

Carga, massa e spin do núcleo

Núcleo: conjunto ligado de prótons e nêutrons.

Nuclídeo: configuração particular de um núcleo.

Algumas características: $E_{\text{lig}} \sim \text{MeV}$; $\rho_{\text{N}} \sim 10^{21} \text{ g/cm}^3 \sim 10^{21} \rho_{\text{Átomo}}$

${}^A_Z X$ designa o nuclídeo de um elemento X, com A nucleons, sendo Z prótons e $(A - Z) = N$ nêutrons.

Nuclídeos com mesmo Z mas $N \neq \Rightarrow$ isótopos.

mesmo A mas $Z \neq \Rightarrow$ isóbaros.

mesmo N mas $Z \neq \Rightarrow$ isótonos.

Carga, massa e spin do núcleo

Carga nuclear

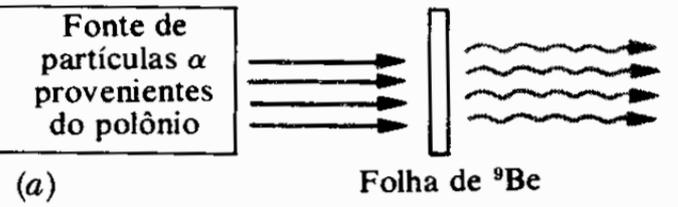
Rutherford, 1911: carga positiva (convenção), concentrada em região de ~ 10 fm. Neutralidade da matéria \Rightarrow carga nuclear quantizada, com mesmo módulo e sinal oposto à carga eletrônica. Número atômico, Z , deve corresponder ao número de cargas no núcleo e na coroa eletrônica.

Moseley, 1913: R–X característicos $\rightarrow E_K \propto Z - 1$.

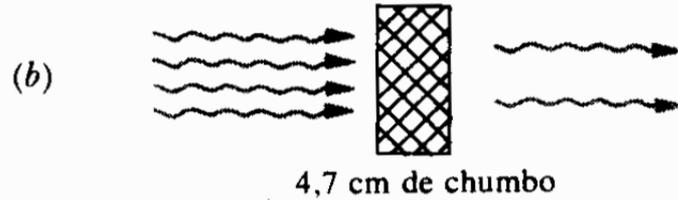
Idéia inicial de núcleos compostos por A prótons e N e^- abandonada por inconsistências com: 1) princípio da incerteza (energia dos e^-); 2) momento de dipolo magnético do núcleo (magneton nuclear ~ 2000 vezes menor que o magneton de Bohr); e 3) momento angular do núcleo: o ^{14}N , p. ex., tem $j = 1$, mas não poderia ter, caso fosse constituído de 14 prótons e 7 e^- .

Rutherford, 1920: propõe a existência de uma partícula neutra, com massa parecida com a do próton, o nêutron.

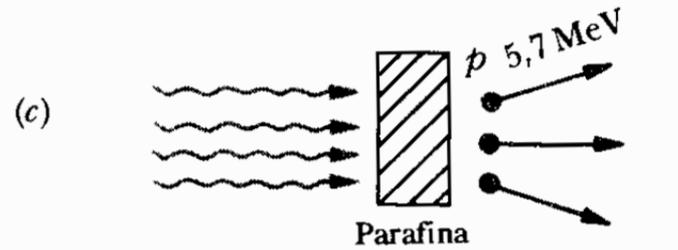
Quadro com as experiências de Bothe e Becker, Curie e Joliot e Chadwick.



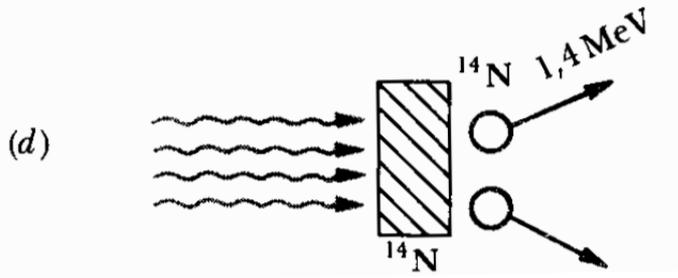
(a) Uma partícula α atingindo uma folha de ${}^9\text{Be}$ produz uma radiação desconhecida.



(b) A intensidade da radiação desconhecida é reduzida a 1/2 pelo uso de 4,7 cm de chumbo. Se a radiação é radiação γ , sua energia deve ser de aproximadamente 15 MeV.



(c) Muitos prótons são produzidos pela radiação desconhecida incidente em parafina. Se a radiação é γ , a energia deve ser aproximadamente de 50 MeV para produzir prótons com energia de 5,7 MeV pelo espalhamento Compton. Se a radiação consiste em partículas sem carga com a mesma massa do próton (nêutrons), a energia do nêutron deve ser somente 5,7 MeV para poder produzir, por colisão, prótons com 5,7 MeV.



(d) A radiação desconhecida incidente sobre o gás nitrogênio produz átomos de recuo de ${}^{14}\text{N}$ com energia de 1,4 MeV, o que implica raios γ com 90 MeV ou nêutrons com 5,7 MeV.

Raio nuclear

Propriedades dos núclídeos

Tamanho? \Rightarrow borda?

Átomo: Ψ_e cai suavemente.

Rutherford: espalhamento α .

Se $d > 10^{-14}$ m \Rightarrow potencial coulombiano.

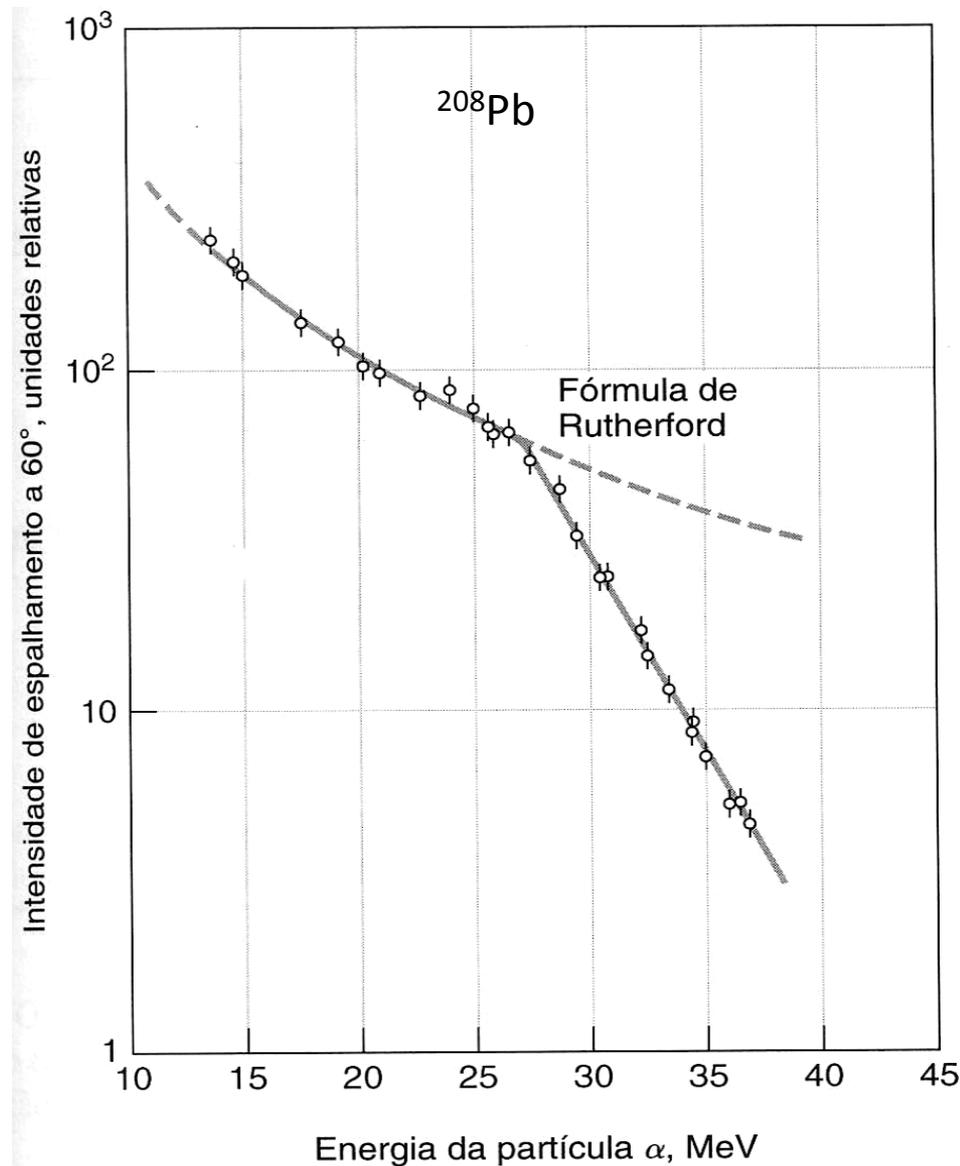
Se $d < 10^{-14}$ m \Rightarrow desvios \Rightarrow
 \Rightarrow “contato” projétil/alvo \Rightarrow
 \Rightarrow potencial nuclear

O que estamos medindo?

\rightarrow distribuição das fontes de campos elétricos

\rightarrow distribuição das fontes de campos nucleares

Carga \leftrightarrow Matéria



Propriedades dos núclídeos

Decaimento β de

núclídeos espelho (aqueles em que $Z_1 = N_2$ e $Z_2 = N_1$)

Supondo que a interação forte se dê entre os nucleons independentemente do tipo, a diferença entre esses 2 núclídeos se deve à energia eletrostática.

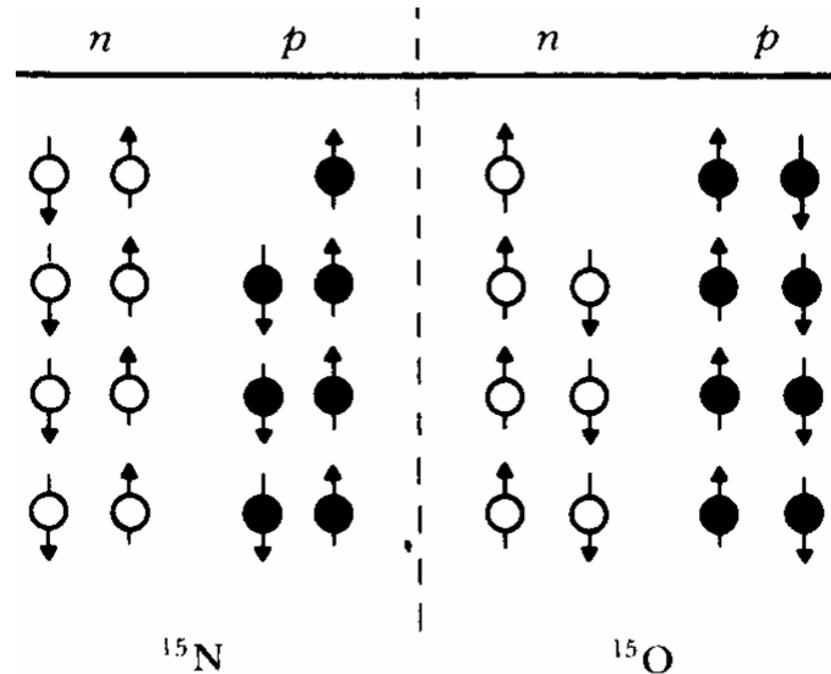
A energia eletrostática de uma esfera uniformemente carregada é:

$$U = \frac{3}{5} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R}$$

O ^{15}O é instável, decaindo por emissão β^+ .

A diferença de energia é dada por:

$$\Delta U = \frac{3}{5} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R} \left[Z^2 - (Z-1)^2 \right] \quad \text{com } Z = 8.$$



Propriedades dos núclídeos

Medindo-se a diferença de energia, pode-se determinar R .

Resultados obtidos para 18 pares de núclídeos espelho indicam que o raio nuclear obedece à seguinte relação:

$$R = R_0 A^{1/3}, \text{ com } R_0 = 1,2(2) \text{ fm.}$$

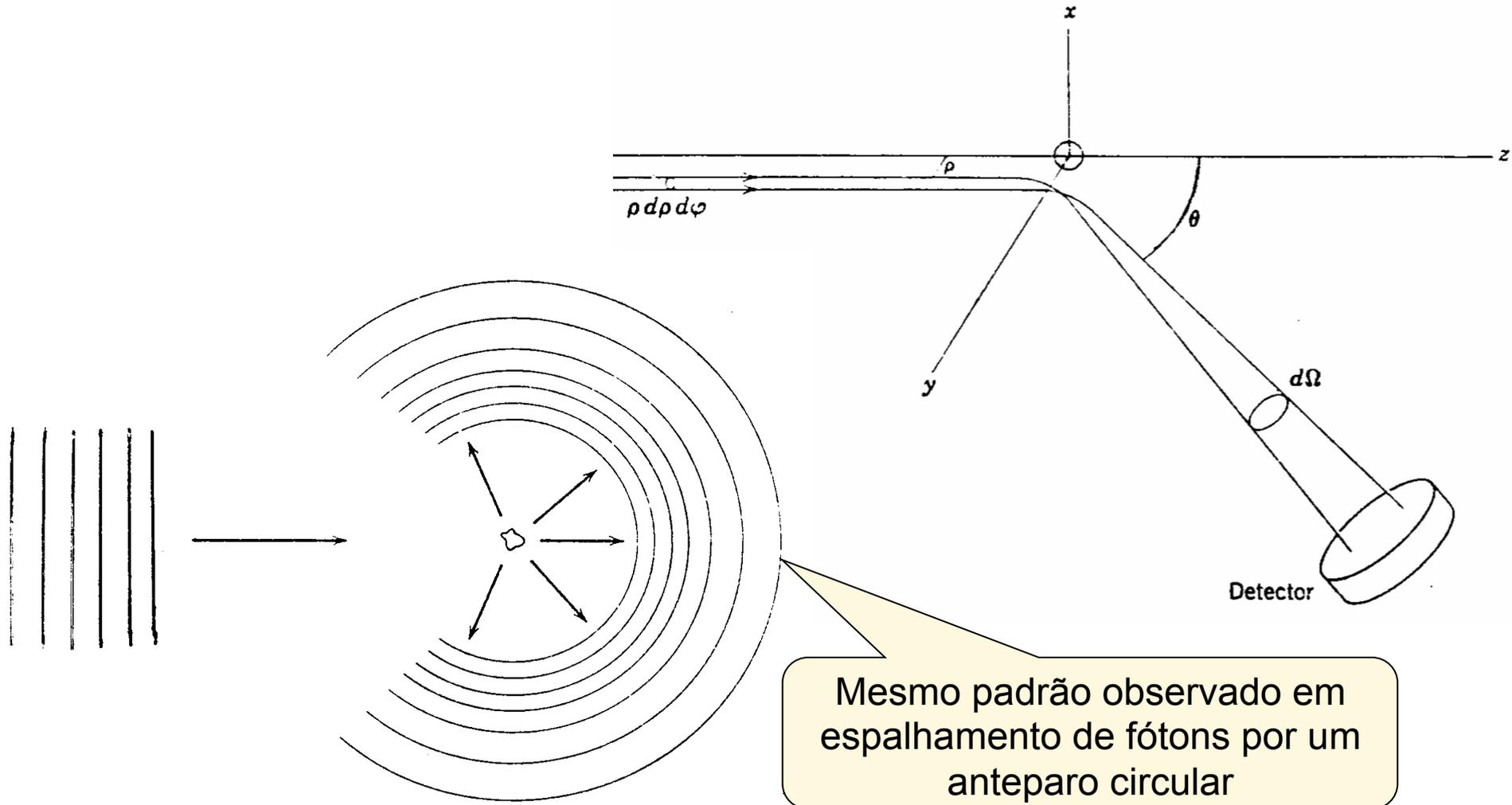
Nota-se que os raios nucleares mudam pouco com o aumento do número de nucleons. Vejamos os casos do ${}^4\text{He}$ e do ${}^{238}\text{U}$:

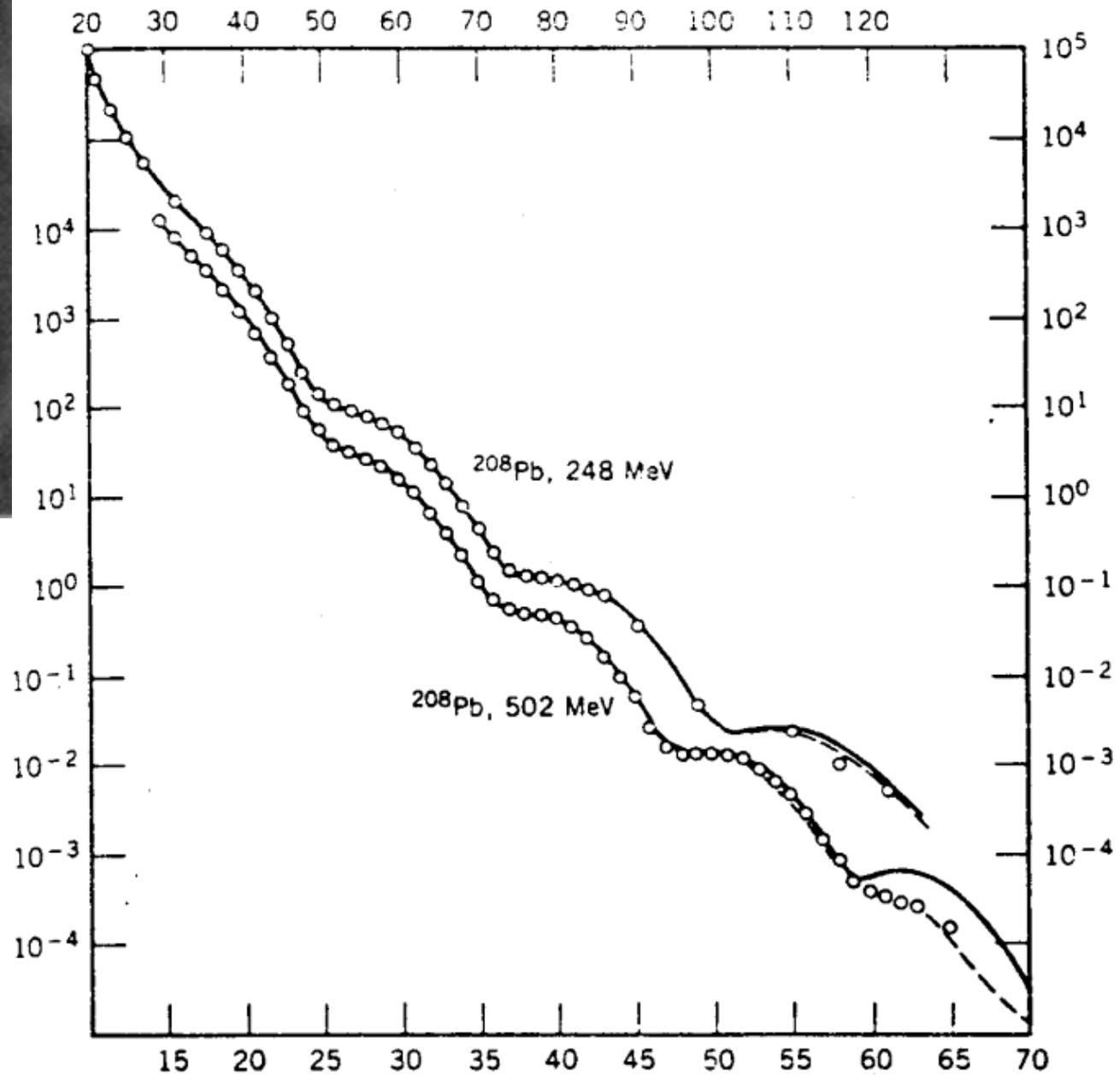
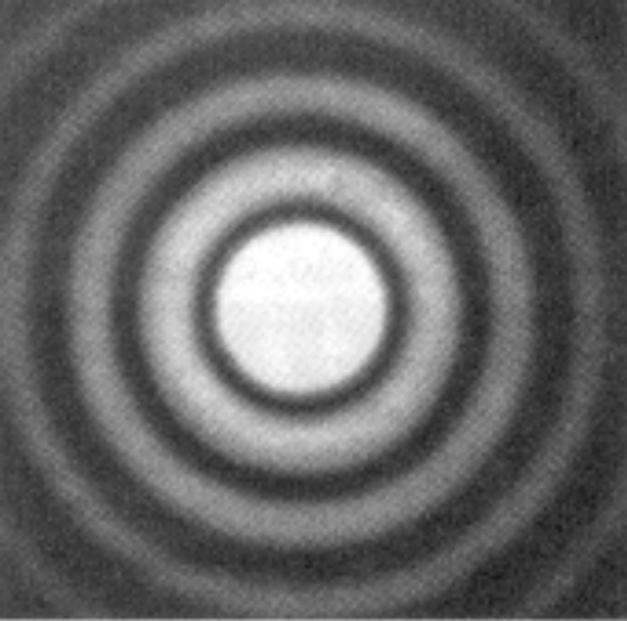
$$R_{\text{He}} = 1,2(4)^{1/3} = 1,9 \text{ fm;}$$

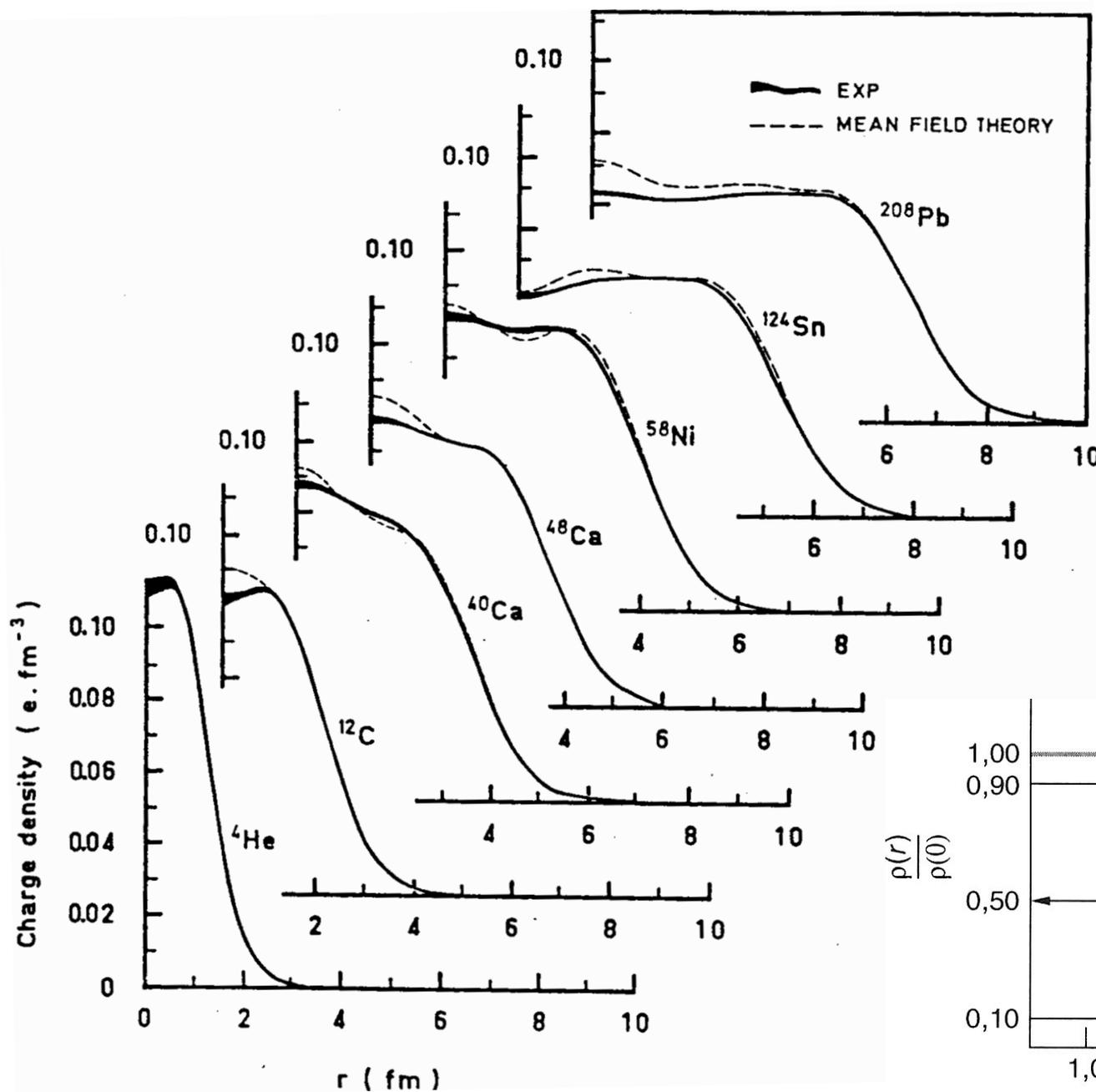
$$R_{\text{U}} = 1,2(238)^{1/3} = 7,4 \text{ fm.}$$

Propriedades dos núclídeos

Distribuição de carga nuclear: espalhamento de elétrons





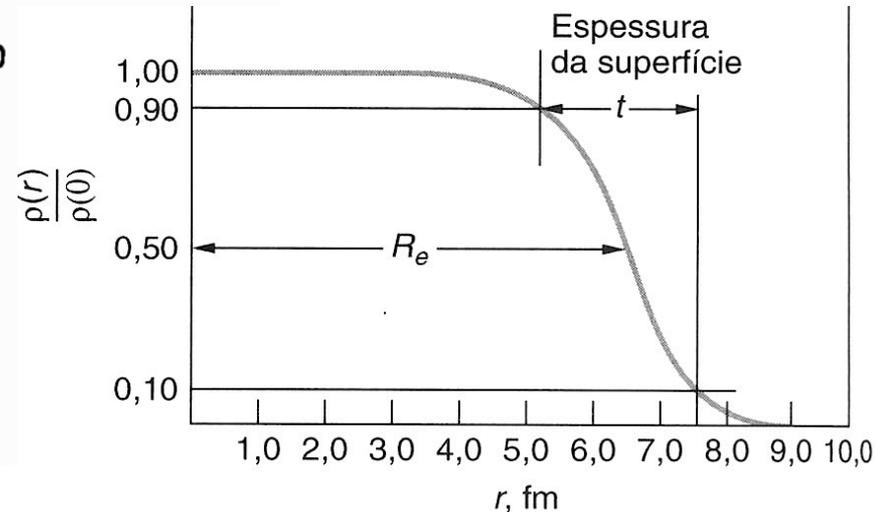


$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R}{d}\right)}$$

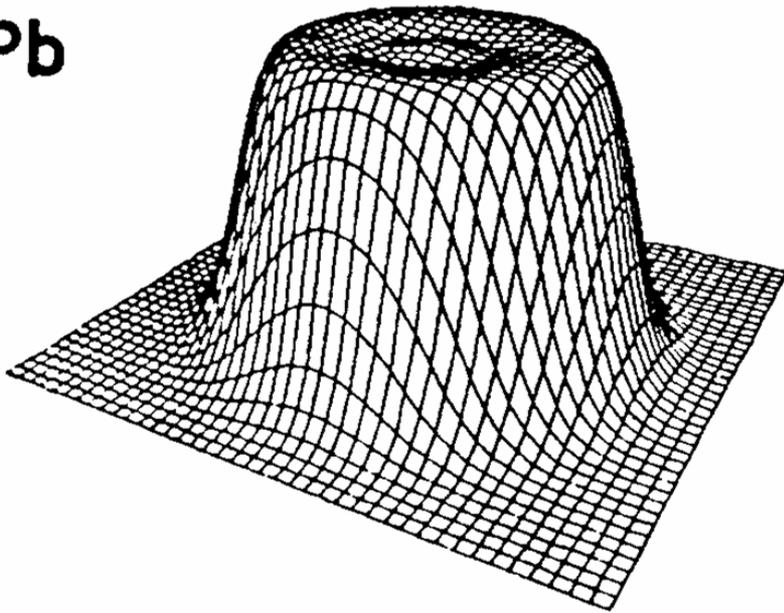
$$R = 1,07(2)A^{1/3} \text{ fm}$$

$$\Delta\rho = 0,9\rho_0 \text{ a } 0,1\rho_0 \Rightarrow$$

$$t = 4,39d = 2,4(3) \text{ fm}$$

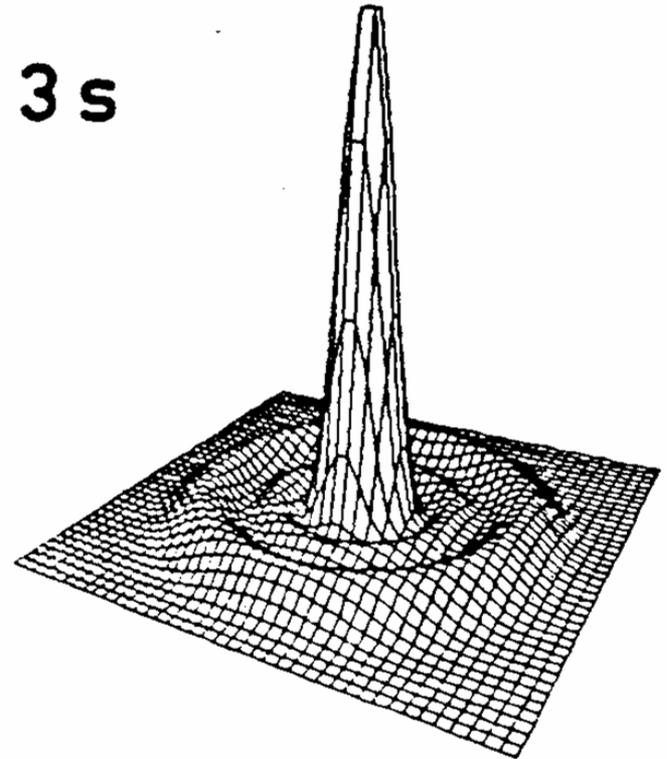


^{206}Pb

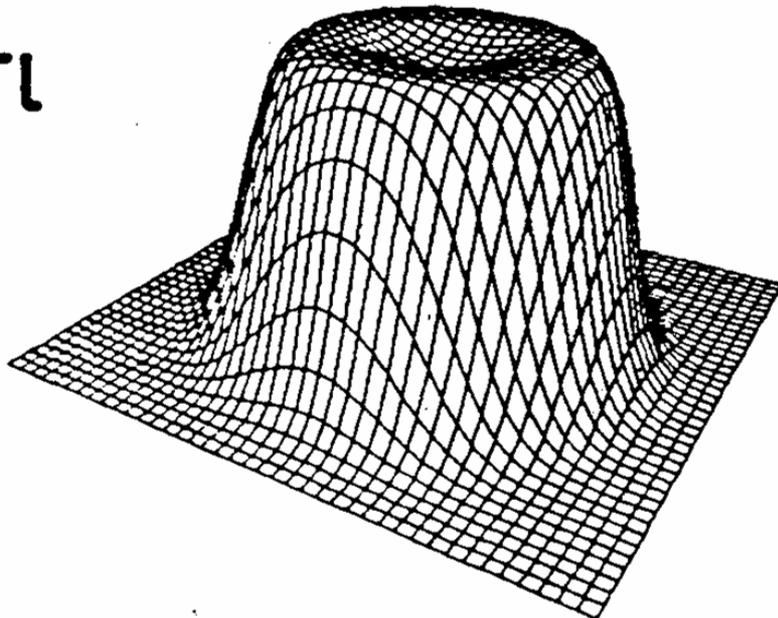


Densidade de carga do próton na
camada 3s do ^{206}Pb

3s



^{205}Tl



Determinação da massa nuclear

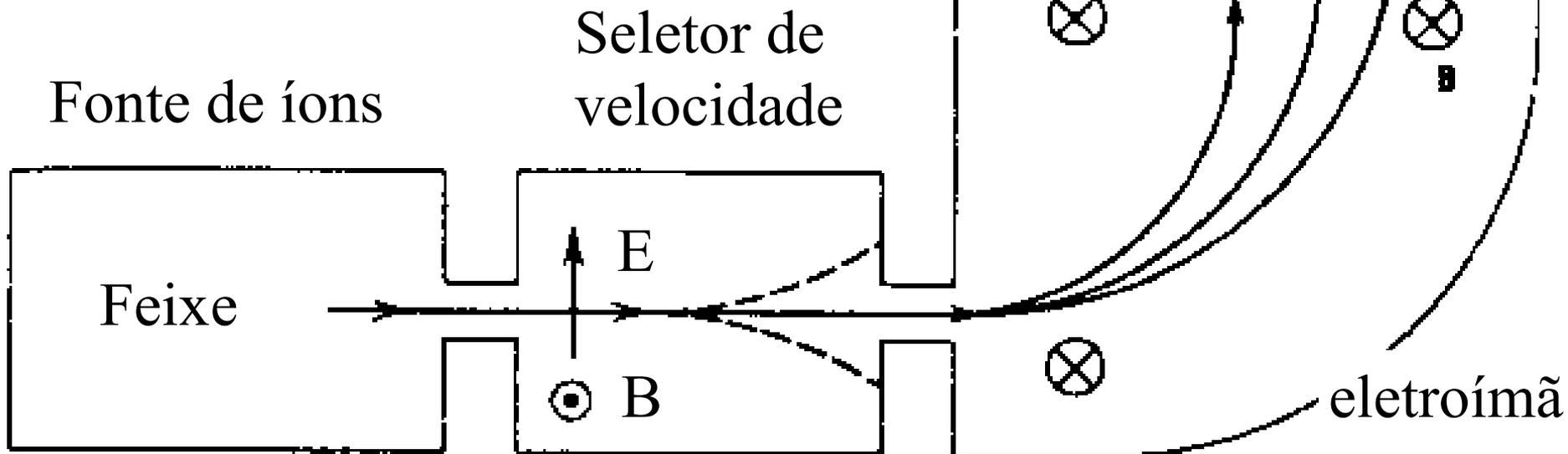
$$E_{\text{lig}} = \Delta Mc^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - M_{\text{núcl}} c^2$$

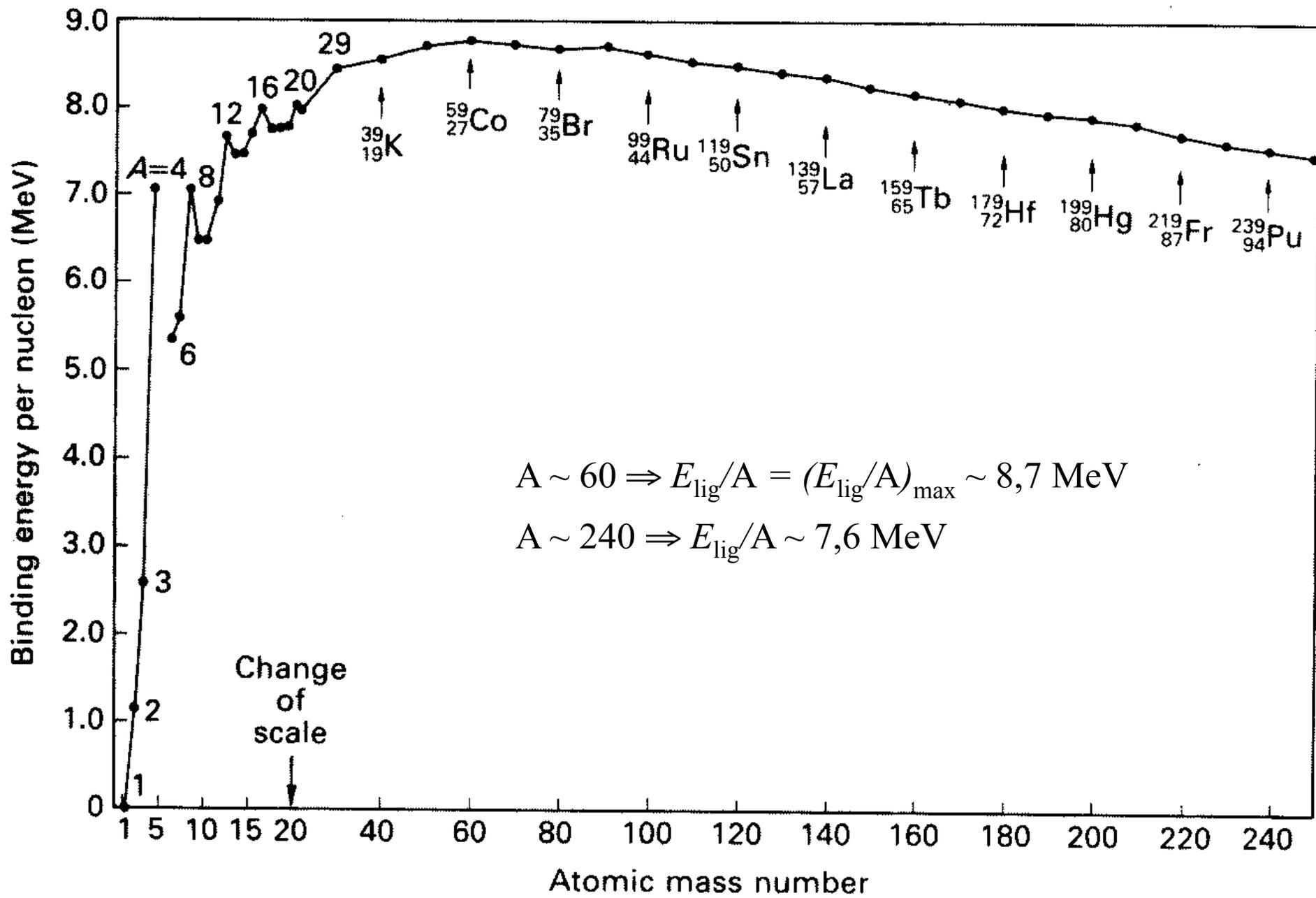
$$E_{\text{lig}} = \Delta Mc^2 = ZM_{\text{H}} c^2 + Nm_n c^2 - M_{\text{átomo}} c^2$$

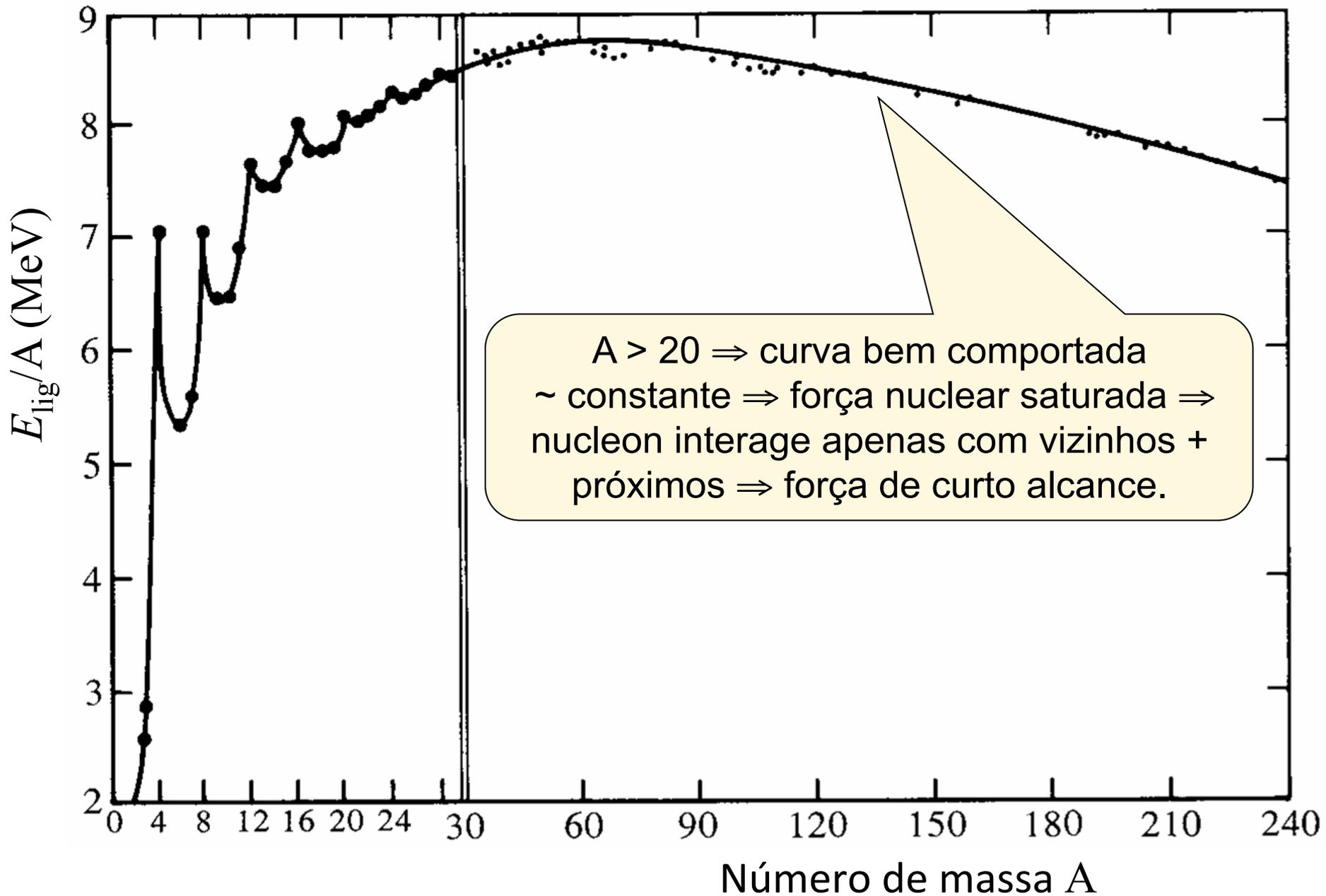
Desprezando a energia de ligação dos e^- .

detectores

Espectrômetro de massa





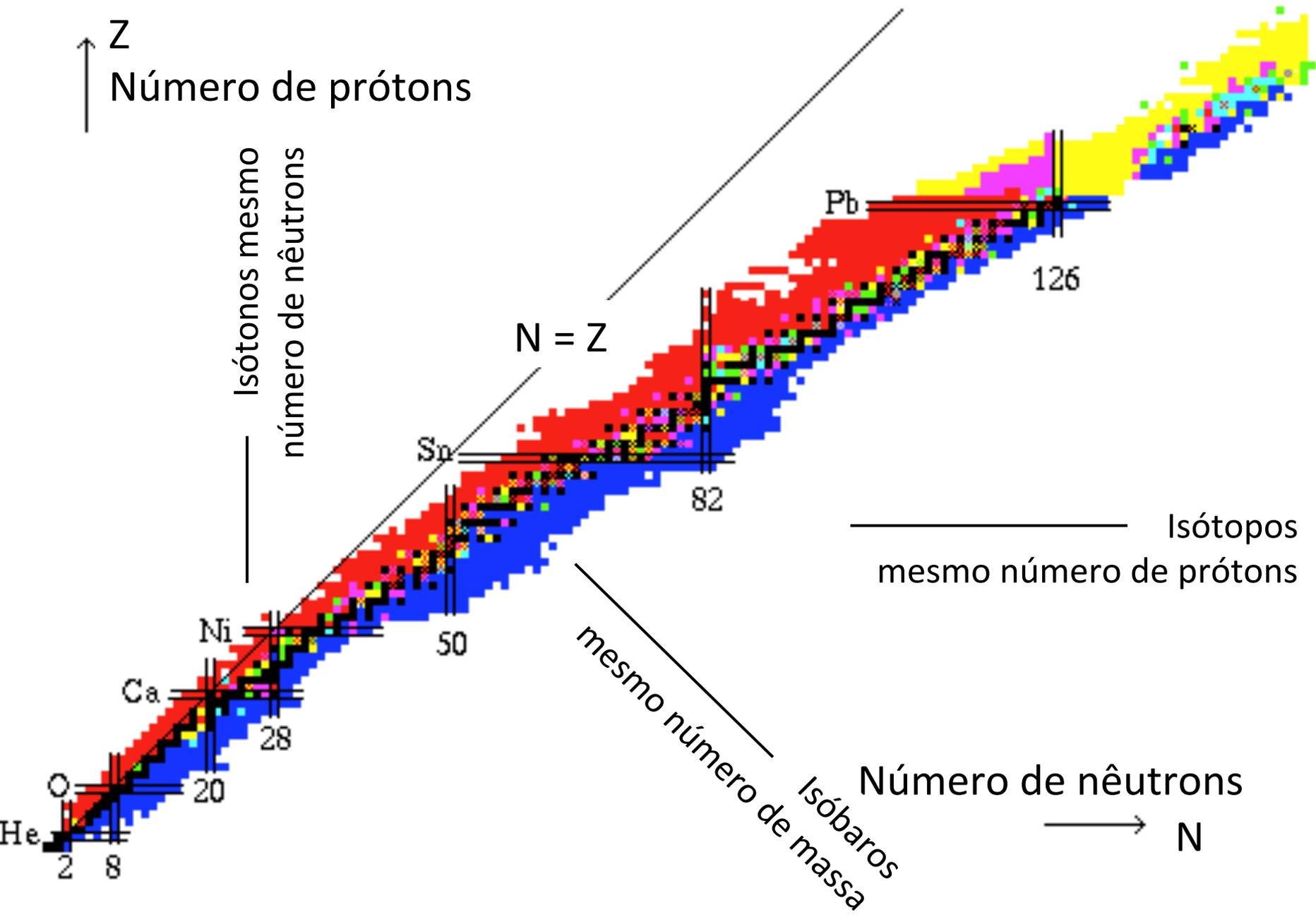


Estabilidade nuclear

De ~ 3000 núclídeos conhecidos, apenas cerca de 290 são estáveis. Os outros sofrem algum tipo de decaimento radioativo, transformando-se em outro núclídeo.

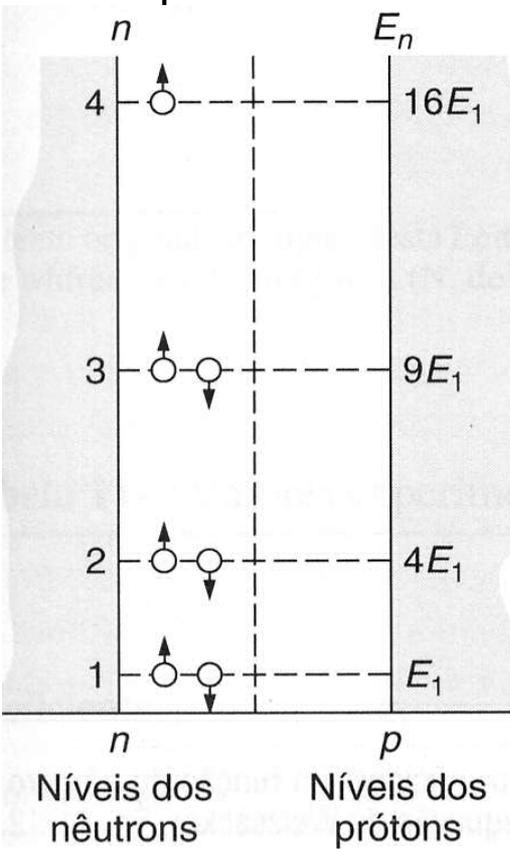
Um gráfico de $N \times Z$ mostra que os núclídeos estáveis se distribuem ao longo de uma curva, conhecida como linha de estabilidade (ou vale de estabilidade, pois corresponde a uma região de mínimo de massa).

Essa curva é próxima da curva $N = Z$, para A baixo, tendendo a se afastar para $N > Z$, com o crescimento de A .



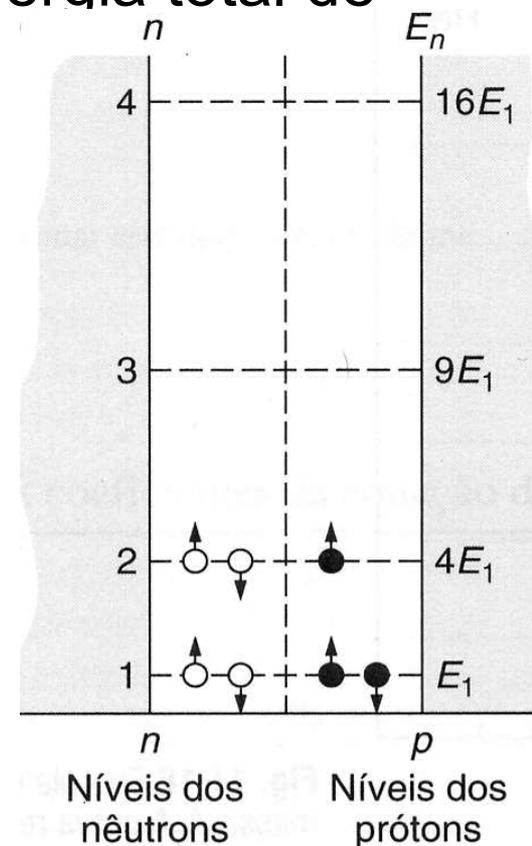
Estabilidade nuclear

Consideremos um conjunto de 7 nucleons em um poço de potencial 1D: se todos fossem nêutrons, estariam distribuídos como mostrado na figura da esquerda, com energia total de $44E_1$. Se $A/2$ deles forem de outro tipo, prótons, no caso, a distribuição fica como na Fig. da direita, com energia total de $16E_1$.

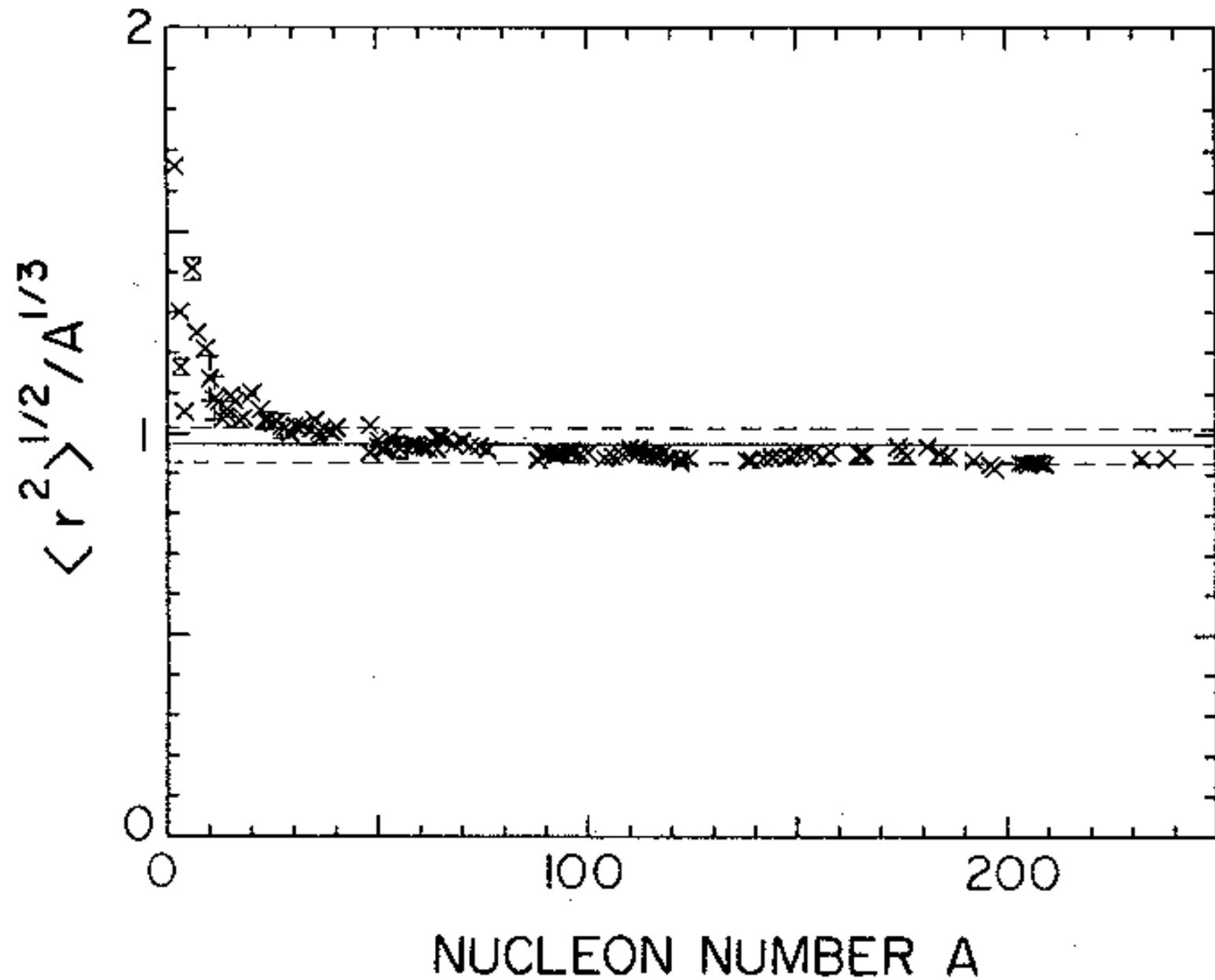


Dessa forma, vemos que a configuração $N = Z = A/2$ é a mais conveniente em termos de energia.

À medida que A aumenta, a repulsão coulombiana faz com que $N > Z$.



<i>A</i>	<i>N</i>	<i>Z</i>	Número de Núcleos Estáveis
par	par	par	166
	ímpar	ímpar	8
ímpar	par	ímpar	57
	ímpar	par	53



O modelo da gota líquida

$E_{\text{lig}}/A \sim \text{constante}$; $\rho_N \sim \text{constante} \Rightarrow$ gota

Weizsäcker (~1930) propôs um modelo que permite calcular a massa de um núcleo a partir de A e Z . Fórmula semi-empírica de massa \rightarrow analogia com gota líquida.

Gota líquida sem gravidade e sem rotação \Rightarrow forma esférica para minimizar a energia (tensão superficial). Líquido incompressível $\Rightarrow \rho = \text{cte}$, (indep. de R) $\Rightarrow R \propto n^{1/3}$ (número de moléculas na gota).

Molécula longe da superfície $\Rightarrow E_{\text{lig}} = a$ (devido às forças entre as moléculas). $E_{\text{lig}} = 0$ quando muito afastadas. Tensão superficial \Rightarrow moléculas próximas à superfície são menos ligadas $\Rightarrow E = an - 4\pi R^2 T$, com T sendo a tensão superficial.

$$\Rightarrow E_{\text{lig}} = an - \beta n^{2/3}.$$

O modelo da gota líquida

Se a gota está carregada \Rightarrow energia potencial eletrostática.

$$Q \text{ na superfície} \Rightarrow E_C = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

$$Q \text{ uniforme no volume} \Rightarrow E_C = \frac{3Q^2}{20\pi\epsilon_0 R}$$

$$\text{Portanto } E_{\text{lig}} = an - \beta n^{2/3} - \gamma Q^2/n^{1/3}$$

No caso do núcleo:

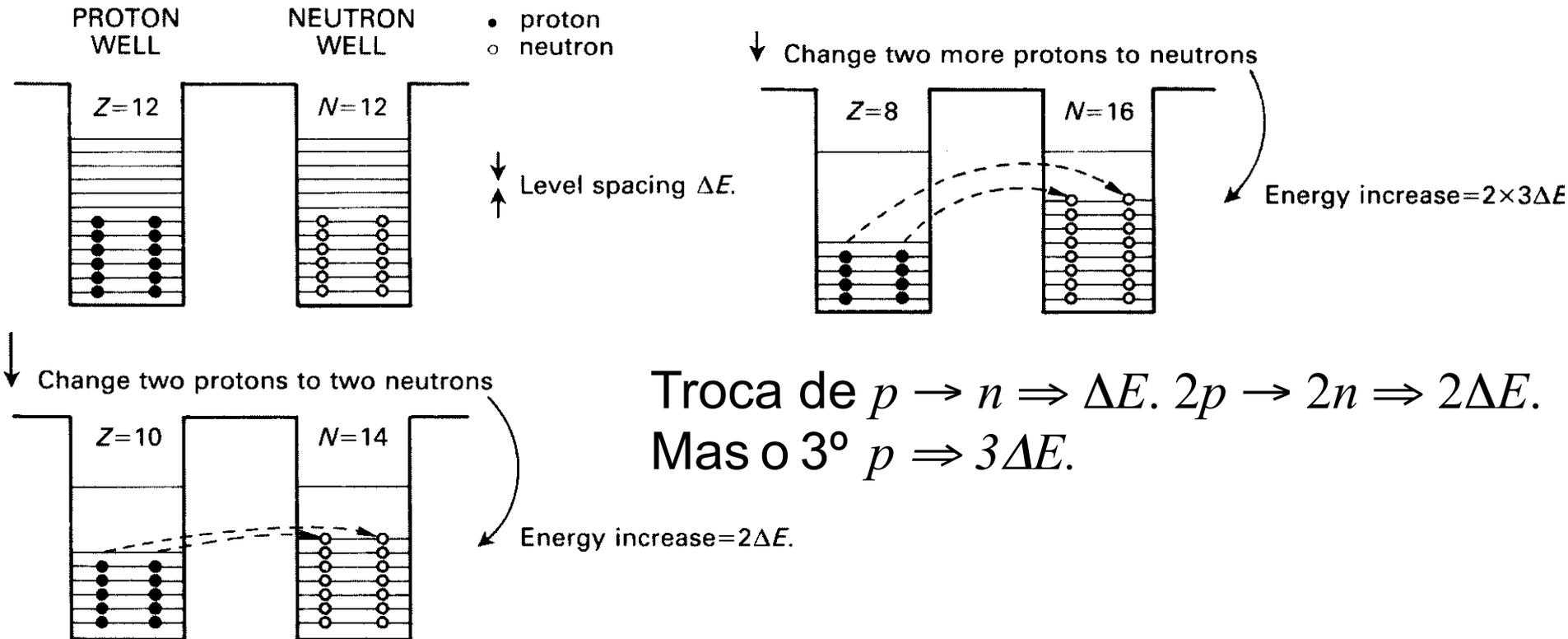
- Esférico;
- Interação entre os nucleons análoga à das moléculas na gota (forças de curto alcance – atrativas – e de alcance mais curto – repulsivas);
- Densidade nuclear é constante

$$\text{Substituindo } n \rightarrow A \text{ e } Q \rightarrow Ze \Rightarrow E_{\text{lig}}(Z,A) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C Z^2/A^{1/3}$$

O modelo da gota líquida

Faltam coisas, pois temos maior energia de ligação para $Z = 0$.
 Decaimento β : $n \rightarrow p$ e $p \rightarrow n$. Portanto, se isso valesse, núcleos com $Z \neq 0$ sofreriam decaimento $\beta \rightarrow Z = 0$.

Processo ligado a efeitos quânticos. Vejamos o que acontece quando trocamos prótons por nêutrons:



Dessa forma, temos:

$$N - Z = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, \dots$$

$$\Rightarrow \Delta E \times 1, 2, 5, 8, 13, 18, 25, \dots$$

A mudança de $N - Z = 0$ para $N > Z$, com $N + Z = \text{cte}$, necessita de uma energia $\sim (N - Z)^2 \Delta E / 8$.

Como, para um poço, $\Delta E \propto V^{-1}$ (volume do poço) $\Rightarrow \Delta E \propto A^{-1}$.

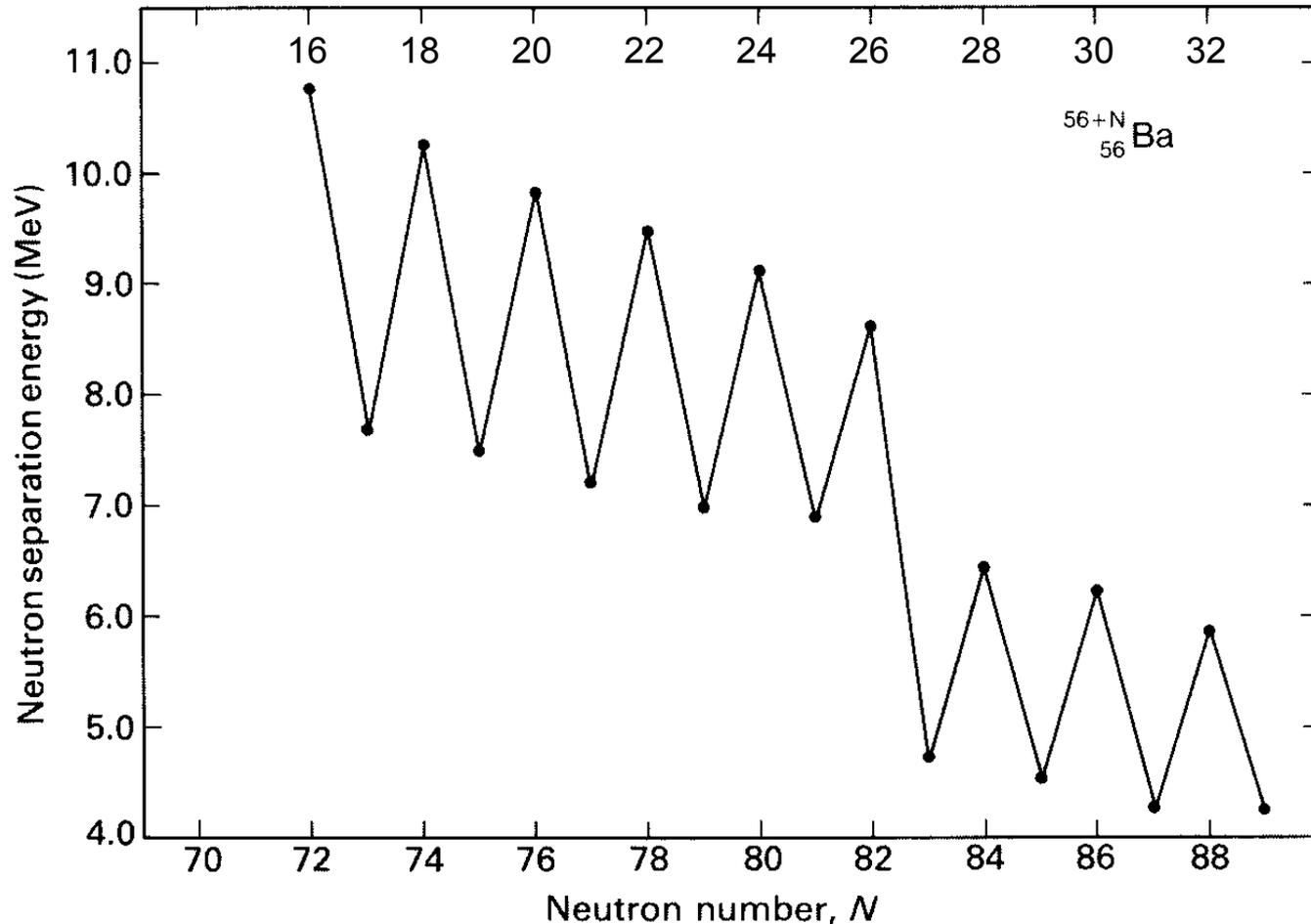
Termo de assimetria: $-a_A (Z - N)^2 / A$.

Falta ainda o termo de emparelhamento: p e n ficam mais ligados quando aos pares (spins antiparalelos). Assim:

- se A é ímpar (Z ímpar e N par, ou Z par e N ímpar) esse termo é nulo.
- se A é par, temos 2 casos:
 - ímpar-ímpar (caso 1)
 - par-par (caso 2)

A energia de ligação é maior no caso 2 do que no 1. O termo de emparelhamento é então adicionado à energia de ligação para casos par-par e subtraído nos ímpar-ímpar:

$$\delta(Z,A) = a_p/A^{1/2}, \text{ com } a_p = 12 \text{ MeV}$$



Ficamos então, com a expressão para a energia de ligação:

$$E_{\text{lig}} = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C Z^2/A^{1/3} - a_A (A - 2Z)^2/A \pm \delta(Z, A), \text{ com:}$$

$$a_V = 15,56 \text{ MeV};$$

$$a_S = 17,23 \text{ MeV};$$

$$a_C = 0,697 \text{ MeV};$$

$$a_A = 23,285 \text{ MeV};$$

$$a_P = 12 \text{ MeV}.$$

