

Instituto de Física
USP

Física V - Aula 19

Professora: Mazé Bechara

Aula 19 – Características dos átomos e o modelo atômico de Thomson.

Espalhamento de partículas - conceitos

1. **Características experimentais dos átomos dos elementos – um “guia” para os modelos atômicos.**
2. **O Modelo atômico (simplificado) de Thomson** – primeira tentativa de descrever as **interações atômicas como eletromagnética atrativa entre seus constituintes**. Os estados fundamentais do H e He. O um estado excitado (não fundamental) do H.
3. **Os Experimentos de Geiger e Marsden (1908):** espalhamento elástico de partículas alfa por folhas de ouro e outros elementos, e seus resultados experimentais conflitantes com o modelo atômico de Thomson.
4. A proposta de Rutherford (1911) para a interação com tais resultados – discussão qualitativa.
5. **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.

Espectros de absorção e emissão atômica – observações e interpretações

Átomos estáveis sempre absorvem algumas frequências (espectro de linhas).

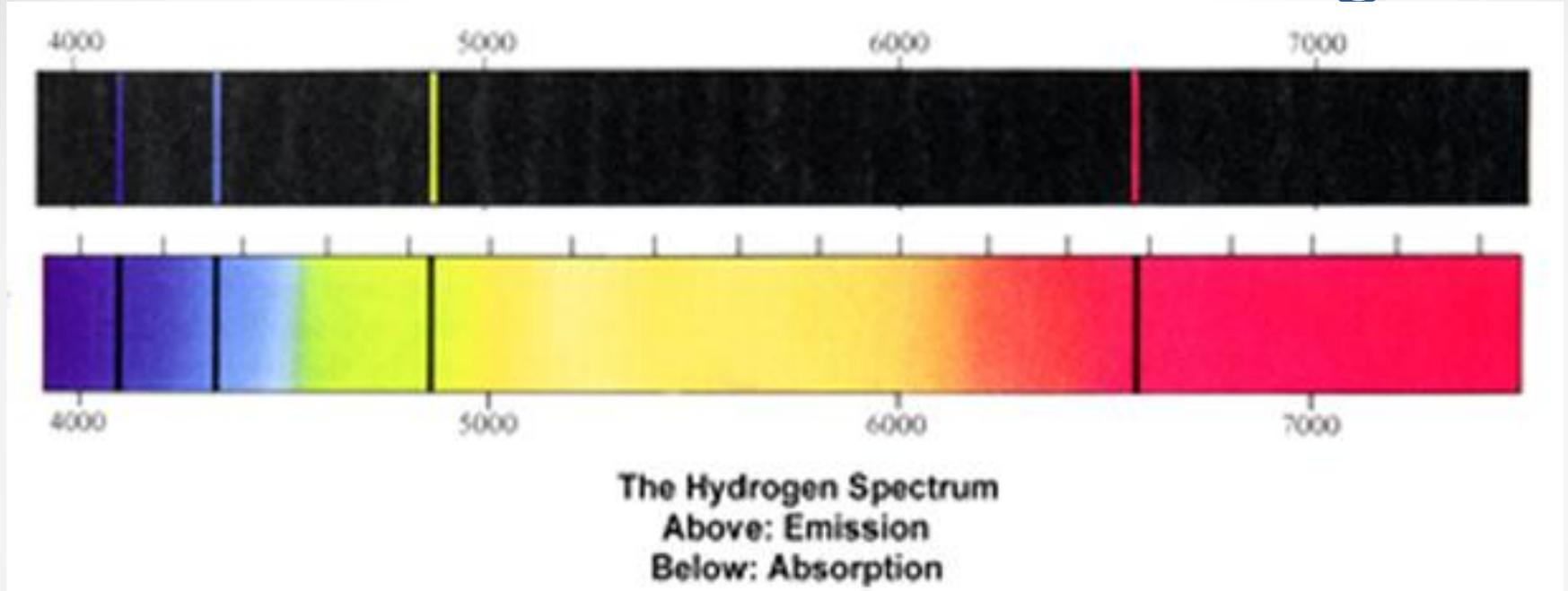
Átomos estáveis que não tenham recebido feixes de radiação eletromagnética ou energias cinéticas de partículas não emitem radiação eletromagnética.

Os átomos estáveis que receberam radiação eletromagnética, ou energia cinética de partículas, emitem espectros de linhas coincidentes com as linhas absorvidas no espectro de absorção.

Os espectros dos átomos mais leves mostram espectros de linhas mais simples do que os átomos mais pesados.

Os comprimentos de onda dos espectros de linhas do átomo de hidrogênio seguem uma relação matemática de série.

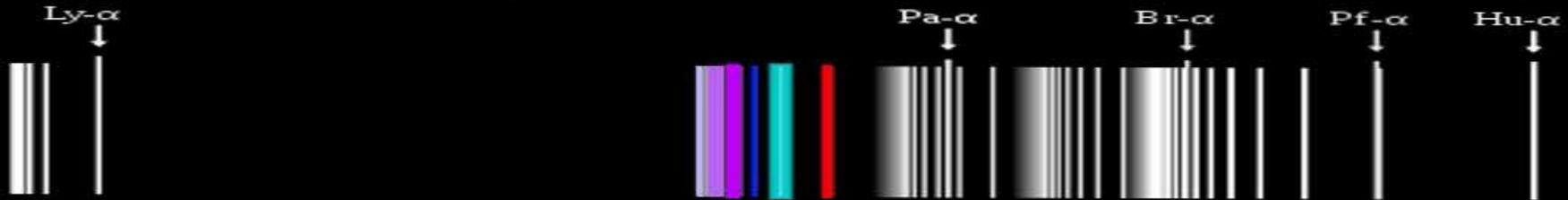
A série de Balmer (visível ao olho humano) do átomo de hidrogênio.



$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad n' = 3, 4, \dots$$

R_H = constante de Rydberg (para o hidrogênio) = $1,096776 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$

As várias séries de emissão do H.



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

$n=1$ – série de Lyman

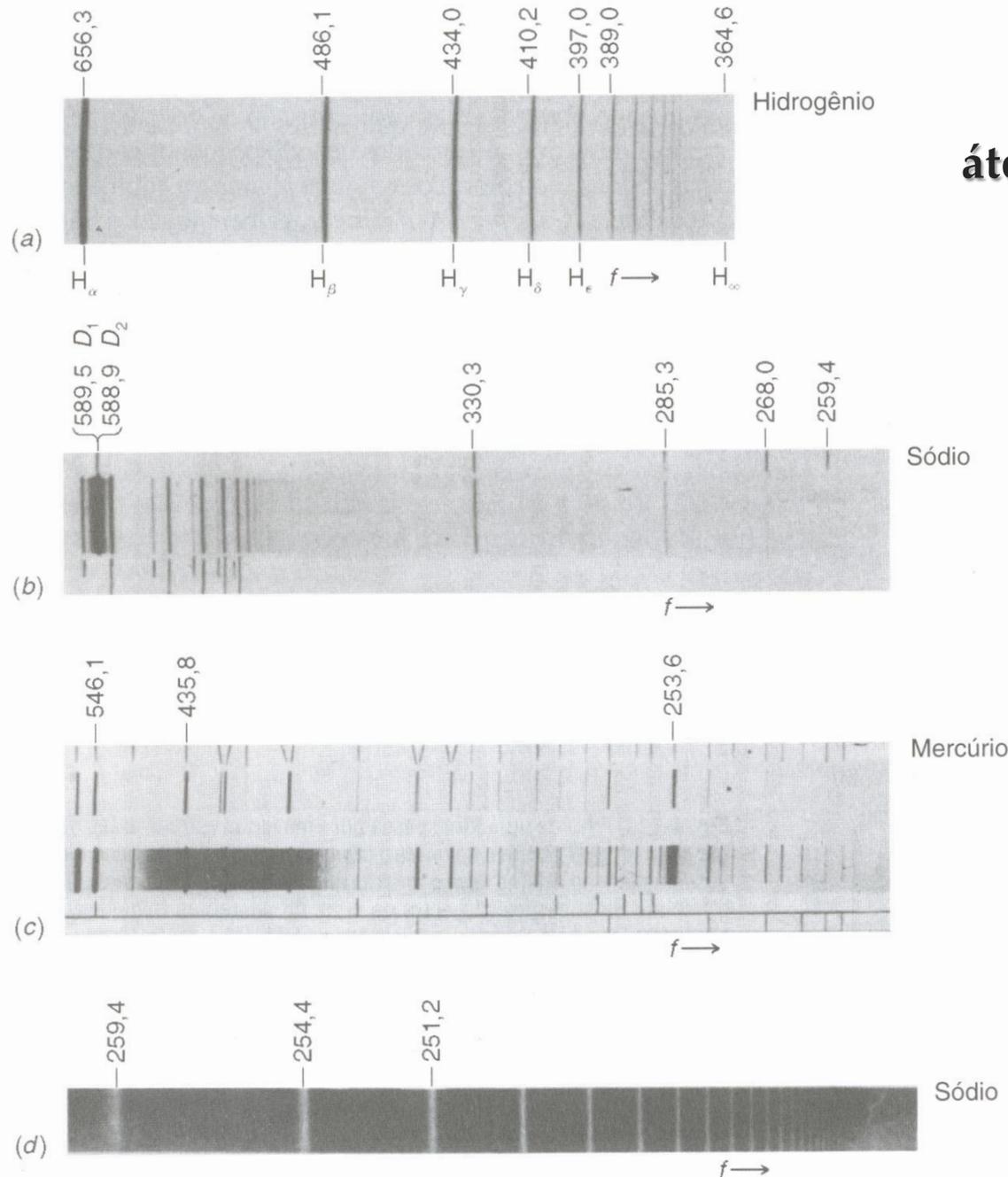
$n=2$ – série de Balmer (pioneira - visível)

$n=3$ – série de Paschen

$n=4$ – série de Pfund

R_H = constante de Rydberg (para o hidrogênio) = $1,096776 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$

Espectros de emissão de átomos – vapor de elementos



A linha amarela que o sódio (Na) emite é usada em lâmpadas. O espectro de emissão do sódio é relativamente simples comparado aos de outros elementos de massa próximas, não alcalinos.

Figura do Tipler & Llewellyn

Elementos – fatos experimentais

Um bom modelo deve descreve-los.

1. **Cada elemento tem um átomo diferente.** O que define o elemento é o número de cargas positivas = cargas negativas que ele tem. Este é o número atômico Z . Os isótopos de um elemento são os que tem massas A diferentes nos seus núcleos. Esta diferença vem da massa das partículas sem carga que há no núcleo – os neutrons.

Exemplo e nomenclatura: ^{12}C , ^{13}C – ambos são carbono porque têm $Z=6$, ou seja 6 cargas negativas (elétrons) e 6 cargas positivas (prótons). Mas o ^{12}C tem $A=12$, que é a massa do seu núcleo: 6 prótons + 6 neutrons. O ^{13}C tem um neutron a mais.

2. O átomo mais leve é o de Hidrogênio que tem massa de 1,008665 uam (unidade atômica de massa). $1\text{uam} = 1.660538921(73) \times 10^{-27}$. **O Carbono 12 é definido como tendo exatos 12 uam, ou seja, 1uam é definida a partir do carbono.**

3. O elemento estável natural mais pesado é o Plutônio 244 (meia vida de ~10.000.000 anos).

4. Os raios dos átomos não mudam muito. Hoje se sabe (mede-se) que o raio do H é de aproximadamente 0,5 angstroms, e o do plutonio da ordem de 3,5 angstroms.

Elementos – fatos experimentais

Tabela Periódica dos Elementos

<p>1 IA Novo Original 2 IIA</p> <p>13 IIIA 14 IVA 15 VA 16 VIA 17 VIIA 18 VIIIA</p>																	
1 H Hidrogênio 1.00784																	2 He Hélio 4.002602
3 Li Lítio 6.941	4 Be Berílio 9.012182											5 B Boro 10.811	6 C Carbono 12.0107	7 N Nitrogênio 14.00674	8 O Oxigênio 15.9994	9 F Flúor 18.9984032	10 Ne Neônio 20.1797
11 Na Sódio 22.989770	12 Mg Magnésio 24.3050	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al Alumínio 26.981538	14 Si Silício 28.0855	15 P Fósforo 30.973761	16 S Enxofre 32.066	17 Cl Cloro 35.453	18 Ar Argônio 39.948
19 K Potássio 39.0983	20 Ca Cálcio 40.078	21 Sc Escândio 44.955910	22 Ti Titânio 47.887	23 V Vanádio 50.9415	24 Cr Cromo 51.9961	25 Mn Manganês 54.938049	26 Fe Ferro 55.8457	27 Co Cobalto 58.933200	28 Ni Níquel 58.6934	29 Cu Cobre 63.546	30 Zn Zinco 65.409	31 Ga Gálio 69.723	32 Ge Germânio 72.64	33 As Arsênio 74.92160	34 Se Selênio 78.96	35 Br Bromo 79.904	36 Kr Criptônio 83.798
37 Rb Rubídio 85.4678	38 Sr Estrôncio 87.62	39 Y Ítrio 88.90585	40 Zr Zircônio 91.224	41 Nb Nióbio 92.90638	42 Mo Molibdênio 95.94	43 Tc Tecnécio (98)	44 Ru Rutênio 101.07	45 Rh Ródio 102.90550	46 Pd Paládio 106.42	47 Ag Prata 107.8682	48 Cd Cádmio 112.411	49 In Índio 114.818	50 Sn Estanho 118.710	51 Sb Antimônio 121.760	52 Te Telúrio 127.60	53 I Iodo 126.90447	54 Xe Xenônio 131.293
55 Cs Césio 132.90545	56 Ba Bário 137.327	57 to 71	72 Hf Háfnio 178.49	73 Ta Tântalo 180.9479	74 W Tungstênio 183.84	75 Re Rênio 186.207	76 Os Ósmio 190.23	77 Ir Íridio 192.217	78 Pt Platina 195.078	79 Au Ouro 196.96655	80 Hg Mercúrio 200.59	81 Tl Tálio 204.3833	82 Pb Chumbo 207.2	83 Bi Bismuto 208.98038	84 Po Polônio (209)	85 At Astato (210)	86 Rn Radônio (222)
87 Fr Frâncio (223)	88 Ra Rádio (226)	89 to 103	104 Rf Rúterfórdio (261)	105 Db Dúbnio (262)	106 Sg Seabórgio (266)	107 Bh Bóhrio (264)	108 Hs Hásio (269)	109 Mt Meitnério (268)	110 Ds Darmstádio (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Uub Ununbium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquátium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuh Ununhexium (292)	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium

- Metais alcalinos
- Metais alcalinos-terrosos
- Metais de transição
- Lantanídeos
- Actinídeos
- Outros metais
- Não-Metais
- Gases nobres
- Sólidos
- Líquidos
- Gases
- Sintético

Massas atômicas em parênteses são aquelas do isótopo mais estável ou comum.

Direitos autorais de design © 1997 Michael Davah (michael@davah.com) http://www.davah.com/periodic/

Nota: Os números de subgrupo 1-18 foram adotados em 1984 pela International Union of Pure and Applied Chemistry (União Internacional de Química Pura e Aplicada). Os nomes dos elementos 112-118 são os equivalentes latinos desses números.

57 La Lantânio 138.9055	58 Ce Cério 140.116	59 Pr Praseodímio 140.90765	60 Nd Neodímio 144.24	61 Pm Promécio (145)	62 Sm Samário 150.36	63 Eu Európio 151.964	64 Gd Gadolínio 157.25	65 Tb Térbio 158.92534	66 Dy Dísprosio 162.500	67 Ho Hólmio 164.93032	68 Er Érbio 167.259	69 Tm Túlio 168.93421	70 Yb Ítrio 173.04	71 Lu Lutécio 174.967
89 Ac Actínio (227)	90 Th Tório 232.0381	91 Pa Protactínio 231.03688	92 U Urânio 238.02891	93 Np Netúnio (237)	94 Pu Plutônio (244)	95 Am Americo (243)	96 Cm Cúrio (247)	97 Bk Berquélio (247)	98 Cf Califórnio (251)	99 Es Einsteinio (252)	100 Fm Férmio (257)	101 Md Mendelevio (258)	102 No Nobelio (259)	103 Lr Lawrêncio (262)

Evidências experimentais da estrutura atômica

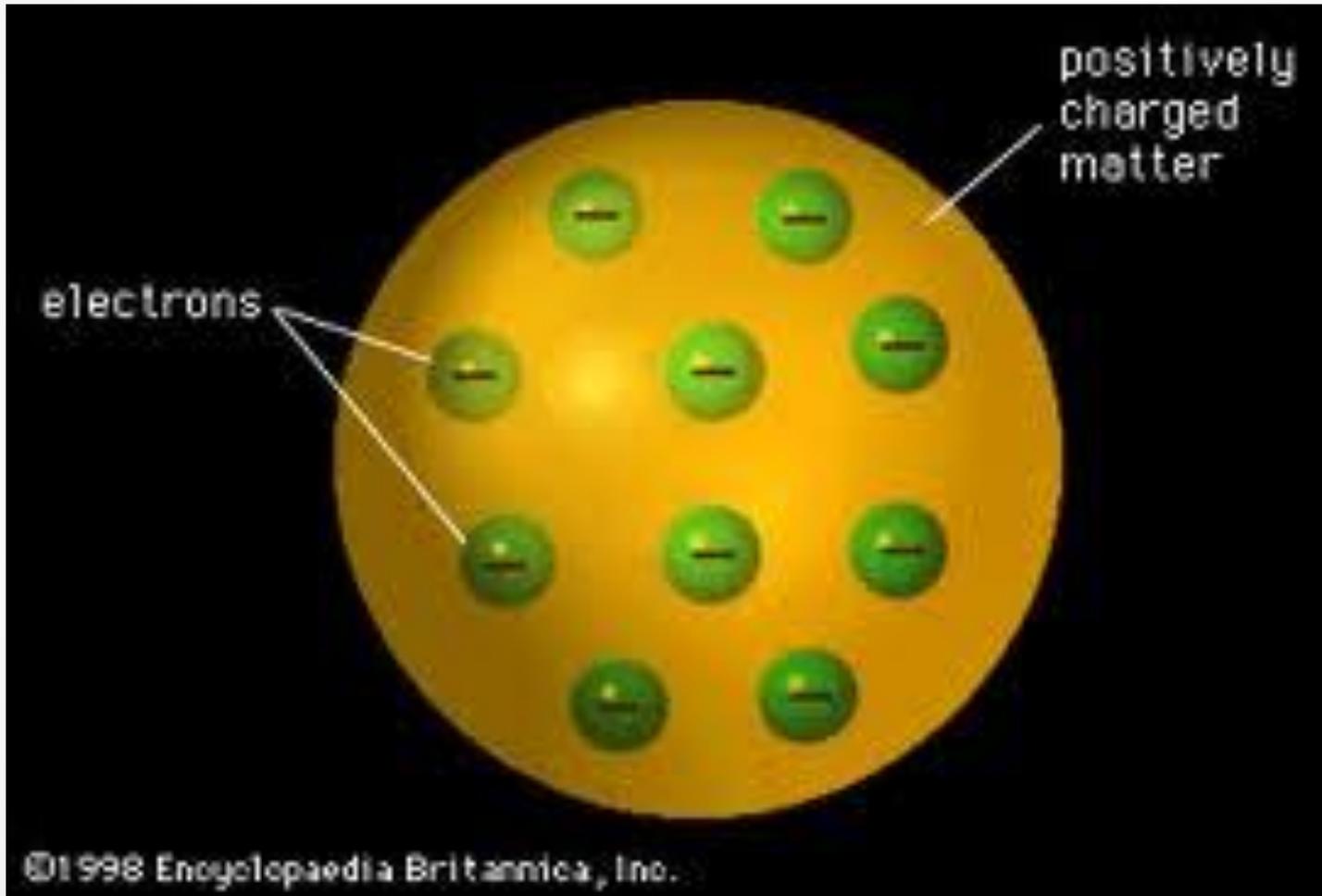
Átomos com as mesmas propriedades físico/químicas têm similaridades em seus espectros de emissão/absorção atômica, indicando relação entre estrutura atômica e propriedades físico-químicas. Estão na mesma coluna vertical na tabela periódica

Os elementos da primeira coluna vertical da tabela periódica contém o hidrogênio (H), o lítio (Li), sódio (Na), potássio (K) que são os chamados de alcalinos. Os espectros de emissão e de absorção destes elementos são “similares”, e são os mais simples. **São chamados de “átomos de um elétron”, por razões que ficarão mais claro mais adiante.**

Uma versão do "modelo de Thomson" para o átomo - a interação e a conceituação dos "estados atômicos".

1. **Hipótese 1:** Os átomos têm a maior parte de sua massa fluida com carga positiva distribuída uniformemente na esfera de raio atômico R com elétrons distribuídos neste fluido. **A força que mantém a estrutura atômica, não é nova força da Natureza, são as forças entre as cargas do átomo.**
2. **Hipótese 2:** No estado de mais baixa energia, ou estado fundamental, os elétrons estão distribuídos de forma a que cada um deles tenha força total nula de sua interação eletrostática atrativa com a carga positiva e repulsiva com os demais elétrons, e portanto todo estão parados, no havendo **emissão de radiação eletromagnética pelos átomos neste estado.**
3. **Hipótese 3:** Quando um ou mais elétrons dos átomos recebem energia podem sair de suas posições de equilíbrio **executando movimentos harmônicos com certas frequências. São os estados excitados. Dedução em aula para o átomo de H.**
4. **Hipótese 4.** Os **estados excitados são instáveis** porque necessariamente **emitem REM** com mesma frequência que oscilam, voltando para a posição de equilíbrio. Os responsáveis pelas linhas de emissão dos átomos são os estados excitados.

“Modelo de Thomson” (versao última e adaptada) para o átomo – tentando explicar os espectros atômicos



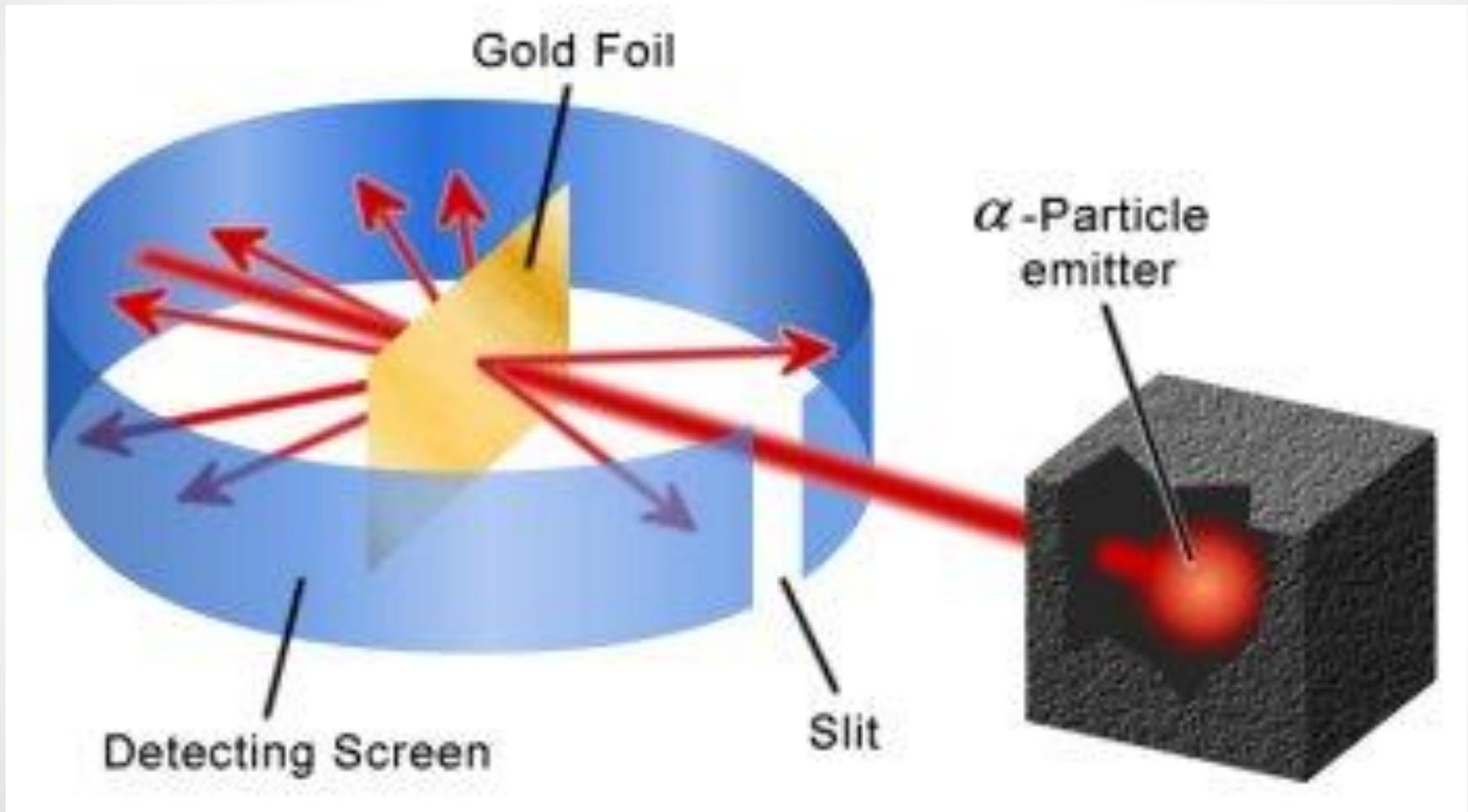
Iniciando pelos átomos mais simples... Discussão e cálculos em sala de aula.

1. Os estados fundamentais do átomo de hidrogênio (H) e no de hélio (He).
2. Um estado excitado do H que pode emitir radiação de frequência bem definida.

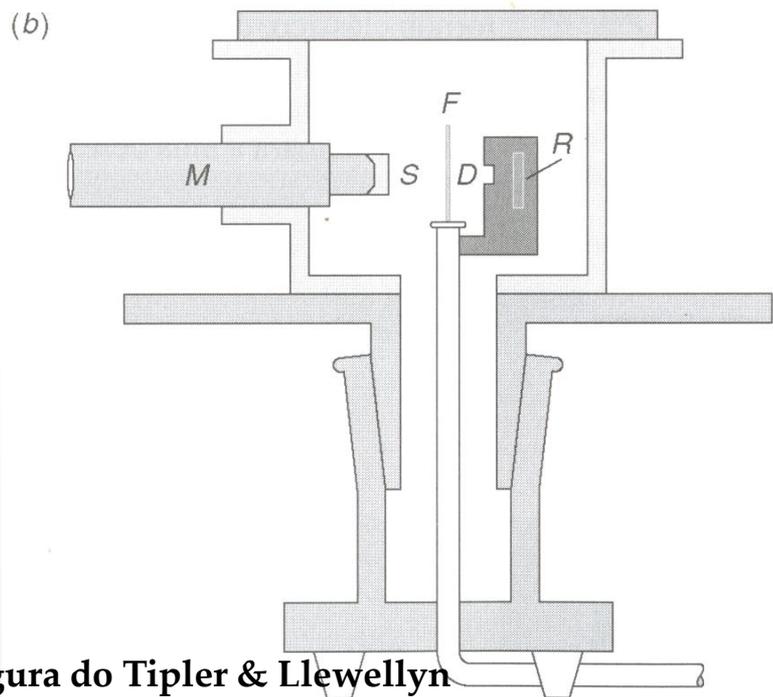
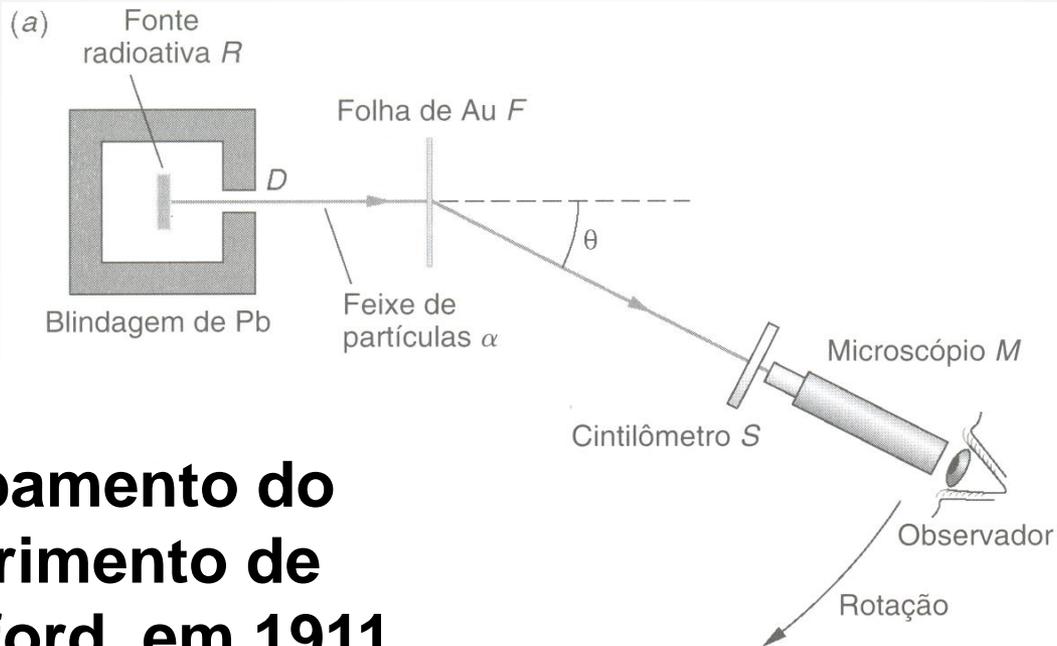
Geiger (à esquerda) e Rutherford (à esquerda) no Laboratório de Manchester



Representação esquemática do experimento de Rutherford (1911)

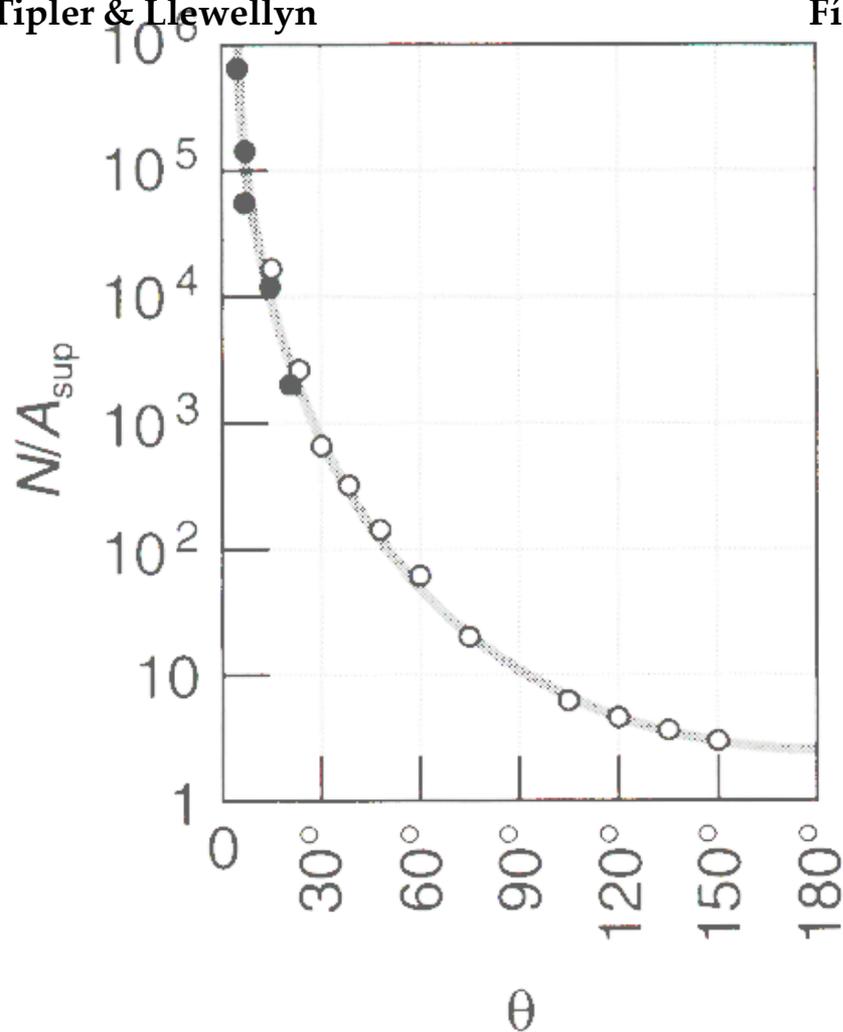


Equipamento do experimento de Rutherford em 1911



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

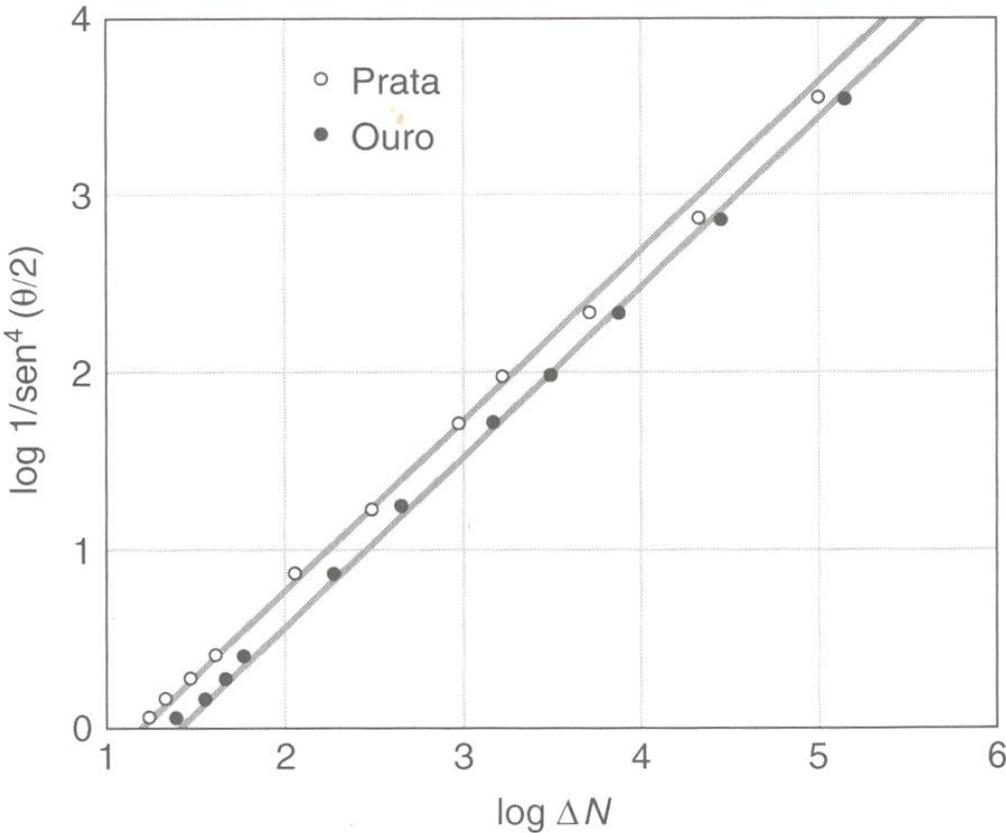
- 1. Feixe de partículas alfa ($Z=2$, $m_{\alpha}=4$) de uma fonte radioativa com energia cinética E_{inc} conhecida incidindo sobre uma folha fina de algum material (alvo), primeiramente ouro. As partículas alfa espalhadas são contadas em um detector colocado em um ângulo θ (ângulo de espalhamento) 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, feixes bem colimados, e detectores colocados a uma distância do alvo que permita desprezar o tamanho do feixe no cálculo do ângulo sólido de espalhamento.**



OS 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.]



Acima: Em escala log: contagem (em algum intervalo de tempo) versus o inverso de $\text{sen}^4(\theta/2)$ equivalente ao gráfico anterior

Resultados publicados em 1913 por Geiger e Marsden no *Philosophical Magazine* (6), 25, 604.

Abaixo: contagem por minuto versus a espessura da folha

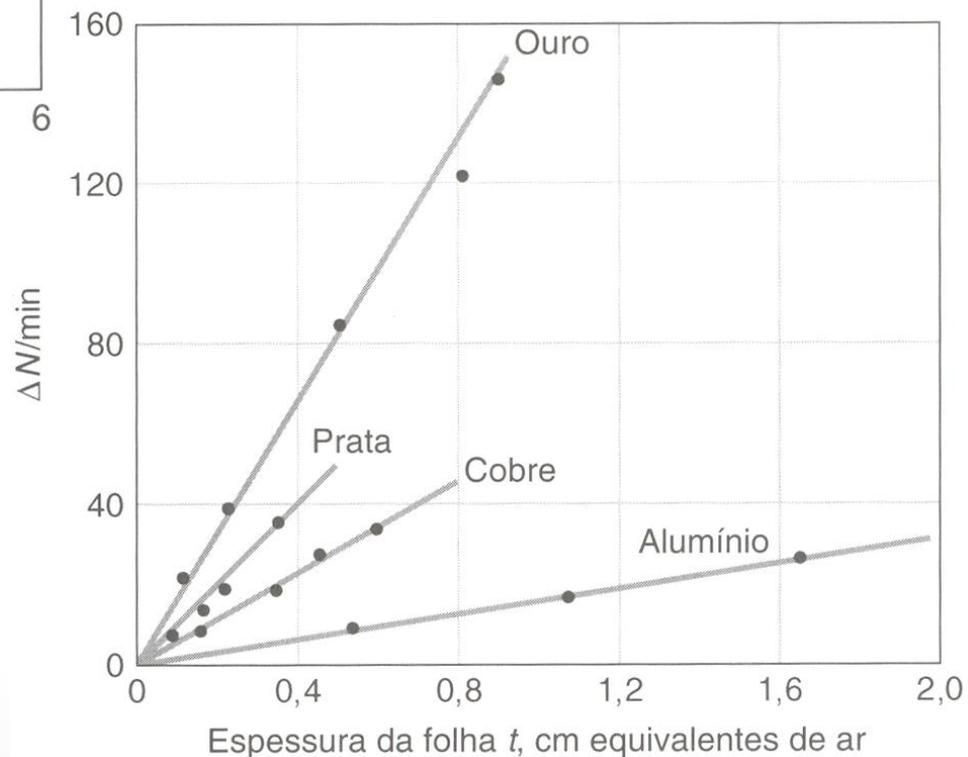
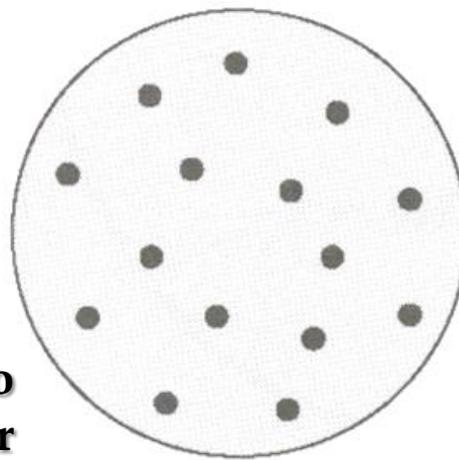


Figura do Tipler & Llewellyn

Figura do Tipler & Llewellyn

(a)



Resultado do cálculo do espalhamento de uma alfa por um átomo de Thomson: desvio máximo: $\theta \sim 1^\circ$ (veja o cálculo no livro de Eisberg-Renick).

(b)

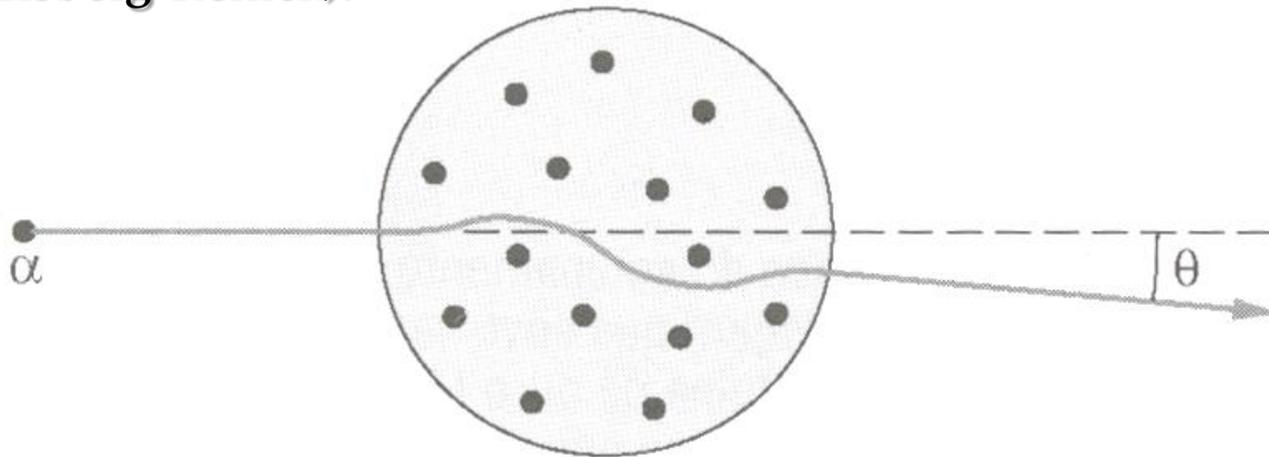


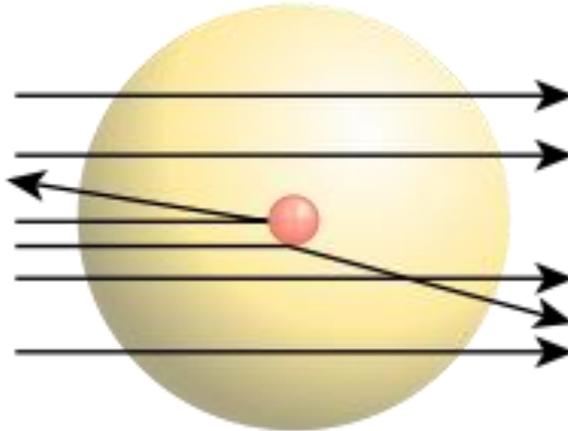
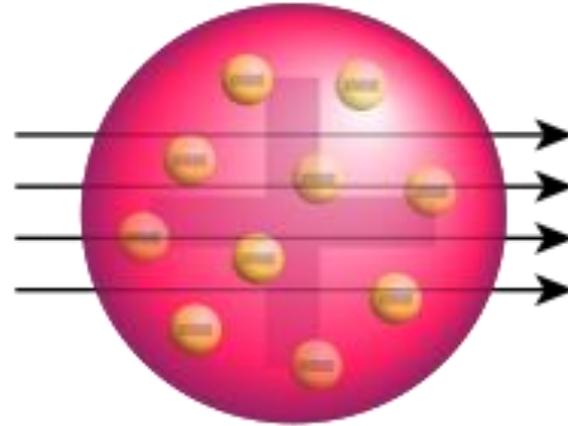
Fig. 4-3 O modelo de Thomson para o átomo. (a) Uma esfera de carga positiva com elétrons embebidos; a carga total é nula. O átomo que aparece na figura seria do elemento alumínio. (b) O desvio sofrido por uma partícula α ao se chocar com um átomo do tipo imaginado por Thomson seria muito menor que 1°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

“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.

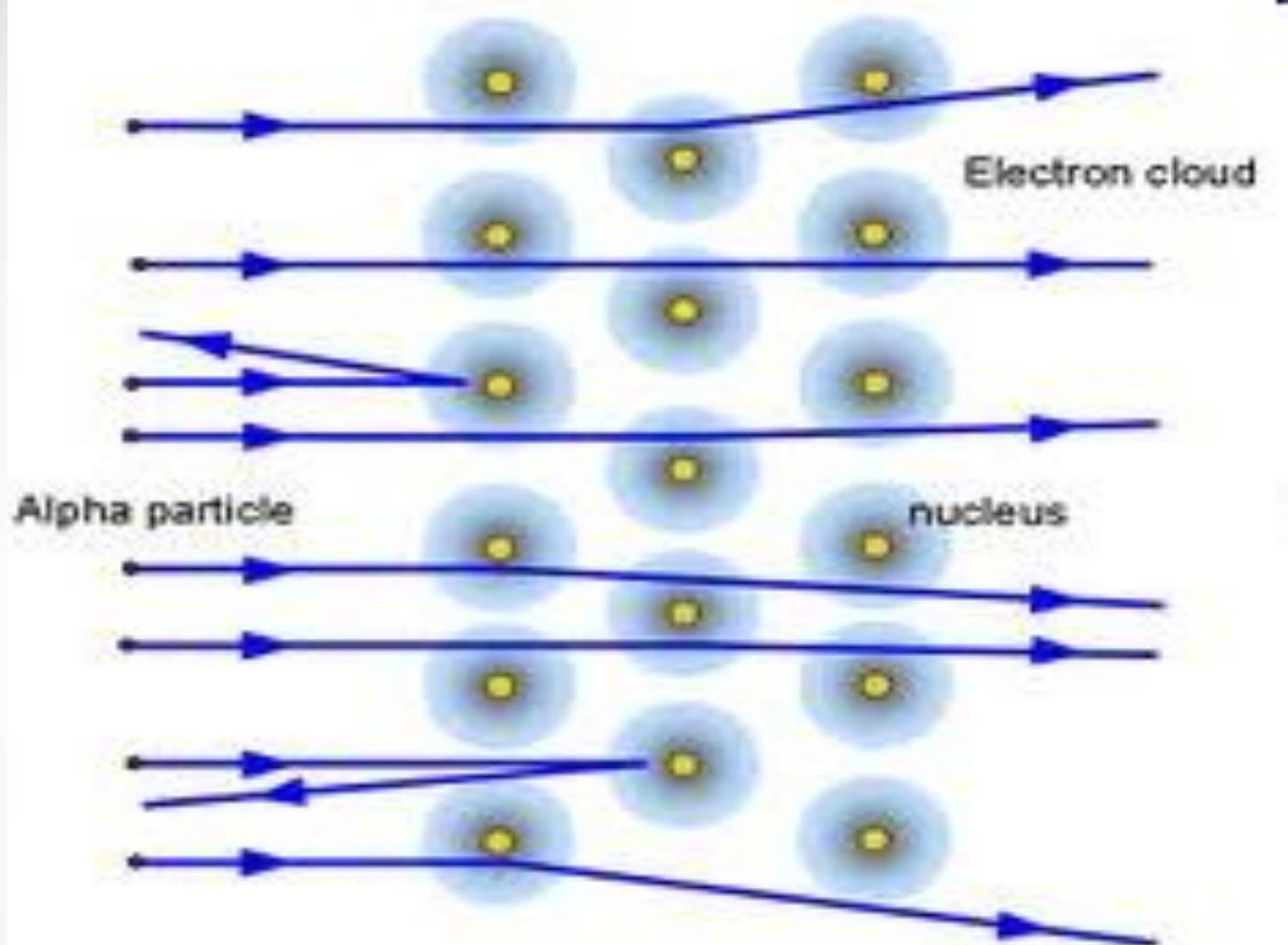
http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/2011/278/pdf_aberto/nucleoatomico278.pdf/at_download/file



Esquema das partículas alfa (flechas) **colidindo** (idéia clássica) com um “átomo de Thomson” e com um “átomo de Rutherford”



Só um átomo com núcleo de dimensão muito menor do que o átomo, que carregue todas as cargas $+Ze$ pode ter o efeito repulsivo importante para “jogar” a partícula alfa com carga $+2e$ tão para trás.



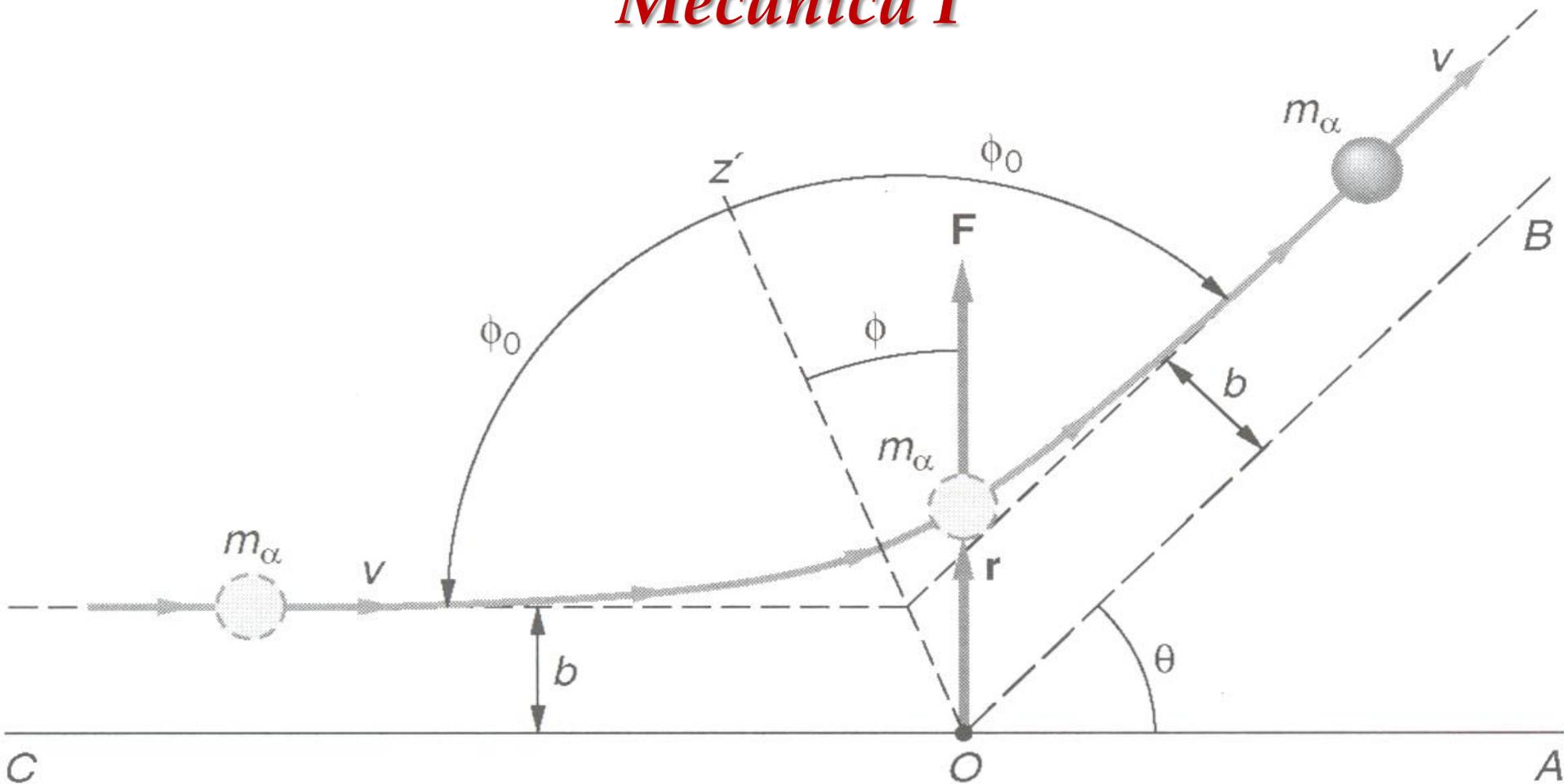
Uma ilustração da possibilidade de grandes desvios quando **partículas alfa** (flechas azuis) de carga $+2e$ **interagem**, cada uma com um único núcleo atômico de carga $+Ze$ (pontos amarelos), por repulsão coulombiana. A interação atrativa com os elétrons (“nuvem” azul) é desprezível comparada com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

Hipóteses sobre o processo de espalhamento

- 1. Cada "partícula" do feixe vai interagir com um único "alvo" da folha!** Isto é possível dado que a matéria tem muitos espaços vazios, e os alvos são os átomos. Mas é preciso também que a folha seja fina.
- 2. Se for possível determinar quantas partículas do feixe são espalhadas por um átomo, o número total das partículas que entram no detector seria proporcional ao número de átomos espalhadores.** Para isto é preciso que a distribuição de "alvos" seja homogênea, ou seja, as folhas devem ser homogêneas além de finas.

Conceituação: espalhamento elástico, ângulo de espalhamento (θ) e parâmetro de impacto (b) e grandezas que se conservam

Mecânica I



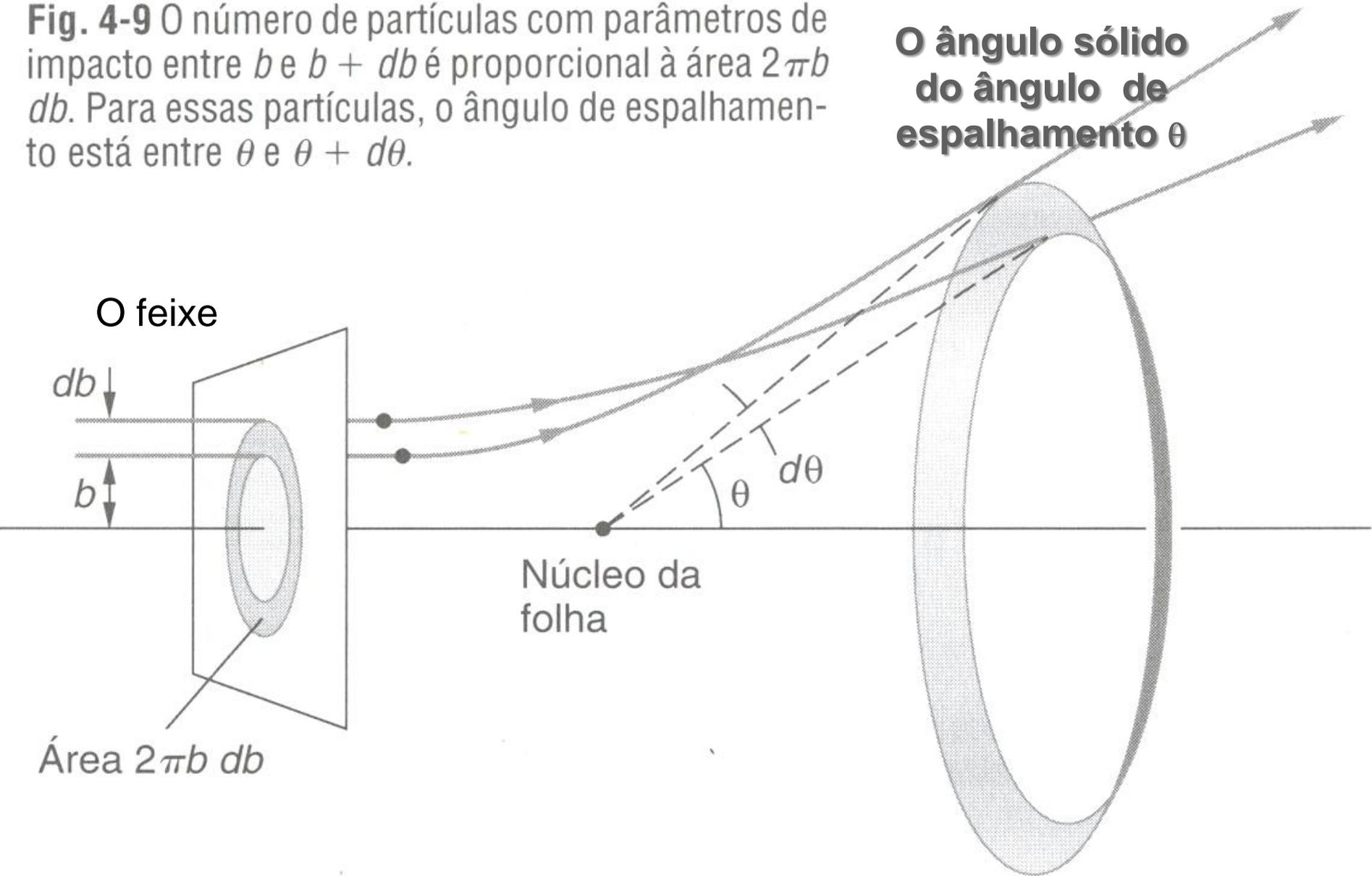
Alguns conceitos

- 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. O que é uma aproximação para o caso de carga acelerada na interação com outra carga, que só cabe para quando tal perda de energia é pequena e pode ser ignorada!**
- 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 (uma assíntota da trajetória), com a linha paralela à esta que passa pela partícula que a espalhará (alvo) – a outra assíntota. Relacionada com o momento angular do movimento relativo das partículas.**

Alguns conceitos

5. Há uma **relação biunívoca** entre o **parâmetro de impacto** e o **ângulo de espalhamento**: menor parâmetro de impacto, maior o ângulo de espalhamento no caso de espalhamento repulsivo.
6. 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 movimento relativo 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 fluxo de partículas incidentes: número de partículas incidentes do feixe na unidade de tempo, com parâmetro de impacto entre b e $b+db$, por unidade de área.
2. Depende do número de partículas espalhadoras.
3. É proporcional ao ângulo sólido a um certo ângulo de espalhamento θ dentro de $d\theta$.
4. Para feixe homogêneo, o fluxo de partículas incidentes é constante:

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

O número de partículas espalhadas no ângulo de espalhamento θ (dentro de $d\theta$) por 1 alvo

5. As partículas que entram entre b e $b+db$, estão na área $2\pi bdb$. Assim, o número de espalhadas no ângulo entre θ e $\theta+d\theta$ é dado pela relação:

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

6. Por N alvos:

$$\frac{dN^{NAlvos}(\theta)}{dt} = N \frac{dN^{1Alvo}(\theta)}{dt}$$

se a folha for fina e homogênea .

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, da folha de "alvos" e do detector?!

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