

Instituto de Física USP

Física V - Aula 17

Professora: Mazé Bechara

Aula 17 – O experimento de Rutherford

1. **Comentário sobre a interação fóton-elétron no espalhamento Compton: no contexto semi-clássico e na teoria de campos.**
2. **O experimento de Geiger, Marsden e Rutherford** de espalhamento elástico de partículas alfa por folhas de ouro e outros elementos, e seus resultados experimentais conflitantes com o modelo atômico de Thomson. A proposta de Rutherford para a interação com tais resultados – discussão qualitativa.
3. **Conceitos e definições:** espalhamento elástico de um feixe de partículas por um “alvo” espalhador; ângulo de espalhamento, parâmetro de impacto no espalhamento; relação entre o parâmetro de impacto e o ângulo de espalhamento. **O conceito e uma expressão da seção de choque diferencial para qualquer força de interação.**

Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz

HÁ UMA profunda diferença formal entre os conceitos teóricos que os físicos formaram a respeito dos gases e de outros corpos ponderáveis e a teoria de Maxwell dos processos eletromagnéticos no assim chamado espaço vazio. Embora consideremos o estado de um corpo como completamente determinado pelas posições e velocidades de um número muito grande mas ainda assim finito de átomos e elétrons, fazemos uso de funções espaciais contínuas para determinar o estado eletromagnético de um volume no espaço, de modo que um número finito de quantidades não pode ser considerado como suficiente para a determinação completa do estado eletromagnético do espaço. De acordo com a teoria de Maxwell, a energia é considerada uma função espacial contínua para todos os fenômenos puramente eletromagnéticos, e, portanto, também para a luz, enquanto, de acordo com o ponto de vista atual dos físicos, a energia de um corpo ponderável deve ser representada como uma soma sobre os átomos e elétrons. A energia de um corpo ponderável não pode ser dividida em um número arbitrariamente grande de partes arbitrariamente pequenas, mas, de acordo com a teoria de Maxwell (ou, de modo mais geral, de acordo com qualquer teoria ondulatória), a energia de um raio de luz, emitido de uma fonte puntiforme, espalha-se continuamente sobre um volume sempre crescente.

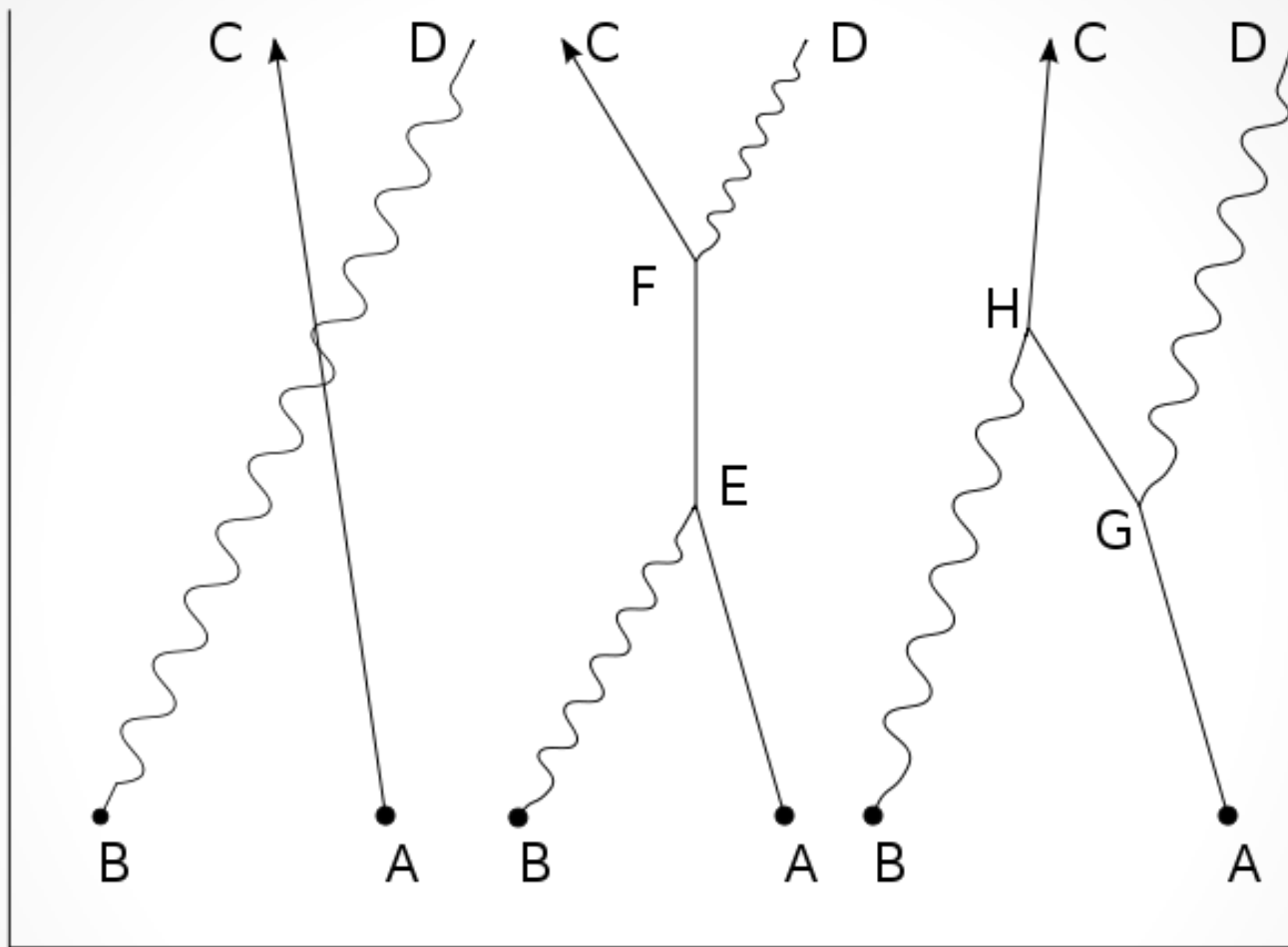
A teoria ondulatória da luz, que opera com funções espaciais contínuas, provou-se sobremaneira adequada na

descrição de fenômenos puramente ópticos, e provavelmente nunca será substituída por outra teoria. Deve-se ter em mente, porém, que as observações ópticas referem-se a médias temporais, e não a valores instantâneos; e é bastante concebível, a despeito da confirmação experimental completa da teoria da difração, reflexão, refração, dispersão, etc., que a teoria da luz, operando com funções espaciais contínuas, leve a contradições quando aplicada aos fenômenos de emissão e transformação da luz.

De fato, parece-me que as observações da “radiação de corpo negro”, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta e outros fenômenos associados à emissão ou transformação da luz podem ser mais facilmente entendidas se admitirmos que a energia da luz é distribuída de forma descontínua no espaço. De acordo com a hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais.

Neste trabalho, desejo apresentar a cadeia de raciocínios e citar os fatos que me levaram por esse caminho, na esperança de que a abordagem aqui apresentada venha a se mostrar útil para alguns pesquisadores em suas investigações.

**Do livro: O Ano Miraculoso de Einstein
cinco artigos que mudaram a face da Física**



Elementos – fatos experimentais

1. O átomo mais leve é o de Hidrogênio que tem massa de 1,008665 uam (unidade atômica de massa). 1uam= $1.660538921(73)\times 10^{-27}$. O Carbono 12 é definido como 12 uam.
2. O elemento estável mais pesado da natureza é o Plutônio 244, com meia vida de $\sim 10.000.000$ anos.
3. Os raios dos átomos não mudam muito. Hoje se sabe (mede-se) que o raio do H é de aproximadamente 0,5 angstrons, e o do plutonio da ordem de 3,5 angstrons.

Geiger (à direita) e Ruthrford (à esquerda) no Laboratório de Manchester



Equipamento do experimento de Rutherford 1911

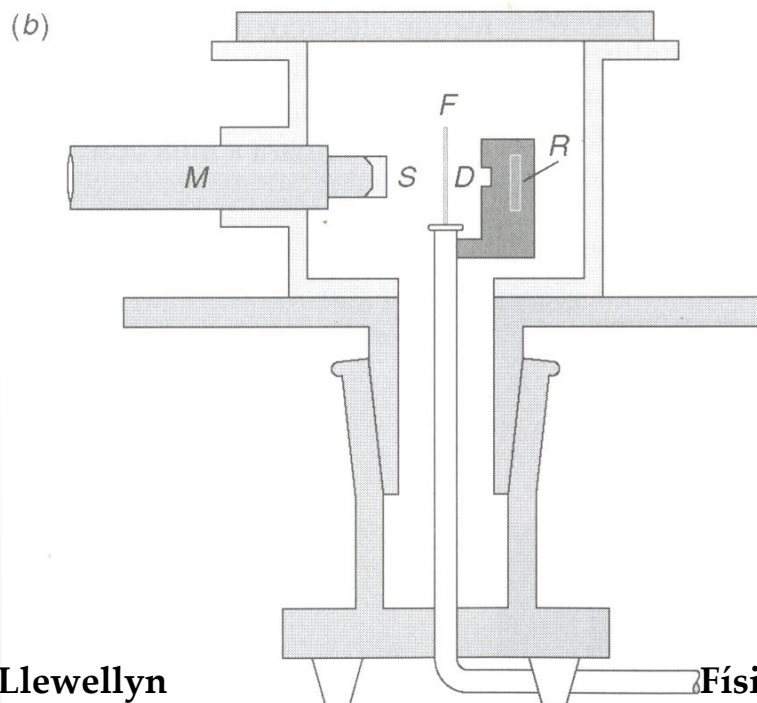
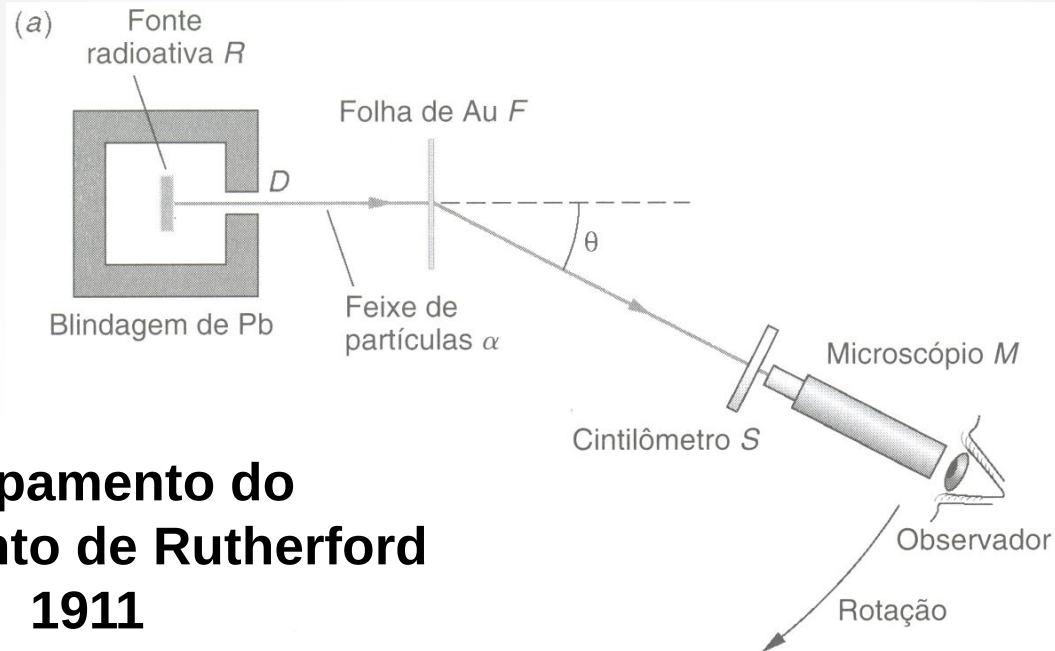
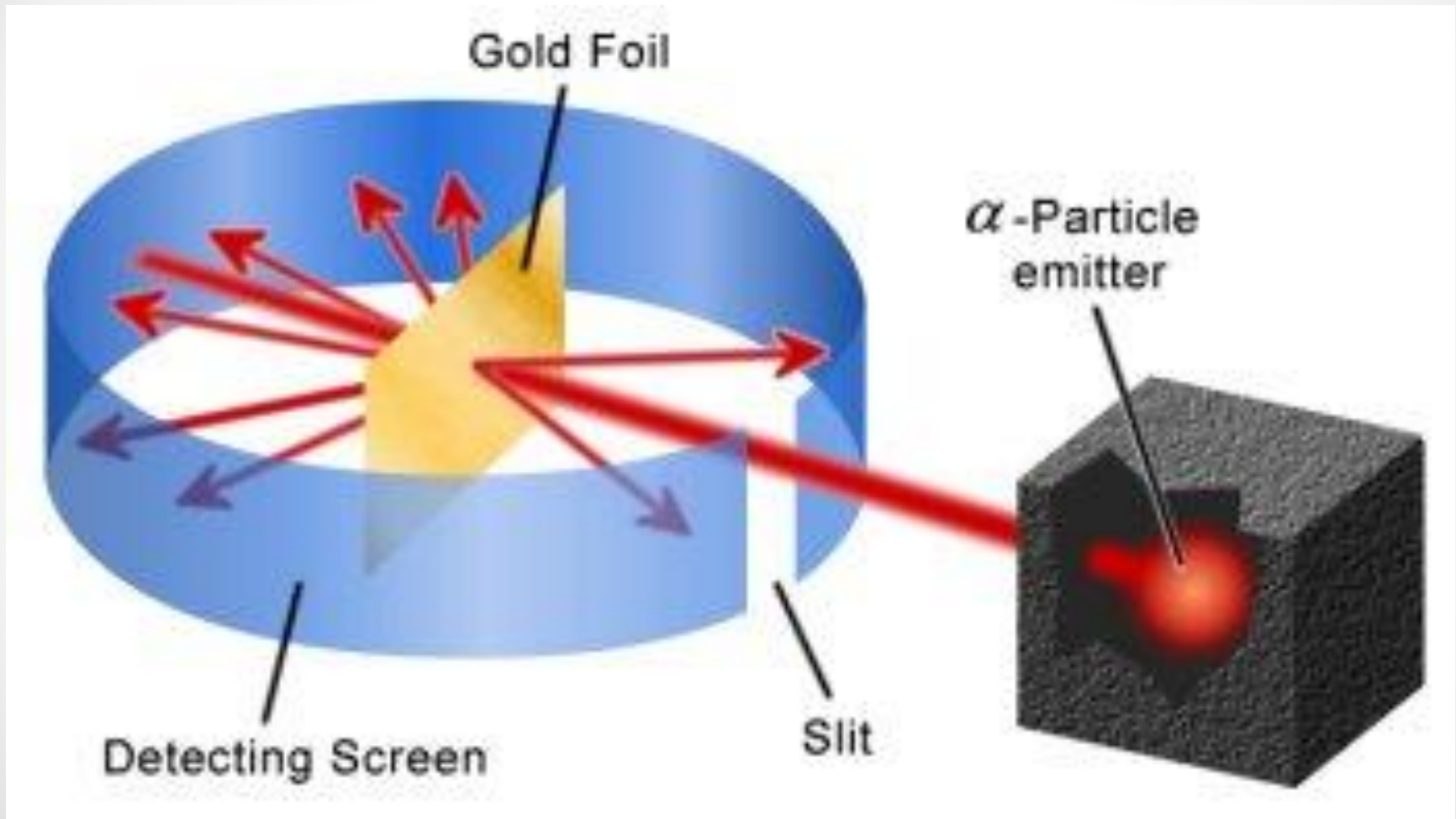
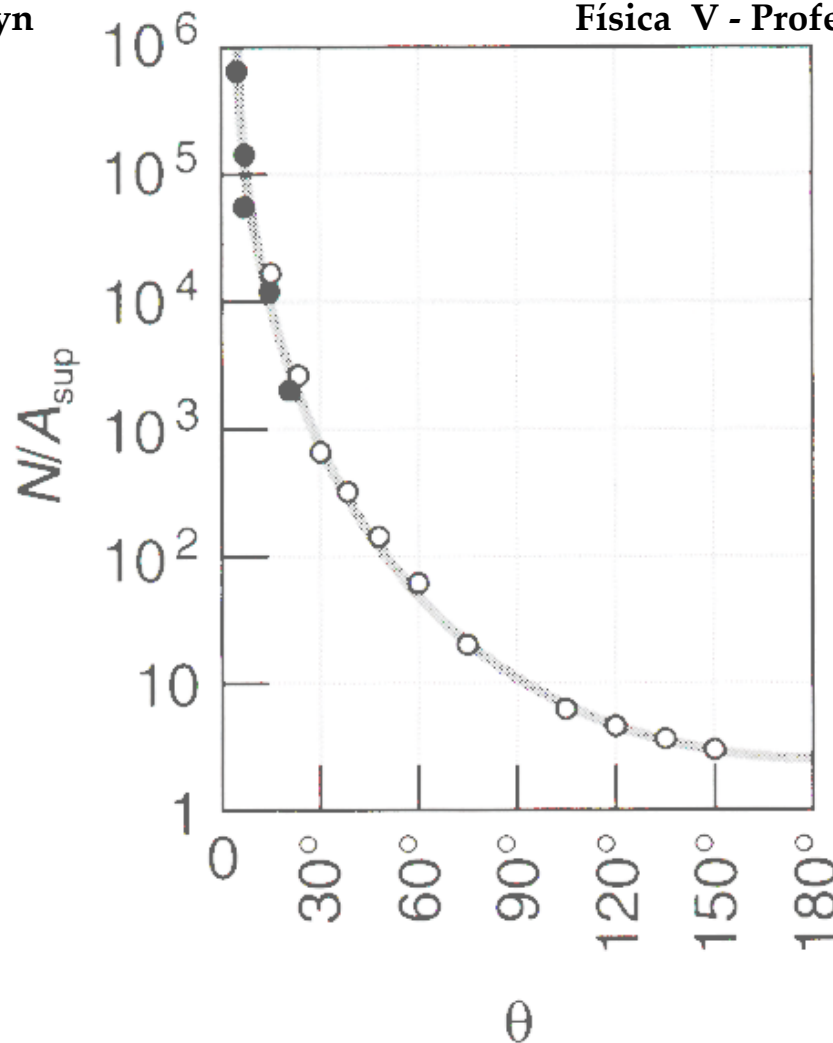


Figura esquemática do experimento de Rutherford – 1911 (cem anos atrás!)



O experimento de Geiger e Marsden (1908) no Laboratório dirigido por Rutherford

1. *Feixe de partículas alfa ($Z=2$, $m=4m_H$) com energia cinética E_{inc} incide sobre uma folha fina de algum material (alvo). Partículas alfa são espalhadas e contadas em um detector colocado em um ângulo θ (ângulo de espalhamento) com a direção do feixe incidente. De fato, pelas dimensões finitas de qualquer detector elas são observadas em torno de θ dentro de uma abertura $d\theta$.*
2. *Condições experimentais para os resultados relatados: folha fina e uniforme com os “átomos alvos”, feixe bem colimado, e detector colocado a uma distância do alvo que permita desprezar o tamanho do feixe no cálculo do ângulo sólido de espalhamento.*



RESULTADOS DO EXPERIMENTO PIONEIRO.

Os pontos, cheios e vazios, são resultados experimentais para folhas finas de dois elementos diferentes.

Fig. 4-11 Número de partículas α espalhadas por unidade de área em função do ângulo de espalhamento θ . A curva é proporcional à função $\text{sen}^{-4}(\theta/2)$; os pontos experimentais foram obtidos por Geiger e Marsden usando partículas α de 7,7 MeV. [Fonte: R. D. Evans, *The Atomic Nucleus*, McGraw-Hill, New York, 1955.]

Figura do Tipler & Llewellyn

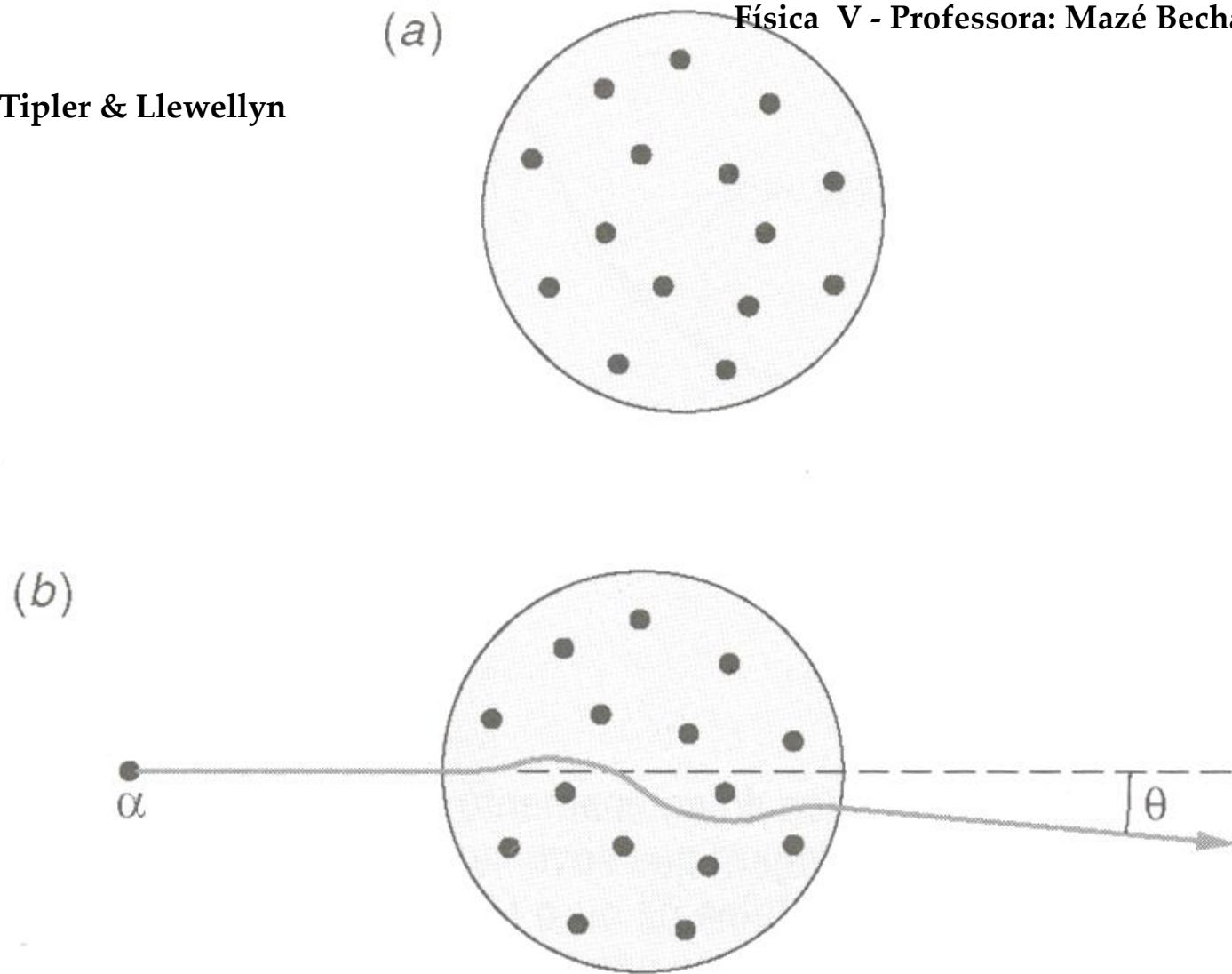


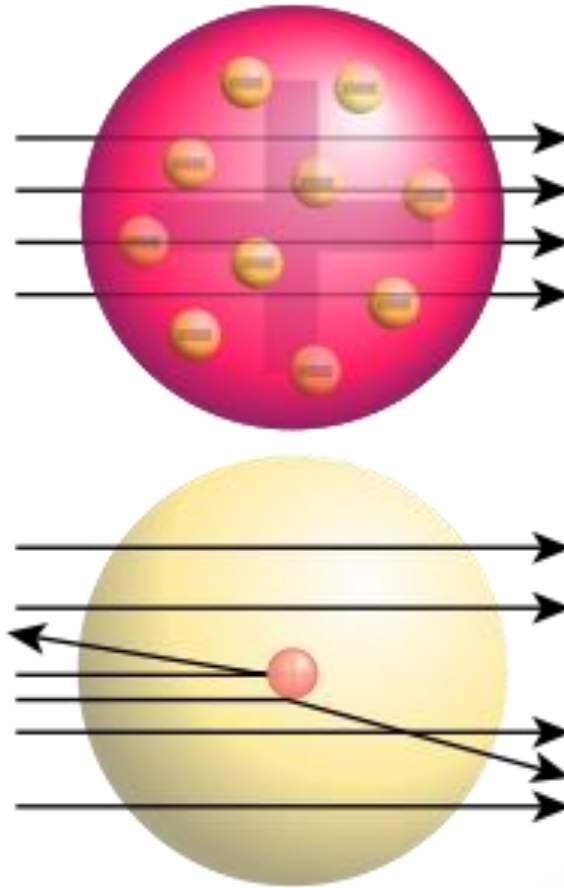
Fig. 4-3 O modelo de Thomson para o átomo. (a) Uma esfera de carga positiva com elétrons embebidos; a carga total é nula. O átomo que aparece na figura seria do elemento alumínio. (b) O desvio sofrido por uma partícula α ao se chocar com um átomo do tipo imaginado por Thomson seria muito menor que 1° .

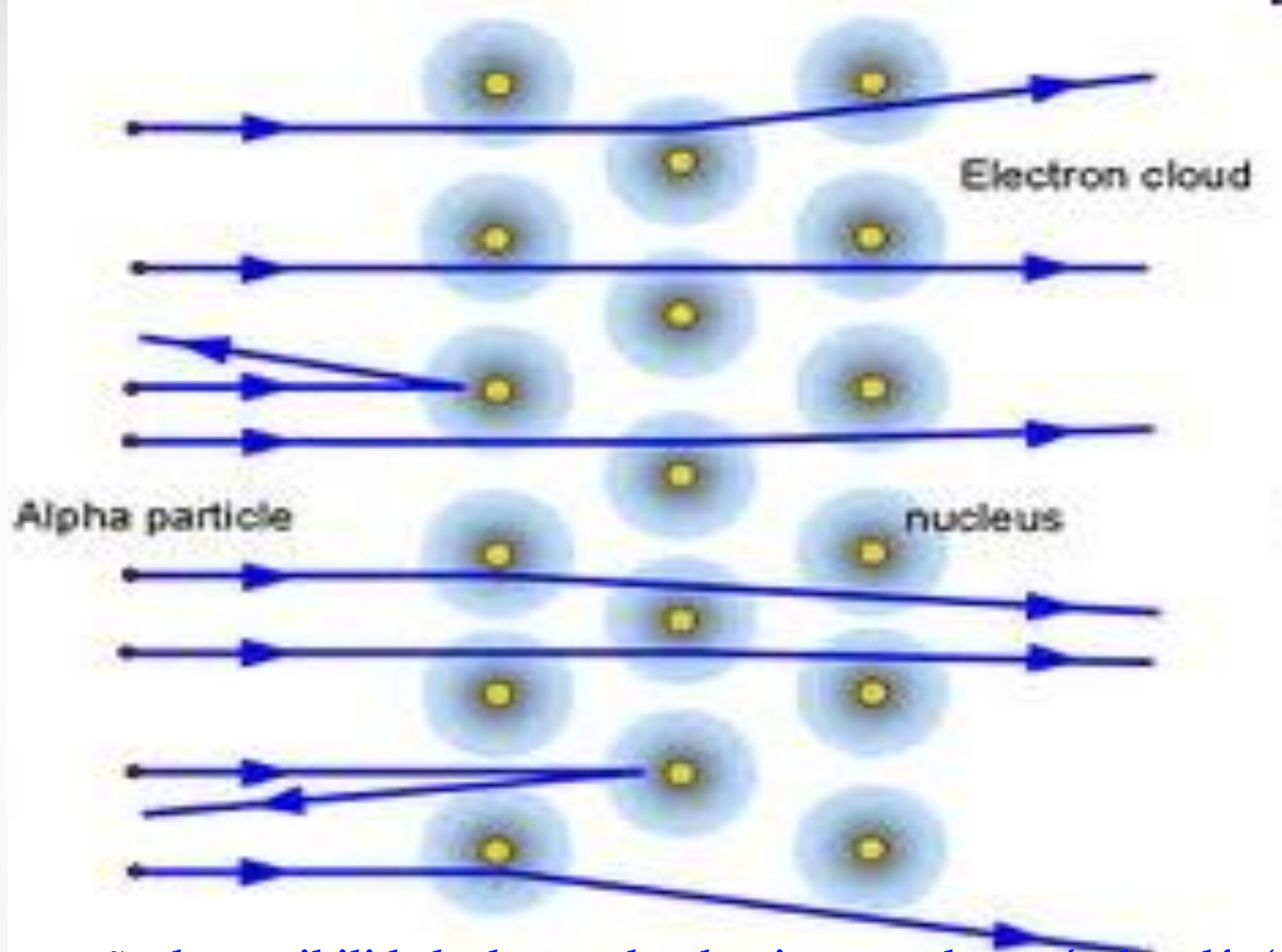
“ Foi praticamente o acontecimento mais inacreditável que aconteceu em minha vida. Era tão inacreditável como se você atirasse um projétil de 15 polegadas sobre um pedaço de papel de seda e ele voltasse e o atingisse”
Rutherford.

http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/2011/278/pdf_aberto/nucleoatomico278.pdf/at_download/file



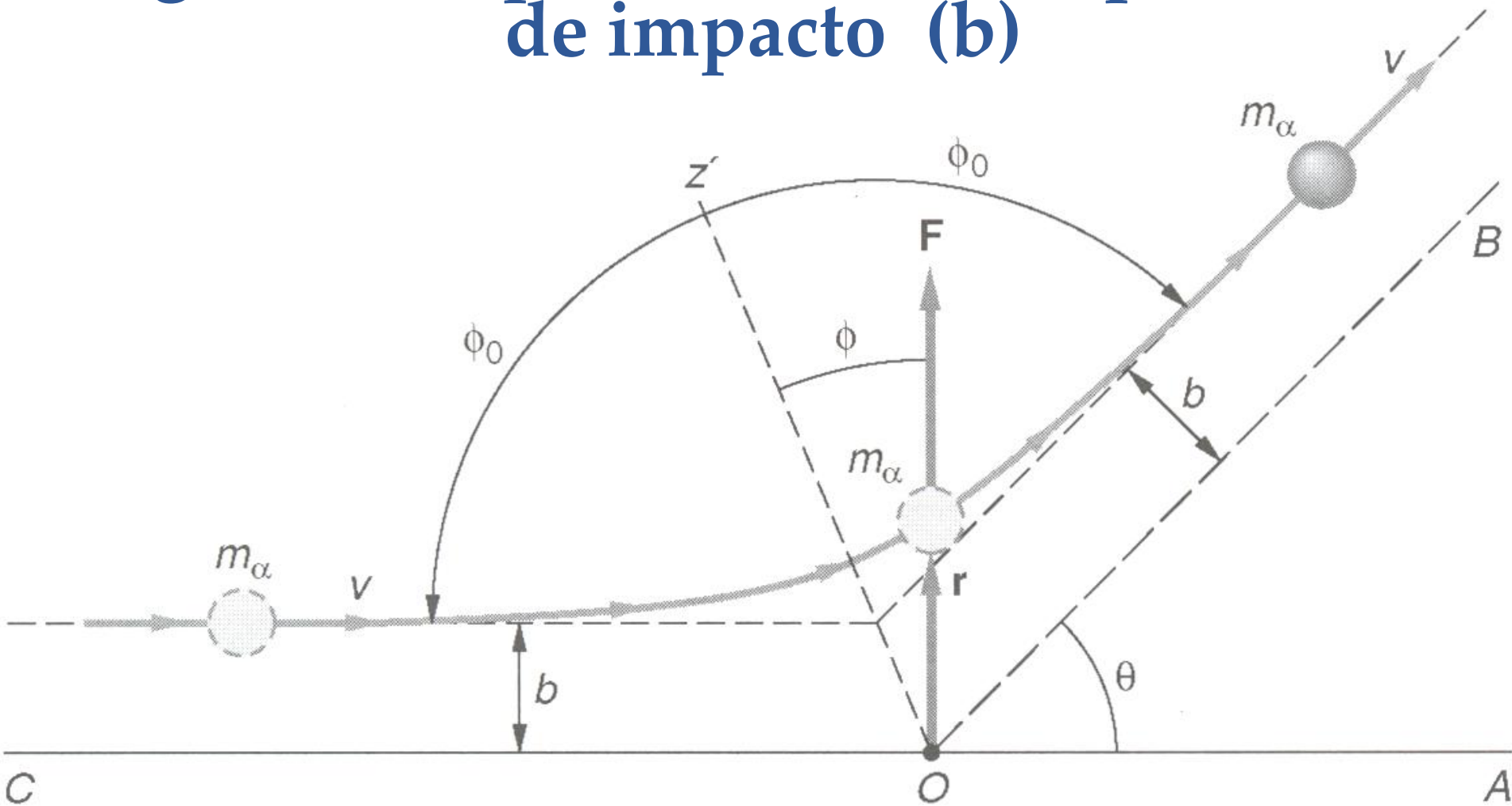
Esquema das partículas alfa (flechas) interagindo com um “átomo de Thomson” e com um “átomo de Rutherford” discussão qualitativa.





Uma ilustração da possibilidade de grandes desvios quando partículas alfa (flechas azuis) de carga $+2e$ interagem, cada uma com um núcleo atômico de carga $+Ze$ (pontos amarelos), por repulsão coulombiana. A interação atrativa com os elétrons (“nuvem” azul) é desprezível pela distribuição deles em torno do núcleo.

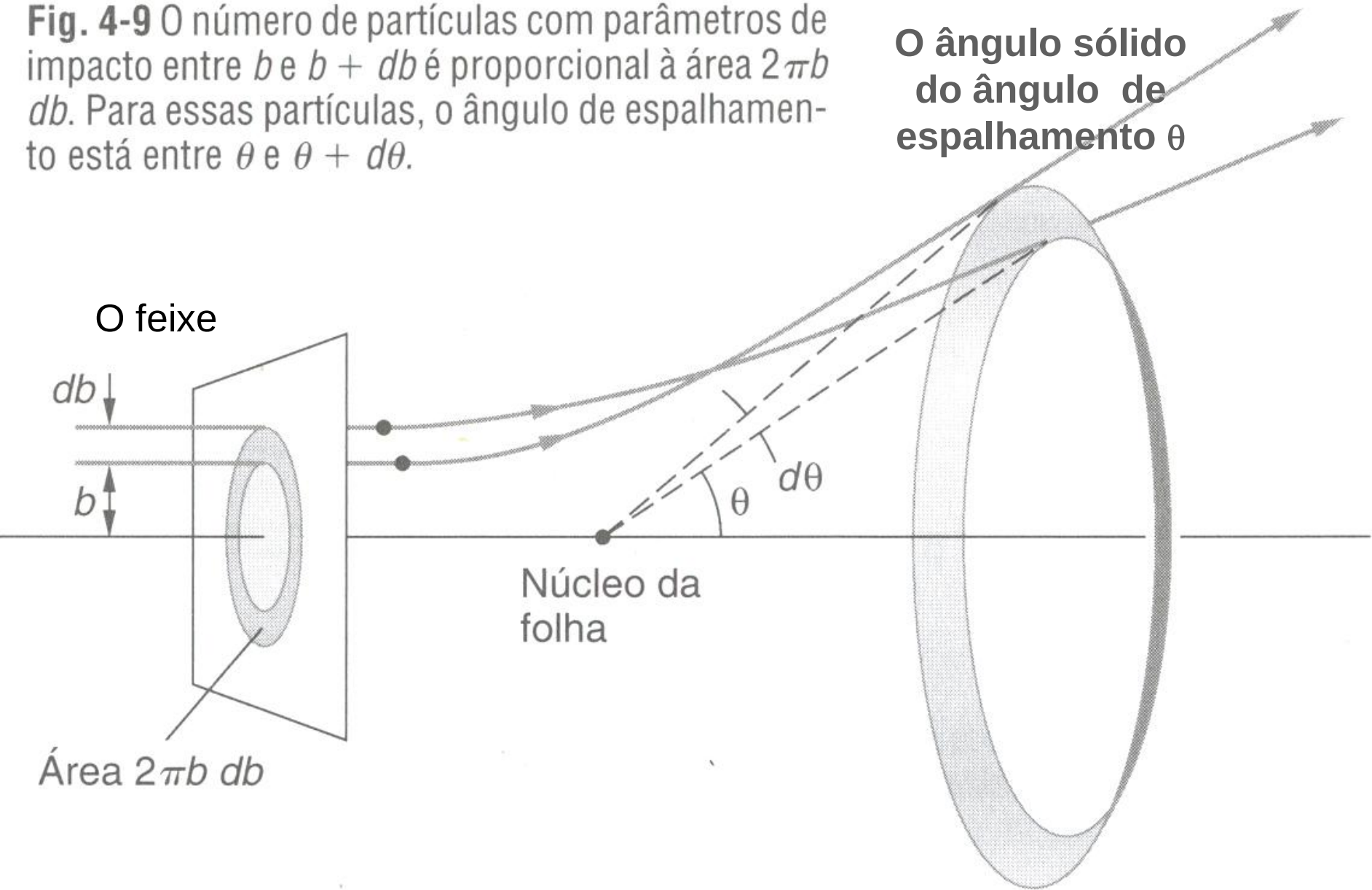
Conceituação: espalhamento elástico, ângulo de espalhamento (θ) e parâmetro de impacto (b)



Alguns conceitos

1. **Espalhamento elástico: a energia do sistema se conserva antes e depois do movimento.** Assim o espalhamento elástico só ocorre com interações conservativas. Como antes da interação a única energia é a cinética da partícula do feixe, depois da interação é a energia cinética da partícula espalhada.
2. **O ângulo de espalhamento θ** é o ângulo da direção do movimento da partícula incidente com a direção que ela saiu depois da interação. Pode variar de zero (não espalhamento) a 180 graus (colisão frontal).
3. **O parâmetro de impacto b** é a distância da linha que passa pela partícula incidente, na direção da sua velocidade incidente antes da interação com o alvo, com a linha paralela à esta que passa pela partícula que a espalhará (alvo).
4. Há uma **relação biunívoca** entre o **parâmetro de impacto** e o **ângulo de espalhamento**: menor parâmetro de impacto, maior o ângulo de espalhamento.
5. Se além de conservativa **a interação for central**, ou seja, dependente apenas da distância entre as duas partículas que interagem, e na linha que os une, **o momento angular do também é uma constante no movimento**

Fig. 4-9 O número de partículas com parâmetros de impacto entre b e $b + db$ é proporcional à área $2\pi b db$. Para essas partículas, o ângulo de espalhamento está entre θ e $\theta + d\theta$.



O número de partículas espalhadas no ângulo de espalhamento θ (dentro de $d\theta$) na unidade de tempo

1. É proporcional ao número de partículas incidentes do feixe na unidade de tempo.
2. É proporcional ao ângulo sólido a um certo ângulo de espalhamento θ dentro de $d\theta$.

Questão: Como saber o efeito da interação entre as partículas do feixe e os constituintes da folha que causou o espalhamento - independente das condições específicas do feixe, do detector?!

Resposta: Definindo a seção de choque diferencial para o espalhamento elástico.

O conceito de Secção de choque diferencial

- Definição: número de partículas espalhadas elasticamente no ângulo de espalhamento θ (entre θ e $\theta + d\theta$) por um único núcleo espalhador dN^{1N} , por fluxo de partículas incidentes I_o , na unidade de tempo dt e por ângulo sólido $d\Omega$:

$$\frac{d\sigma(\theta, \text{int})}{d\Omega} \equiv \sigma(\theta, \text{int}) = \frac{dN^{1N}(\theta, \text{int})}{dt I_o d\Omega}$$

I_o é o fluxo de partículas incidentes:

$$I_0 = \frac{dN_{inc}}{dA_{feixe} dt}$$

$d\Omega$ é o ângulo sólido total no ângulo de espalhamento θ

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = 2\pi \sin\theta d\theta$$

Faça uma análise dimensional na expressão e observe que a seção de choque diferencial tem unidade de área – daí o nome.

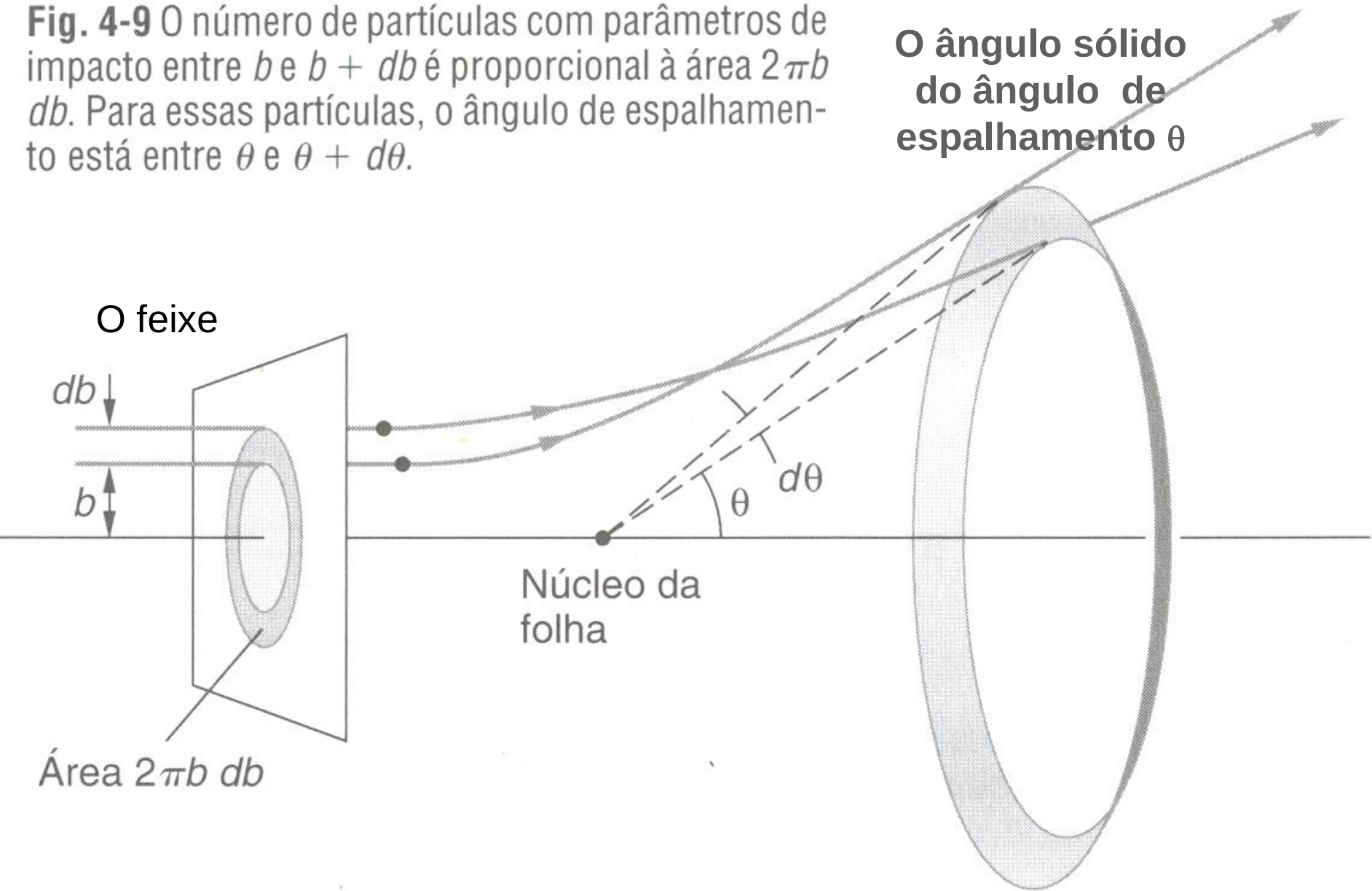
A secção de choque diferencial para espalhamento elástico com qualquer interação

$$\frac{dN_{inc}(b)}{dt} = \frac{dN^{1N}(\theta)}{dt} = I_o 2\pi b db$$

$$\frac{d\sigma(\theta, \text{int})}{d\Omega} = \frac{I_o 2\pi b db}{I_o d\Omega} = \pm \frac{2\pi b db}{2\pi \sin\theta d\theta} = \frac{1}{\sin\theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right|$$

Observe que a dinâmica da interação vai definir a relação entre o parâmetro de impacto e o ângulo de espalhamento

Fig. 4-9 O número de partículas com parâmetros de impacto entre b e $b + db$ é proporcional à área $2\pi b db$. Para essas partículas, o ângulo de espalhamento está entre θ e $\theta + d\theta$.



A secção de choque diferencial para espalhamento elástico com qualquer interação

$$\frac{dN_{inc}(b)}{dt} = \frac{dN^{1N}(\theta)}{dt} = I_0 2\pi b db$$

$$\frac{d\sigma(\theta, \text{int})}{d\Omega} = \frac{I_0 2\pi b db}{I_0 d\Omega} = \pm \frac{2\pi b db}{2\pi \sin\theta d\theta} = \frac{b}{\sin\theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right|$$

Observe que a dinâmica da interação vai definir a relação entre o parâmetro de impacto (que não se consegue observar) e o ângulo de espalhamento que se observa ao colocar lá um detector