

Universidade de São Paulo Instituto de Física

EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS DA NATUREZA QUÂNTICA DA
RADIAÇÃO E DA MATÉRIA

AULA 07

Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br
rodrigo.fernandes.me@gmail.com

2º. Semestre de 2023

Monitores: Rodrigo Fernandes de Almeida
Samuel Pizzol

Modelo atômico

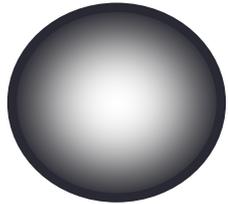
Problema:

encontrar um modelo que satisfizesse os requisitos relacionados a emissão ótica e fosse compatível com as fórmulas de Balmer e Rydberg

LINHA DO TEMPO

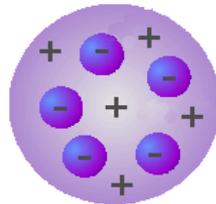
1808

Dalton



1897

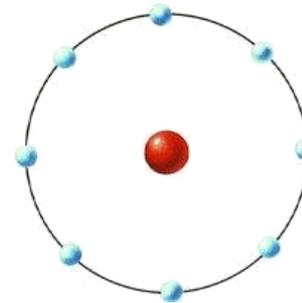
Thomson



Radioatividade

1911

Rutherford



1913

Rutherford-Bohr



1º Proposta: Dalton

O átomo apresenta uma forma esférica;

Todo átomo é maciço e indivisível;

Todo átomo é indestrutível;

Seu modelo para o átomo foi associado a uma bola de bilhar

Modelo atômico

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

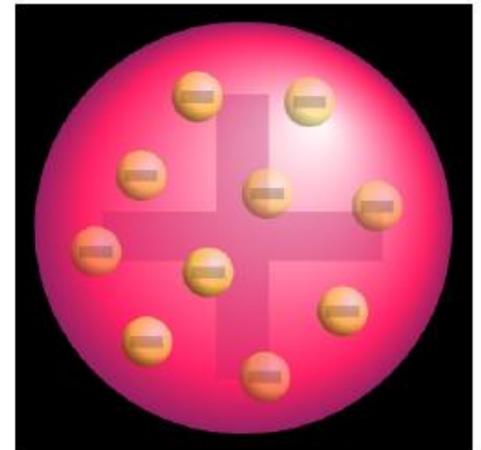
Problema:

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”

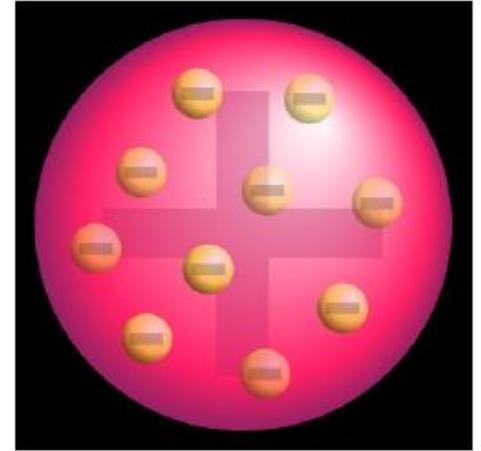


Modelo atômico

1º Proposta:

Thomson em 1904: esfera de carga positiva embebida por elétrons – carga total nula -
Philosophical Magazine, 7 (1904), 237

•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

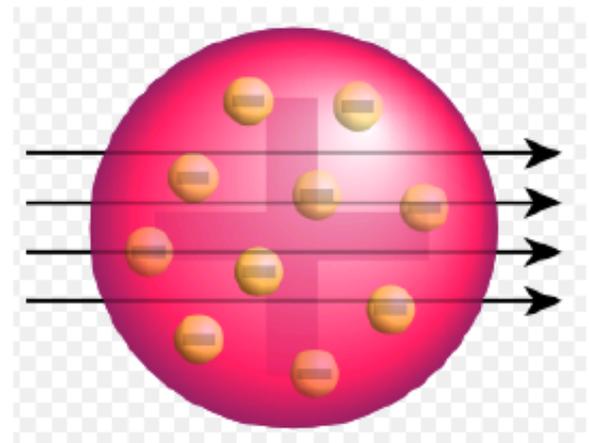


Não observado

- 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

Como testar o modelo de Thomson?

- Através do “bombardeamento” do átomo com diferentes partículas
- No caso do modelo de Thomson, se espera que as deflexões sejam pequenas: massa do elétron \ll massa da partícula- α



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 α e β
- Observou que a razão q/m das partículas α era duas vezes menor que para o próton
- Suspeitava que as partículas α eram átomos de Hélio duplamente ionizada
- Deixou uma amostra de substância radioativa se desintegrar emitindo partículas α e submeteu este conteúdo a uma descarga elétrica e observou as linhas do espectro de Hélio
- Percebeu que as partículas α possuíam alta energia e massa relativamente elevada

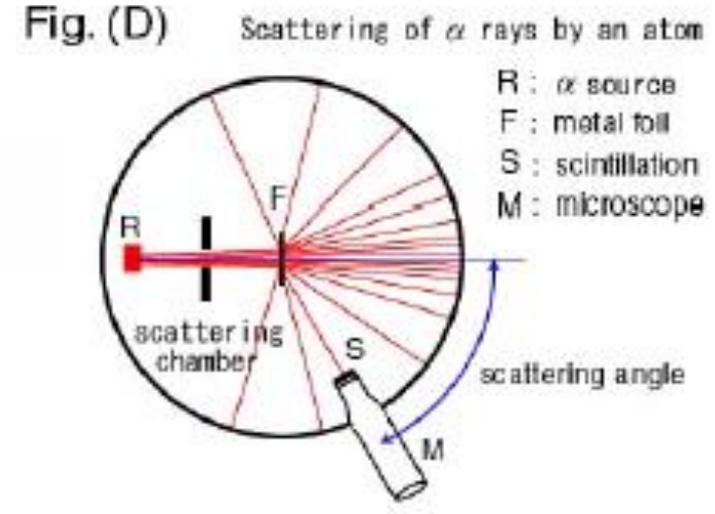
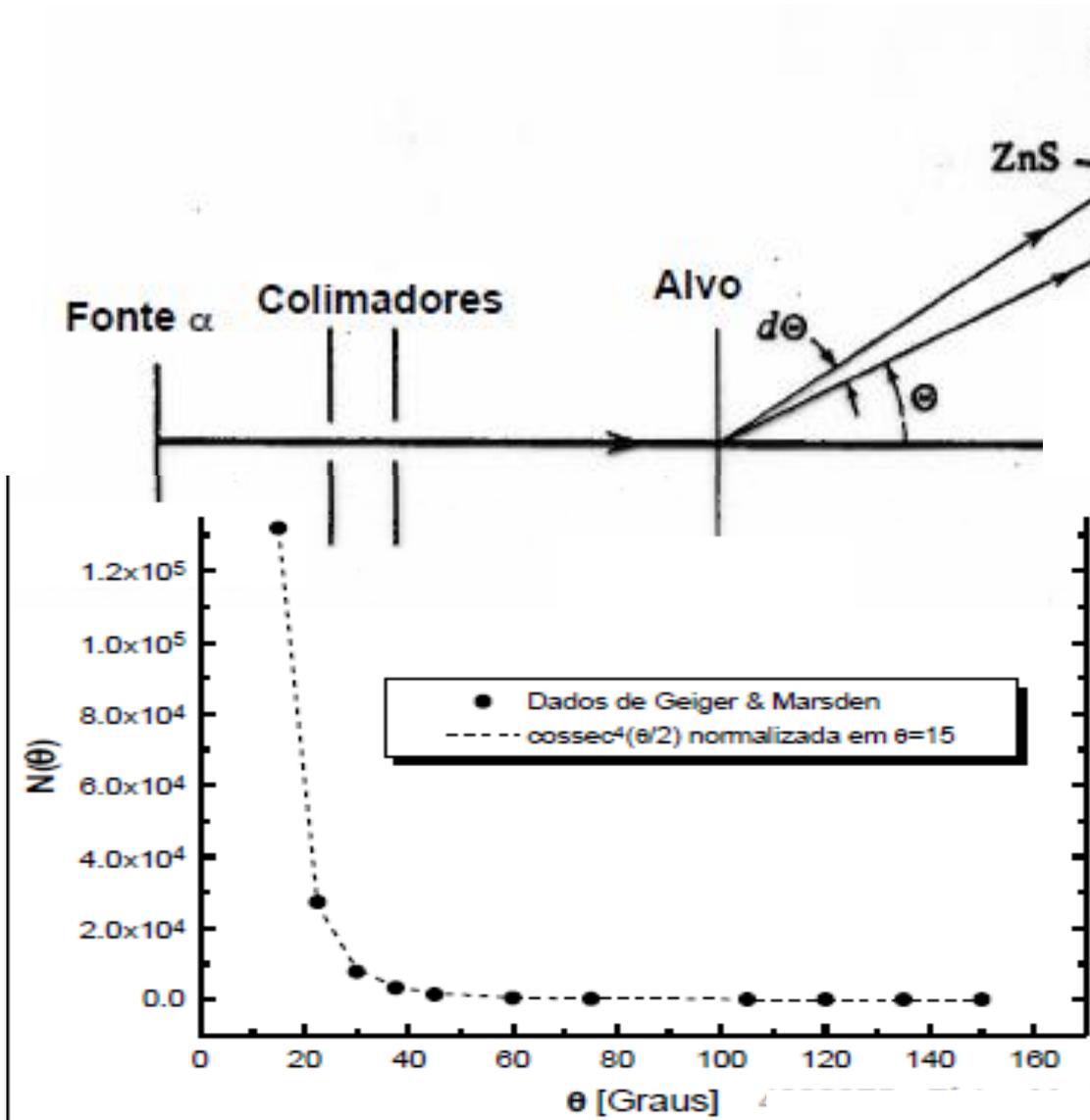


Ótimo instrumento para sondar os átomos

Estrutura do átomo

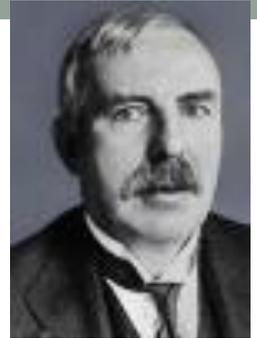


Experimento de Rutherford, Geiger e Marsden (1909)



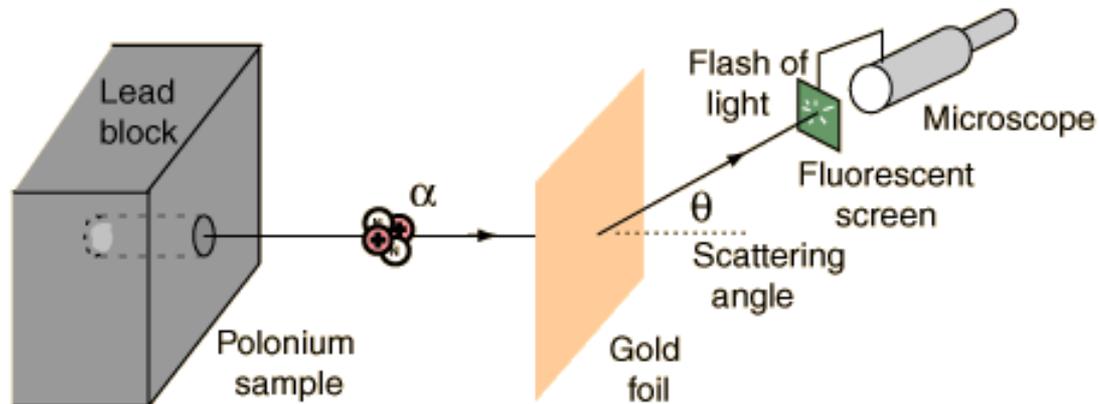
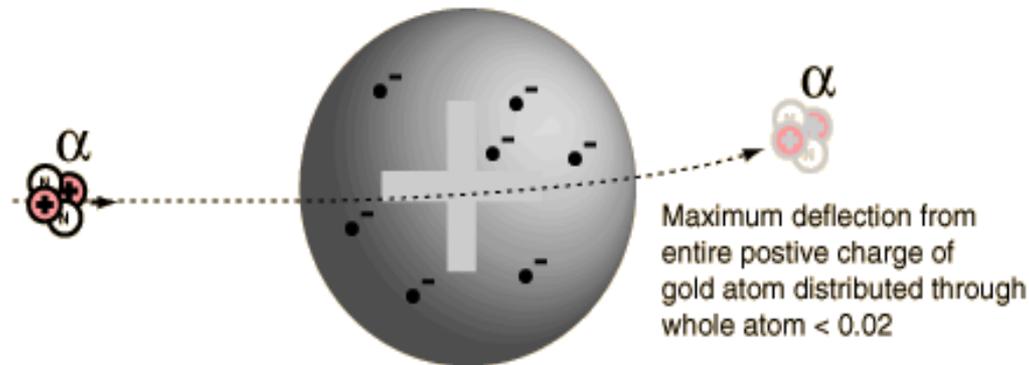
1 a cada 8000 α s são espalhadas $> 90^\circ$

Estrutura do átomo



- As primeiras experiências de espalhamento

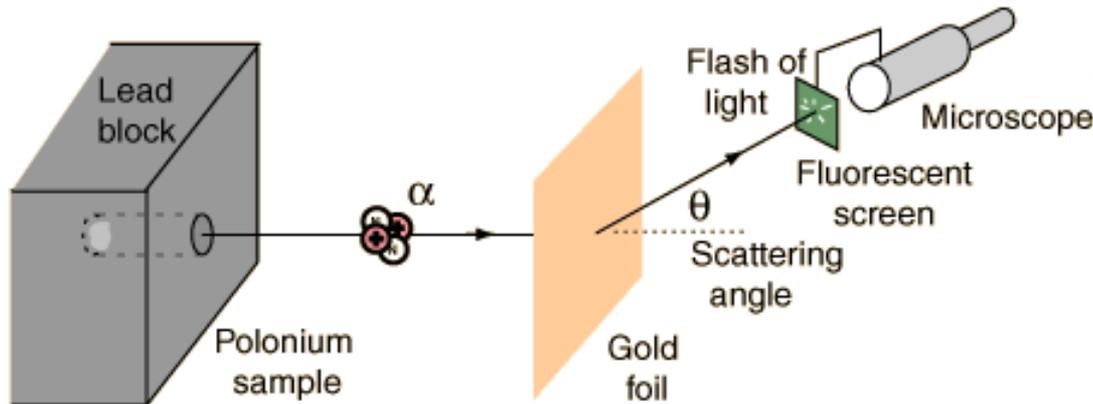
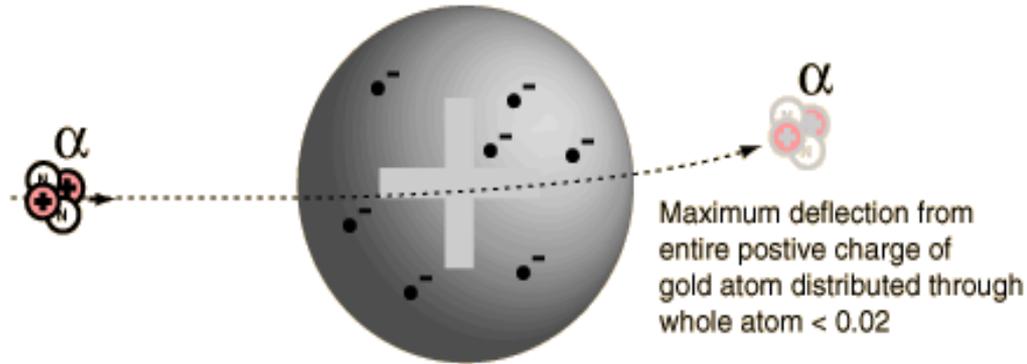
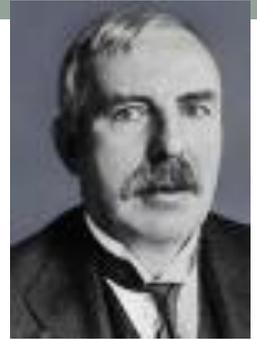
Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas α



Estrutura do átomo

- As primeiras experiências de espalhamento usou partículas α (possuíam alta energia e massa relativamente elevada)
- Ótimo instrumento para sondar os átomos

Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas α



Rutherford observou grandes deflexões, sugerindo um núcleo duro e pequeno

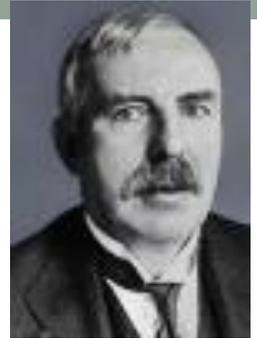
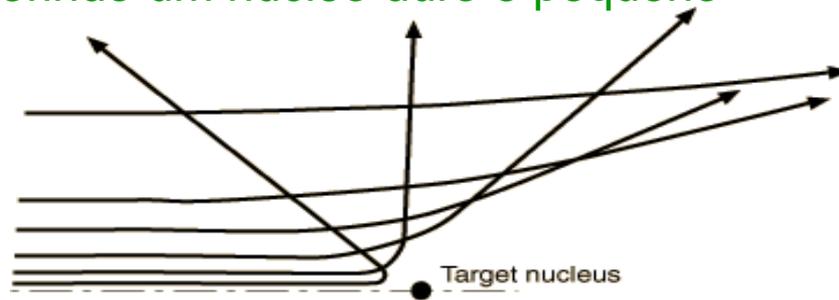


Estrutura do átomo

- As primeiras experiências que determinaram a estrutura do átomo foram as de espalhamento

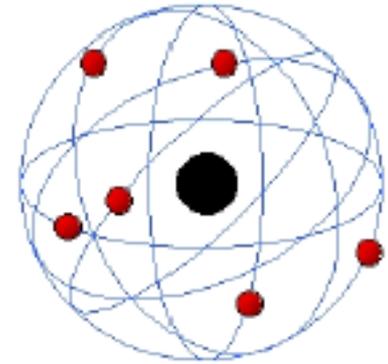
Rutherford em 1911 propõe um novo modelo

Rutherford observou grandes deflexões, sugerindo um núcleo duro e pequeno



- Ernest Rutherford: experimento com um feixe de partículas α 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}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 α que o núcleo alvo não sofre recuo (energia cinética inicial e final da α 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)

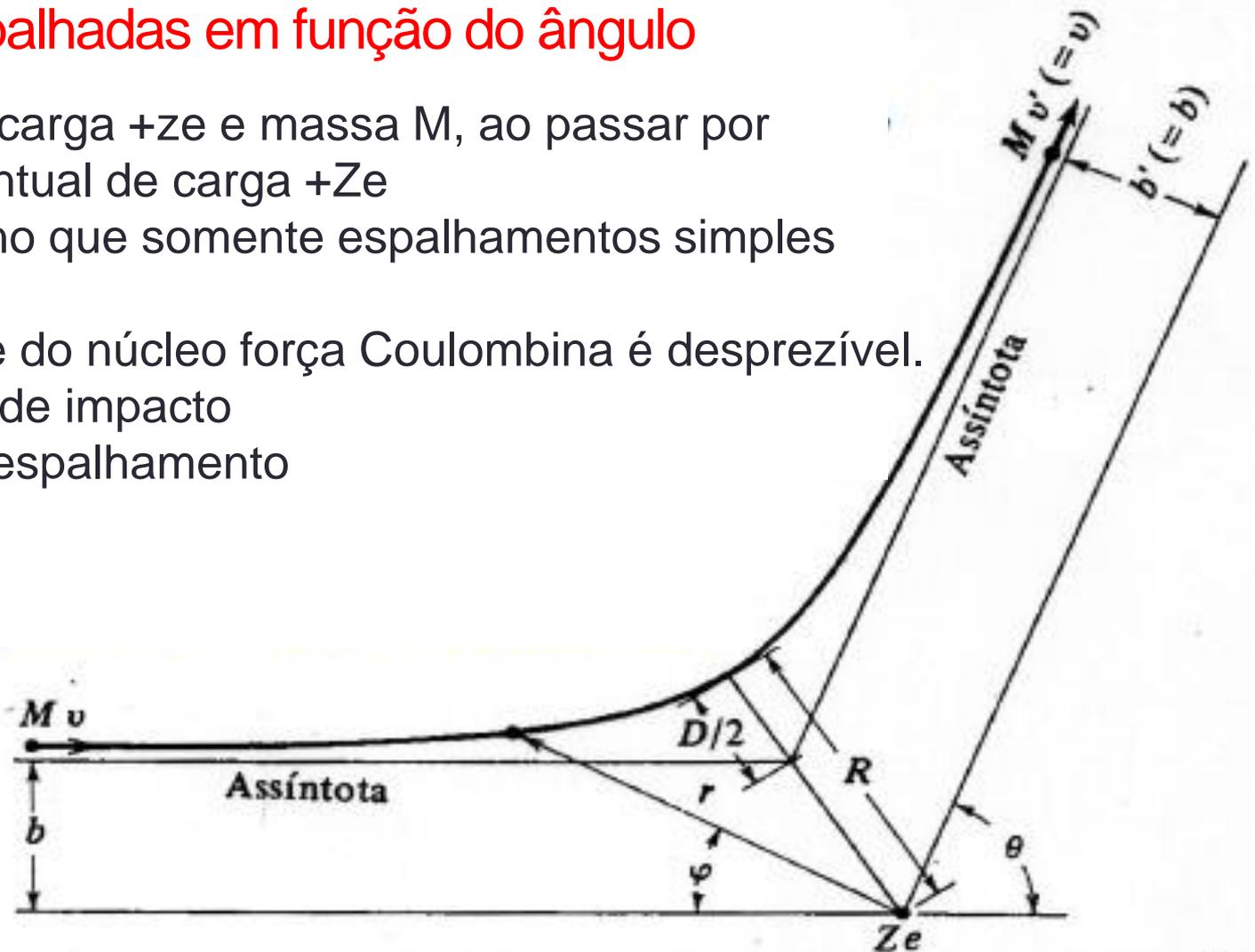
Rutherford (1911)

- **Objetivo:** calcular o número de partículas espalhadas em função do ângulo.
- **1º passo:** o ângulo de espalhamento da partícula incidente depende da proximidade da colisão. Portanto, é preciso calcular o ângulo de espalhamento em função da proximidade, ou **parâmetro de impacto**, da colisão.

ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

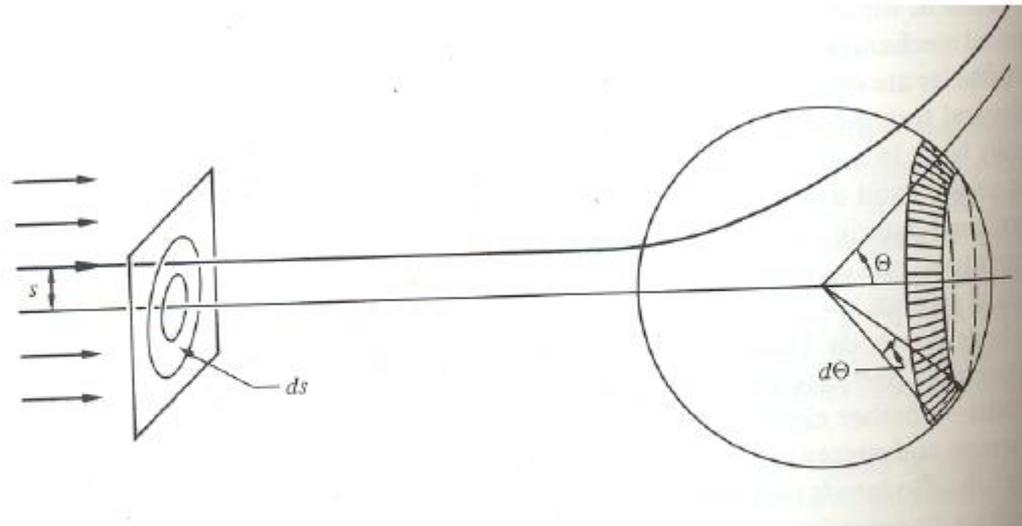
Melhor caracterização é preciso calcular o número de partículas espalhadas em função do ângulo

- Partícula α 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
- θ – ângulo de espalhamento



Rutherford (1911)

- **2º passo:** Qual a probabilidade de uma partícula interagir com o núcleo e ser espalhada em um ângulo θ ?



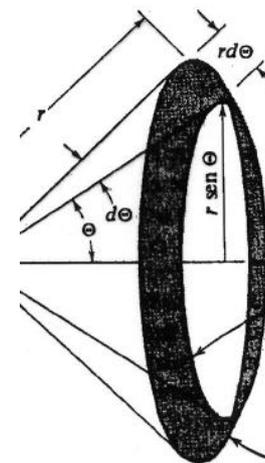
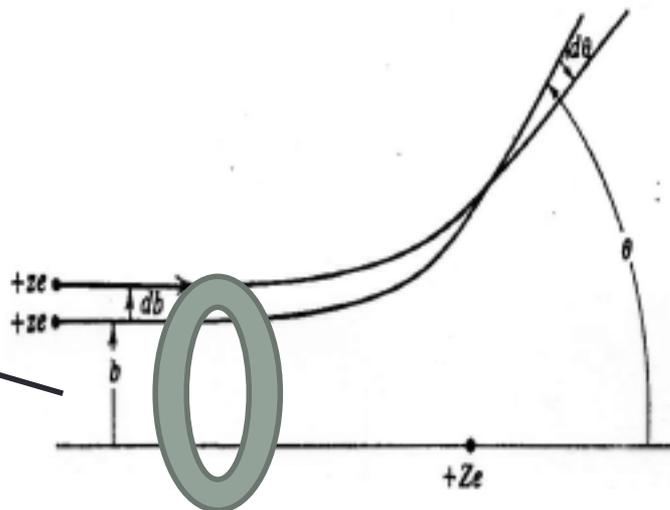
Seção de choque σ

□ Está relacionada a probabilidade de uma partícula ser espalhada por um núcleo

Vemos que na vida real o detector está posicionado sobre um intervalo de ângulo θ e $\theta+d\theta$

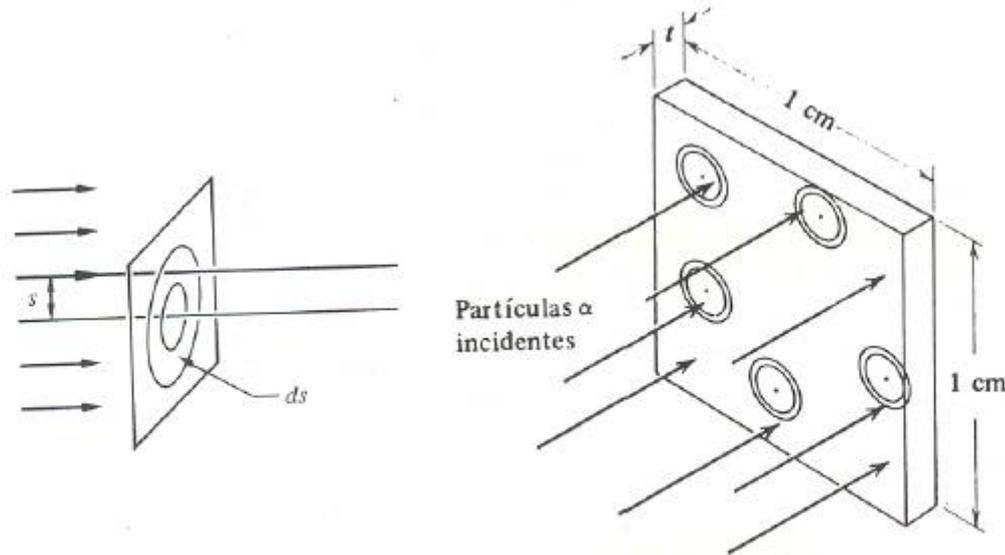
que corresponde a um parâmetro de impacto b e $b+db$

$$\text{Área} = 2\pi b db$$



Rutherford (1911)

- **2º passo:** Qual a probabilidade de uma partícula interagir com o núcleo e ser espalhada em um ângulo θ ?



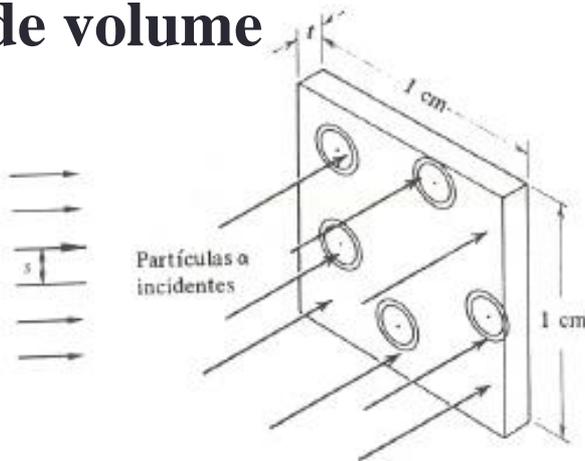
Espalhamento α

□ No espalhamento de uma partícula por um núcleo deve-se considerar:

□ Folha de espessura t com densidade ρ

□ Estamos supondo que a folha é tão fina que a probabilidade de que um núcleo esteja na “sombra” de outro é insignificante.

Chamaremos de n o número de núcleos (átomos) por unidade de volume



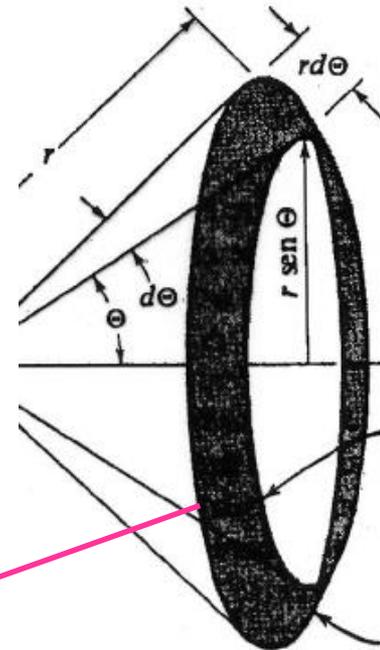
$$n = \frac{\rho(\text{g} / \text{cm}^3) \cdot N_A (\text{átomos} / \text{mol})}{M (\text{g} / \text{mol})}$$

$$n = \frac{\rho N_A}{M} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}$$

Se a folha tem uma espessura t (cm) temos que nt é o número de átomos por unidade de área (átomos/cm²)

Equação de espalhamento de Rutherford

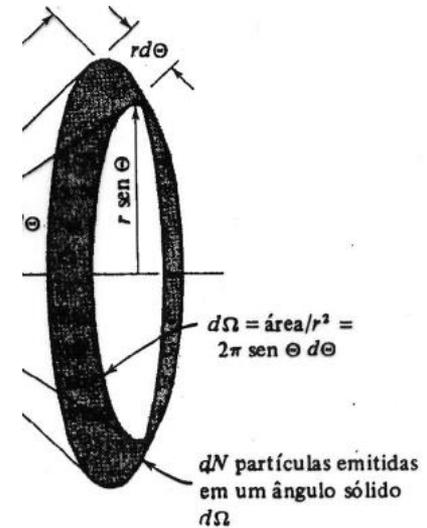
- As N partículas α cujo ângulo de espalhamento está entre $\theta + d\theta$ passam por uma zona esférica de raios r com centro no átomo responsável pelo espalhamento:



$$dA = (rd\theta).(2\pi r \sin \theta)$$

- O número de partículas α espalhadas em um ângulo sólido $d\Omega$ em torno de um ângulo de espalhamento θ

$$dN = N(\theta)d\theta = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Zze^2}{2mv^2}\right)^2 \frac{I \cdot \rho \cdot t}{\text{sen}^4(\theta/2)} 2\pi \cdot \text{sen}(\theta) d\theta$$



Pontos importantes:

- O espalhamento é proporcional a Z_1^2 e Z_2^2
- O termo Mv^2 é a energia cinética da partícula α incidente, e o espalhamento é inversamente proporcional a energia cinética desta partícula
- O espalhamento é inversamente proporcional a 4 potência de $\text{sen}(\theta/2)$
- O espalhamento é proporcional a espessura da folha de metal n
- número de partículas α de um feixe de intensidade I

$$n = \frac{\rho(\text{g/cm}^3) \cdot N_A(\text{átomos/mol})}{M(\text{g/mol})}$$

$$n = \frac{\rho N_A \text{ átomos}}{M \text{ cm}^3}$$

n o número de núcleos (átomos) por unidade de volume

$$dN \sim \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot I \cdot n \cdot t \cdot d\Omega$$

Secção de choque de Rutherford

Modelo de Rutherford

De acordo com o modelo de Rutherford o número de partículas espalhadas α por núcleo observadas na tela de um cintilômetro de área A será a uma distância r da folha espalhadora:

$$\Delta N = Int \left(\frac{A}{r^2} \right) \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E_\alpha} \right)^2 \frac{1}{4} \frac{1}{\sin^4 \theta / 2}$$

Intensidade do feixe α é o número de núcleos por unidade de área (átomos/cm²)

Se a folha tem uma espessura t (cm) temos que nt é o número de átomos por unidade de área (átomos/cm²)

partículas α

Fator devido a área do cintilômetro e a distância deste da folha espalhadora

Partículas espalhadoras

Energia cinética das partículas α antes do espalhamento

Dados observados

- Geiger e Marsden, em nova e mais precisa medida (1911), observaram que:
 - A distribuição angular variava com $1/\sin^4(\theta/2)$, para $5^\circ < \theta < 150^\circ$;
 - A intensidade de partículas espalhadas era proporcional a espessura da folha;
 - A intensidade de partículas espalhadas era proporcional ao quadrado do peso atômico (medido para Al, Cu, Ag, Sn e Au).

ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

- Rutherford foi capaz de estimar o raio do núcleo, a partir da distância de maior aproximação:

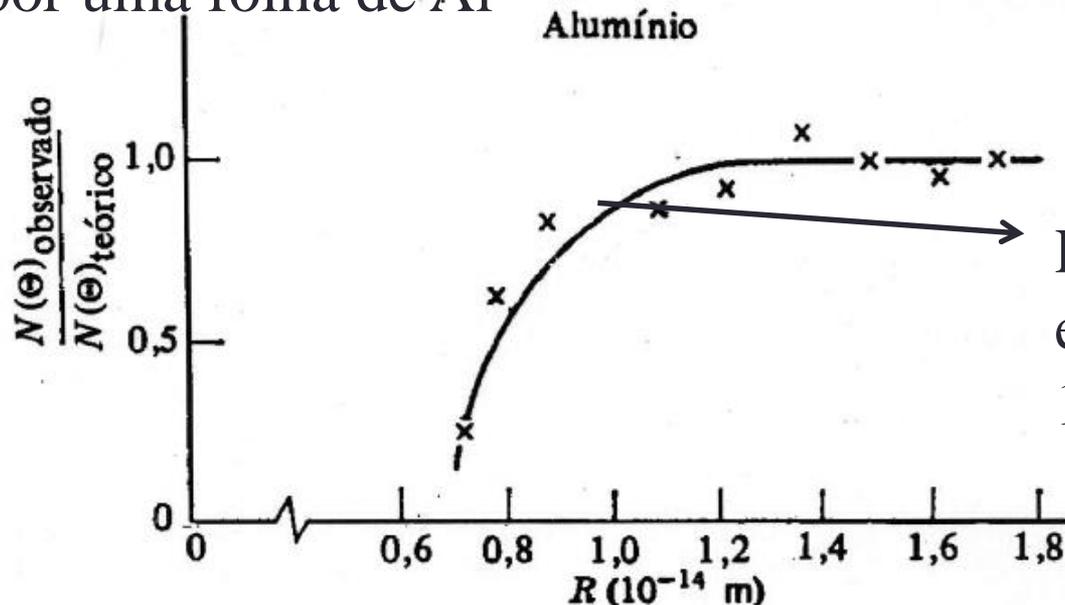
$$a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\frac{1}{2} m v^2}$$

- Ele obteve valores da ordem de 10^{-15}m (1fm) para partículas α com E de $p \sim 5\text{MeV}/c$!!!

Secção de choque diferencial de Rutherford

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E_\alpha} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$$

Fornece o número de partículas espalhadas em um dado elemento de ângulo sólido $d\Omega$. Dados obtidos pelo grupo de Rutherford para o espalhamento de partículas α de várias energias a um ângulo fixo grande por uma folha de Al

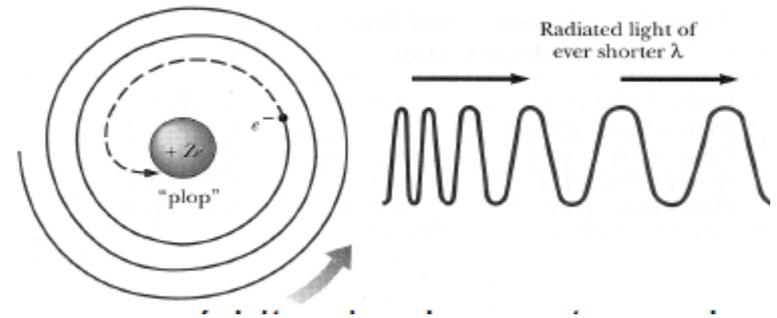


Raio do núcleo de Al
é aproximadamente
 $10^{-14} \text{ m} = 10\text{F}$

E a estabilidade do átomo proposto por Rutherford ?

- ❑ Este modelo proposto por Rutherford tinha um sério problema conceitual:
 - ❑ Como elétrons que estavam orbitando ao redor do núcleo poderia manter o sistema estável?
 - ❑ Elétron acelerado devido ao movimento circular em torno do núcleo.
 - ❑ Da teoria eletromagnética clássica temos que uma carga acelerada irradia energia continuamente (radiação eletromagnética).
 - ❑ Energia do sistema deve decrescer.
 - ❑ R decresce – órbitas irão diminuir o sistema deveria colapsar – elétron cair no núcleo

$$\Delta t \sim 10^{-12} \text{ s}$$



- ❑ Como resolvemos este problema?
- ❑ Além do mais havia a emissão de comprimentos de luz discretos por alguns gases, que não havia ainda sido explicado

Exercício: Espalhamento de partículas α

- Partículas α são produzidas pela desintegração do ^{226}Ra e 450 partículas por minuto são produzidas em um cintilômetro para um ângulo $\theta = 45^\circ$. Se as condições experimentais forem mantidas e o detector for deslocado de modo a observar as partículas no ângulo de 90° , qual será o número de partículas observadas por minuto?

$$\Delta N = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E_\alpha} \right)^2 \frac{1}{4} \frac{Int}{\text{sen}^4 \theta / 2} \left(\frac{A}{r^2} \right)$$

$$\Delta N = C \frac{1}{\text{sen}^4 \theta / 2}$$

Quando deslocamos o detector para 90° ,

$$\Delta N = C \frac{1}{\text{sen}^4 90 / 2}$$

$$450 = C \frac{1}{\text{sen}^4 45 / 2}$$

$$\Delta N = 450 \frac{\text{sen}^4 45 / 2}{\text{sen}^4 90 / 2} = 450 \frac{0.021}{0.25}$$

$$C = 450 * \text{sen}^4 (45 / 2)$$

$$\Delta N = 37.8 \approx 38 \text{particulas/ min}$$

Exercício: Espalhamento de partículas α

- Um feixe de partículas α com $E_k = 6,0\text{MeV}$ incide em uma folha de prata com $1,0\mu\text{m}$ de espessura. A corrente do feixe é de $1,0\text{nA}$. Quantas partículas α serão contadas por um pequeno cintilômetro com 5mm^2 de área situado a $2,0\text{cm}$ da folha com um ângulo de 75° ? (dados: Ag: $Z=47$, $\rho=10,5\text{g/cm}^3$, $M=108\text{g/mol}$)

$$\Delta N = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Z_2 e^2}{2E_\alpha} \right)^2 \frac{Int}{\text{sen}^4 \theta / 2} \left(\frac{A}{r^2} \right)$$

1) Intensidade do feixe de α

$$I = \frac{i}{q} = \frac{1\text{nA}}{2e} = \frac{1 \times 10^{-9} (\text{C/s})}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{C}}$$

2) Número de núcleos (átomos por unidade de volume)

$$I = 0,312 \times 10^{10} = 3,12 \times 10^9 \frac{\text{alfas}}{\text{s}}$$

$$n = \frac{\rho (\text{g/cm}^3) \cdot N_A (\text{átomos/mol})}{M (\text{g/mol})}$$

$$n = \frac{10,5 (\text{g/cm}^3) \cdot 6,02 \times 10^{23} (\text{átomos/mol})}{108 (\text{g/mol})}$$

$$n = \frac{\rho N_A \text{ átomos}}{M \text{ cm}^3}$$

$$n = 5,85 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} = 5,85 \times 10^{28} \frac{\text{átomos}}{\text{m}^3}$$

Exercício: Espalhamento de partículas α

- Um feixe de partículas α com $E_k = 6,0\text{MeV}$ incide em uma folha de prata com $1,0\mu\text{m}$ de espessura. A corrente do feixe é de $1,0\text{nA}$. Quantas partículas α serão contadas por um pequeno cintilômetro com 5mm^2 de área situado a $2,0\text{cm}$ da folha com um ângulo de 75° ? (dados: Ag: $Z=47$, $\rho=10,5\text{g/cm}^3$, $M=108\text{g/mol}$)

$$\Delta N = \frac{Int}{\text{sen}^4 \theta / 2} * \left(\frac{A}{r^2} \right) * \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Z_2 e^2}{2E_\alpha} \right)^2$$

3) Correção área do cintilômetro

$$\frac{A}{r^2} = \frac{5\text{mm}^2}{(2\text{cm})^2} = \frac{5 \times 10^{-6} \text{m}^2}{(2 \times 10^{-2})^2 \text{m}^2}$$

$$\Delta N = \frac{3,12 \times 10^9 \times 5,85 \times 10^{28} \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{-6}}{0,137 \times (2 \times 10^{-2})^2} \times \left(\frac{9 \times 10^9 \times 47 \times (1,6 \times 10^{-19})^2}{2 \times 6 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19}} \right)^2$$

$$\Delta N = \frac{91,26 \times 10^{25}}{0,137 \times 4 \times 10^{-4}} \times (56,4)^2 \times (10^{-16})^2$$

$$\Delta N = 529 \times 10^3 \times 10^{-3}$$

$$\Delta N = 529 \text{ alfas} / \text{s}$$

estação – RBS

LAMFI - 1.7MV Pelletron Acelerador



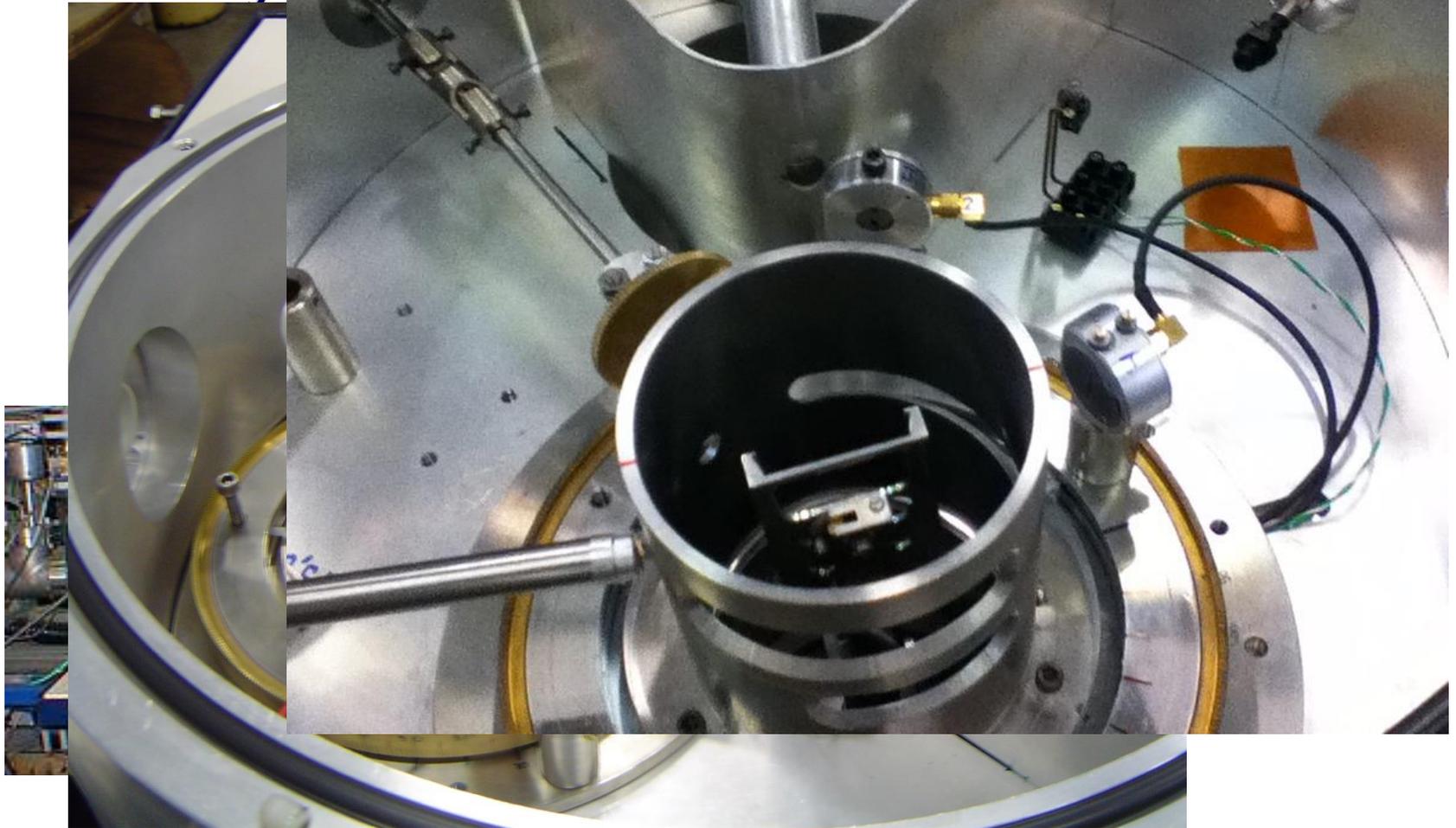
Fonte de íons:

1) fonte RF/Rb para feixes de He-

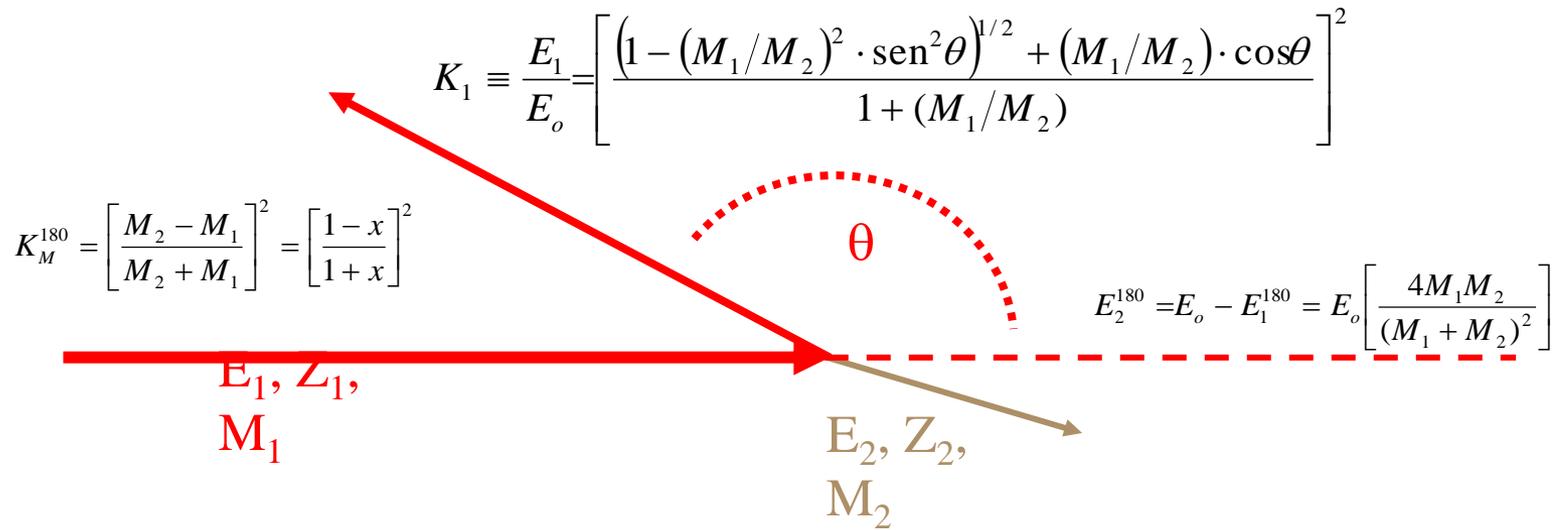
2) fonte SNICS II para feixes de H⁻, Li⁻, O⁻, Si⁻.

estação – PIXE

Estação



estação – RBS – FOTOS: LAMFI



Seção de choque no CM

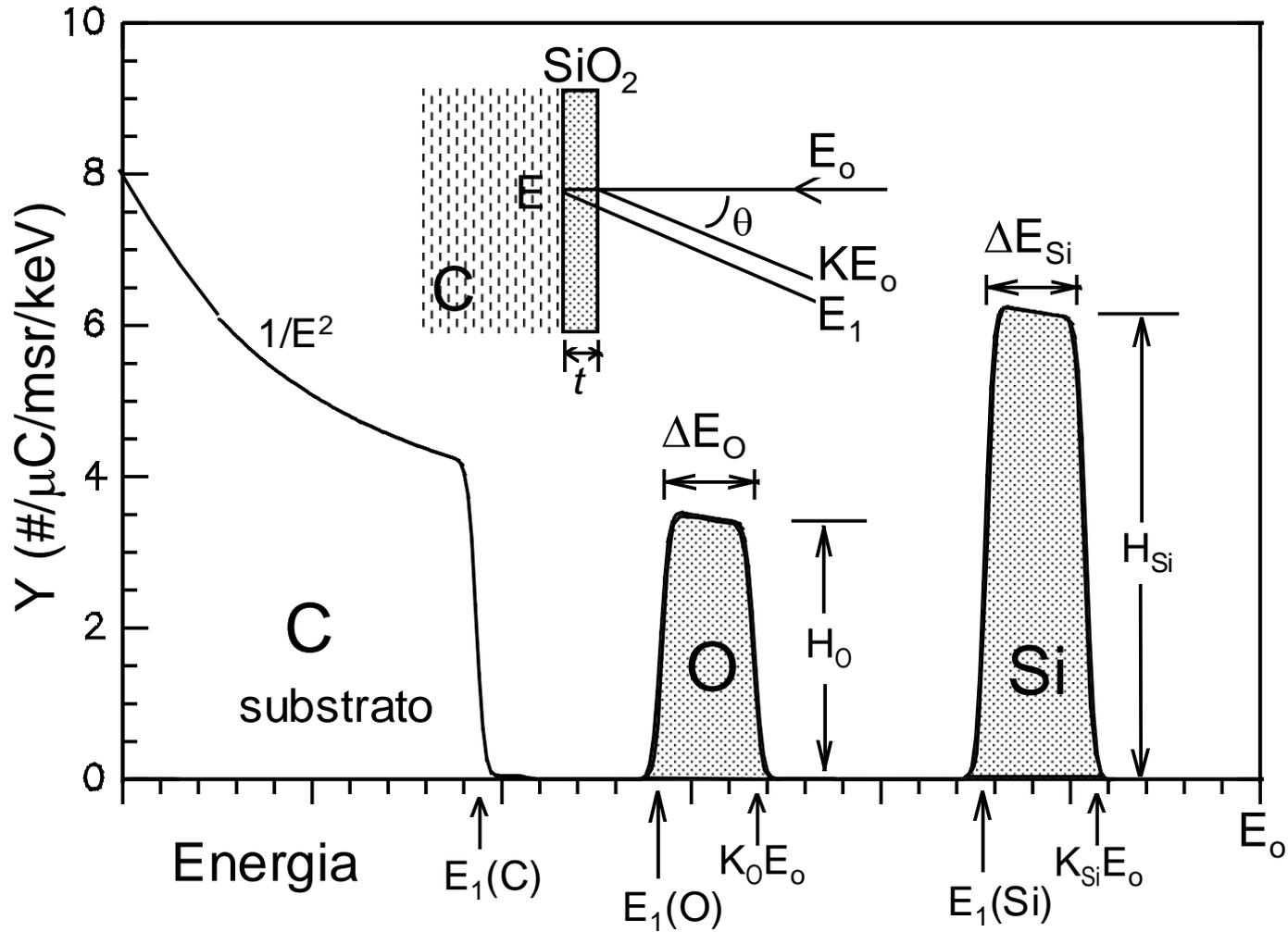
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) = \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4 \cdot E_c} \right)^2 \frac{1}{\text{sen}^4(\theta/2)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) = \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4 \cdot E} \right)^2$$

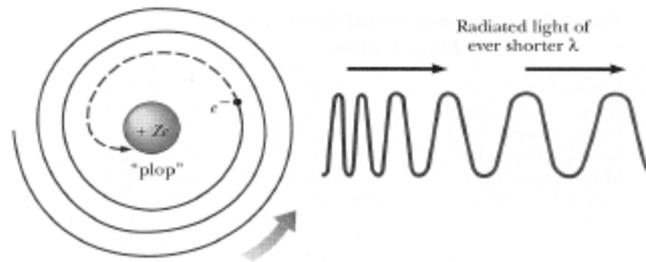
Seção de choque no laboratório

$$\left[\frac{4}{\text{sen}^4\theta} \frac{\left\{ \left[1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \text{sen}\theta \right)^2 \right]^{1/2} + \text{cos}\theta \right\}^2}{\left\{ 1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \text{sen}\theta \right)^2 \right\}^{1/2}} \right]$$

um espectro RBS didático

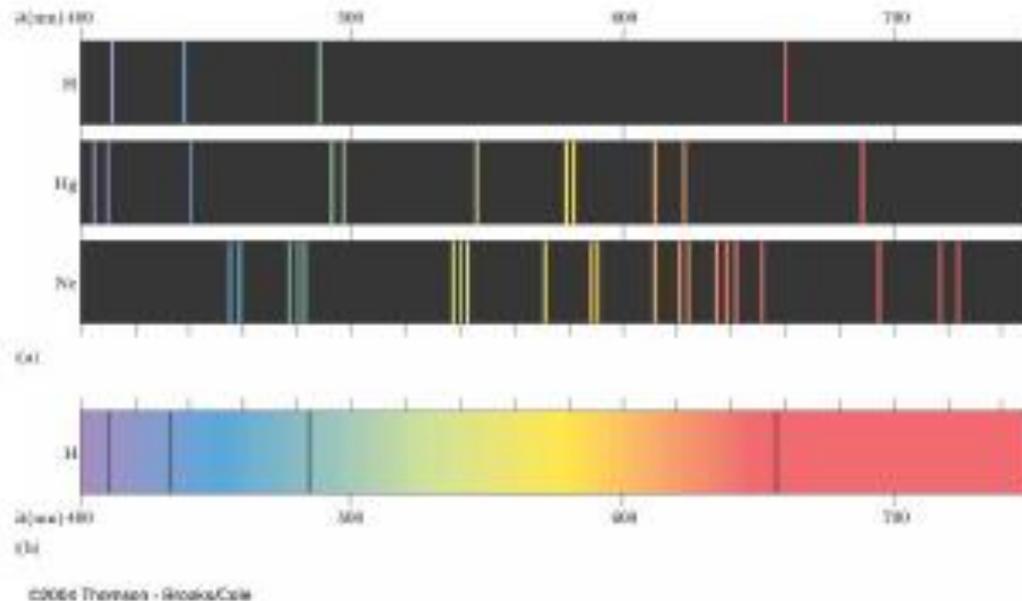


Estabilidade do átomo proposto por Rutherford



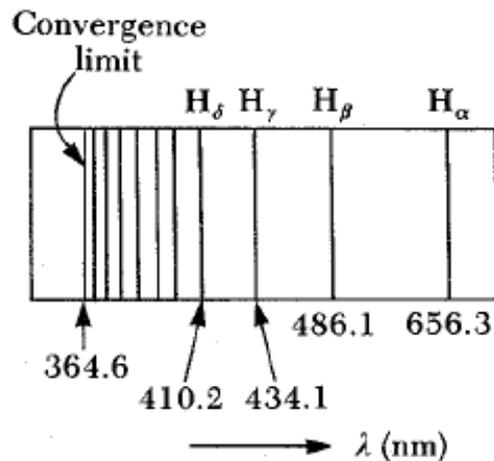
- Este modelo proposto por Rutherford tinha um sério problema conceitual:
 - Como é possível um sistema físico composto de elétrons “orbitando” o núcleo ser estável?
 - Esse sistema deveria colapsar segundo as leis da física clássica...
- Como resolver isso?

Espectros Atômicos



- Esses espectros discretos são observados para diferentes elementos

Espectro do Hidrogênio



- Em 1885, Johannes Balmer, um professor suíço de ensino fundamental, foi o primeiro a extrair uma fórmula matemática que reproduz a regularidade observada na faixa do visível:

$$\lambda = 3646 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad \text{com } n = 3, 4, 5, \dots$$

Espectro do Hidrogênio

Nomes	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	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 6, 7, 8, \dots$

O Modelo de Bohr

- ❑ Em 1913, Niels Bohr propõe um modelo baseado nas ideias de Rutherford – artigo “On the constitution of atoms and molecules”:
 - ❑ Considerou que o elétron se move em torno do núcleo (muito + massivo) e com carga positiva



POSTULADOS:

- ❑ Eisberg e Resnick pag. 138
- ❑ O elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob a influência da atração Coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo as leis da mecânica clássica.
- ❑ Em vez de infinitas orbitas que seriam possíveis segundo a mecânica clássica, o elétron só pode se mover em certas órbitas na qual seu momento angular orbital L é um múltiplo inteiro de \hbar ($h/2\pi$)

$$L=n\hbar \quad , \quad n=1,2,3....$$

O Modelo de Bohr

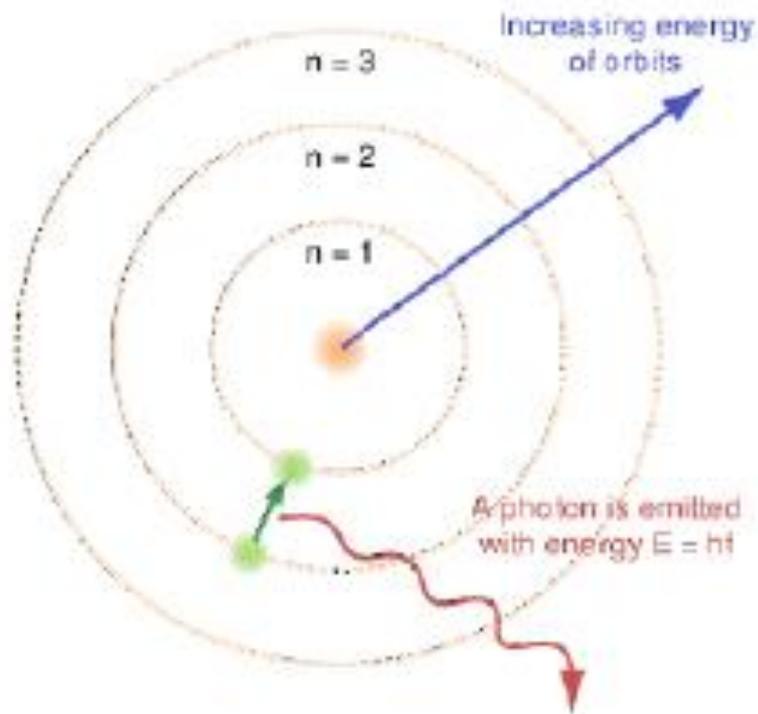
POSTULADOS:

- ❑ Apesar dos elétrons estarem acelerados, um elétron que se move em uma destas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética. Portanto a energia total E permanece constante.
- ❑ É emitida radiação eletromagnética se um elétron se move inicialmente sobre uma órbita de energia E_i e depois muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em uma órbita E_f . A frequência da radiação emitida ν é igual a:

$$h\nu = E_i - E_f$$

o elétron pode transitar de uma órbita permitida para outra “num salto” emitindo um fóton e conservando energia do sistema

O Modelo de Bohr



- Orbita circular
- $L = n\hbar$
- Energia total constante

- $$\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$$