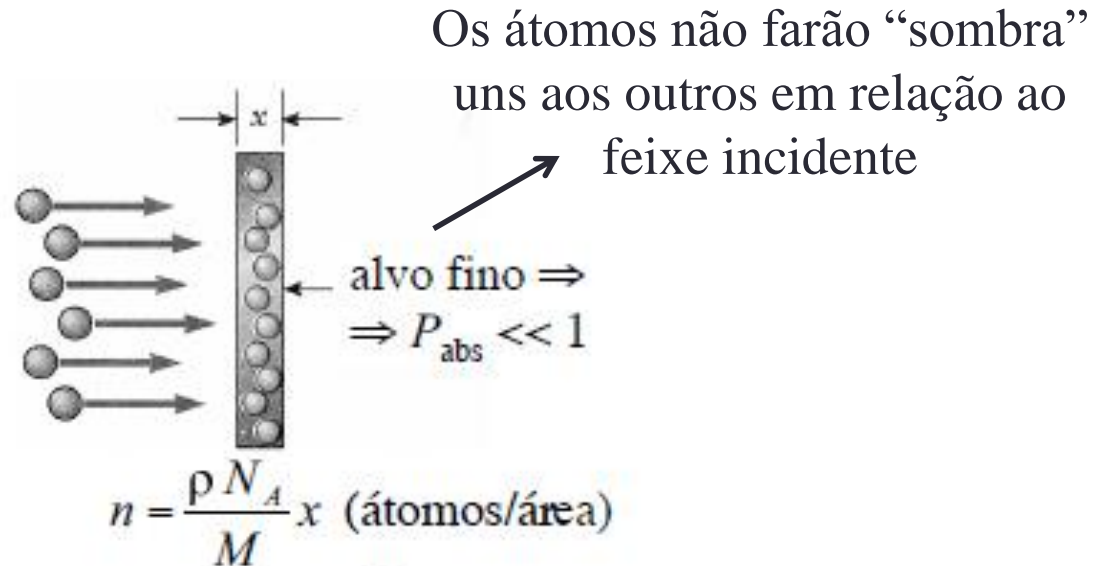
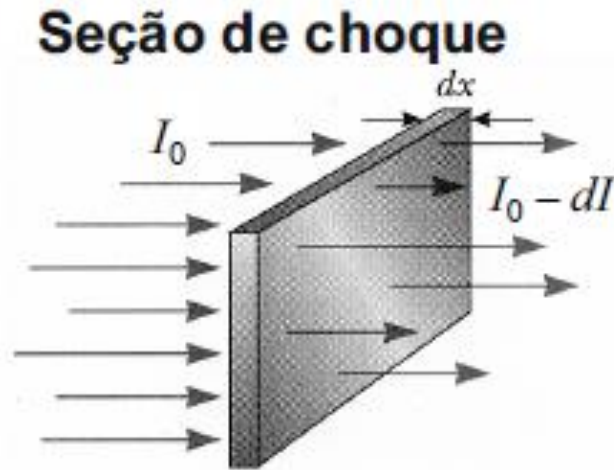
❑ Quais as probabilidades de ocorrência de cada processo?

❑ Estas informações são importantes para equipamentos de blindagens de reatores, aceleradores, e aparelhos de RX.

❑ A probabilidade de um fóton ser absorvido, por exemplo, por efeito fotoelétrico, espalhamento Compton ou produção de pares, ao passar por uma lâmina fina, é dado pela **seção de choque**

# Seção de Choque

□ Seção de choque define a probabilidade de interação do fóton com um material por algum processo.



□ O número de absorções fotoelétricas  $N_{Fe}$  que ocorrem:

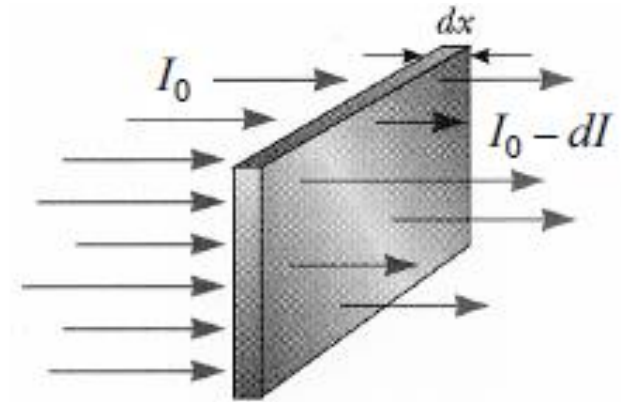
$$N_{Fe} = \sigma_{Fe} \cdot I_0 \cdot n$$

$\swarrow$  Feixe com  $I_0$  fótons  
 $\searrow$   $n$  átomos por unidade de área

É a seção de choque: probabilidade de um certo tipo de átomo sofrer uma certo tipo de interação (no caso fotoelétrica)

# Seção de Choque

❑ O feixe de fótons ao atravessar o material (espessura  $x$ ) terá sua intensidade diminuída pela remoção de uma parte desses fótons do feixe pelos três processos.



❑ Fótons de baixa energia (luz visível): bastam espessuras pequenas (poucos mm de material) para que todos os fótons tenham interagido ocorrendo absorção total da radiação.

❑ Fótons com energia mais altas (raios X e raios gamas) pouco interagem e podem atravessar grandes cm de material sem sofrer nenhuma interação.

❑ A quantidade  $dI$  de fótons absorvidos em uma espessura  $dx$  de material, deve ser proporcional ao número de fótons  $I$  e a espessura  $x$

$$dI = A I dx$$

$A$  é a constante de proporcionalidade e depende da probabilidade de interação de um dos três processos.

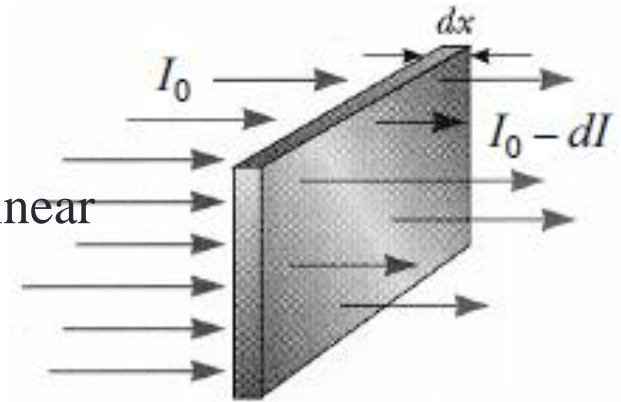
# Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

$$dI = -I_0 \mu dx$$

Coeficiente de absorção linear

Decréscimo do número de fótons .

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$



□ após atravessar uma espessura  $x$  de um absorvedor o feixe o intensidade inicial cai exponencialmente para  $I$ .

□ Como a absorção do feixe é causada pelos três processos de interação. O coeficiente de absorção pode ser decomposto em três termos:

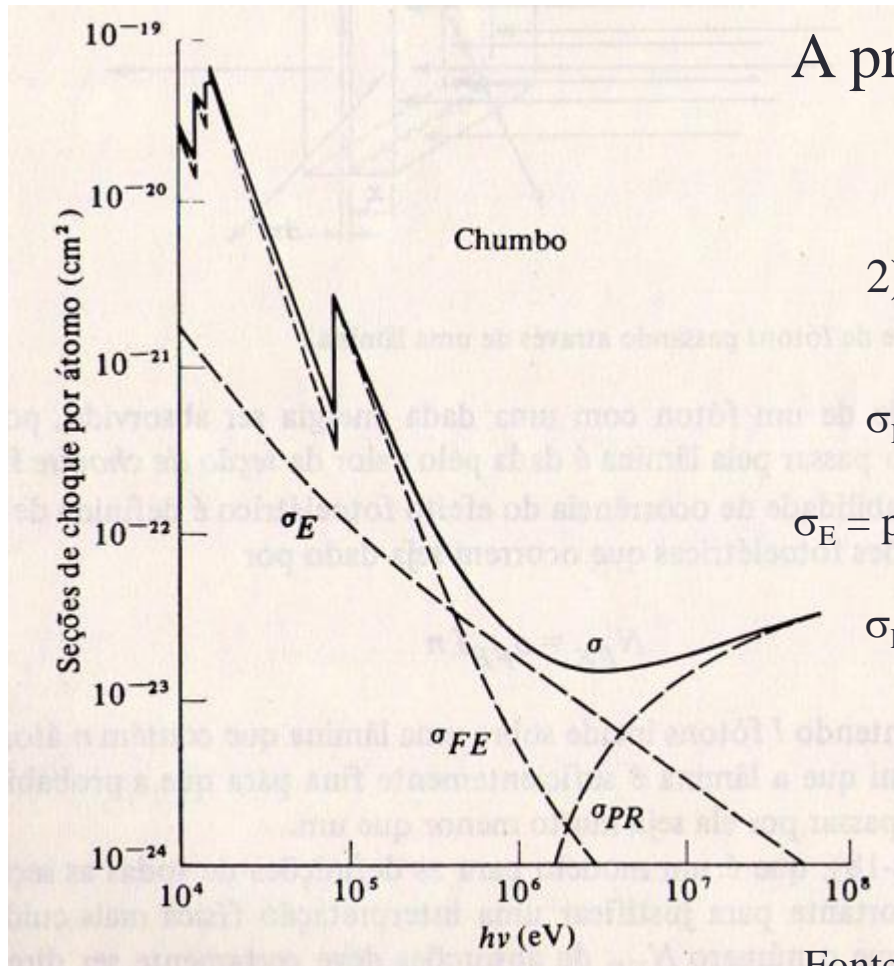
$$\mu = \mu_E + \mu_C + \mu_P$$

□ nos cálculos é comum utilizarmos o coeficiente de absorção de massa definido como

$$\frac{\mu}{\rho} \quad I(x) = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)x}$$

# Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

☐ Pode-se medir qual a seção de choque em função da energia dos fótons para cada processos ocorrer.



A probabilidade de produção de pares aumenta drasticamente

- 1) ENERGIA DO FÓTON
- 2) AUMENTO DO NÚMERO ATÔMICO Z DO NÚCLEO PRÓXIMO

$\sigma_{FE}$  = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo fotoelétrico

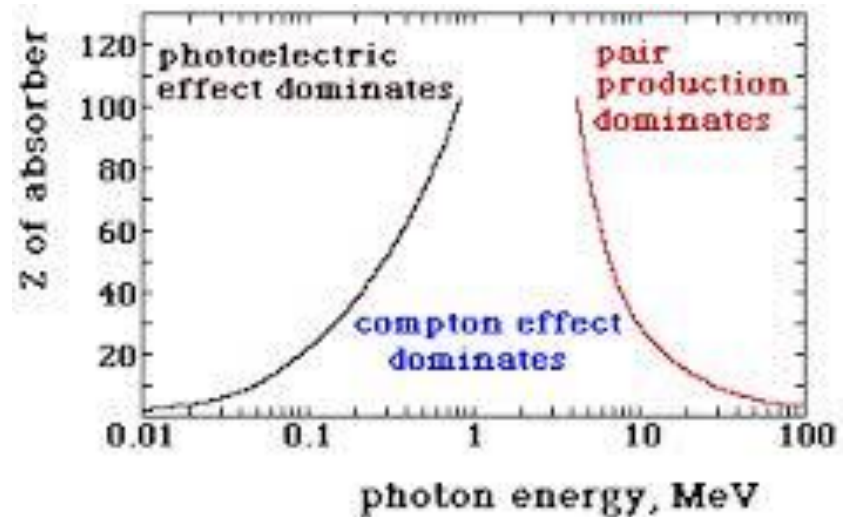
$\sigma_E$  = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo Compton

$\sigma_{PR}$  = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo de produção de pares



# Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

□ Agora temos como varia a probabilidade de ocorrência dos três processos em função da energia:



□ O efeito fotoelétrico é dominante para baixas energias. O efeito Compton só se torna dominante para energias maiores que 500 keV.

□ A produção de pares só ocorre para energias superiores a 1 MeV e é dominante para energias altas (~20 MeV)

□ Em resumo podemos dizer que as probabilidades desses processos dependem da energia do fóton e da densidade do material que está envolvido de interação da radiação.



# Modelos Atômico

□ A partir das várias informações obtidas até agora poderemos começar uma discussão sobre modelos dos átomos.

# Modelos Atômico

**PERGUNTA: COMO É O ÁTOMO?  
QUAL O MELHOR MODELO QUE  
O DESCREVE ?**

- ❑ Para entendê-lo necessitamos olhar os espectros atômicos.
- ❑ Sabemos que a radiação térmica emitida pelos corpos aquecidos (radiação de corpos negro) **É CONTÍNUA**



- ❑ O espectro de emissão de átomos é discreta



- ❑ Apenas alguns comprimentos de onda estão presentes

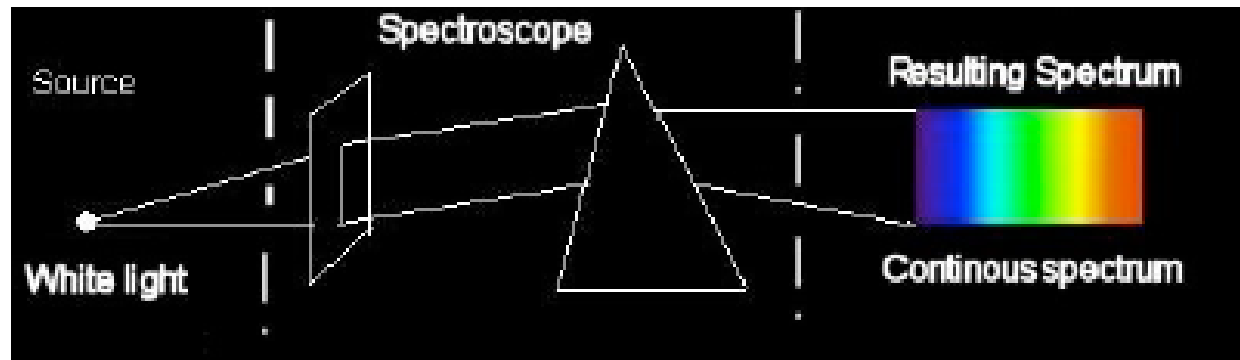


Onde vejo isto?

# Espectros Atômicos

□ Newton observou que a luz solar que entrava no seu laboratório através de uma pequena fenda em sua persiana podia ser refratada por um prisma de vidro e projetada em uma tela e mostrava uma série de faixa coloridas

↓ espectro

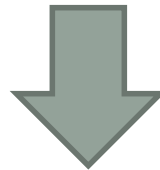


□ Os espectros de emissão dos elementos e compostos químicos podem ser divididos em três categorias:

- Espectros contínuos
- Espectros de Bandas
- Espectros de Linhas

# Espectros Atômicos

- ❑ Espectros contínuos: emitidos por sólidos incandescentes, não aparecem linhas (nem claras nem escuras)
- ❑ Espectros de Bandas: são formados por grupos de linhas muito próximas umas das outras, que parecem formar bandas contínuas - pedaços de substâncias sólidas colocadas em uma chama ou submetidas a descargas elétrica
- ❑ Espectros de Linhas: são características de átomos isolados



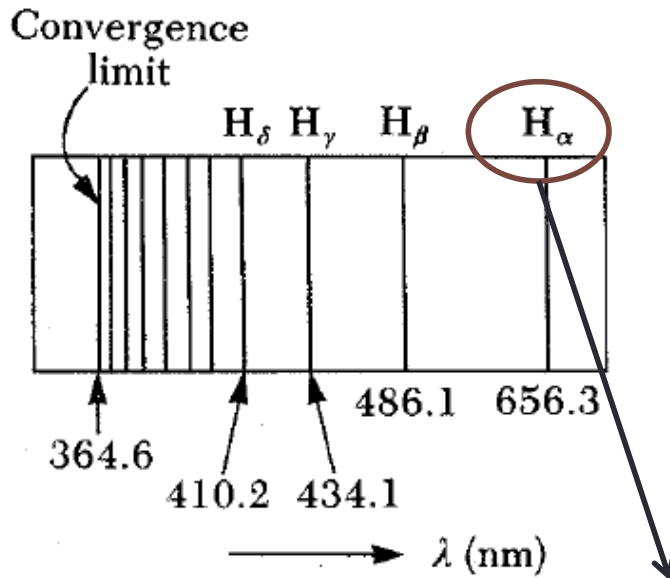
Física clássica não consegue explicar estas linhas



No final do século XIX a radiação característica emitida pelos átomos aquecidos foi exaustivamente estudada

# Espectro Hidrogênio

- Espectro de emissão do átomo de Hidrogênio (átomo + simples) possui linhas discretas na **região visível e ultravioleta**:



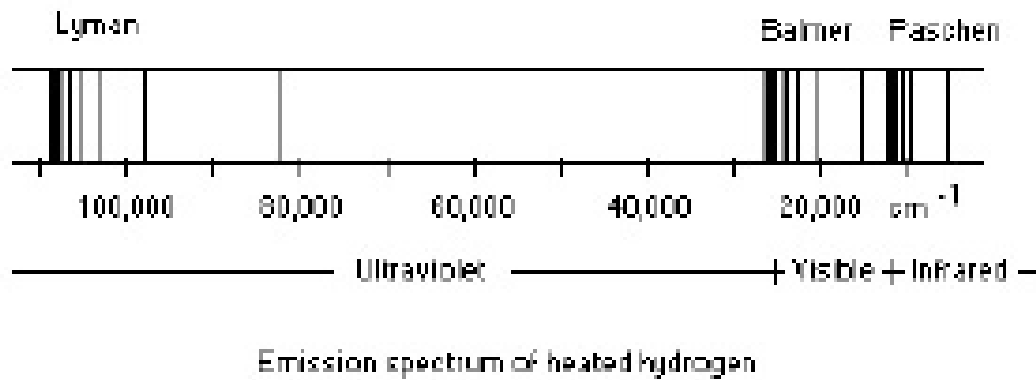
1885: J. Balmer descobriu que as linhas do espectro de hidrogênio podiam ser calculadas através de fórmula empírica:

$$\lambda_m = 3646 \frac{m^2}{m^2 - 4}, m = 3, 4, 5$$

Corresponde a  $m=3$

# Espectro Hidrogênio

- Balmer previu que uma expressão mais geral que pudesse explicar as outras séries:



- 1890 Rydberg finalmente encontra uma formulação mais geral para as séries observadas:

$$K = \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), m=1,2,3\dots, n>m$$

Constante de Rydberg para o H

$$R_H = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

# Espectro Hidrogênio

$$R_H = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Constante de Rydberg para o H

$$K = \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), m=1, 2, 3, \dots, n > m$$

Nome	Faixa de comprimentos de onda	Fórmulas
Lyman	Ultravioleta	$\kappa = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 2, 3, 4, \dots$
Balmer	Ultravioleta próximo e visível	$\kappa = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 3, 4, 5, \dots$
Paschen	Infravermelho	$\kappa = R_H \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 4, 5, 6, \dots$
Brackett	Infravermelho	$\kappa = R_H \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 5, 6, 7, \dots$
Pfund	Infravermelho	$\kappa = R_H \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 6, 7, 8, \dots$

# Modelo atômico

- ❑ Os cientistas do final do século XIX sabiam:
  - ❑ Átomo tinha o diâmetro da ordem de  $10^{-10}\text{m}$
  - ❑ Era eletricamente neutro
  - ❑ Continha elétrons (partículas muito + leves que o átomo como um todo)

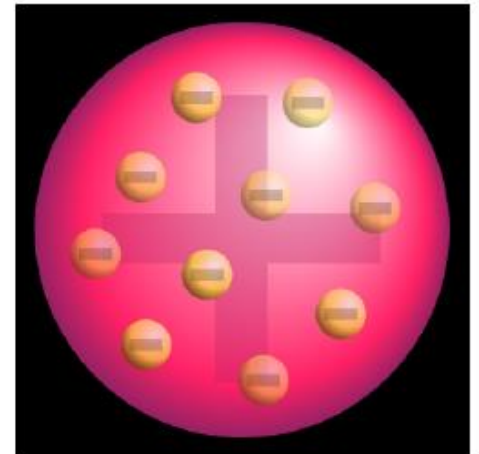
## Problema:

encontrar um modelo que satisfizesse todos estes requisitos e fosse compatível com as fórmulas de Balmer e Rydberg

## 1º Proposta:

Thomson em 1904: esfera de carga positiva embebida por elétrons – carga total nula

MODELO CHAMADO DE “PUDIM DE PASSAS”



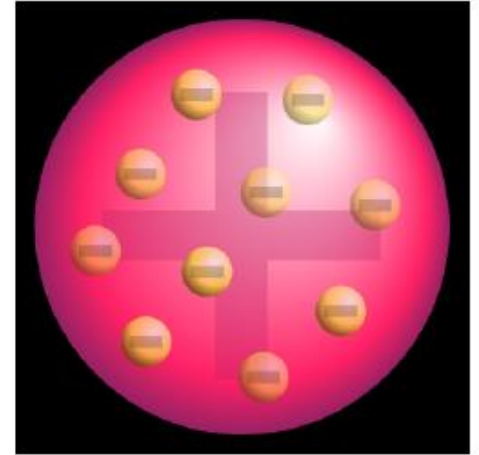


# Modelo atômico

## 1º Proposta:

Thomson em 1904: esfera de carga positiva embebida por elétrons – carga total nula

MODELO CHAMADO DE “PUDIM DE PASSAS”



## Problema:

- Forças eletrostáticas não são suficientes para manter o sistema em equilíbrio
  - Cargas deveria, ter movimento (acelerado) já que se mantinham dentro do átomo
  - Cargas (aceleradas) em movimento – irradiar energia continuamente
- ↓ Não observado
- Neste modelo, quando o átomo era aquecido, os elétrons poderiam vibrar em torno de sua posição de equilíbrio produzindo radiação eletromagnética - no entanto, não consegui calcular o espectro de luz observado

## Estrutura do átomo



- Rutherford começou a realizar experimentos com radioatividade natural
- Descobriu que o Urânio emitia pelo menos dois tipos de partículas que ele chamou de  $\alpha$  e  $\beta$
- Observou que a razão  $q/m$  das partículas  $\alpha$  era duas vezes menor que para o próton
- Suspeitava que as partículas  $\alpha$  eram átomos de Hélio duplamente ionizada
- Deixou uma amostra de substância radioativa se desintegrar emitindo partículas  $\alpha$  e submeteu este conteúdo a uma descarga elétrica e observou as linhas do espectro de Hélio
- Percebeu que as partículas  $\alpha$  possuíam alta energia e massa relativamente elevada



Ótimo instrumento para sondar os átomos

# Estrutura do átomo

## Experimento de Rutherford, Geiger e Marsden (1909)

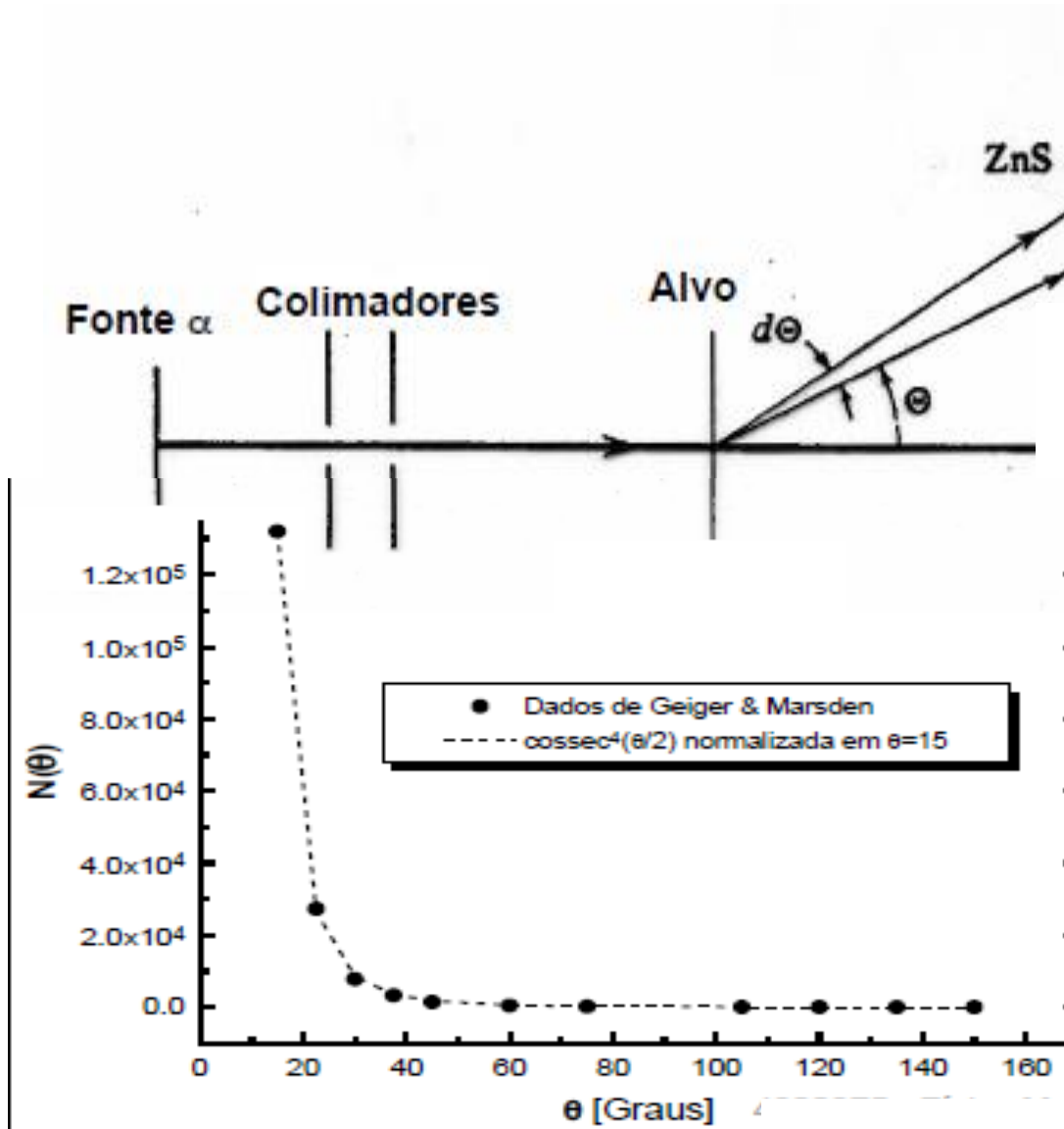
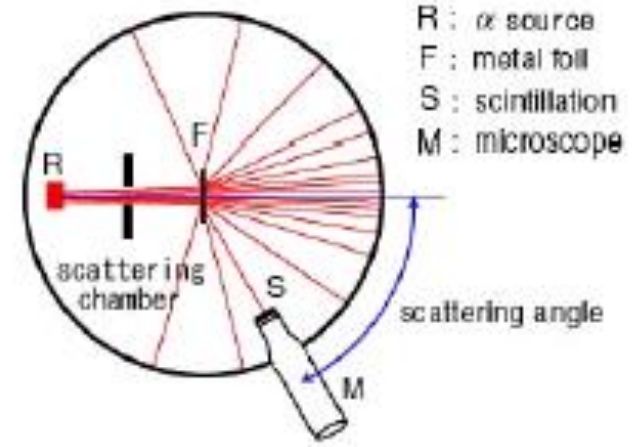
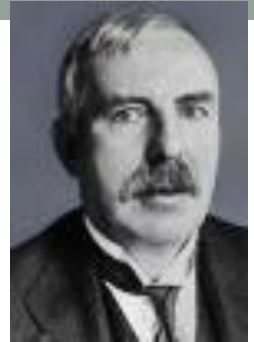


Fig. (D) Scattering of  $\alpha$  rays by an atom



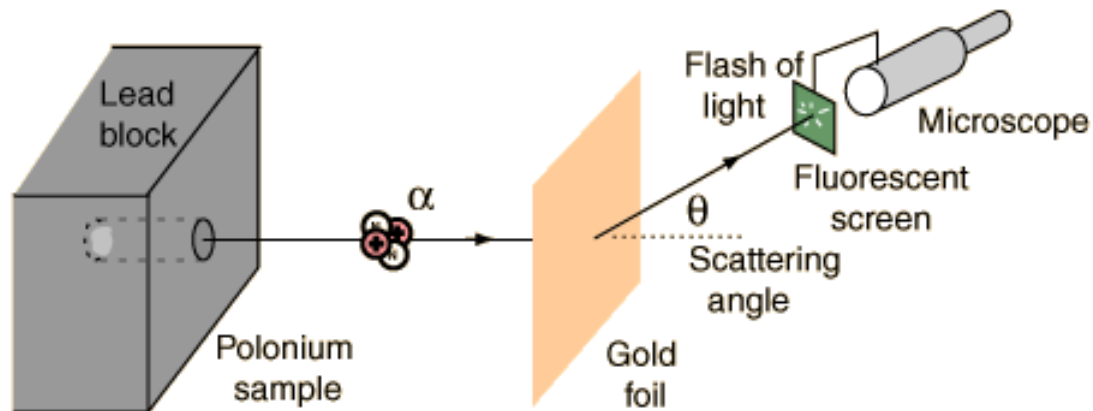
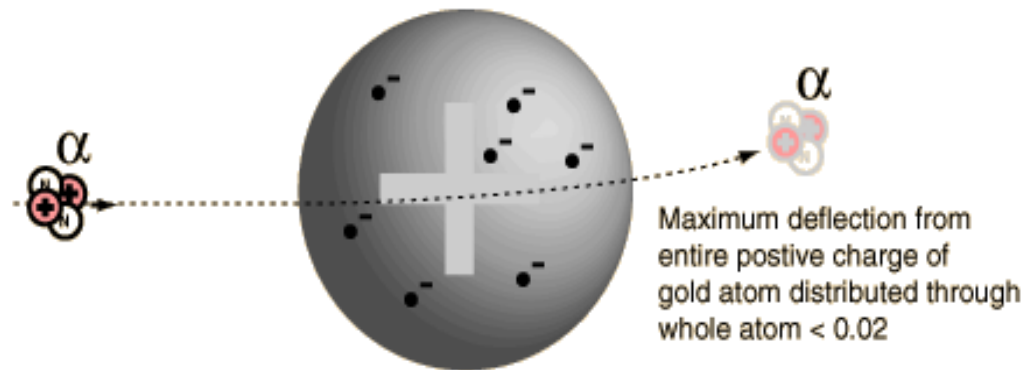
1 a cada 8000  $\alpha$ s são espalhadas  $> 90^\circ$

# Estrutura do átomo



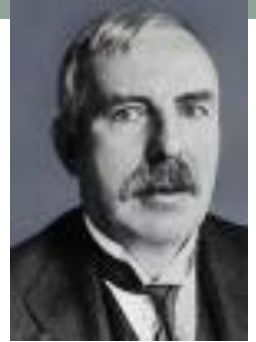
- As primeiras experiências de espalhamento

Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas  $\alpha$

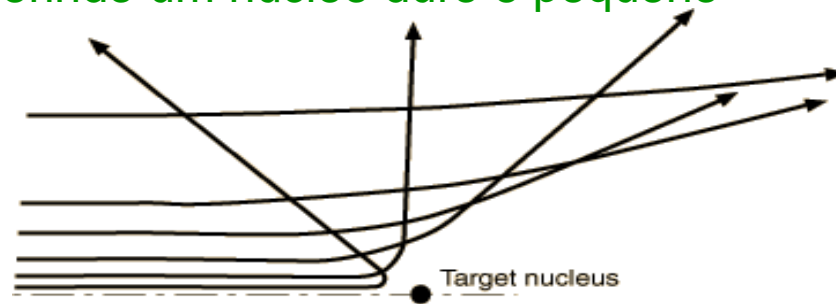


## Estrutura do átomo

- As primeiras experiências que determinaram a estrutura do átomo foram as de espalhamento e Rutherford em 1911 propõe um novo modelo

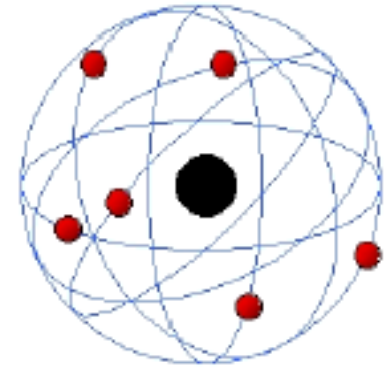


Rutherford observou grandes deflexões, sugerindo um núcleo duro e pequeno



- Ernest Rutherford: experimento com um feixe de partículas  $\alpha$  descobriu a **estrutura nuclear** do átomo. Primeiro experimento de colisão de partículas subatômicas.

## MODELO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO



- As hipóteses para o modelo atômico e sua interação:
  - Mecânica Clássica é válida
  - O átomo contém um núcleo com carga  $+Ze$  e  $Z$  elétrons orbitando em sua volta;
  - Carga positiva estava centrada em um volume de cerca de  $10^{-14}\text{m}$  (10 mil vezes menor que o átomo)
  - Espalhamento é devido a força repulsiva Coulombiana entre a partícula carregada positivamente e o núcleo carregado também positivamente
  - A massa do núcleo é tão grande em comparação com a  $\alpha$  que o núcleo alvo não sofre recuo (energia cinética inicial e final da  $\alpha$  são praticamente iguais)
  - núcleo e a partícula incidente são pontos (interação com cargas pontuais)
  - Nenhuma mudança ocorre no estado do alvo ou da partícula incidente (não há penetração na região nuclear)

# ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

Melhor caracterização é preciso calcular o número de partículas espalhadas em função do ângulo

- Partícula  $\alpha$  de carga  $+ze$  e massa  $M$ , ao passar por um núcleo pontual de carga  $+Ze$
- O alvo é tão fino que somente espalhamentos simples ocorrem
- Partícula longe do núcleo força Coulombiana é desprezível.
- $b$  – parâmetro de impacto
- $\theta$  – ângulo de espalhamento

