
Física Moderna II

Aula 06

Marcelo G. Munhoz

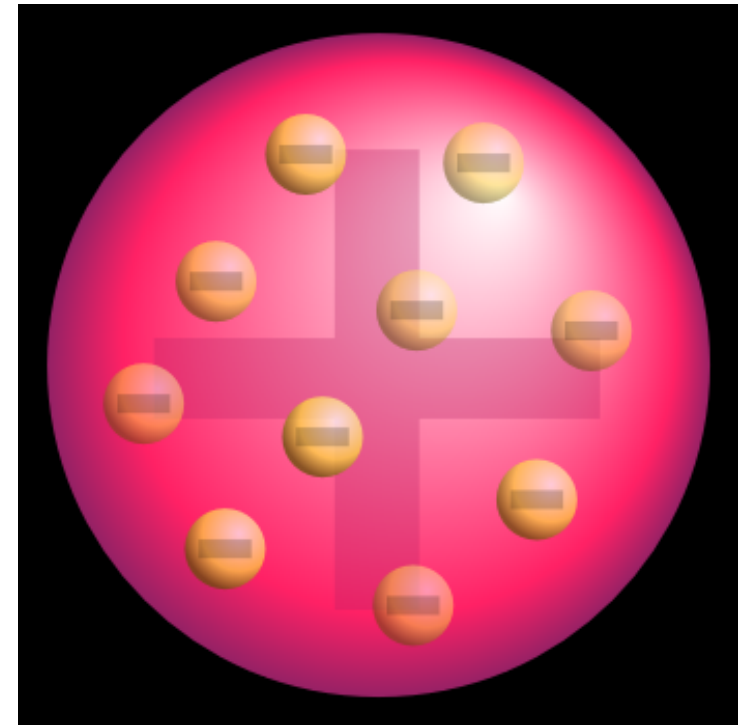
munhoz@if.usp.br

Edifício HEPIC, sala 202

ramal 916940

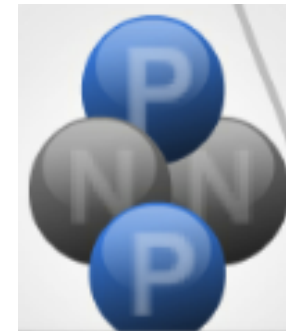
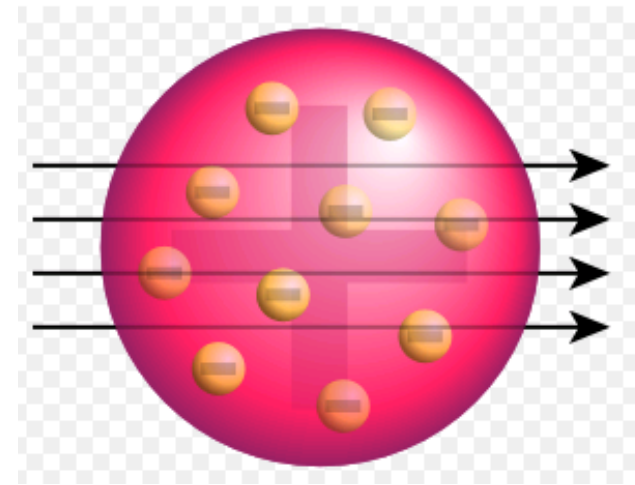
1904 - O Modelo Atômico de Thomson

- *Philosophical Magazine*, 7 (1904), 237
- A partir da descoberta dos elétrons (carga negativa corresponde a corpúsculos), Thomson propõe um modelo atômico, chamado de “pudim de passas”.



Como testar o modelo de Thomson?

- Através do “bombardeamento” do átomo com diferentes partículas
- A melhor candidata na época eram as chamadas partículas- α
- No caso do modelo de Thomson, se espera que as deflexões sejam pequenas
 - massa do elétron $\ll$ massa da partícula- α (7000 vezes menor)



Dados observados

- Geiger e Marsden (1909) observam o resultado do bombardeamento de elétrons e partículas- α em finas folhas de certos materiais
- Para a surpresa de todos, eles observam partículas espalhando em ângulos bastante traseiros

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

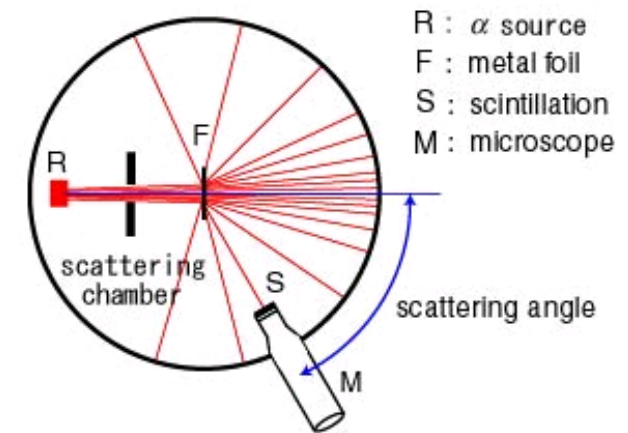
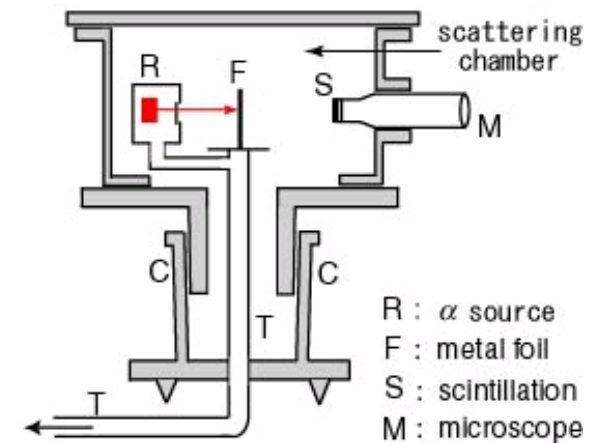


Fig. (E) Setting of the experiment

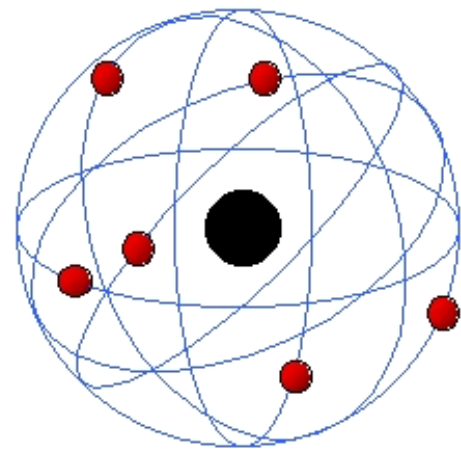
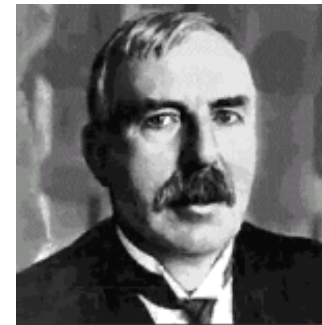


1911 - Rutheford propõem a existência do núcleo atômico

- Rutherford demonstra quantitativamente que os resultados de Geiger e Marsden seriam obtidos a partir de novas hipóteses para o modelo atômico.
- A partir dessas novas hipóteses, ele calcula quantas partículas- α deveriam ser vistas em função do ângulo de espalhamento.

1911 - Rutheford propõem a existência do núcleo atômico

- As hipóteses para o modelo atômico e a sua interação são:
 - ❑ A mecânica clássica é válida
 - ❑ O átomo contém um núcleo de carga $+Ze$ e Z elétrons orbitando a sua volta
 - ❑ Somente a força Coulombiana agindo
 - ❑ O núcleo e a partícula incidente são pontos
 - ❑ O núcleo alvo não sofre recuo
 - ❑ Nenhuma mudança ocorre no estado do alvo ou da partícula incidente

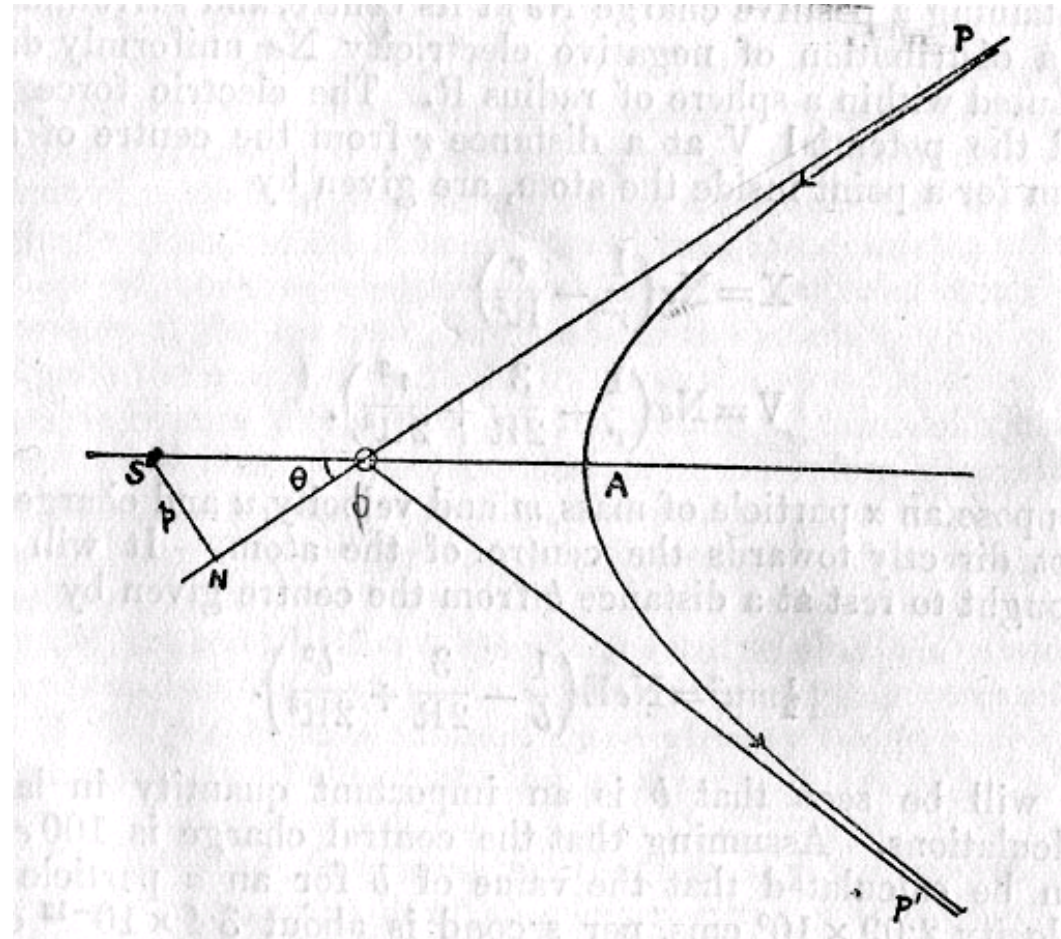


Rutherford (1911)

- **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.

Rutheford (1911) - Mecânica Clássica

- **Força central que varia com o inverso da distância: órbita hiperbólica, onde O é o centro e S é o foco (localização da força central)**



Conservação de energia e momento

(*W.S.C. Williams*, Capítulo 1)

Table 1.1 The notation for quantities used in deriving Rutherford's formula for the differential scattering cross-section for the elastic scattering of one charged particle by a fixed charged target particle.

m mass	Incident particle
v velocity	
T kinetic energy	
ze electric charge	
Ze charge of target nucleus (at O)	See Fig. 1.5.
b impact parameter	
d distance of closest approach (at D)	
u velocity of incident particle at D	
θ angle of scatter	See Fig. 1.6.
r, ϕ polar coordinates with respect to OD of point (X) on the trajectory of particle.	
a distance of closest approach for $b=0$.	

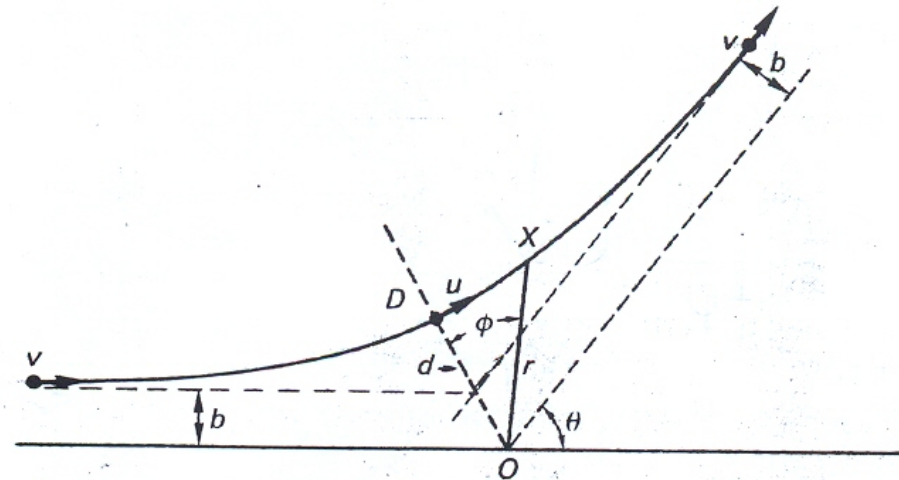


Fig. 1.5 The classical orbit of the incident particle in Rutherford scattering for non-zero impact parameter b .

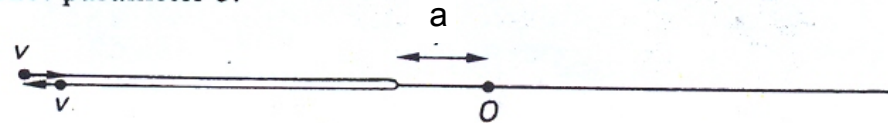
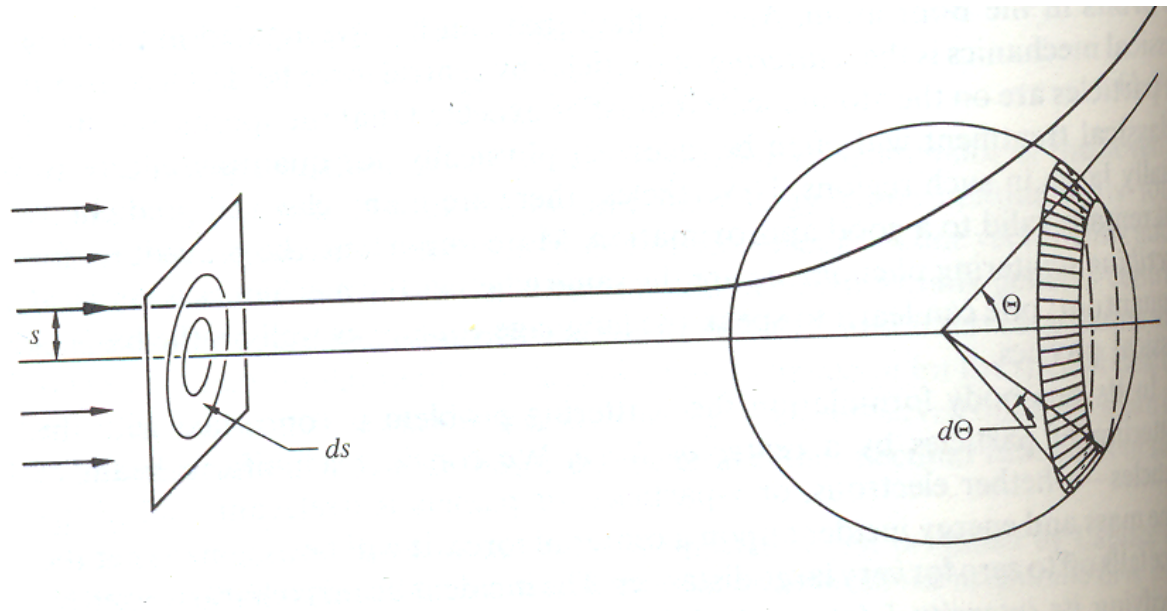


Fig. 1.6 The classical orbit in Rutherford scattering for zero impact parameter. Conservation of energy requires that the incident particle's distance of closest approach p , is given by

$$a = Zze^2/4\pi\epsilon_0 T.$$

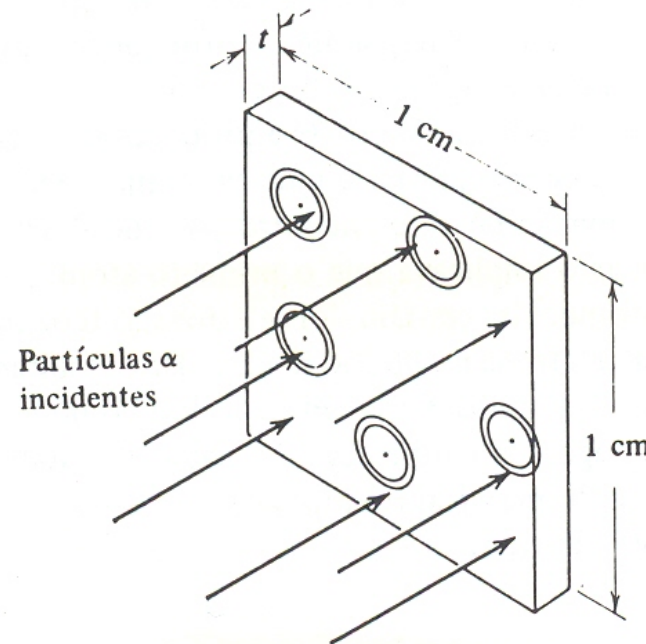
Rutherford (1911)

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



Rutherford (1911)

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



Rutherford (1911)

- Portanto, Rutherford deduziu a seguinte expressão para o espalhamento de partículas- α em um ângulo θ quando um feixe incide sobre um alvo fino de diferentes elementos:

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

Normalizando as medidas:

Definição de seção de choque

- Ao incidir um feixe de íons sobre um alvo, o número de núcleos por unidade de tempo que irão interagir com o alvo (N) é proporcional ao número de íons por unidade de tempo no feixe (intensidade do feixe - I) e o número de átomos no alvo por unidade de área (n): $N \propto I \cdot n$
- A constante de proporcionalidade depende dos processos físicos envolvidos na interação e é chamada de **seção de choque** (σ):

$$N = \sigma \cdot I \cdot n$$

Seção de Choque

- A seção de choque tem unidade de área:

$$\sigma = \frac{N}{I \cdot n} \Rightarrow \frac{\text{partículas/s}}{\text{partículas/s} \cdot \text{partículas/área}} = \text{área}$$

- Ela corresponde a uma área efetiva que o projétil deve entrar para interagir com o alvo;
- Uma interpretação melhor para a seção de choque é simplesmente a probabilidade de interação;

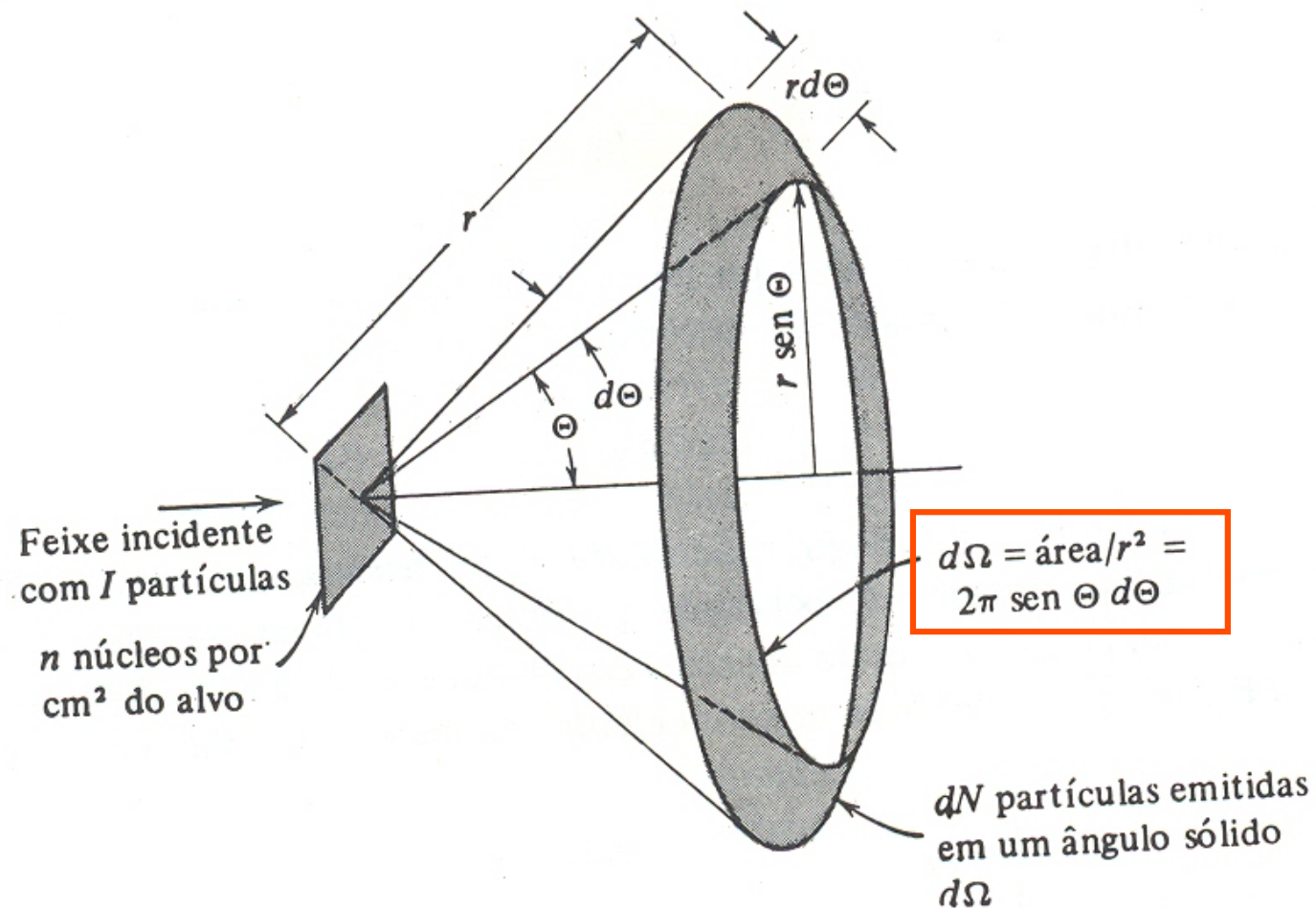
Seção de choque diferencial

- A seção de choque diferencial ($d\sigma/d\Omega$) fornece o número de partículas espalhadas em um dado elemento de ângulo sólido $d\Omega$, ou seja:

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

- I = intensidade do feixe;
- n = centros espalhadores por unidade de área
 $n = \rho \cdot t$;

Seção de choque diferencial



Seção de choque diferencial de Rutherford (clássica)

■ Portanto, como:

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

e:

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

tem-se que:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dN}{I \cdot n \cdot d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Zze^2}{2mv^2} \right)^2 \frac{1}{\text{sen}^4\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Dados observados

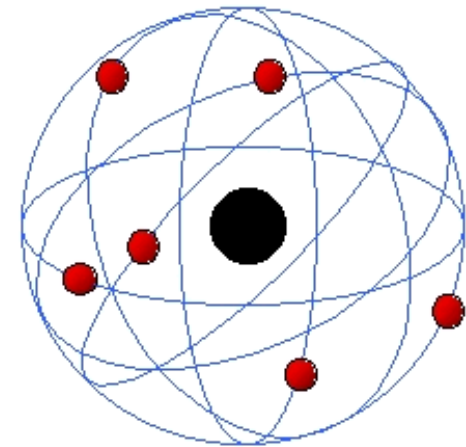
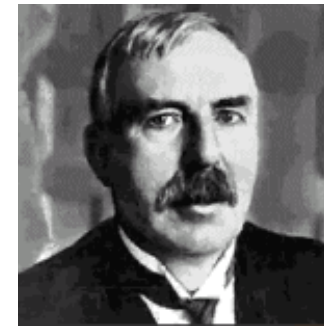
- Geiger e Marsden, em nova e mais precisa medida (1911), observaram que:
 - A distribuição angular variava com $1/\sin^4(\theta/2)$, para $5^\circ < \theta < 150^\circ$
 - A intensidade de partículas espalhadas era proporcional a espessura da folha
 - A intensidade de partículas espalhadas era proporcional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

Como descrever o núcleo atômico?

- As hipóteses de Rutherford sobre o núcleo atômico eram bastante rudimentares
 - ▣ Apesar de representarem um grande avanço no entendimento da matéria, elas não são satisfatórias
- Como podemos estudar o núcleo?
- Quais são as características mais detalhadas do núcleo? Como podemos descrevê-lo?

1911 - Rutheford propõem a existência do núcleo atômico

- As hipóteses para o modelo atômico e a sua interação são:
 - ❑ A mecânica clássica é válida
 - ❑ **O átomo contém um núcleo de carga $+Ze$ e Z elétrons orbitando a sua volta**
 - ❑ Somente a força Coulombiana agindo
 - ❑ O núcleo e a partícula incidente são pontos
 - ❑ O núcleo alvo não sofre recuo
 - ❑ Nenhuma mudança ocorre no estado do alvo ou da partícula incidente



O núcleo tem uma estrutura interna?

- Em uma publicação de 1913 (*Rays of Positive Electricity*), J. J. Thomson relata a existência de um mesmo elemento com massas diferentes
- Na atual nomenclatura, esses elementos são chamados de *isótopos*
- Essa descoberta mostrou que o núcleo atômico não era composto apenas de “entidades” com carga positiva

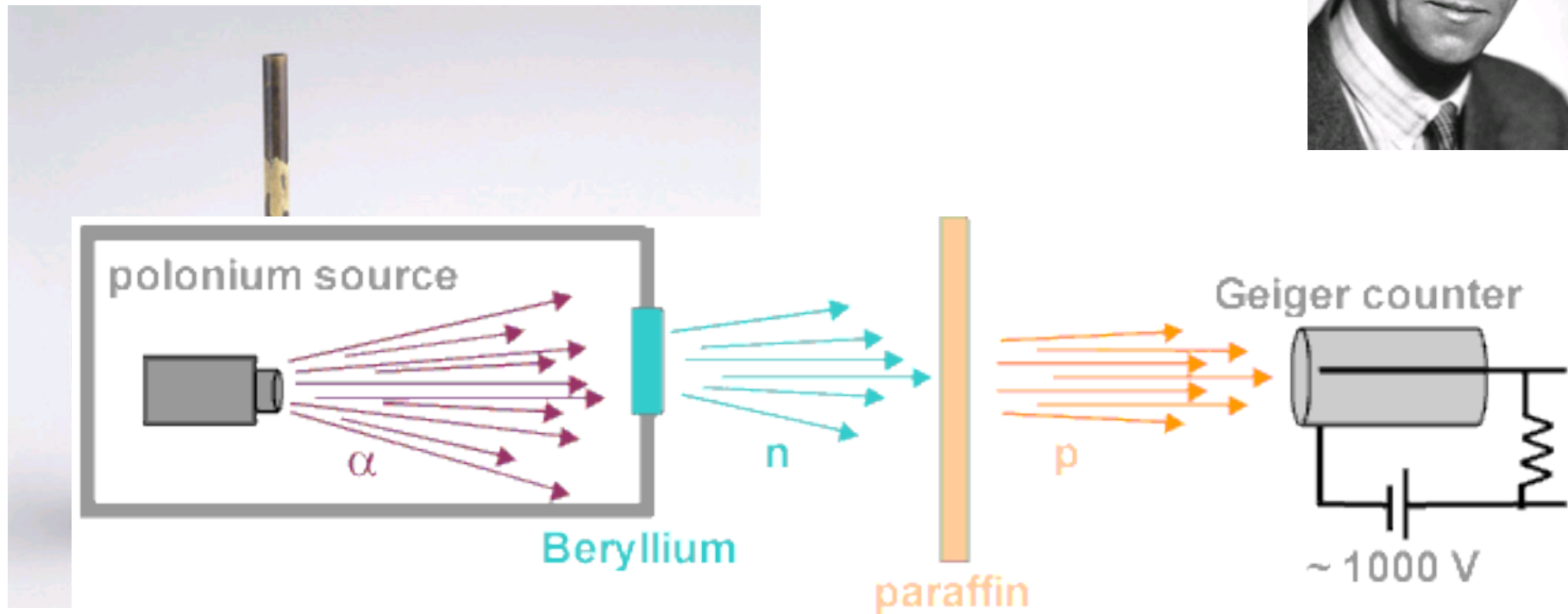
O núcleo tem uma estrutura interna?

- Inicialmente, especulou-se que existiam elétrons no núcleo
- Porém, essa hipótese se mostrou inviável (Por quê?)
- Somente em 1932, com a descoberta do nêutron por Chadwick (*Proc. Roy. Soc., A136, 692, 1932*), Heisenberg postulou a existência de prótons e nêutrons no núcleo atômico (*Z. Physik, 77, 1, 1932*)

1932 – Chadwick descobre os nêutrons

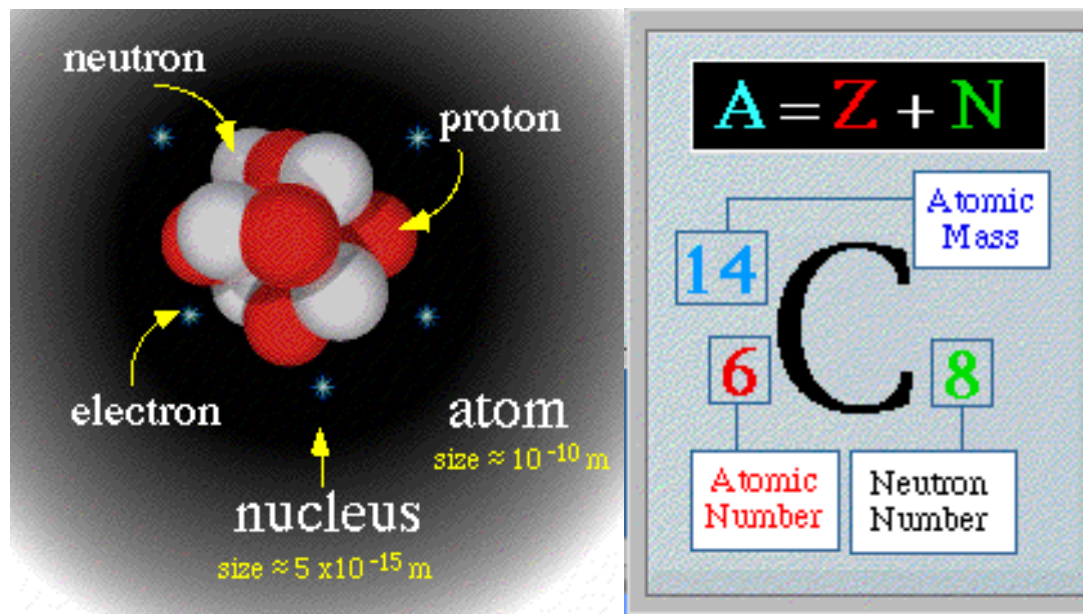


1932 – Chadwick descobre os nêutrons

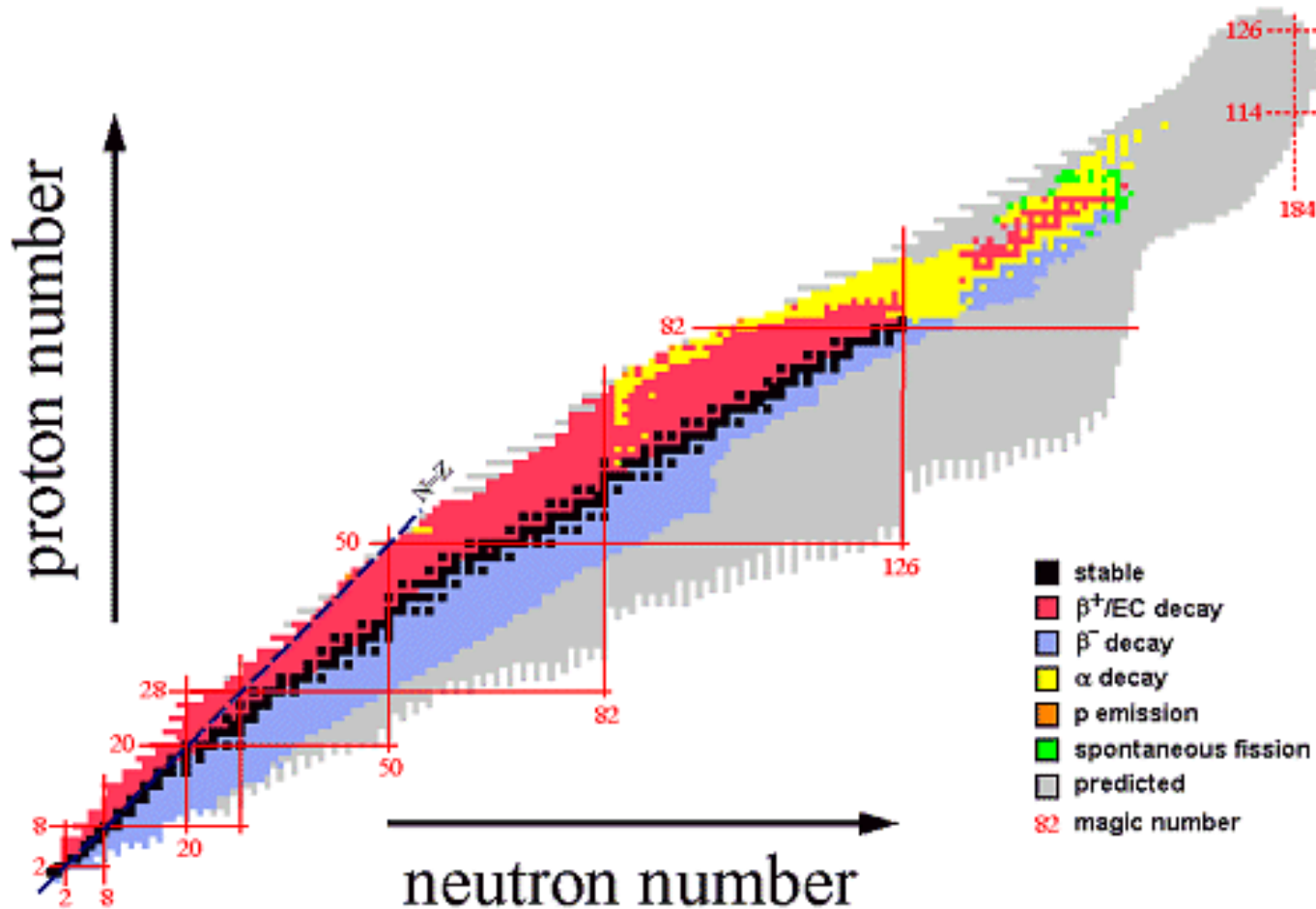


O núcleo tem uma estrutura interna?

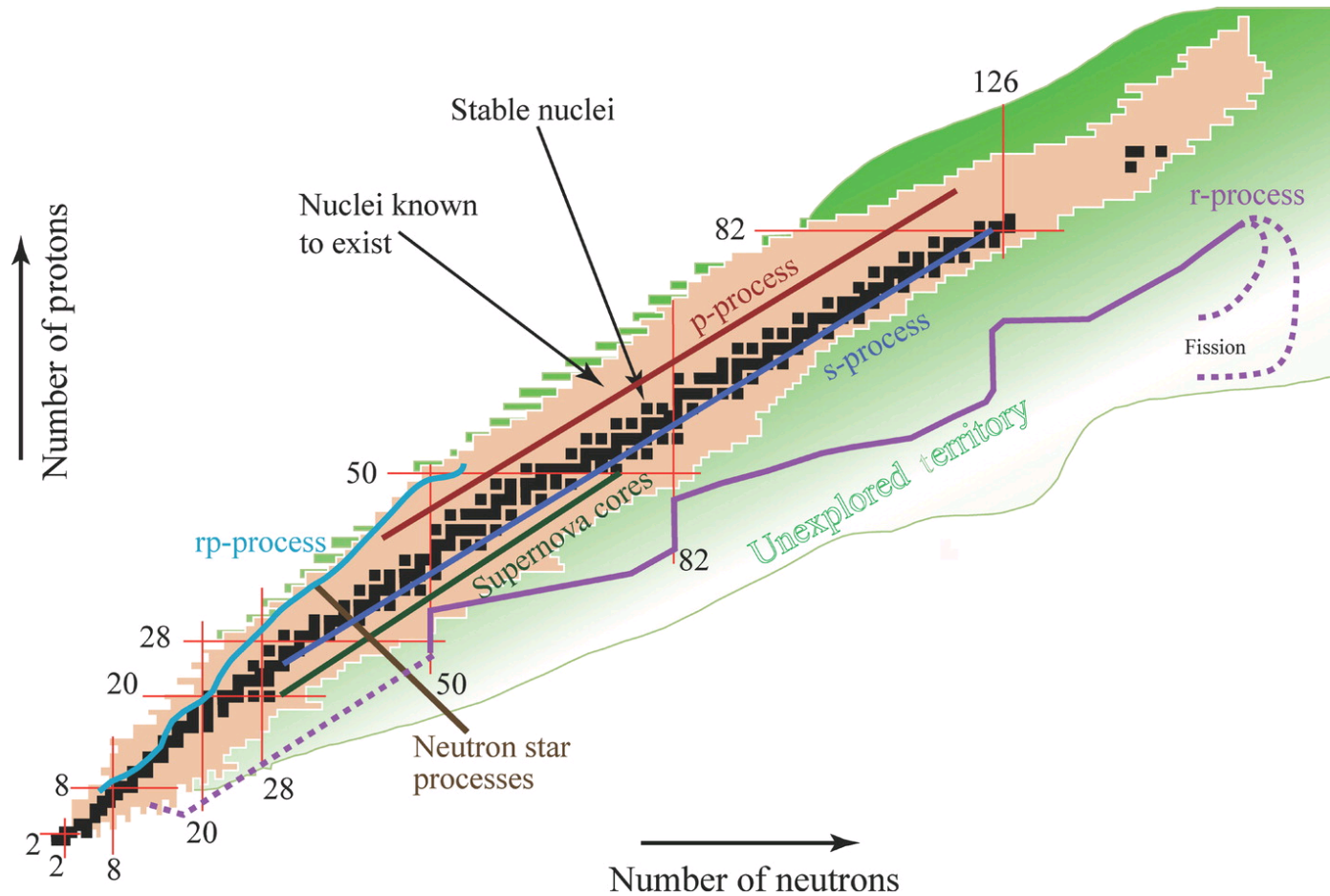
- Descrição mais simples (estabelecida apenas após 1932):
 - O núcleo é composto de prótons e nêutrons



Quais são as possíveis combinações de prótons e nêutrons para formar os núcleos?



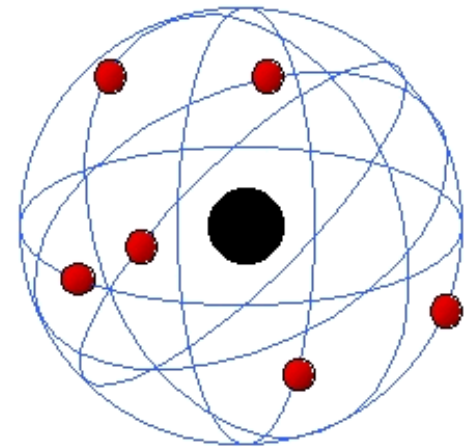
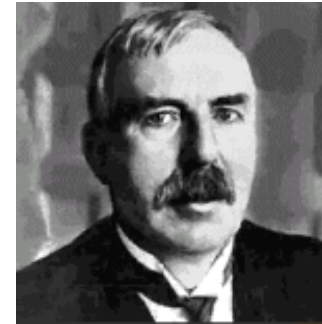
Estudos recentes...



A
R Geesaman DF, et al. 2006.
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 56:53–92

1911 - Rutheford propõem a existência do núcleo atômico

- As hipóteses para o modelo atômico e a sua interação são:
 - ❑ A mecânica clássica é válida
 - ❑ O átomo contém um núcleo de carga $+Ze$ e Z elétrons orbitando a sua volta
 - ❑ Somente a força Coulombiana agindo
 - ❑ **O núcleo e a partícula incidente são pontos**
 - ❑ O núcleo alvo não sofre recuo
 - ❑ Nenhuma mudança ocorre no estado do alvo ou da partícula incidente



Como podemos determinar o tamanho do núcleo?

Através de métodos indiretos:

- Interações eletromagnéticas e nucleares:
 - Espalhamento de partículas- α ;
- Interações eletromagnéticas:
 - Espalhamento de elétrons;
- Interações nucleares:
 - Espalhamento de nêutrons.

Unidades nucleares

		SI Values
Energy	1 eV	$=1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
	1 MeV = 10^6 eV	$=1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$
	1 GeV = 1000 MeV	$=1.602 \times 10^{-10} \text{ J}$
Momentum	1 MeV/c	$=5.344 \times 10^{-22} \text{ kg m s}^{-1}$
Mass	1 MeV/c ²	$=1.783 \times 10^{-30} \text{ kg}$
The unified atomic mass unit (¹² C scale)	1 u = 931.5 MeV/c ²	$=1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Length	1 fermi (fm)	$=1.0 \times 10^{-15} \text{ m}$
Other quantities	$\hbar c = 197.3 \text{ MeV fm}$	$=3.162 \times 10^{-26} \text{ J m}$
	$c = 2.998 \times 10^{23} \text{ fm s}^{-1}$	$=2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
	$\hbar = 6.588 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$	$=1.055 \times 10^{-34} \text{ J s}$
	$=197.3 \text{ MeV/c fm}$	

The fine-structure constant

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137.04}$$

Natural units

$$\hbar = c = 1$$

$$1 \text{ unit of mass} = 1 \text{ GeV}$$

$$1 \text{ unit of length} = 1 \text{ GeV}^{-1} = 0.1975 \text{ fm}$$

$$1 \text{ unit of time} = 1 \text{ GeV}^{-1} = 6.588 \times 10^{-25} \text{ s}$$

Ordem de grandeza

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

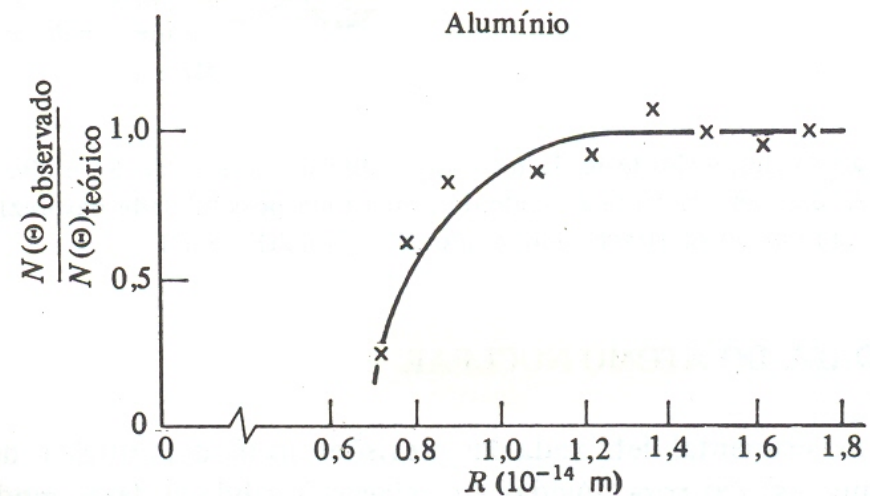
$$D = \frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{mv^2}{2} \right)}$$

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

Ordem de grandeza

- Em experiências com Al e Mg, inicialmente E. Bieler e, em seguida, o próprio Rutherford, observaram que esse modelo não era mais válido:

$$D = \frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{mv^2}{2} \right)}$$

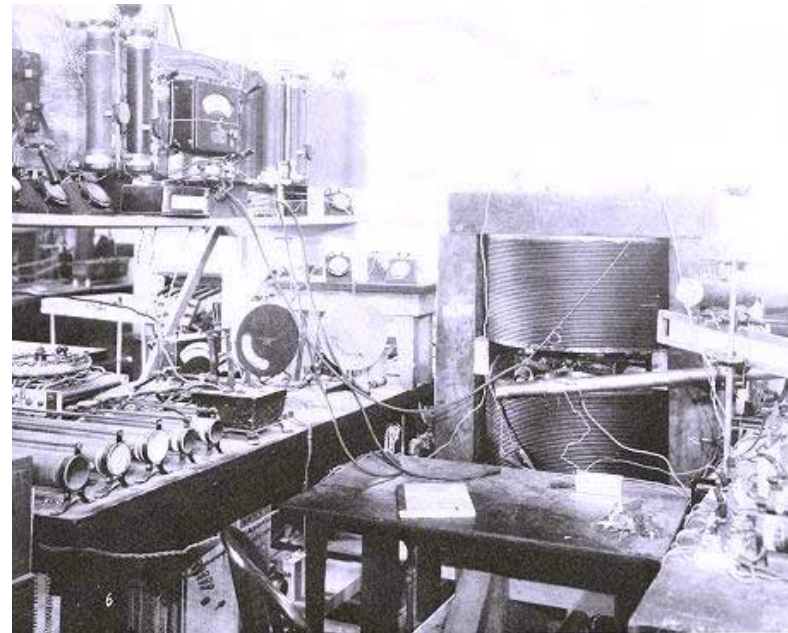
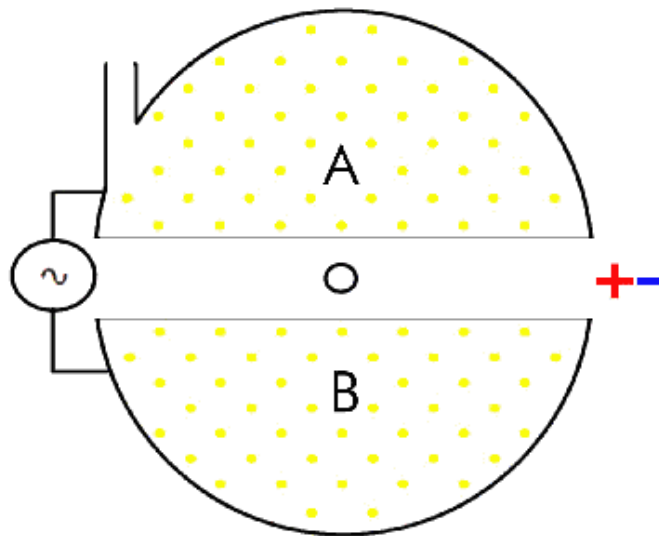


Espalhamento de elétrons

- Que tipo de informação sobre o núcleo conseguimos extrair com o espalhamento de elétrons?
 - Extensão da carga elétrica do núcleo;
- Qual a vantagem de se usar elétrons?
 - Elétrons de alta energia possuem comportamento ondulatório e permitem “enxergar” distâncias de $10^{-15} m$:
$$\Delta p \Delta x \approx \hbar/2$$
$$\Delta p \approx 100 MeV / c \Rightarrow \Delta x \approx 1 fm$$

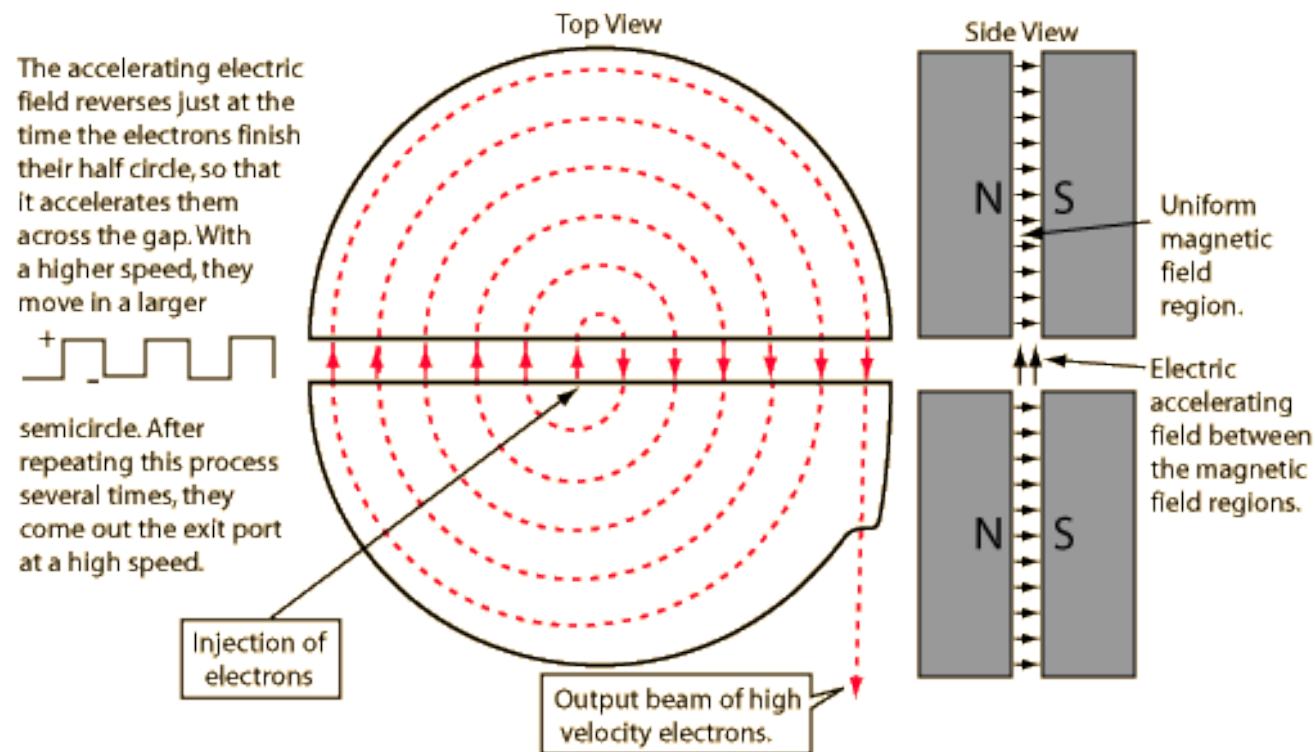
1929 – Cyclotron

- Ernest Lawrence (University of California, Berkeley)



1940 - Betatron

■ Donald Kerst (University of Illinois)

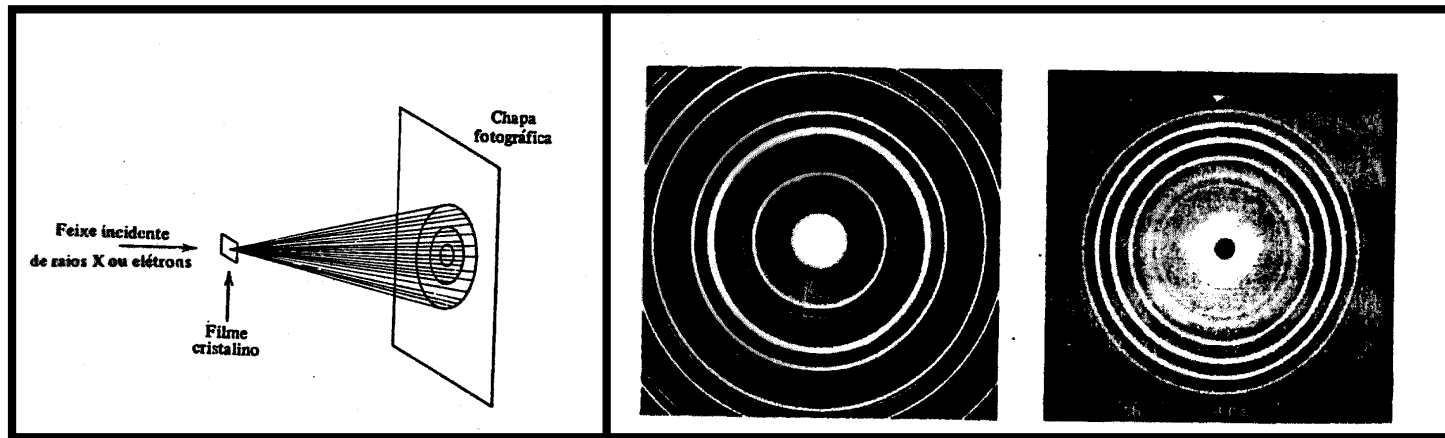


Espalhamento de elétrons

- Para extrairmos alguma informação sobre o núcleo a partir do espalhamento de elétrons devemos:
 - Considerar o caráter ondulatório do elétron;
 - Considerar a extensão da distribuição de carga do núcleo, ao invés de considerá-lo como um ponto, como fez Rutherford.
- Como fazer isso?

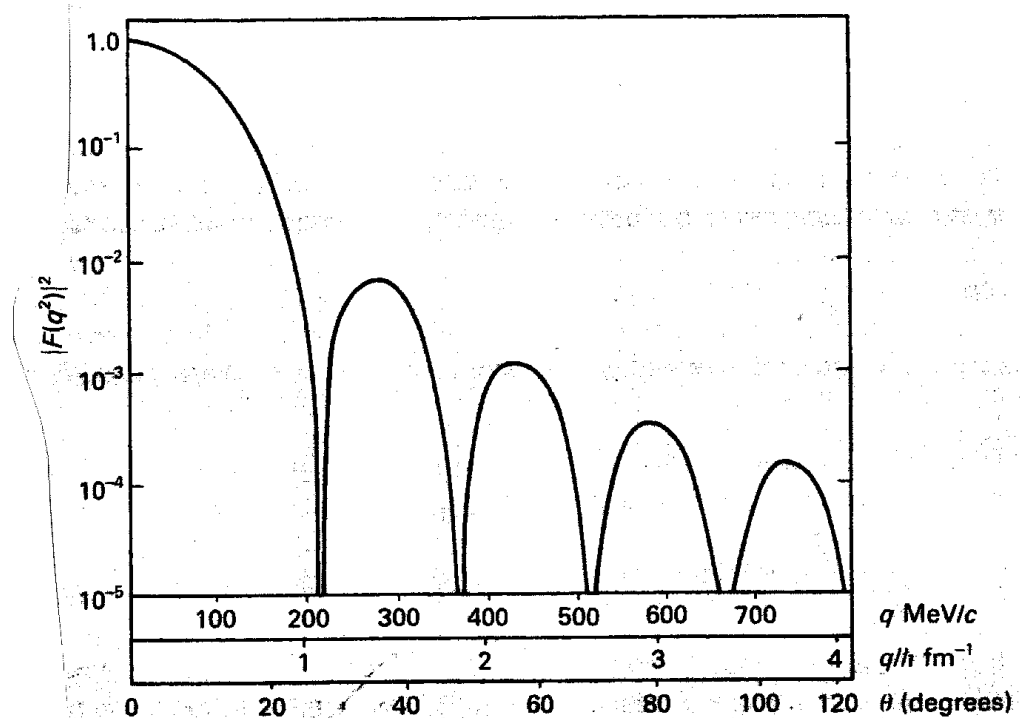
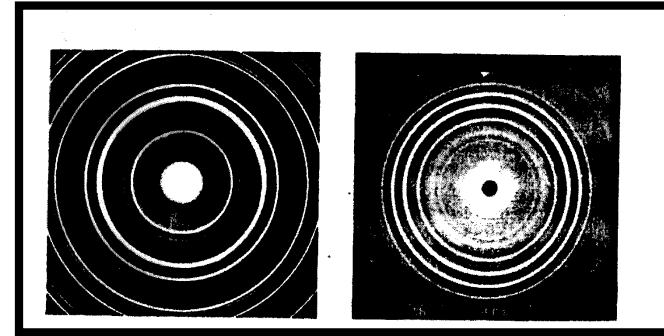
O caráter ondulatório do elétron ...

- Ao interagir com o núcleo, o elétron sofrerá **difração**, da mesma maneira que a luz quando incide sobre um objeto opaco.



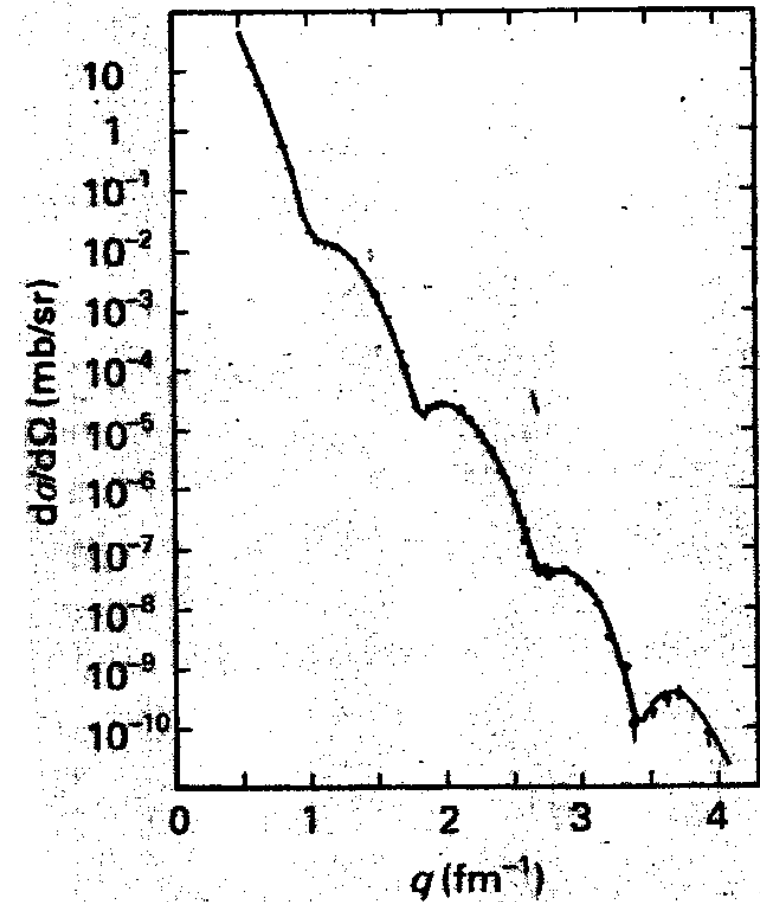
... e a extensão da carga nuclear

- Assim como a intensidade de luz, o número de elétrons varia em função da distância do centro espalhador ou ângulo em relação ao seu eixo.
- E a distância entre os mínimos e máximos depende do tamanho do objeto espalhador.



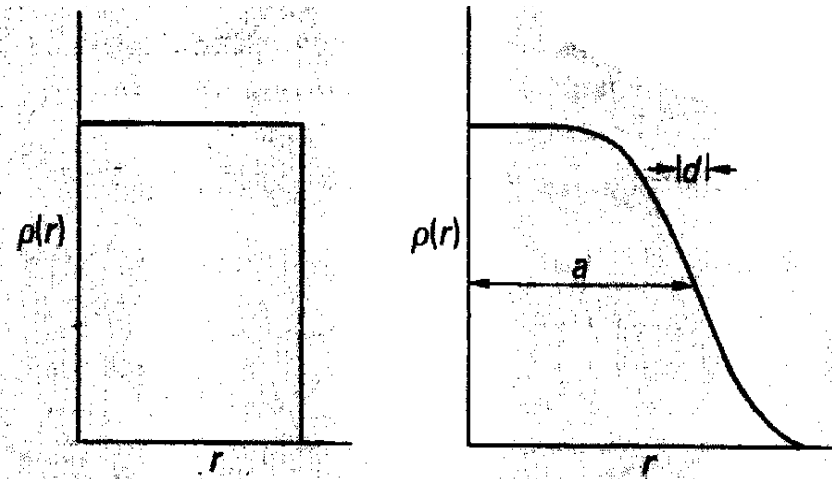
Espalhamento de elétrons

- O resultado experimental concorda com esta abordagem para o espalhamento de elétrons.
- Em seguida, é preciso verificar um modelo para a distribuição de carga que concorde com os dados experimentais.



Modelo para a distribuição de carga no núcleo

- O **modelo I** é o mais simples, porém resultaria em pontos de intensidade nula;
- O **modelo II** concorda bem com os dados, permitindo extrair os valores de ρ_0 (densidade interna), d (difusividade) e a (raio)

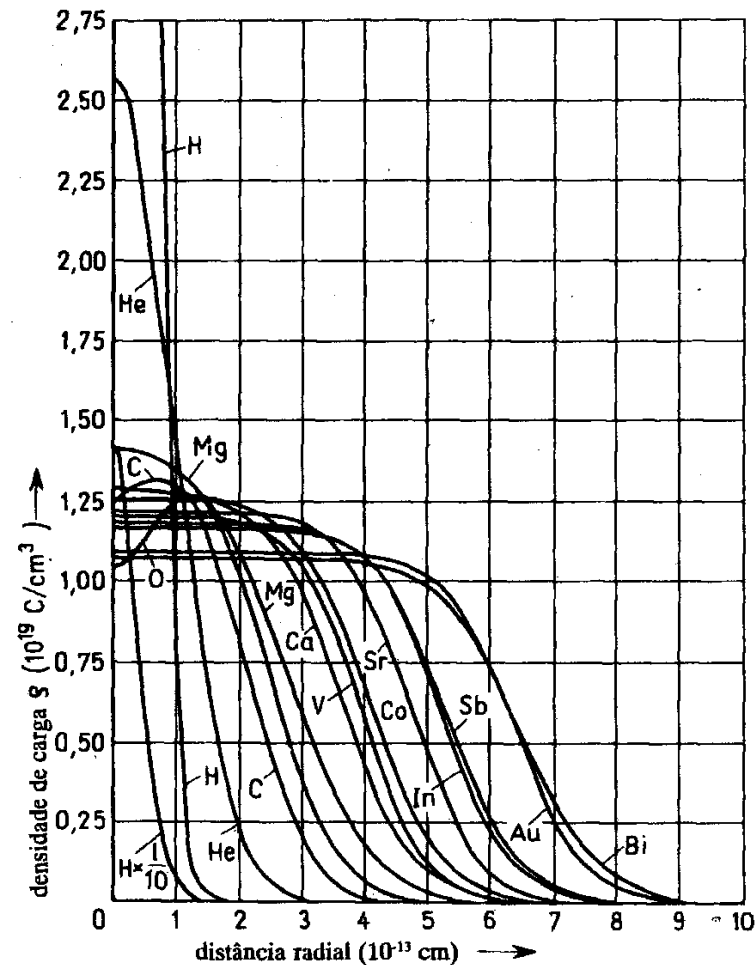


(a) Model I: $\rho(r) = \rho_0, r < a,$
 $\rho(r) = 0, r > a.$

(b) Model II: $\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r-a}{d}\right)}.$

Valores obtidos para os parâmetros do modelo

- O estudo do espalhamento de elétrons para vários núcleos mostra que a densidade nuclear é a mesma para diferentes núcleos, mudando apenas o raio e, em menor escala, a difusividade.



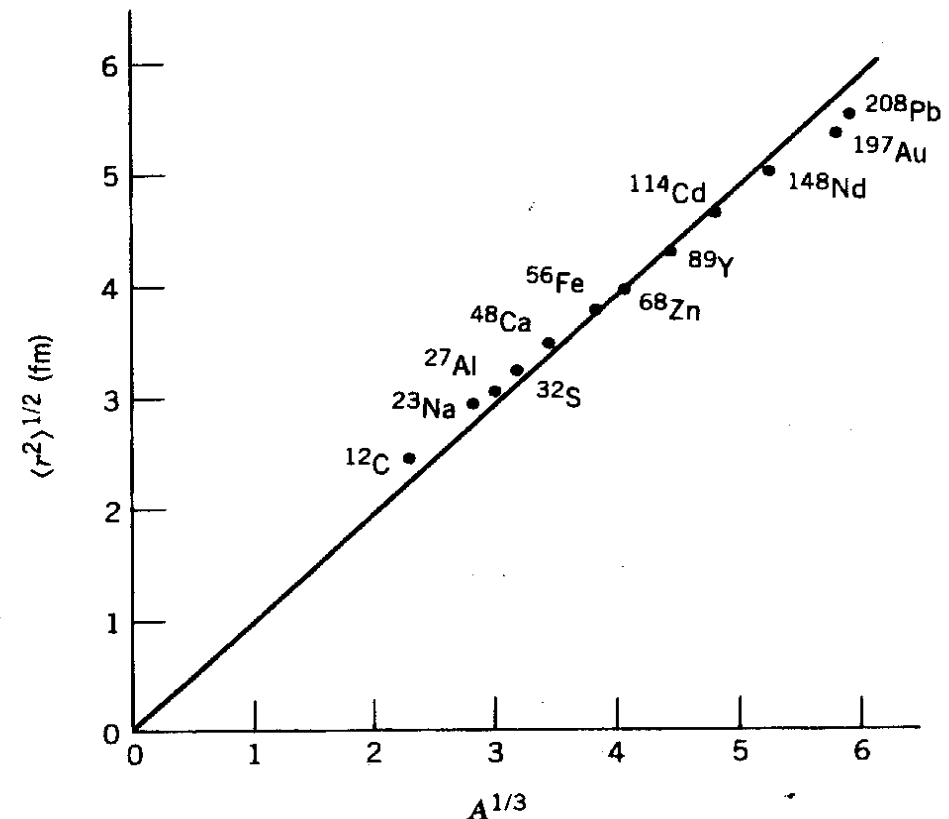
Valores obtidos para os parâmetros do modelo

- Evidência de que o raio do núcleo tem uma dependência do tipo:

$$R \propto A^{1/3}$$

- Supondo que o núcleo tem uma forma esférica, tem-se que:

$$V \propto A$$



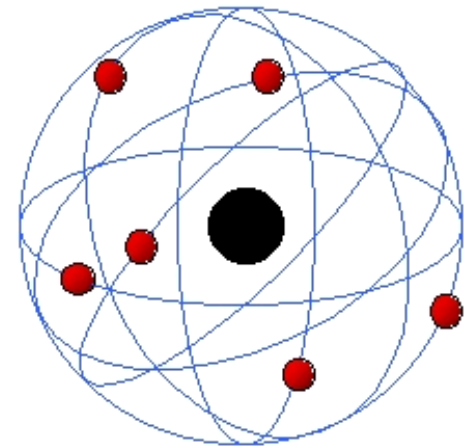
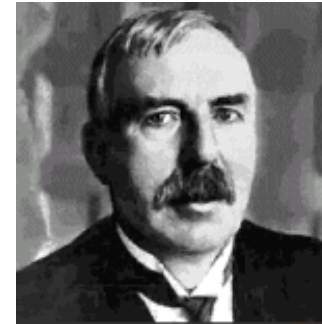
E o que isso significa?

- Qual o significado dessa dependência do raio nuclear com $A^{1/3}$ ou do volume nuclear com A ?
 - ❑ O volume nuclear é aditivo;
 - ❑ Isso mostra que a força que mantém o núcleo coeso é de curto alcance, pois caso contrário a densidade nuclear deveria aumentar conforme se aumenta o número de nucleons, como acontece com o átomo.

1911 - Rutheford propõem a existência do núcleo atômico

■ As hipóteses para o modelo atômico e a sua interação são:

- ❑ A mecânica clássica é válida
- ❑ O átomo contém um núcleo de carga $+Ze$ e Z elétrons orbitando a sua volta
- ❑ Somente a força Coulombiana agindo
- ❑ O núcleo e a partícula incidente são pontos
- ❑ **O núcleo alvo não sofre recuo**
- ❑ Nenhuma mudança ocorre no estado do alvo ou da partícula incidente



Massa Atômica

- A massa dos átomos tem sido medida desde os primórdios da teoria atômica, no início do século XIX
- Com as medidas da massa do elétron no final do século XIX, logo se concluiu que a massa atômica estava concentrada na parte positiva do átomo, ou seja, no núcleo atômico

Unidades nucleares

		SI Values
Energy	1 eV	$=1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
	1 MeV = 10^6 eV	$=1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$
	1 GeV = 1000 MeV	$=1.602 \times 10^{-10} \text{ J}$
Momentum	1 MeV/c	$=5.344 \times 10^{-22} \text{ kg m s}^{-1}$
Mass	1 MeV/c ²	$=1.783 \times 10^{-30} \text{ kg}$
The unified atomic mass unit (¹² C scale)	1 u = 931.5 MeV/c ²	$=1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Length	1 fermi (fm)	$=1.0 \times 10^{-15} \text{ m}$
Other quantities	$\hbar c = 197.3 \text{ MeV fm}$	$=3.162 \times 10^{-26} \text{ J m}$
	$c = 2.998 \times 10^{23} \text{ fm s}^{-1}$	$=2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
	$\hbar = 6.588 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$	$=1.055 \times 10^{-34} \text{ J s}$
	$=197.3 \text{ MeV/c fm}$	

The fine-structure constant

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137.04}$$

Natural units

$$\hbar = c = 1$$

$$1 \text{ unit of mass} = 1 \text{ GeV}$$

$$1 \text{ unit of length} = 1 \text{ GeV}^{-1} = 0.1975 \text{ fm}$$

$$1 \text{ unit of time} = 1 \text{ GeV}^{-1} = 6.588 \times 10^{-25} \text{ s}$$

Massa Nuclear

- Unidades de medida:

- Como $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$, então podemos expressar a massa em unidades de MeV/c²;
- Também podemos expressá-la em ***unidades de massa atômica (u.m.a.)***

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{1}{12} \text{ Massa do átomo neutro de } {}^{12}\text{C}$$

- Excesso de massa:

$$\Delta = (M - A) \cdot c^2$$

Massa Nuclear

The unified atomic
mass unit ($^{12}_6\text{C}$ scale)

$$1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$= 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$\Delta = (M - A) \cdot c^2$$

m_e	0,511 MeV
m_n	939,566 MeV
m_p	938,272 MeV
m_d	1875,613 MeV
$m(^3\text{He})$	2808,350 MeV
m_α	3727,323 MeV
u	931,494 MeV

$$n = 1.00866 \text{ u.m.a.}$$

$$^1\text{H} = 1.0079 \text{ u.m.a.}$$

$$^2\text{H} = 2.01410 \text{ u.m.a.}$$

$$^3\text{H} = 3.01860 \text{ u.m.a.}$$

$$^4\text{He} = 4.00260 \text{ u.m.a.}$$

$$^6\text{Li} = 6.01512 \text{ u.m.a.}$$

$$^{12}\text{C} = 12.00000 \text{ u.m.a.}$$

Como medir a massa nuclear?

- Existem diversos métodos. Entre eles:
- Espectrômetros de massa:
 - Interação eletromagnética
- Reações nucleares:
 - Interação nuclear

Espectrômetros de massa

Seletor de velocidade:

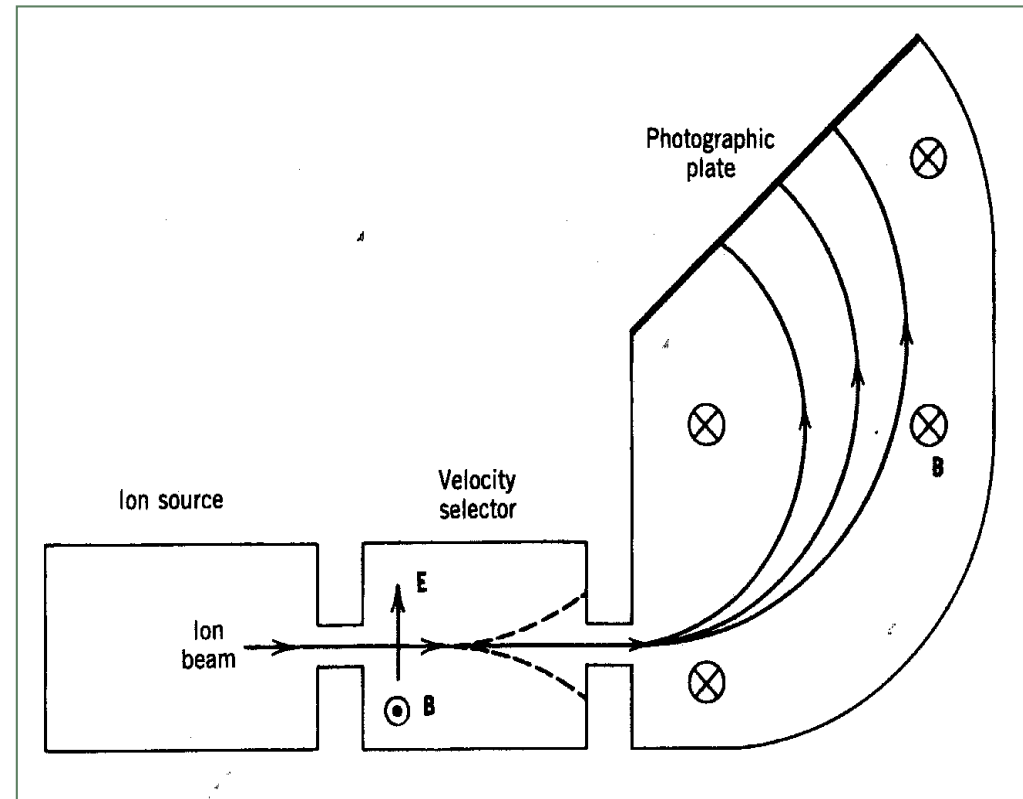
$$F_{elétrica} = F_{magnética}$$

$$qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

Seletor de massa - $m(R)$:

$$F_{centrifuga} = F_{magnética}$$

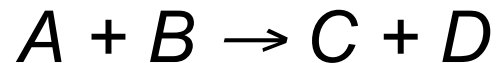
$$\frac{mv^2}{R} = qvB \Rightarrow m = \frac{qB^2}{E} \cdot R$$



Reações nucleares:

o valor Q de uma reação

- Considere uma reação entre dois núcleos A e B , resultando nos núcleos C e D :



- A partir do princípio da conservação da energia, podemos medir a massa de um núcleo;
- Por esse princípio, devemos ter:

$$m_A c^2 + T_A + m_B c^2 + T_B = m_C c^2 + T_C + m_D c^2 + T_D \Rightarrow$$

$$m_A c^2 + m_B c^2 - m_C c^2 - m_D c^2 = T_C + T_D - T_A - T_B$$

Reações nucleares:

o valor Q de uma reação

- Portanto, se medimos a energia cinética dos núcleos e conhecemos a massa de 3 deles, podemos medir a massa do quarto núcleo;
- Chamamos de Q da reação a diferença entre a massa total inicial da reação e a massa final, ou seja:

$$Q = (m_A + m_B - m_C - m_D) \cdot c^2$$

$$Q = (m_{inicial} - m_{final}) \cdot c^2$$

O que podemos esperar para os valores de massa dos núcleos?

- Podemos calcular a massa de um núcleo a partir da expressão:

$$m(Z, N)c^2 = Z \cdot m_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - B$$

onde B é a energia de ligação do núcleo, isto é, a energia necessária para manter o núcleo como um sistema ligado;

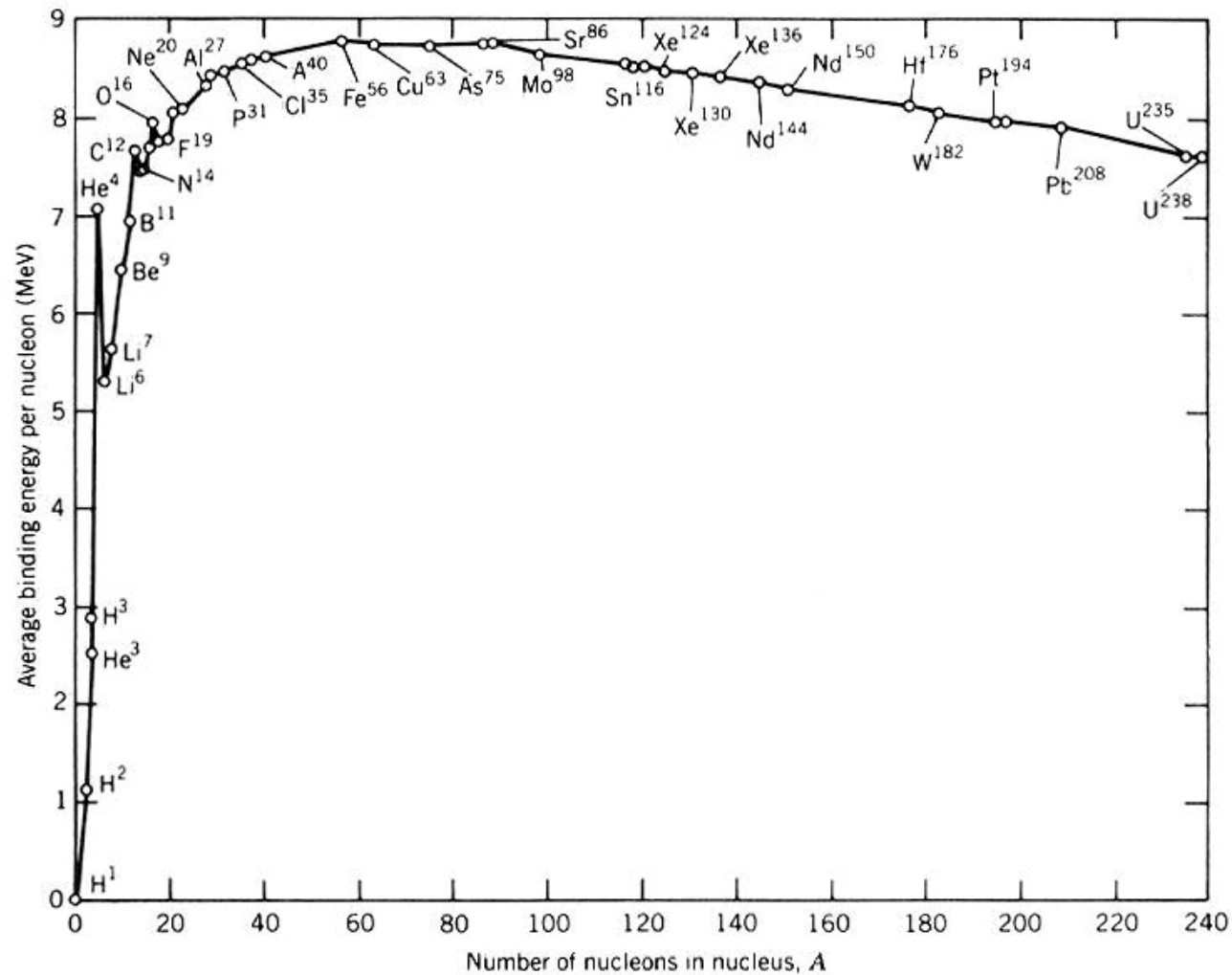
- Se a massa dos núcleos for apenas a soma das massas de seus constituintes, devemos ter: $B = 0$

Energia de ligação

- Portanto, a energia de ligação de um núcleo (B) está intimamente conectada ao conceito de massa do mesmo;
- Normalmente, a energia de ligação é expressa a partir das massas atômicas ao invés das nucleares. Portanto, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} B &= Z \cdot m_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - m(Z, N) c^2 \\ &= Z \cdot m_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - [M(Z, N) - Z \cdot m_e] c^2 \\ &= Z \cdot M_H c^2 + N \cdot m_n c^2 - M(Z, N) c^2 \end{aligned}$$

Energia de ligação



Como podemos explicar este resultado?

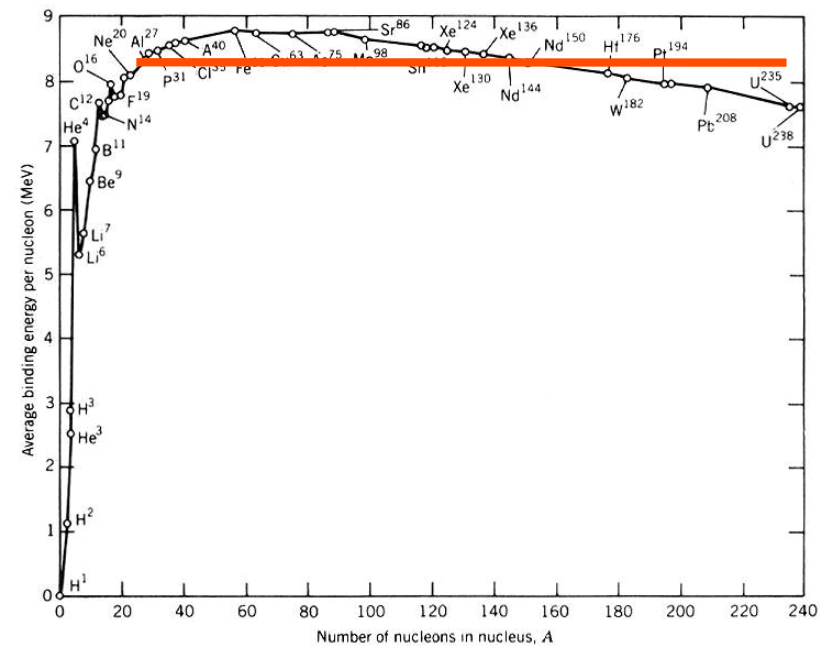
- Este resultado mostra que a massa de um núcleo não é apenas a soma da massa dos seus constituintes, ou seja, o núcleo é uma estrutura mais complexa do que isso
- Portanto, é preciso criar modelos para o núcleo...

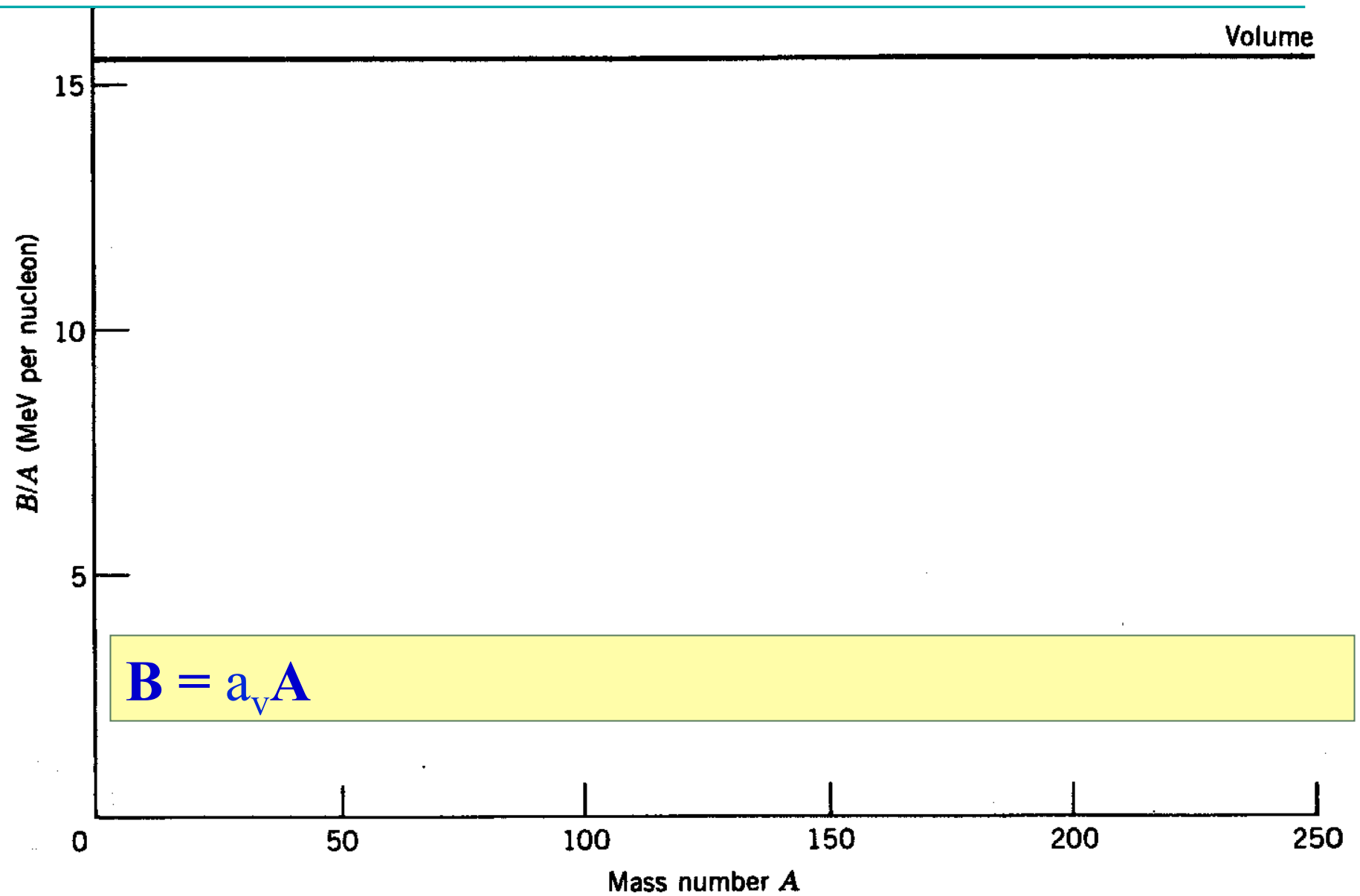
1935 – C. F. von Weizsäcker e H. Beth

- O fato da energia de ligação por nucleon ser quase constante para um grande número de núcleos e a densidade de carga constante observada nos estudos do raio do núcleo, levam a considerar o núcleo como um **líquido incompressível**.
- Considerando essa abordagem, C. F. Von Weizsäcker e H. Beth desenvolveram uma fórmula semi-empírica de massa.

Modelo da Gota-líquida

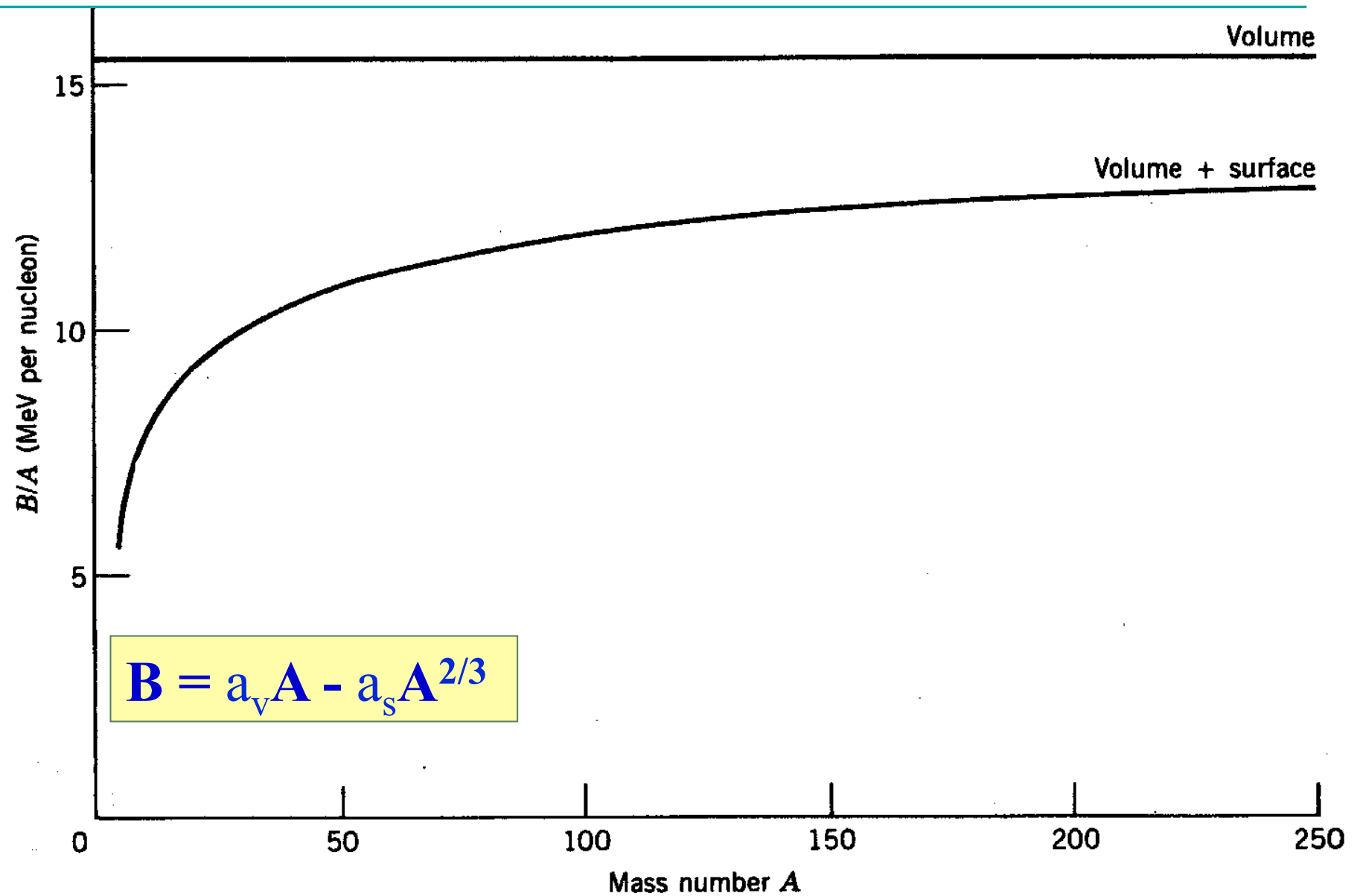
- B/A é aproximadamente constante em função de A ;
- Isto indica que a força entre os nucleons deve ser de curto alcance, pois caso contrário, B deveria ser proporcional a $A(A-1)$.





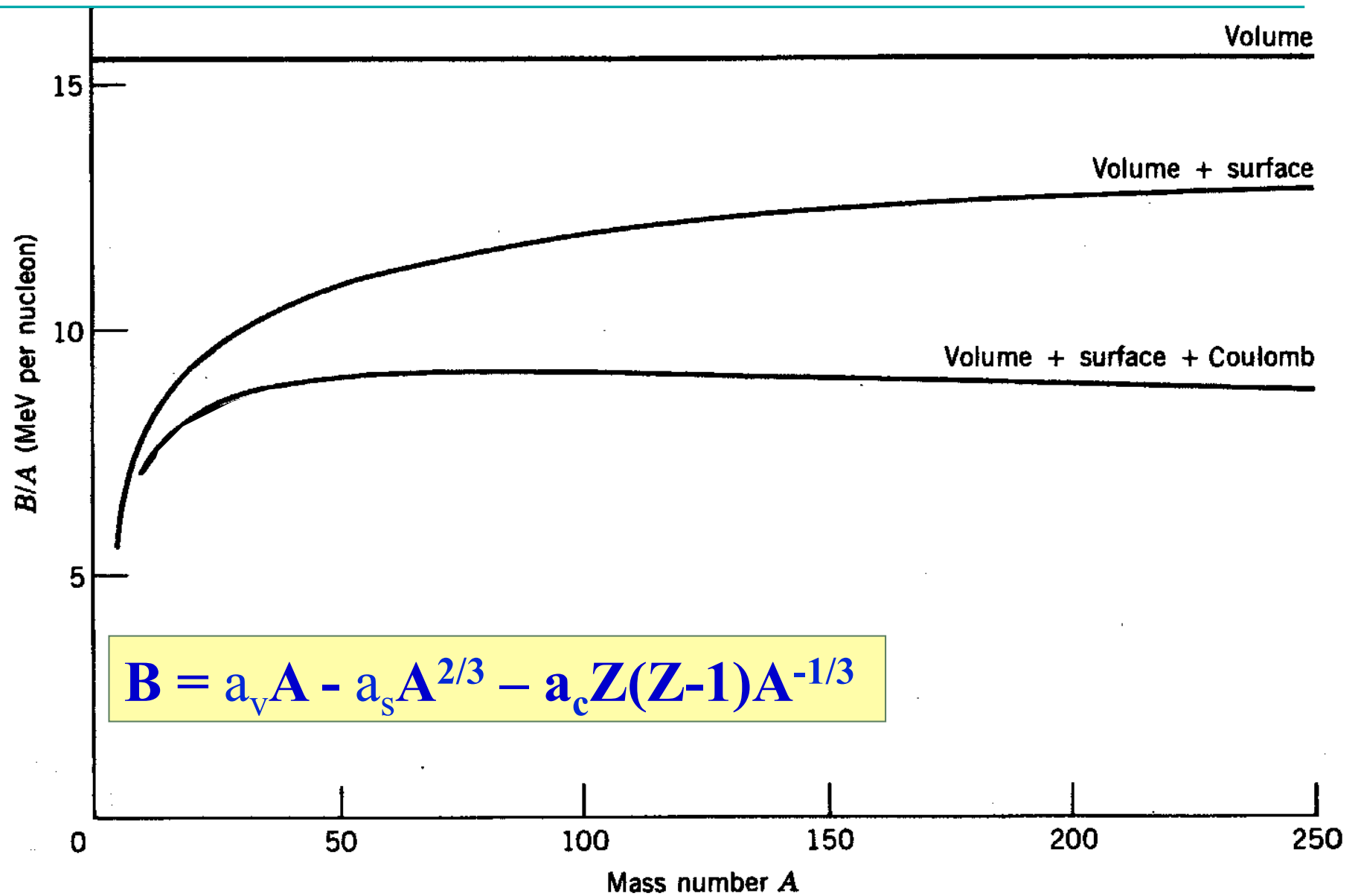
Modelo da Gota-líquida

- Os nucleons na superfície devem contribuir menos com a energia de ligação, pois possuem menos “vizinhos”;
- Como a superfície de uma esfera é proporcional a R^2 devemos acrescentar um termo com essa dependência no nosso modelo;
- Como $R \propto A^{1/3}$, temos $B \propto A^{2/3}$



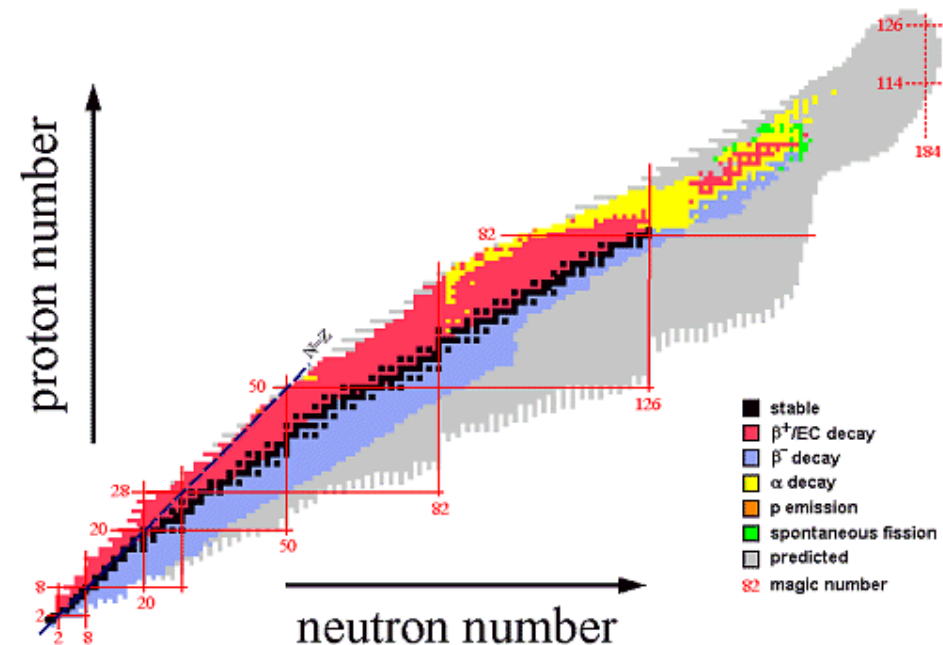
Modelo da Gota-líquida

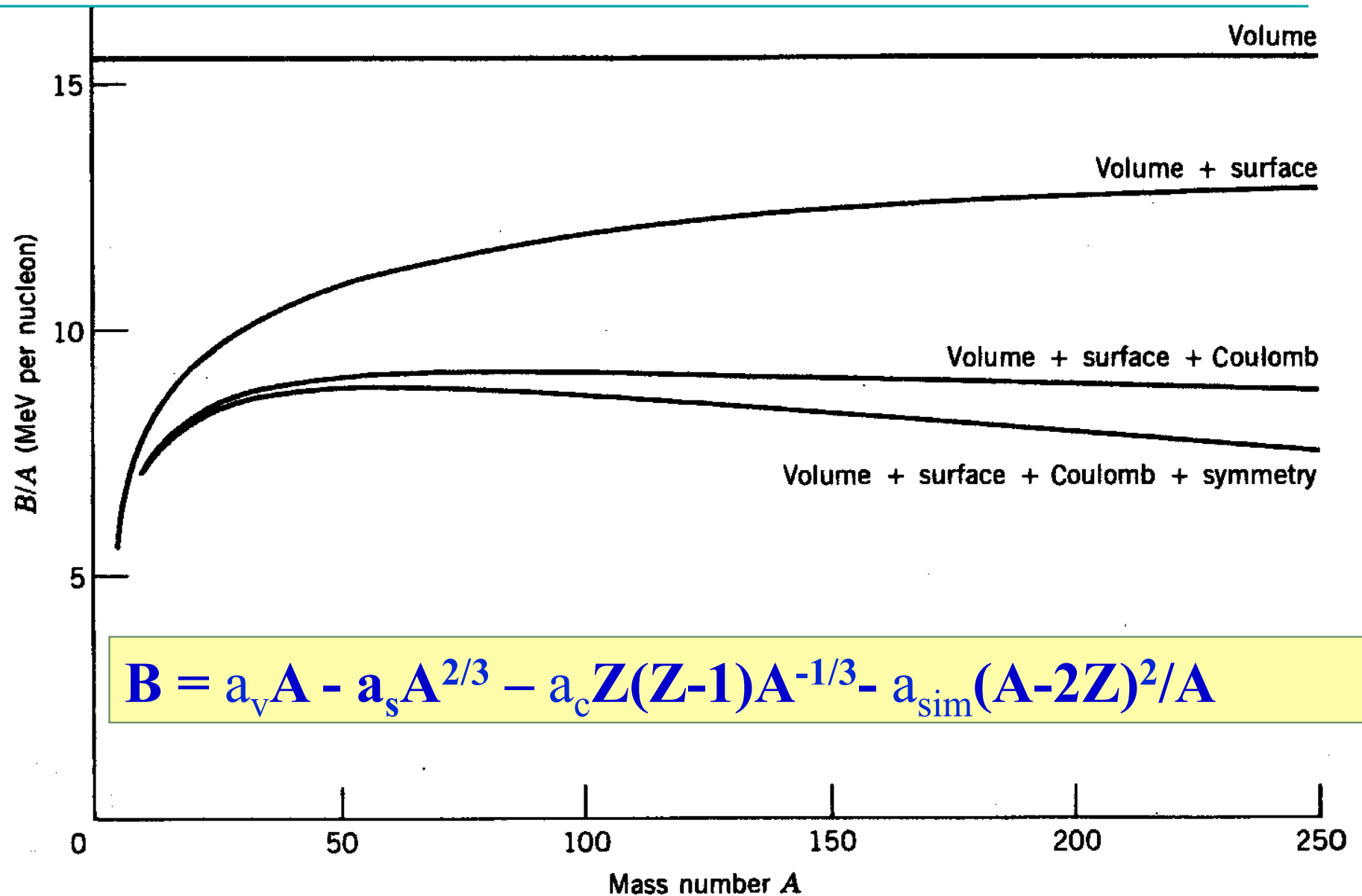
- A repulsão Coulombiana entre prótons também deve ser considerada;
- Ela será proporcional a $Z(Z-1)$ e inversamente proporcional ao raio ($A^{1/3}$)
- Portanto, devemos subtrair um termo proporcional a $Z(Z-1) \cdot A^{-1/3}$



Modelo da Gota-líquida++

- Núcleos estáveis tendem a apresentar $Z \sim A/2$;
- Essa deve ser uma condição de estabilidade que deve aumentar B ;
- Portanto, podemos acrescentar outro termo proporcional a $(A-2Z)^2/A$ pois esse efeito deve diminuir com o aumento de A .

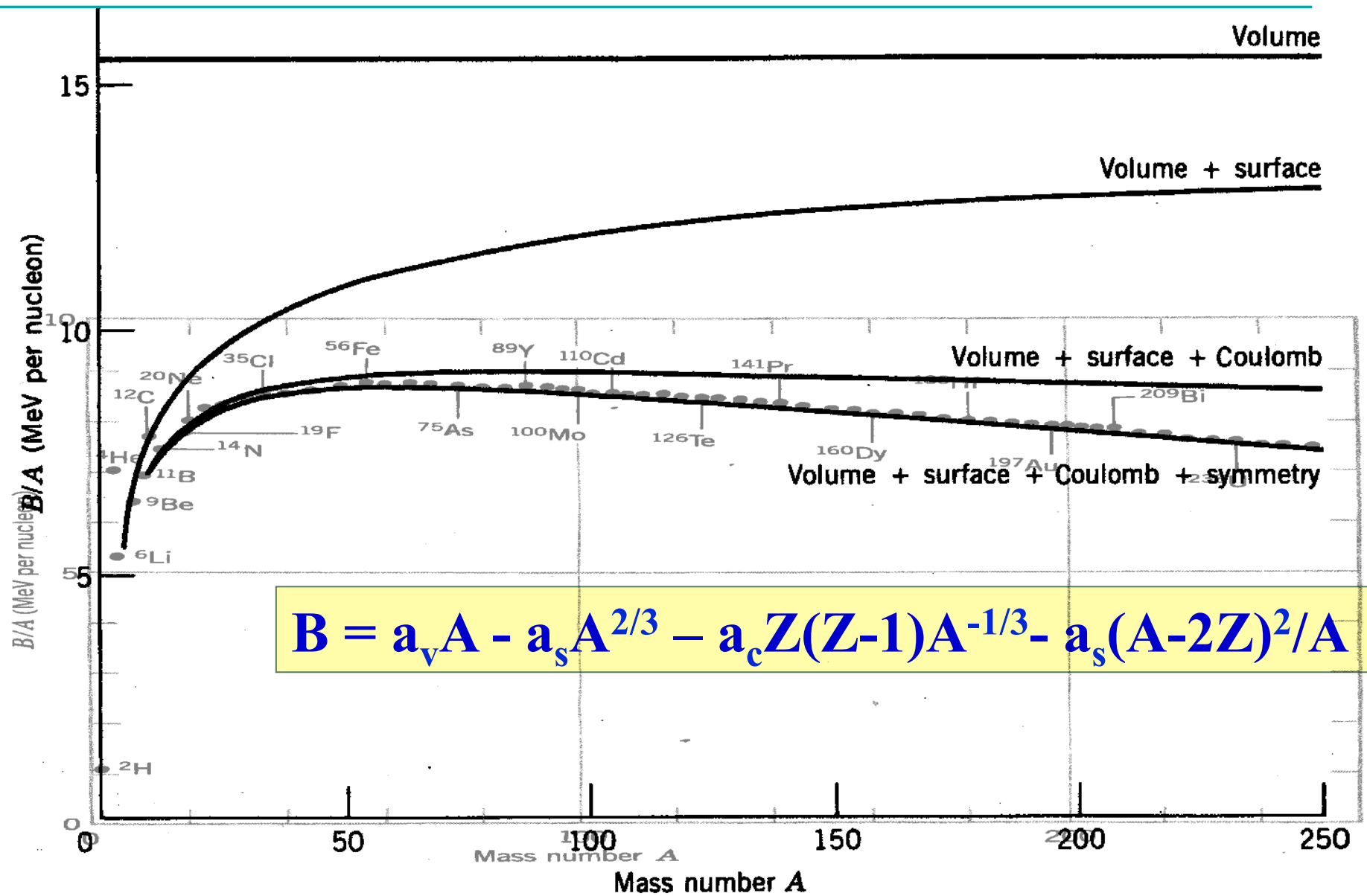




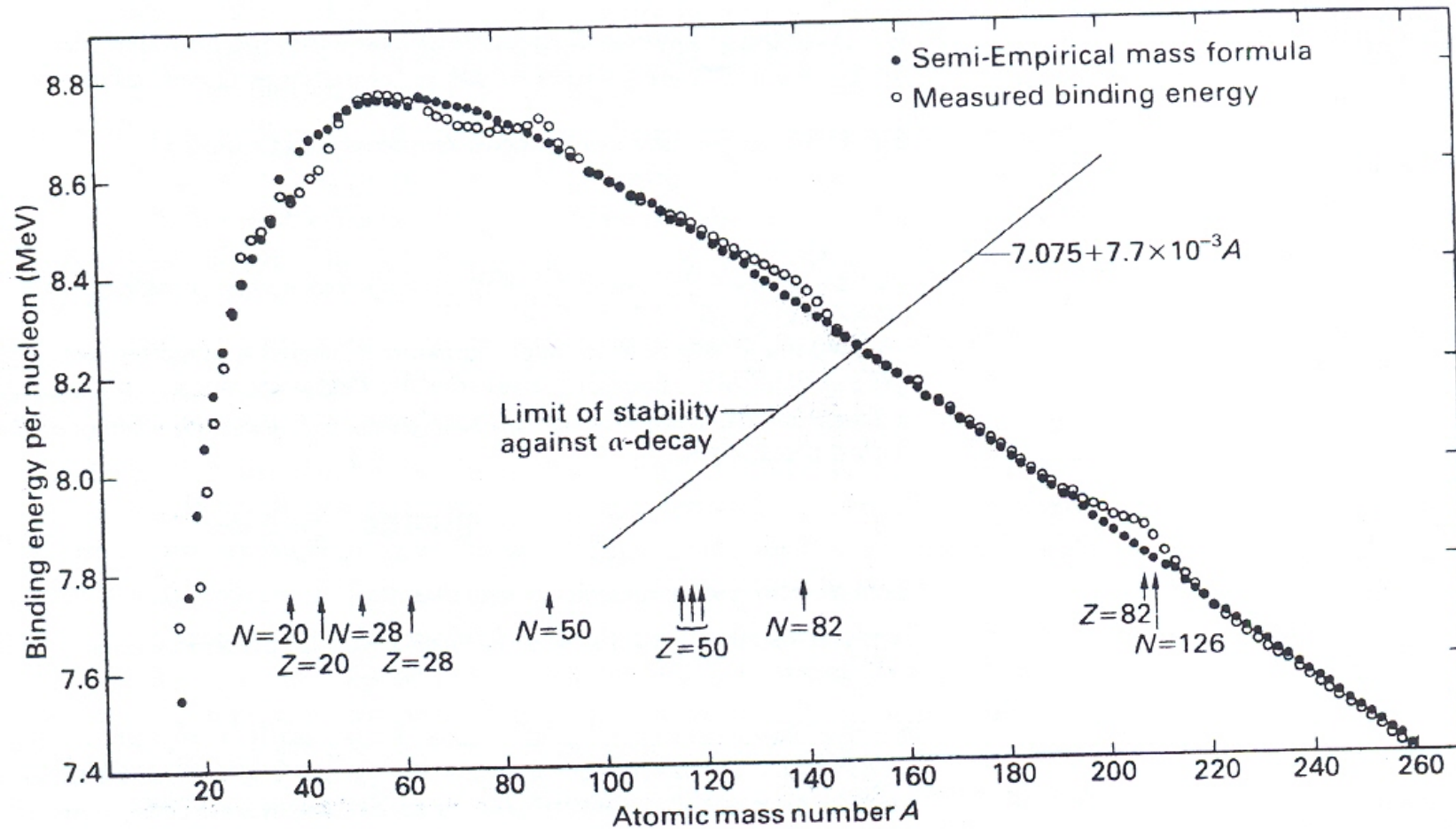
Modelo da Gota-líquida++

- Uma outra observação experimental importante é o fato que os núcleos estáveis tendem a ter um número par de prótons e nêutrons;
- Isso pode ser expresso acrescentando-se mais um termo empírico ao modelo, que tem o caráter de uma força de emparelhamento:

$$\delta = \begin{cases} -a_p A^{-3/4}, & \text{para núcleos ímpar-ímpar} \\ 0, & \text{para núcleos par-ímpar} \\ a_p A^{-3/4}, & \text{para núcleos par-par} \end{cases}$$



Quão bem esse modelo realmente descreve os valores observados de massa?



Fórmula semi-empírica de massa

$$B = Z \cdot m_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - m(Z, N) c^2 \Rightarrow$$

$$m(Z, N) c^2 = Z \cdot m_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - B$$

onde:

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1) A^{-1/3} - a_{sim} (A-2Z)^2 / A + (\delta)$$

e

$$a_v = 15,56 \text{ MeV}$$

$$a_s = 17,23 \text{ MeV}$$

$$a_c = 0,697 \text{ MeV}$$

$$a_{sim} = 23,285 \text{ MeV}$$

$$a_p = 12,0 \text{ MeV}$$

Entendimento microscópico do núcleo

- Esse modelo funciona bem para explicar características mais globais dos núcleos, como a energia de ligação
- Para uma descrição microscópica do núcleo, isto é, em termos dos seus constituintes, é preciso outras abordagens