



**Universidade de São Paulo
Instituto de Física**

FÍSICA MODERNA I

AULA 08

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

**2o. Semestre de 2018
Monitor: Felipe Prado**

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=64495>

Interação de fótons com a matéria

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

❑ Efeito fotoelétrico.



Absorvem completamente o fóton

❑ Espalhamento Compton



Espalha o fóton

❑ Produção de pares



Absorvem completamente o fóton

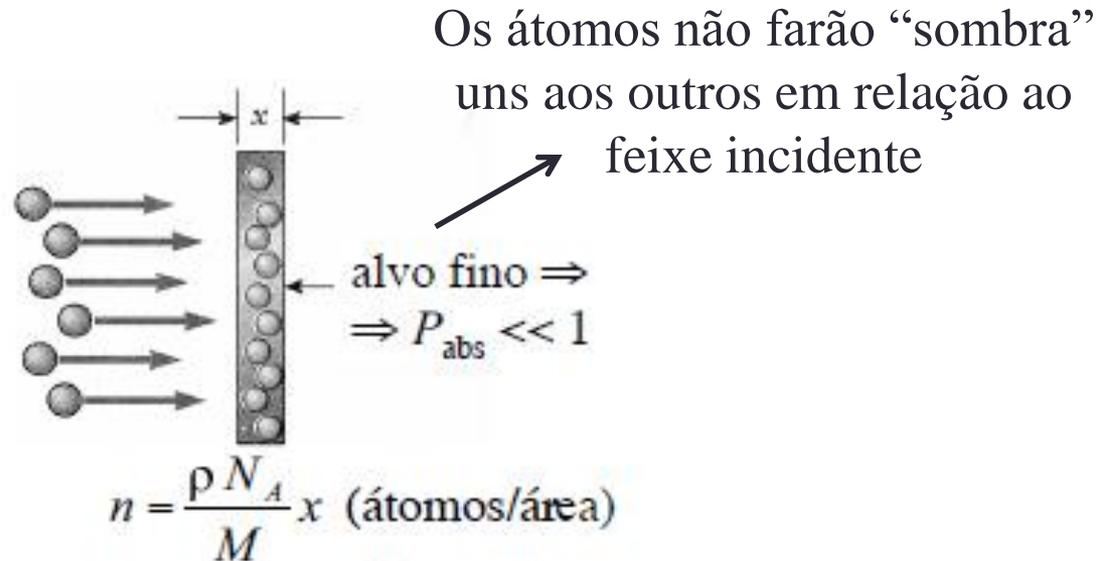
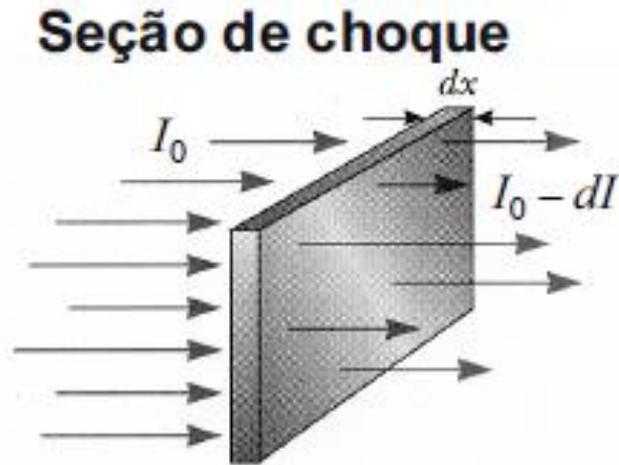
❑ Quais as probabilidades de ocorrência de cada processo?

❑ 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:

A quantidade dI de fótons absorvidos em uma espessura dx de material, deve ser proporcional ao número de fótons I_0 e a espessura x

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

Feixe com I_0 fótons

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)

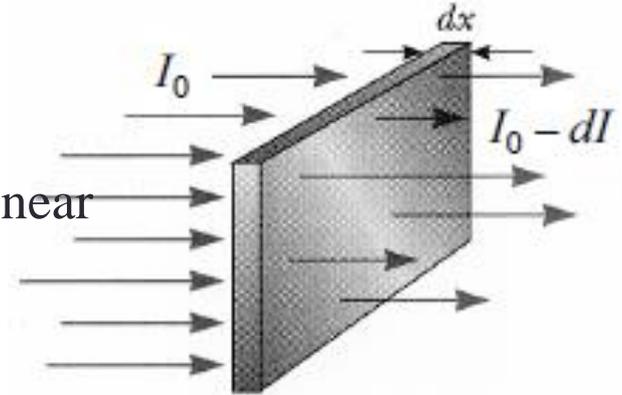
Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

$$dI = -I_0 \mu dx$$

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:

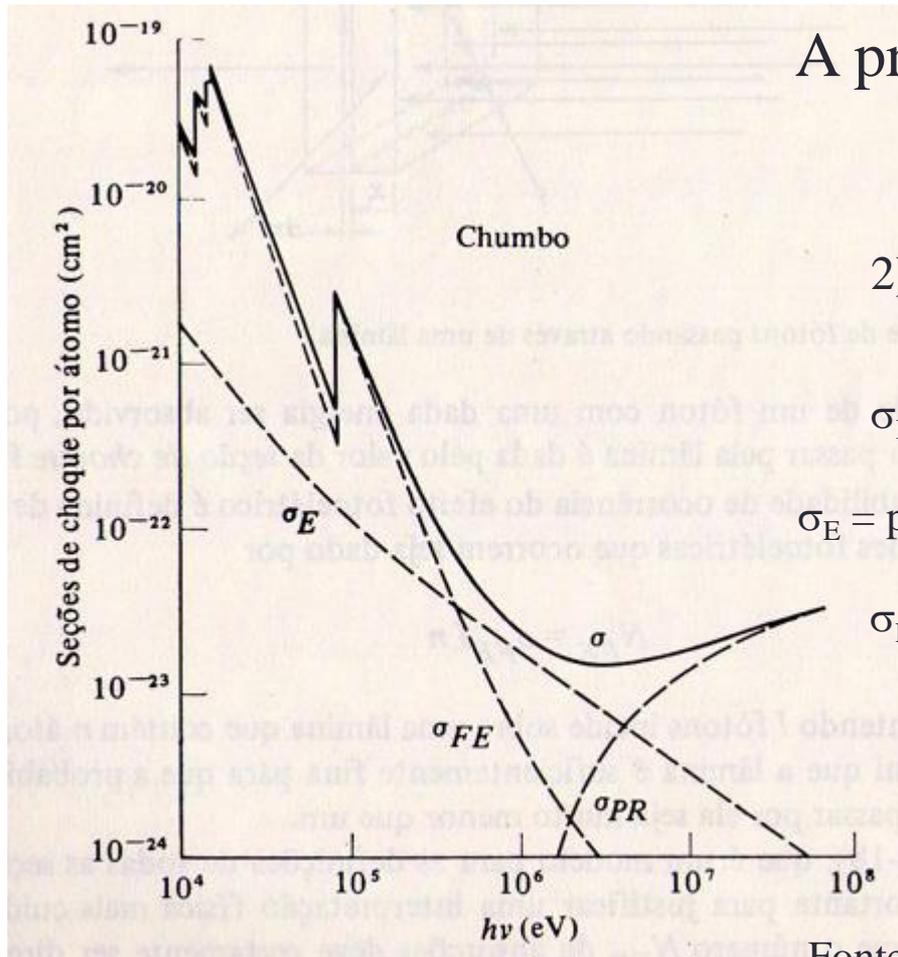
$$\mu = \mu_E + \mu_C + \mu_P$$

❑ 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

σ_{FE} = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo fotoelétrico

σ_E = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo Compton

σ_{PR} = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo de produção de pares

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

**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



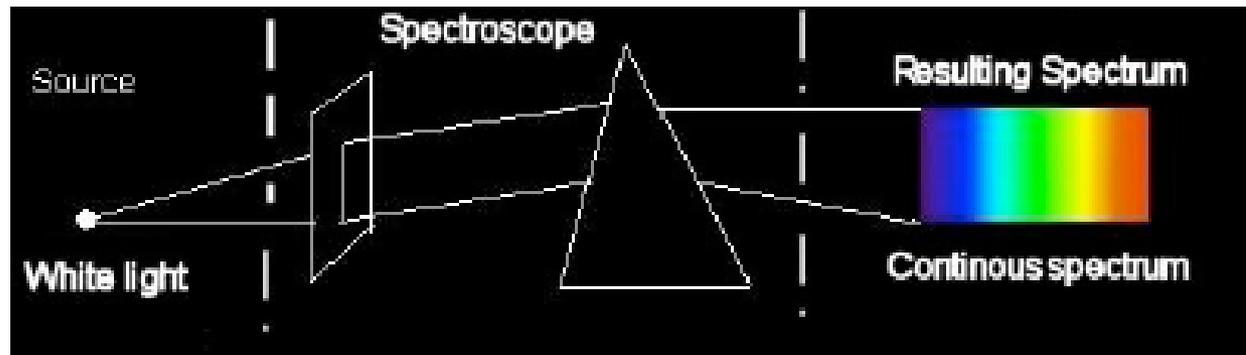
Onde vejo isto?

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

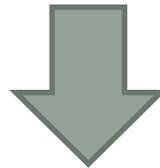


□ Os espectros de emissão dos elementos e compostos químicos podem ser divididos em três categorias:

- 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



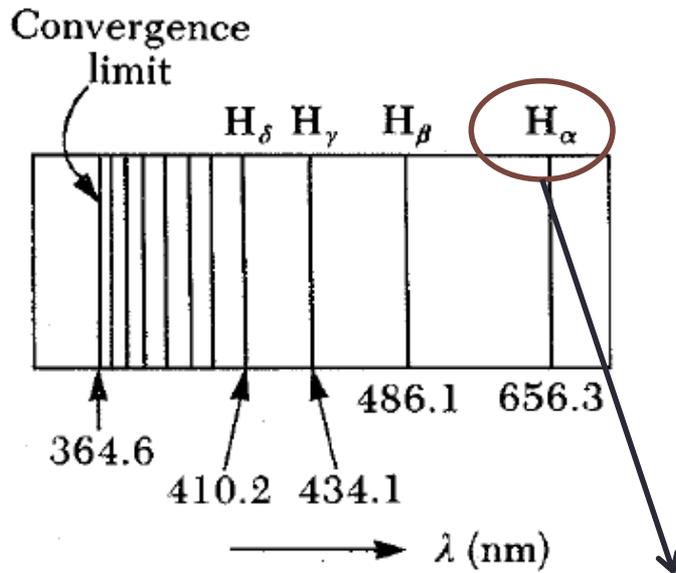
Física clássica não consegue explicar estas linhas



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**:



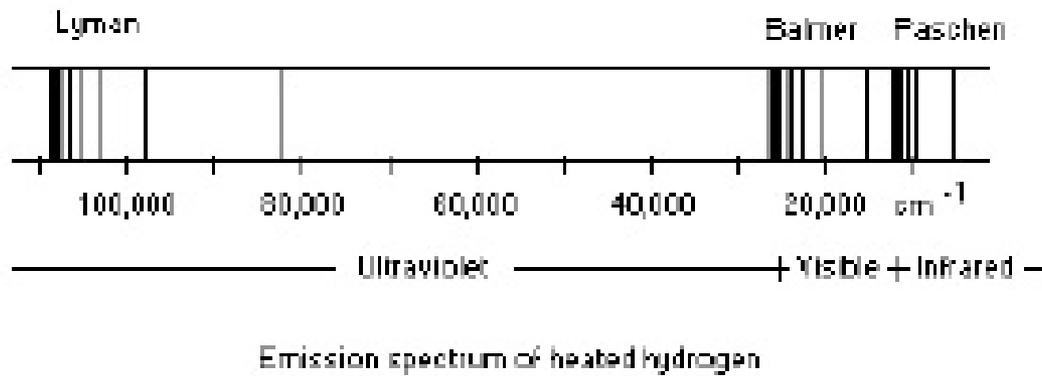
1885: J. Balmer descobriu que as linhas do espectro de hidrogênio podiam ser calculadas através de fórmula empírica:

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

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:

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

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

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}m
 - ❑ Era eletricamente neutro
 - ❑ Continha elétrons (partículas muito + leves que o átomo como um todo)

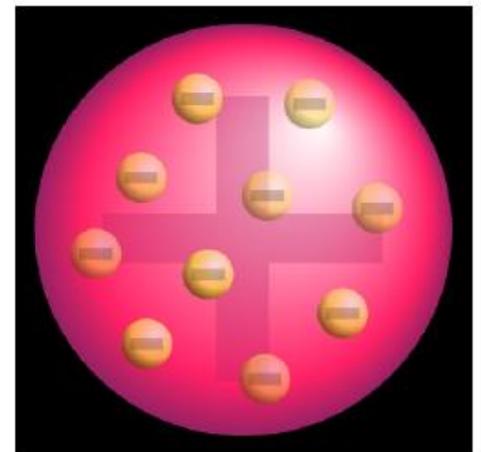
Problema:

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”

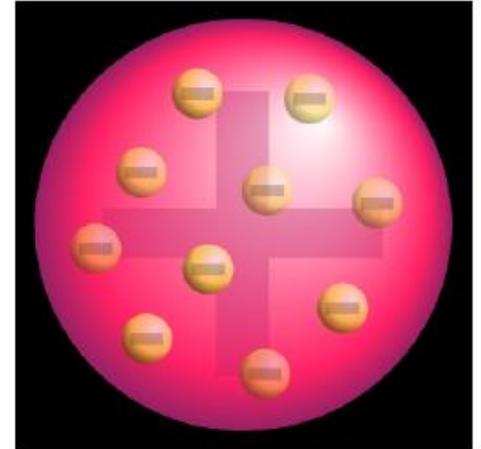


Modelo atômico

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 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)

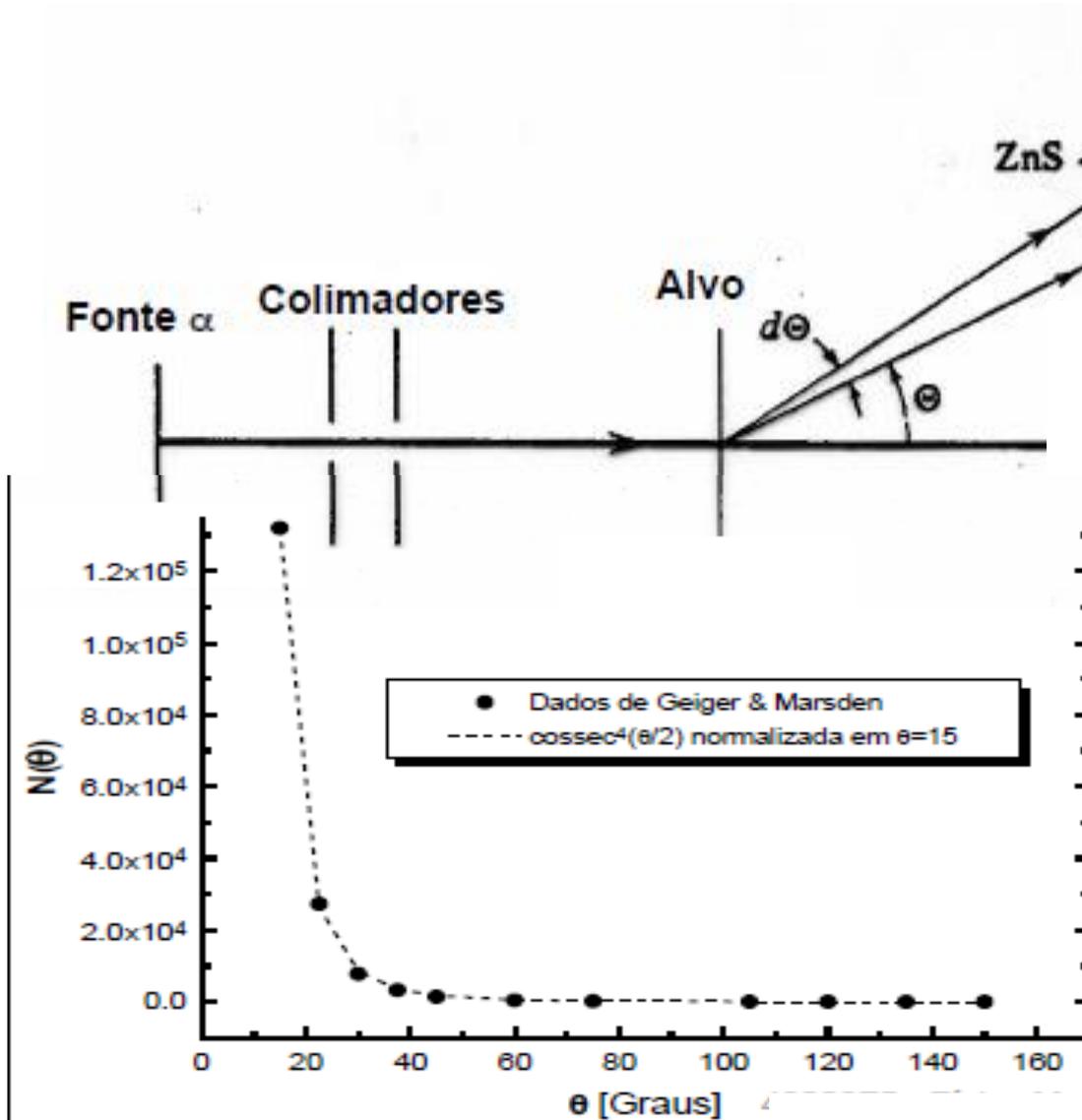
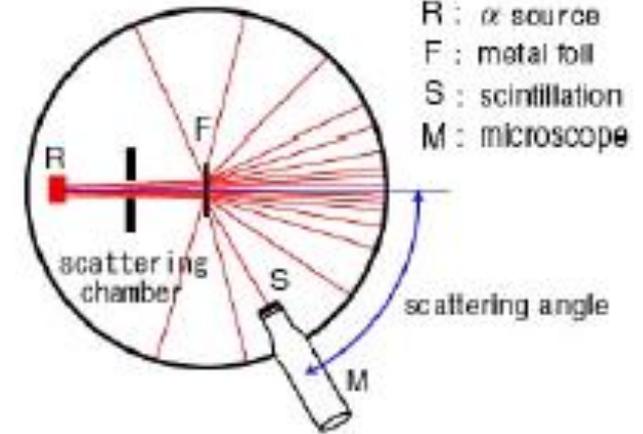
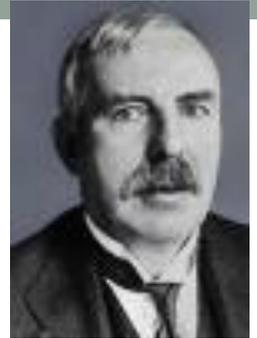


Fig. (D) Scattering of α rays by an atom



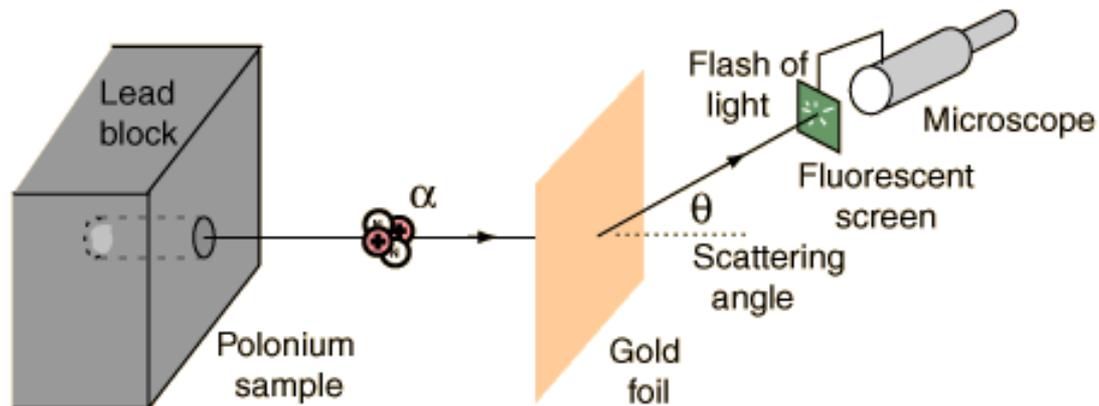
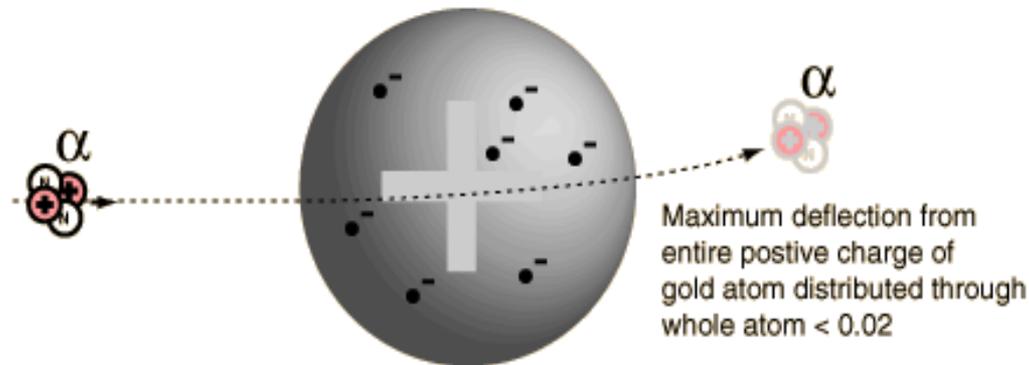
1 a cada 8000 α s são espalhadas $> 90^\circ$

Estrutura do átomo

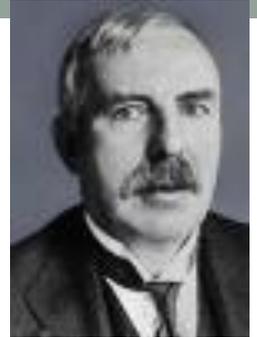


- As primeiras experiências de espalhamento

Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas α

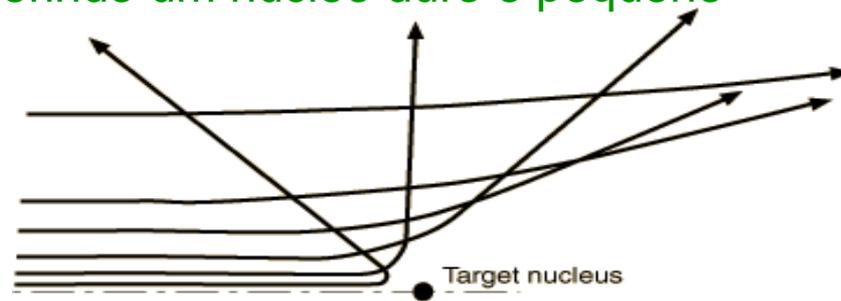


Estrutura do átomo



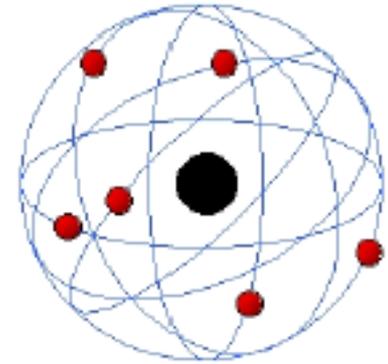
- As primeiras experiências que determinaram a estrutura do átomo foram as de espalhamento e Rutherford em 1911 propõe um novo modelo

Rutherford observou grandes deflexões, sugerindo um núcleo duro e pequeno



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

MODELO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

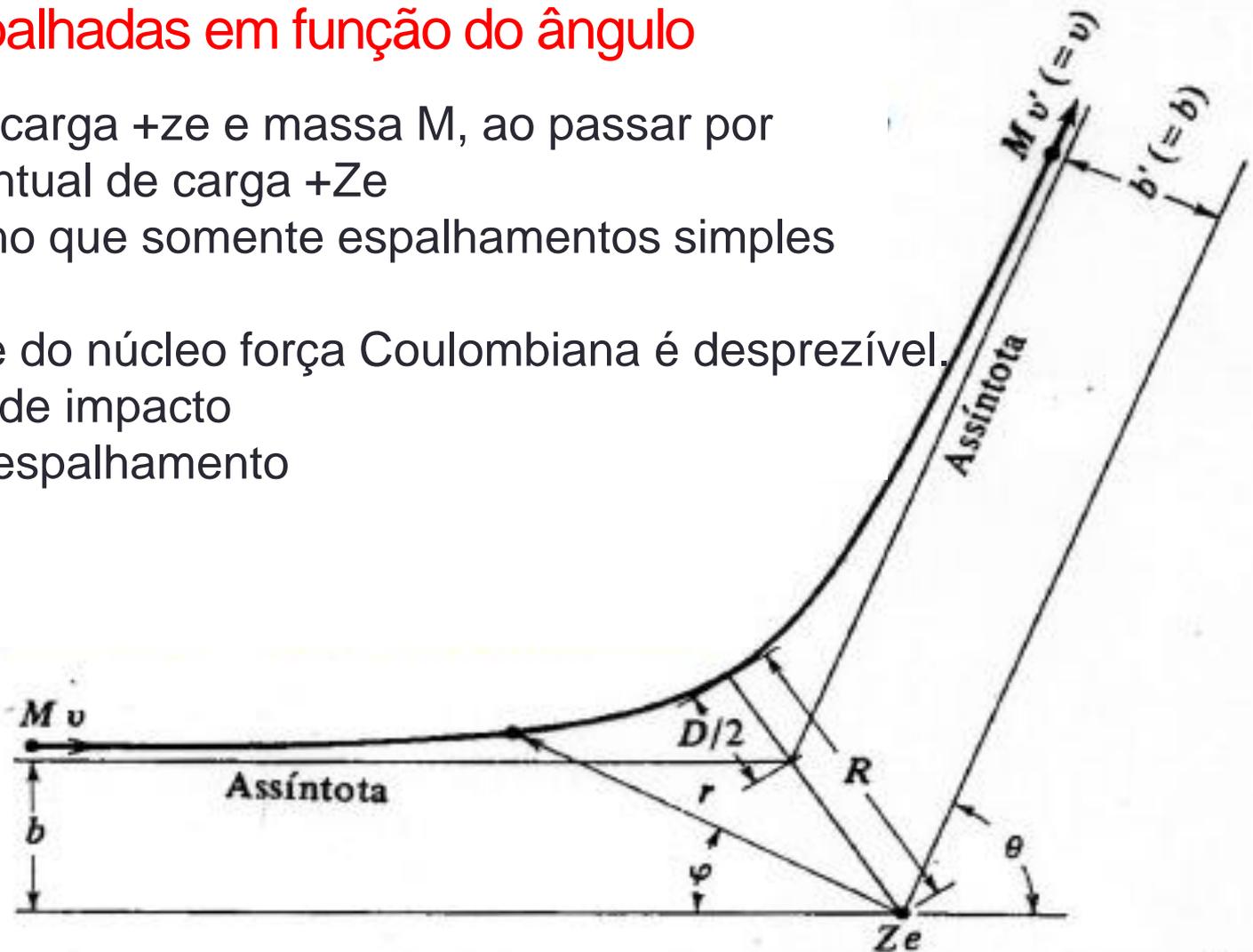


- As hipóteses para o modelo atômico e sua interação:
 - Mecânica Clássica é válida
 - O átomo contém um núcleo com carga $+Ze$ e Z elétrons orbitando em sua volta;
 - Carga positiva estava centrada em um volume de cerca de 10^{-14}m (10 mil vezes menor que o átomo)
 - Espalhamento é devido a força repulsiva Coulombiana entre a partícula α 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)

ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

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

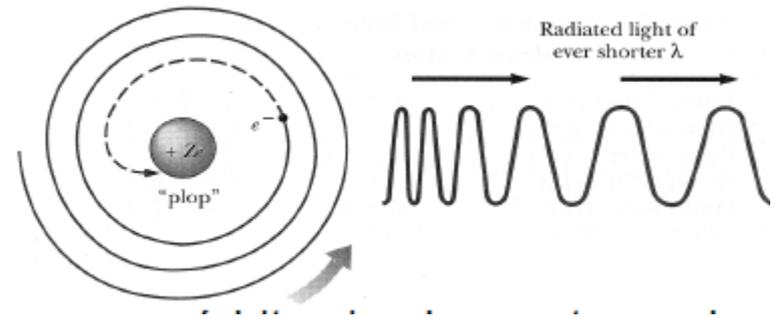
- Partícula α de carga $+ze$ e massa M , ao passar por um núcleo pontual de carga $+Ze$
- O alvo é tão fino que somente espalhamentos simples ocorrem
- Partícula longe do núcleo força Coulombiana é desprezível.
- b – parâmetro de impacto
- θ – ângulo de espalhamento



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

RETOMAR O ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

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

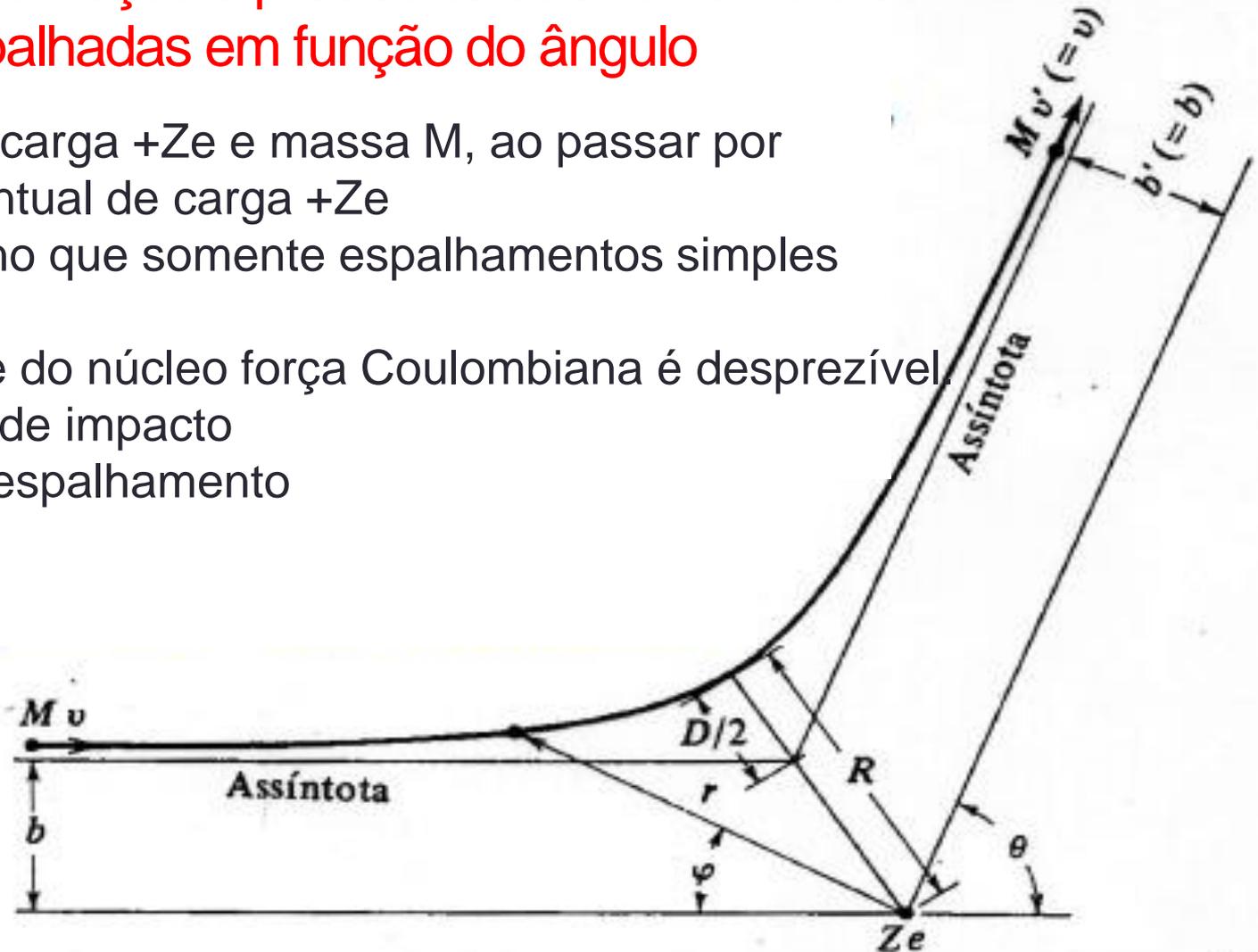
que está relacionada a probabilidade de uma partícula ser espalhada por um núcleo

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 $b+db$

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



ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

- b e v parâmetro de impacto e velocidade antes da colisão
- b' e v' depois da colisão

Uma vez que a **força** agindo sobre as partículas **é central**, temos que o momento angular do sistema se conserva na colisão

$$L = Mvb = Mv'b'$$

- Supondo colisão elástica e desprezando a E_{cin} adquirida pelo núcleo

$$\frac{1}{2} Mv^2 = \frac{1}{2} Mv'^2$$

- $v = v'$ me diz que a trajetória da partícula espalhada esta no mesmo plano
- $b = b'$ o parâmetro de impacto não é alterado após a colisão

ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO



Estimativa do raio do núcleo

- A trajetória da partícula α neste espalhamento é descrito por uma hipérbole

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{b} \text{sen}\varphi + \frac{D}{2b^2} (\text{cos}\varphi - 1)$$

- D é a distância de máxima aproximação numa colisão frontal

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{cin}}$$

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

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

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 $\sim 5\text{MeV}$

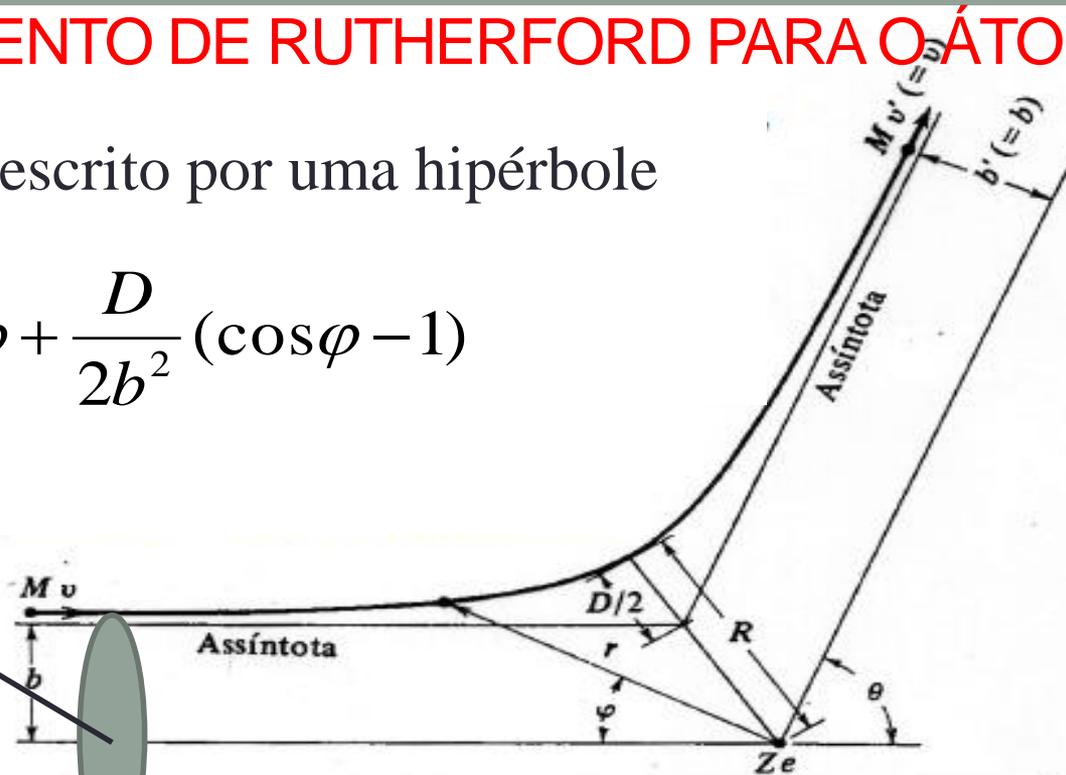
ESPALHAMENTO DE RUTHERFORD PARA O ÁTOMO

espalhamento é descrito por uma hipérbole

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{b} \operatorname{sen} \varphi + \frac{D}{2b^2} (\cos \varphi - 1)$$

$$\text{area} = \pi b^2$$

Seção de choque de espalhamento



- Fazendo $r \rightarrow \infty$ e usando a relação assintótica $\varphi = \pi - \theta$

$$\frac{1}{b} \operatorname{sen} \varphi = -\frac{D}{2b^2} (\cos \varphi - 1)$$

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

$$b = \frac{D}{2} \frac{(1 - \cos \varphi)}{\operatorname{sen} \varphi}$$

$$b = \frac{D}{2} \cot g \frac{\theta}{2}$$

$$\theta = 0, b = \infty$$

$$\theta = 180^\circ, b = 0$$

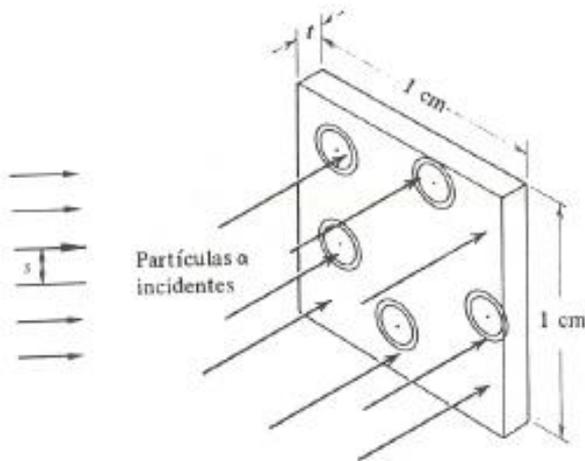
Espalhamento α

□ 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)

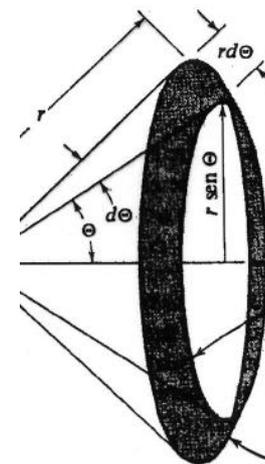
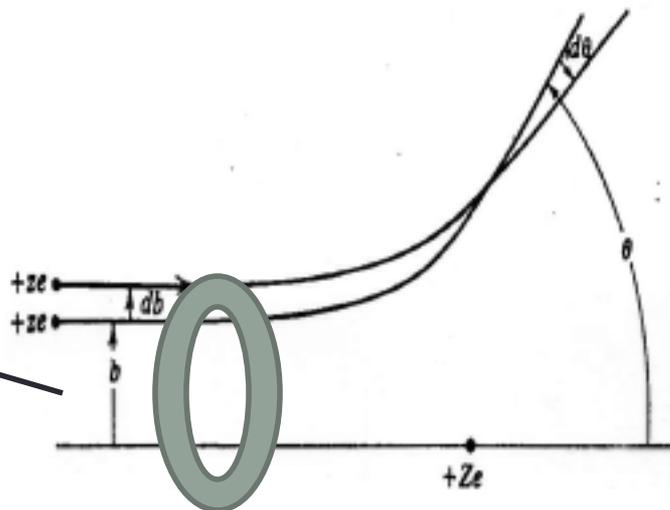
Seção de choque σ

□ 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 $\theta+d\theta$

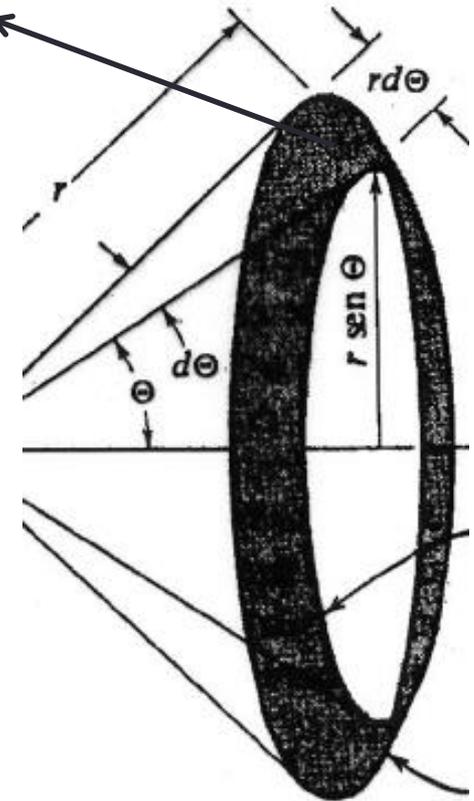
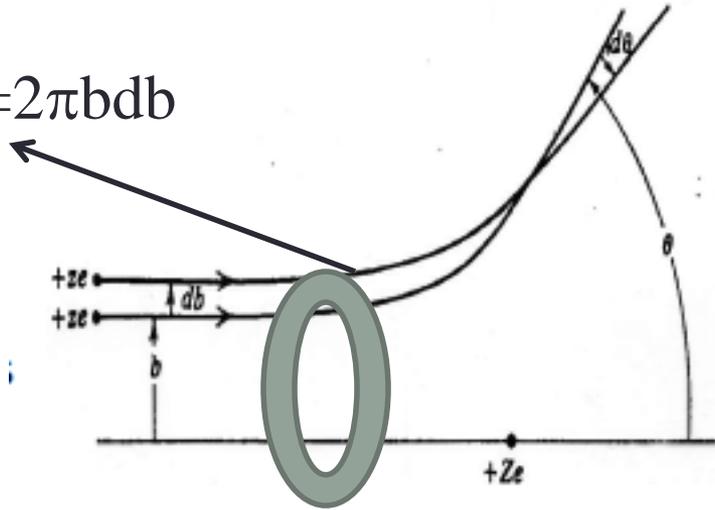
que corresponde a um parâmetro de impacto b e $b+db$

$$\text{Área} = 2\pi b db$$



$$dA = (2\pi r \sin\theta)(r d\theta)$$

$$\text{Área} = 2\pi b db$$



- A probabilidade de uma partícula α passar por um desses anéis é $P(b)db$ e é igual :

$$P(b)db = nt2\pi b db$$

$$b = \frac{D}{2} \cot g \frac{\theta}{2}$$

$$P(b)db = 2\pi nt \frac{D}{2} \cot g \frac{\theta}{2} \left(-\frac{D}{2} \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} d\theta \right)$$

$$db = -\frac{D}{2} \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} d\theta$$

$$P(b)db = -\pi nt \frac{D^2}{4} \cot g \frac{\theta}{2} \left(\frac{1}{\sin^2 \theta/2} \right) d\theta$$

- A probabilidade de α passar por um desses anéis $P(b)db$, é igual a:

$$P(b)db = 2\pi nt \frac{D}{2} \cot g \frac{\theta}{2} \left(-\frac{D}{2} \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} d\theta \right)$$

$$P(b)db = -\pi nt \frac{D^2}{4} \cot g \frac{\theta}{2} \left(\frac{1}{\text{sen}^2 \frac{\theta}{2}} \right) d\theta$$

$$\cot g \frac{\theta}{2} = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\text{sen} \frac{\theta}{2}}$$

$$2 \text{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = \text{sen} \theta$$

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{\text{sen} \theta}{2 \text{sen} \frac{\theta}{2}}$$

$$P(b)db = -\frac{\pi nt D^2}{8} \frac{\text{sen} \theta}{\text{sen}^4 \frac{\theta}{2}} d\theta$$

- $P(b)db$ é igual a probabilidade de que as partículas sejam espalhadas entre $\theta+d\theta$
- O sinal negativo aparece pois uma redução de b provoca um aumento em θ .