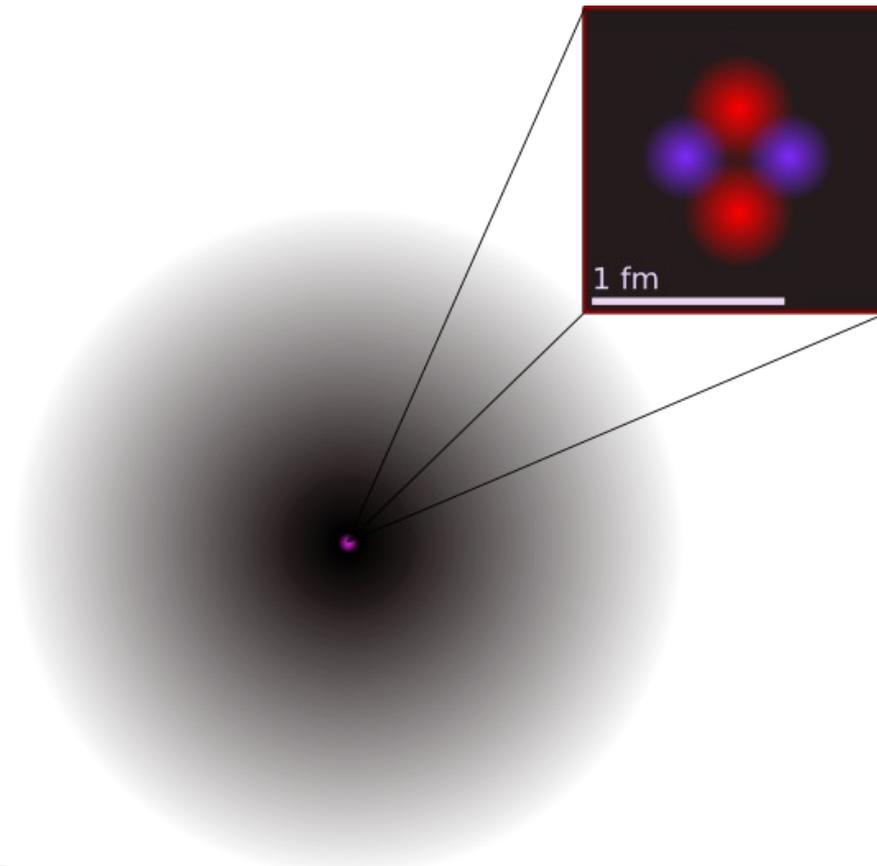


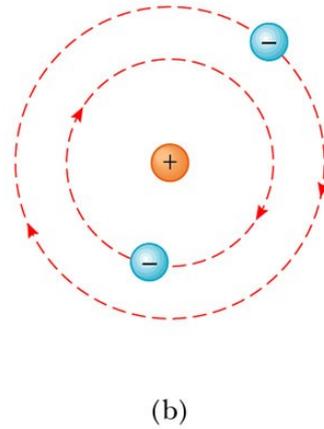
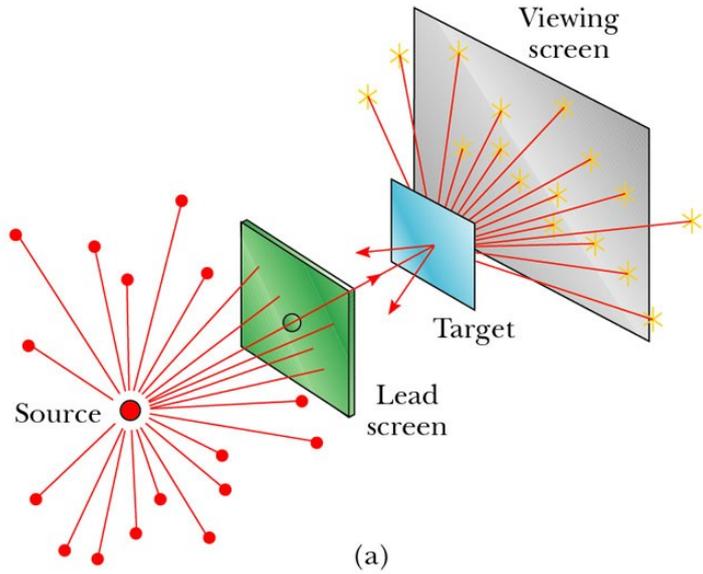
Física Nuclear 1: O núcleo atómico



1 Ångström (=100,000 fm)

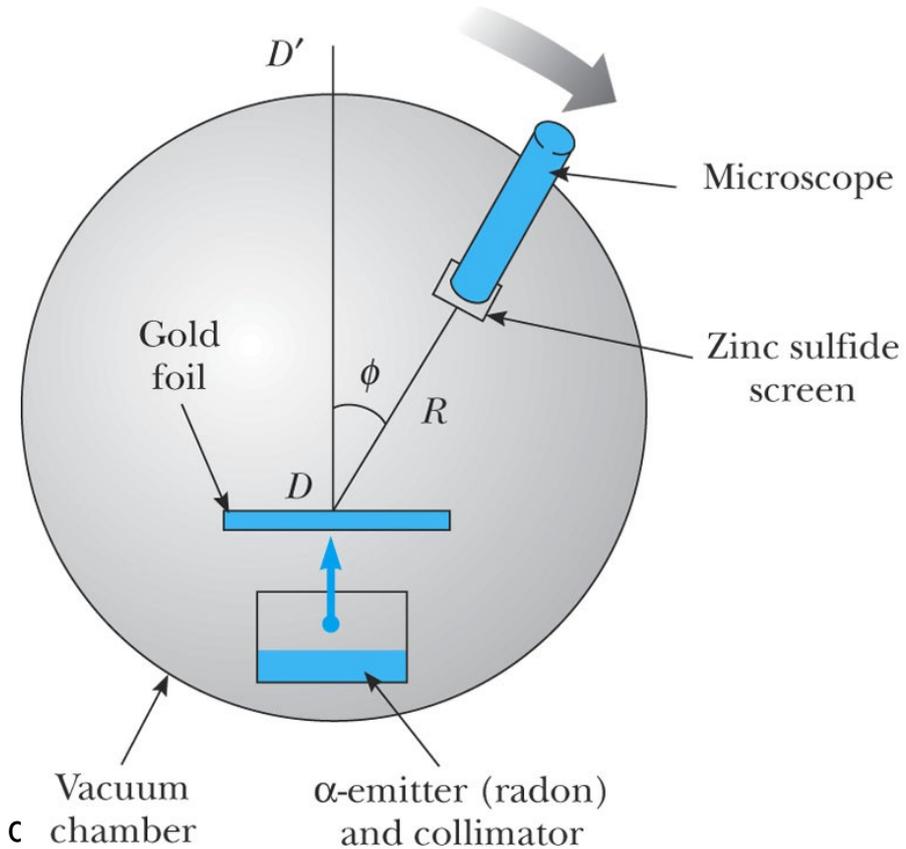
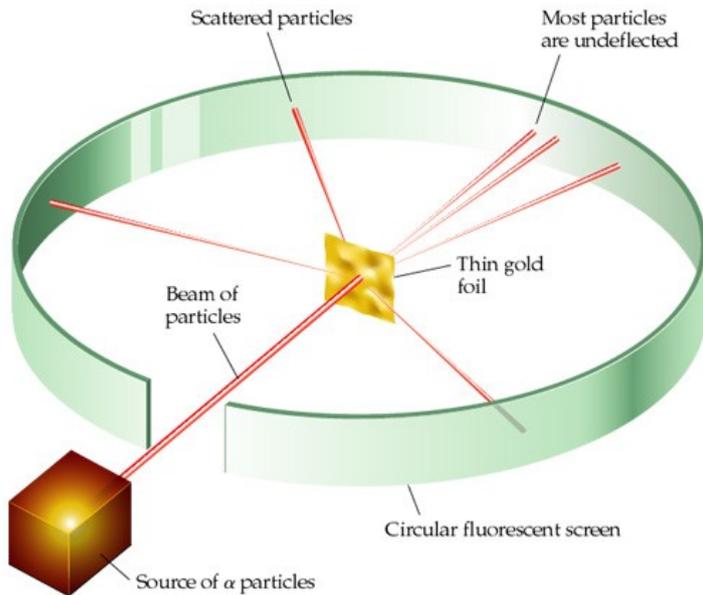
L. Peralta

Experiência de Geiger-Marsden-Rutherford



As partículas α podiam ser deflectidas com ângulos superiores a 90°

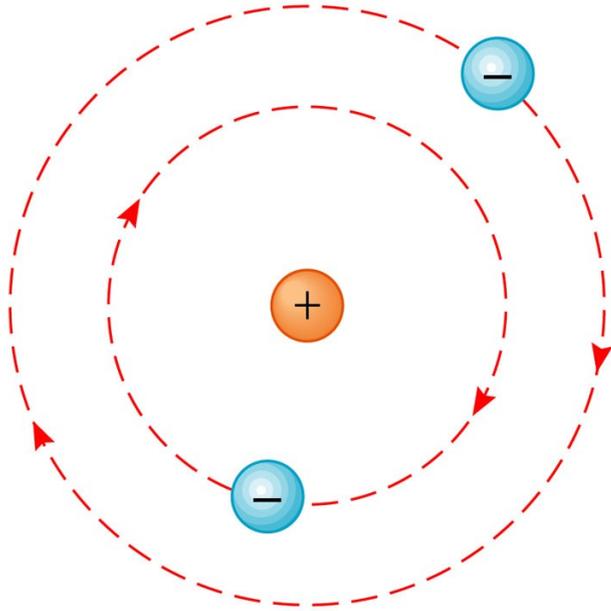
© 2006 Brooks/Cole - Thomson



JL- Acção de Formação c

© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Átomo de Rutherford



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Os electrões orbitam em torno do núcleo

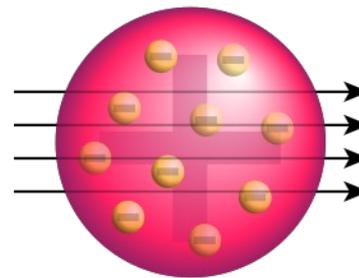
O núcleo:

encontra-se no centro do átomo

contêm a maioria da massa do átomo

o núcleo é muito menor que o átomo

O modelo de Rutherford explica as deflexões a grandes ângulos das partículas α .



Modelo Thomson



Modelo Rutherford

Electrões dentro do núcleo ?

- O núcleo não pode ser só constituído por protões: a repulsão colombiana deveria levar à separação dos nucleões.
- Não há evidencia de uma força mais forte que a electromagnética entre protões e electrões.
- O momento do electrão dentro do núcleo deveria ser “demasiado elevado”

$$\Delta x \approx 10^{-14} \text{ m} \Rightarrow \Delta p \geq \frac{1}{\Delta x} \frac{h}{4\pi} \sim 10 \text{ MeV}/c$$

O **spin nuclear** não está de acordo com a existência de Z prótons e A-Z electrões

Exemplo: Deutério Z=1, A=2 o que implicaria 1 electrão no núcleo

Três partículas de spin 1/2 => S=1/2, 3/2
(usando as regras do acoplamento de spins 2 a 2)

Mas spin deuterão = 1 !

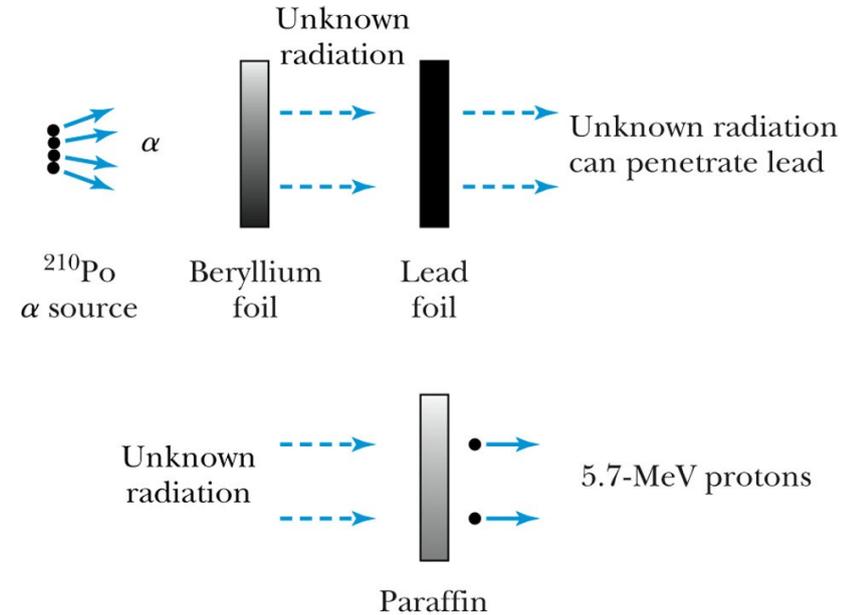
Momento magnético $\mu = \frac{e\hbar}{2m} L$

Como a massa do electrão é muito menor que a do próton o momento magnético do núcleo seria dominado pelo momento magnético dos electrões do núcleo.

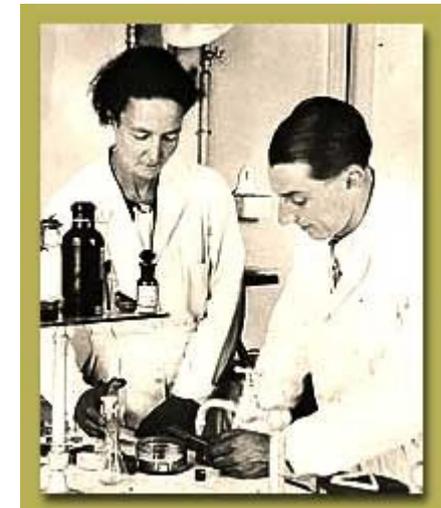
Verifica-se que $\mu_n \sim \frac{1}{2000} \mu_e$

Descoberta do neutrão

1930 Bothe and Becker na Alemanha realizam experiências com fontes de polónio que bombardeiam alvos de berílio. Descobrem a produção de uma radiação muito penetrante. Pensaram tratar-se de fotões gama.



Irene e Frédéric Joliot-Curie mostram que quando esta radiação desconhecida bombardeava parafina eram ejetados protões. Mas não interpretaram correctamente o resultado da experiência....



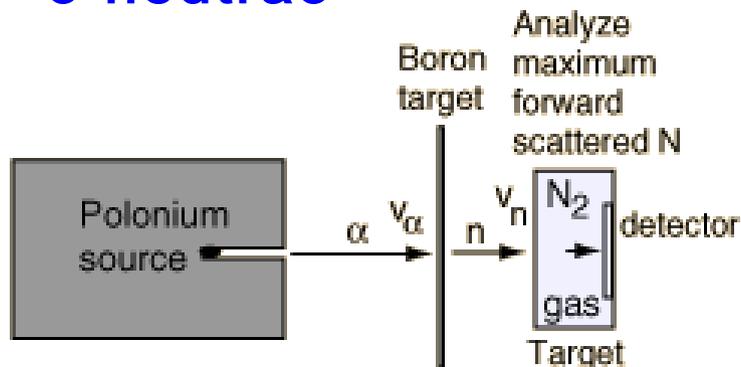
1932 James Chadwick descobre o neutrão



Chadwick realiza experiências com outros absorvedores e consegue provar que a misteriosa radiação não pode ser fótons gama.

Da análise baseada na conservação da energia momento conclui que a radiação desconhecida deverá ter uma massa da ordem da massa do próton, mas não possui carga eléctrica

=> **o neutrão**



Qual é o tamanho do núcleo ??

Qual é o aspecto do núcleo ??

Como definir raio?

O núcleo será homogéneo?

Haverá uma camada superficial?

Como medir estas grandezas ??



Difracção de electrões

Raios X muónicos

Desvios em espectros de raios-X e visível

Diferenças de energia em núcleos espelho

Interacção E.M. => distr. de carga

ver K. Krane

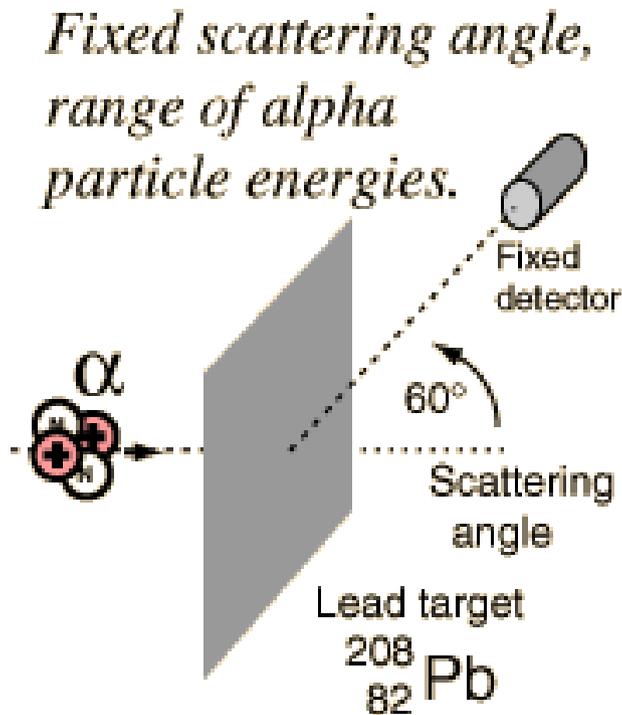
Difusão de Rutherford

Decaimento alfa

Raios X átomos piónicos

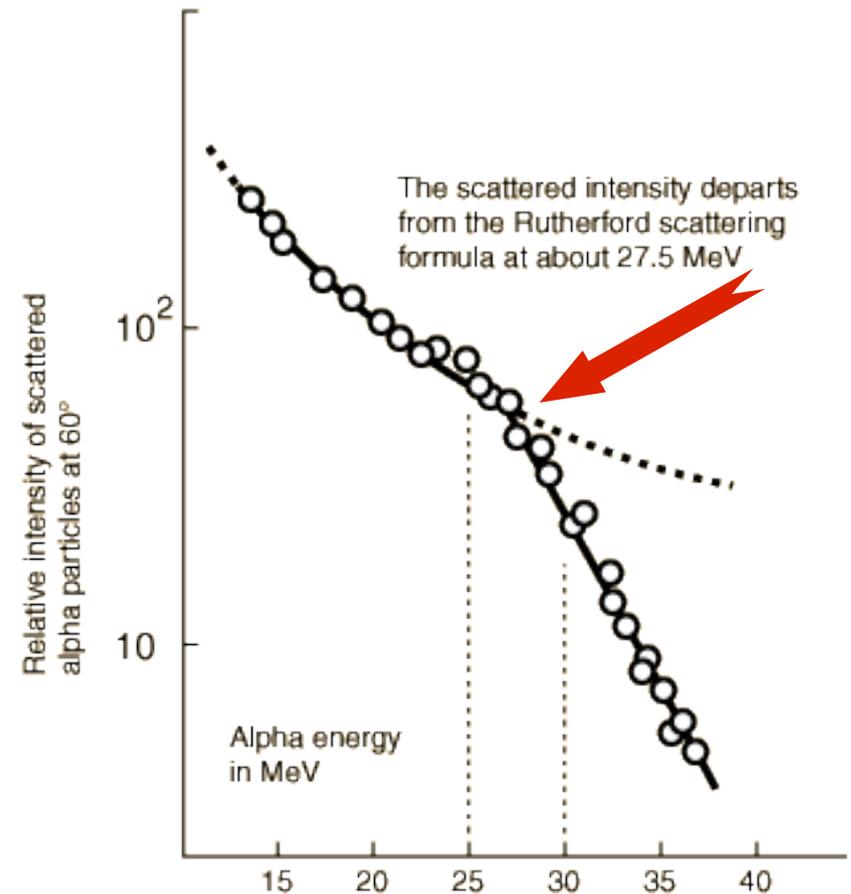
Interacção forte => distr. massa

Dispersão de Rutherford e a dimensão do núcleo



origem: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/rutsca3.html>

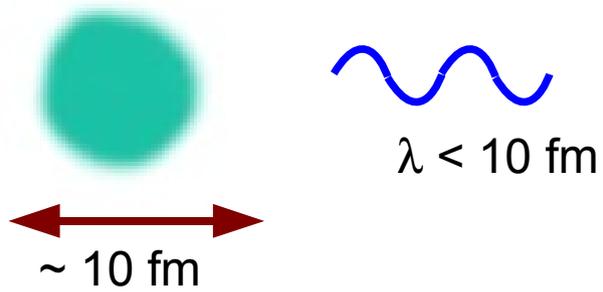
Dispersão a um **ângulo fixo**
mas **energia variável**



origem: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/rutsca3.html>

A partícula alfa “sente” a força nuclear quando a aproximação ao núcleo é grande (ie consegue vencer a repulsão colombiana)

Princípio da difracção de electrões



$$\lambda = \frac{h}{p}$$

comprimento de onda de De Broglie

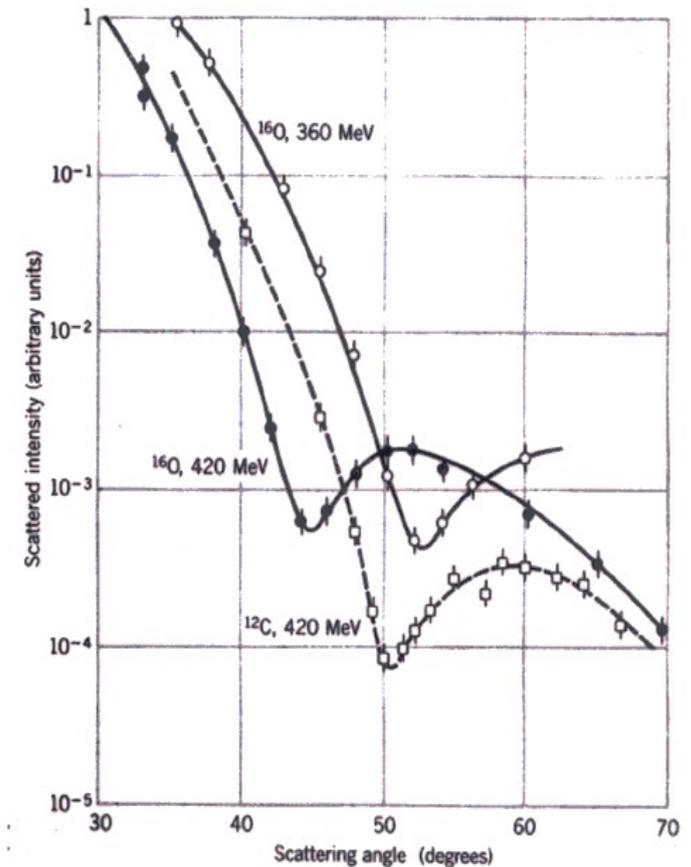
$$\theta_{min} = \sin^{-1} \left(\frac{1,22 \lambda}{D} \right)$$

Mínimos difracção por uma abertura circular

Exemplos:

$^{12}\text{C} \Rightarrow 2.3 \text{ fm}$

$^{16}\text{O} \Rightarrow 2.6 \text{ fm}$



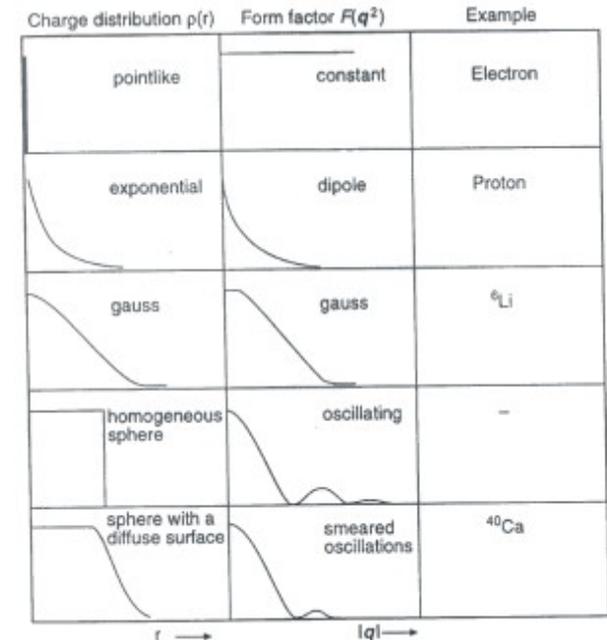
Distribuição da carga no núcleo

Secção eficaz carga pontual.
Calculada teoricamente

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 G_E^2(q^2)$$

Distr. Experimental

Factor de forma
Dá informação sobre a
distribuição de carga

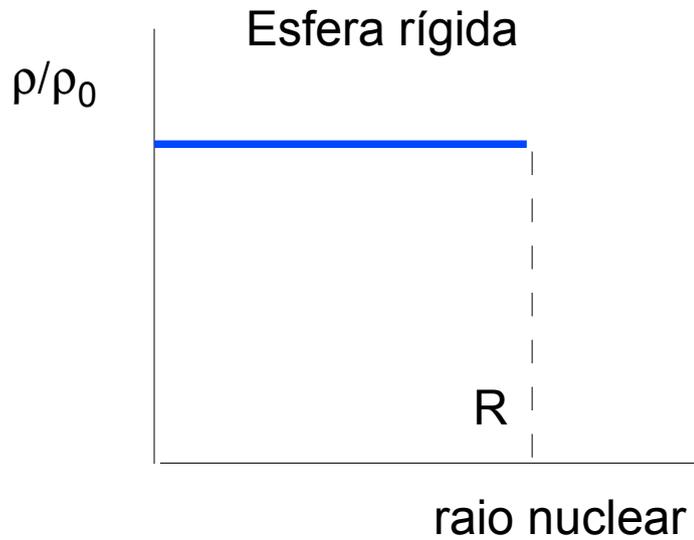


$$\bar{r}^2 = -6 \frac{dG_E}{dq^2} \Big|_{q^2=0}$$

Medida experimental

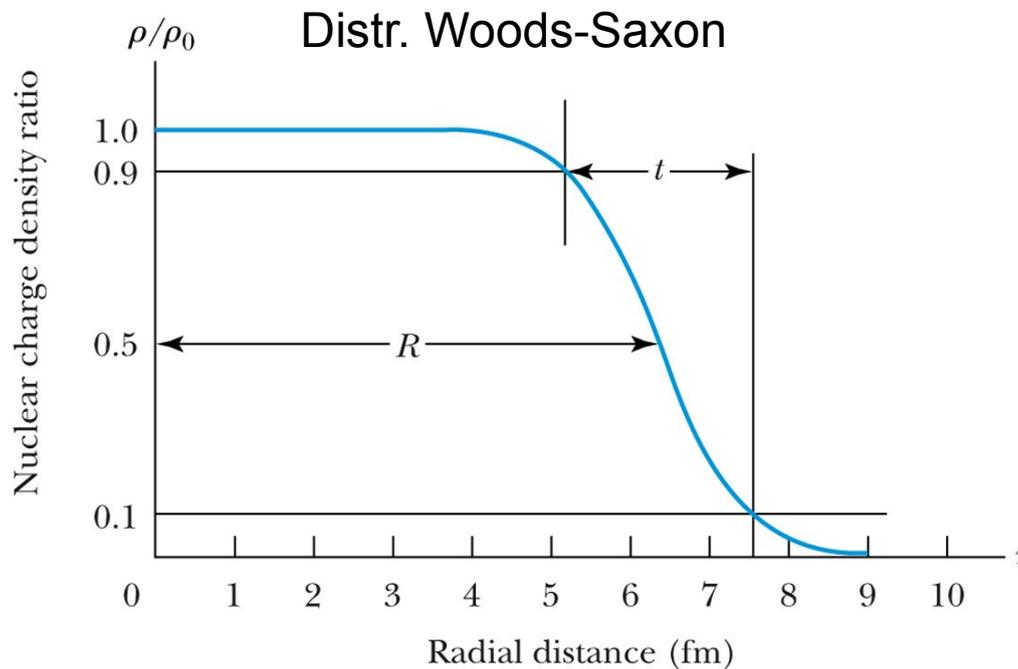
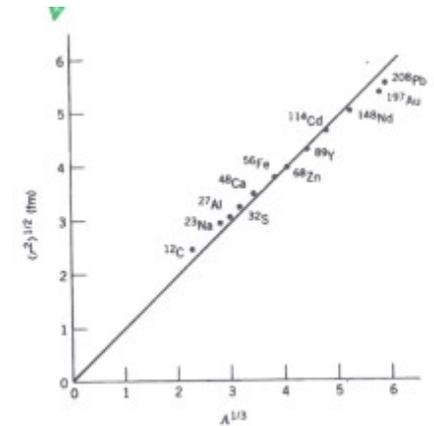
Raio quadrado médio

Modelos da distribuição da matéria nuclear



$$\frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} \sim \text{cte}$$

$$\Rightarrow R = R_0 A^{1/3}$$



$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{t}\right)}$$

$$\rho_0 \sim 0,165 \text{ nucleões/fm}$$

$$R_0 \sim 1,07 A^{1/3} \text{ fm}$$

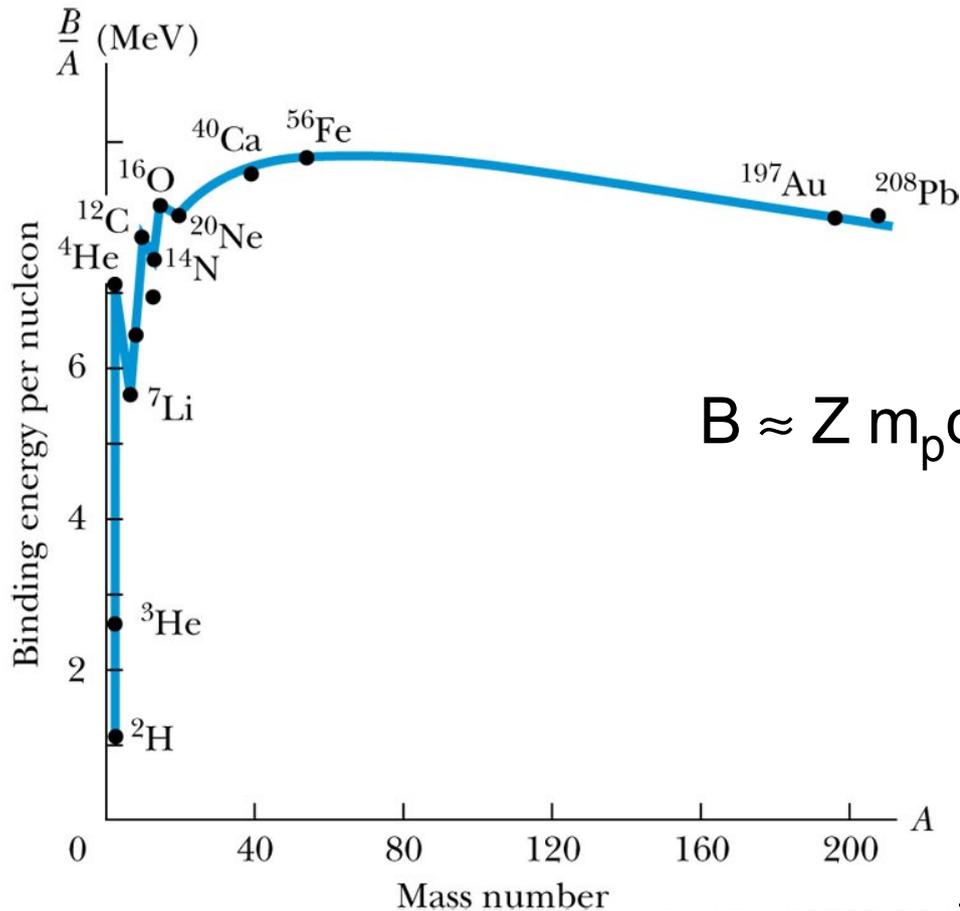
$$t \sim 0,55 \text{ fm}$$

Energia de ligação

$$M_{\text{at\u00f3mica}} c^2 = Z m_p c^2 + (A-Z) m_n c^2 + Z m_e c^2 - B - B_a$$

↙ ↘ Energia liga\u00e7\u00e3o nuclear
 ~ 1 MeV a 1000 MeV

↙ ↘ Energia liga\u00e7\u00e3o at\u00f3mica
 ~ 10 eV a 100 keV



$$B \approx Z m_p c^2 + (A-Z) m_n c^2 + Z m_e c^2 - M_{\text{at\u00f3mica}} c^2$$

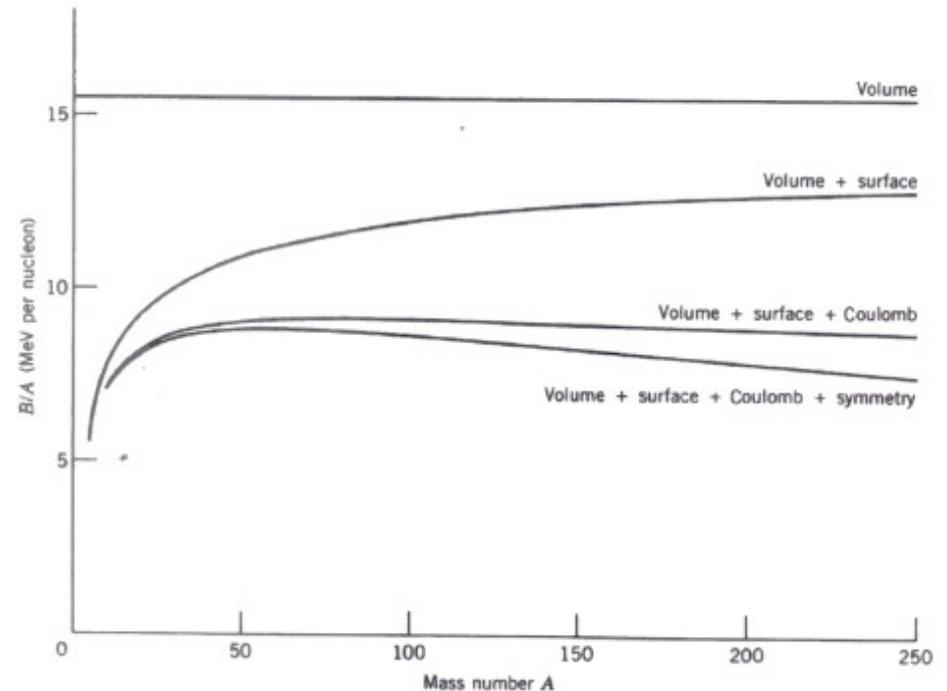
Energia de ligação: fórmula semi-empírica de massa

$$B/A \approx \text{Cte} \Rightarrow B = +a_v A$$

Se todos os nucleões interactuassem com todos os outros nucleões esperávamos um termo proporcional a $A(A-1)$

=> Só os 1os vizinhos contam

=> indicação de uma interacção a curta distância



Os nucleões da superfície do núcleo têm menos vizinhos.

Logo estão menos ligados.

$$\text{Area} \approx 4 \pi R^2 \propto A^{2/3}$$

=> Diminuição da energia de ligação

$$-a_s A^{2/3}$$

Os prótons têm carga eléctrica

=> diminuição da energia de ligação
devida à repulsão electrostática

=> considerando o núcleo como uma
esfera uniformemente carregada

=> diminuição da energia de ligação

$$E = -\frac{3}{5} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z^2 e^2}{R^2}$$

$$-a_c Z(Z-1) A^{-1/3}$$



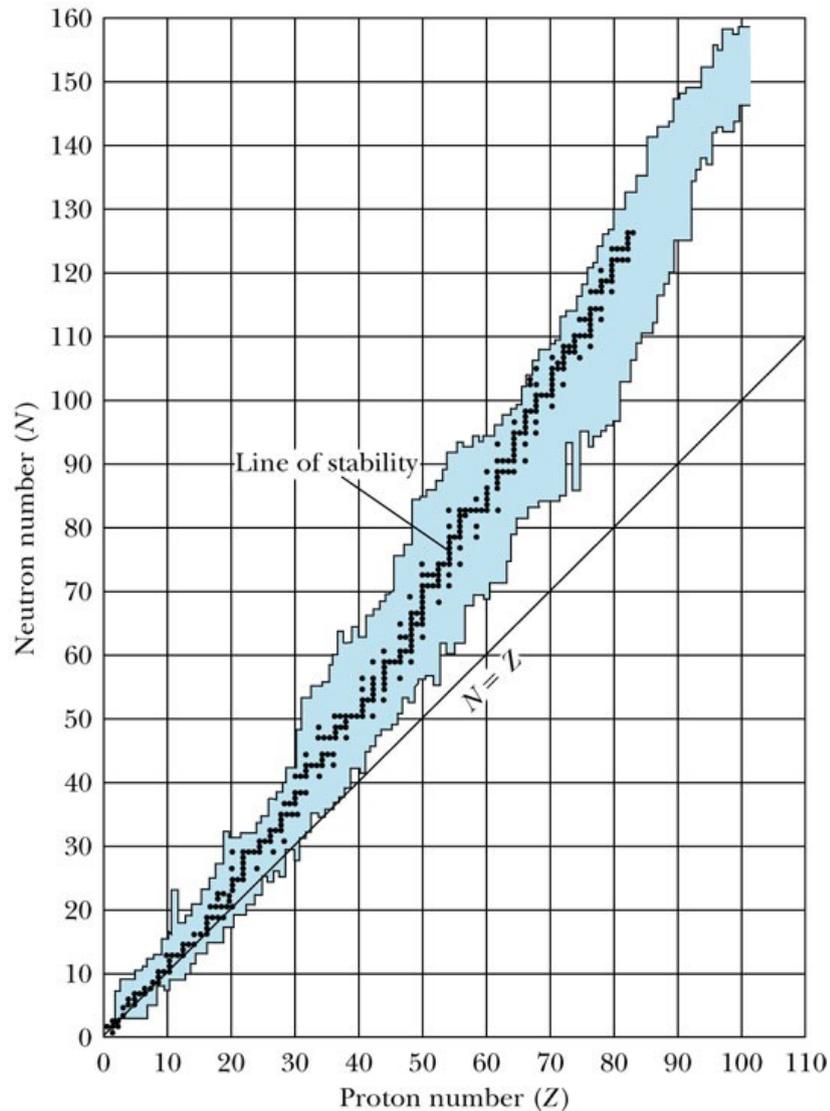
núcleo não é
exactamente esférico!

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1) A^{-1/3}$$

**Modelo de gota
líquida**

Mas existem outros factores que influenciam a energia de ligação

Diagrama de Segré: curva de estabilidade nuclear



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Para Z pequeno os núcleos estáveis são os que $Z \approx A/2$

$$-a_s \frac{(A - 2Z)^2}{A} \quad \text{termo de simetria}$$



Reduz a importância do termo para A elevado

Fórmula semi-empírica de massa de Von Weizsäcker



$$\delta = \begin{cases} +a_p A^{-3/4} & Z, N \text{ pares} \\ 0 & A \text{ impar} \\ +a_p A^{-3/4} & Z, N \text{ impar} \end{cases}$$

Termo de emparelhamento

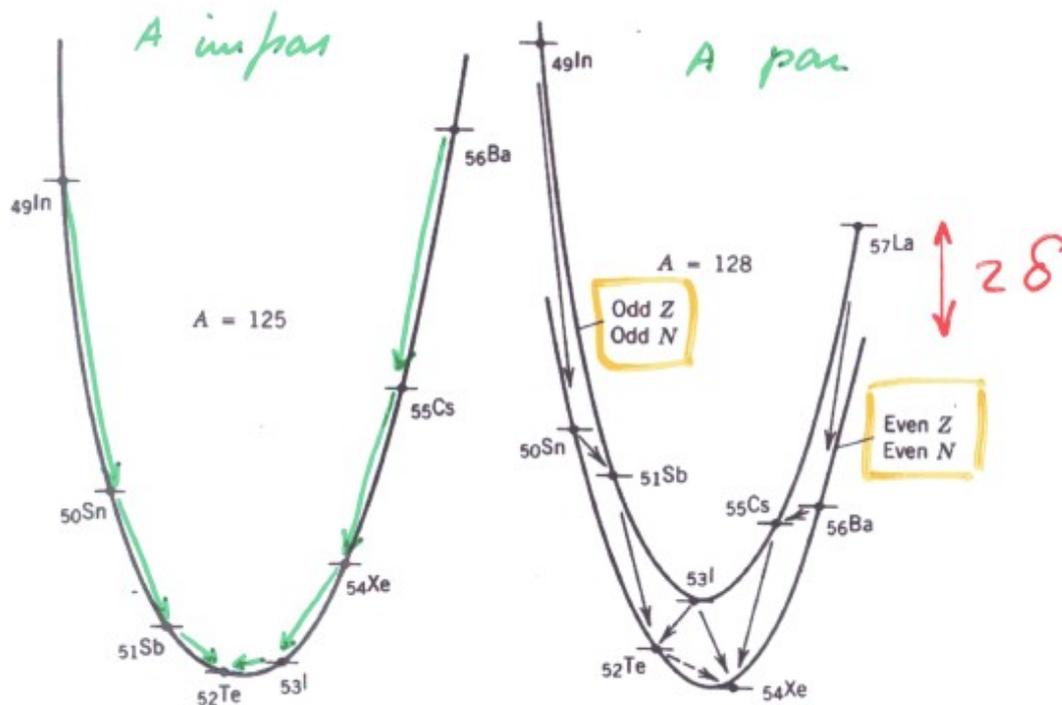
$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1) A^{-1/3} - a_s \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta$$

Estabilidade nuclear e parábolas de massa

mínimo de estabilidade

$$\frac{\partial M}{\partial Z} = (m_p + m_e) - m_n + 2a_c Z A^{-1/3} - a_c A^{-1/3} - 4a_s \frac{(A - 2Z)}{A} = 0$$

$$Z_{\min} = \frac{m_n - m_p - m_e + a_c A^{-1/3} + 4a_s}{2a_c A^{-1/3} + 8a_s A^{-1}} \approx \frac{A}{2} \frac{1}{1 + \frac{A^{2/3}}{4} \frac{a_c}{a_s}}$$



Para Z pequeno

$$Z_{\min} \approx A/2$$

Lei do decaimento radioactivo

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

λ constante de decaimento

Actividade

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

- Actividades *Curie, Ci*
1 Ci = 3.7×10^{10} decaimentos/s
 - SI *Becquerel, Bq*
1 Bq = 1 decaimento / s
- 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq

Lei do decaimento radioactivo

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = -\frac{dN}{N dt}$$

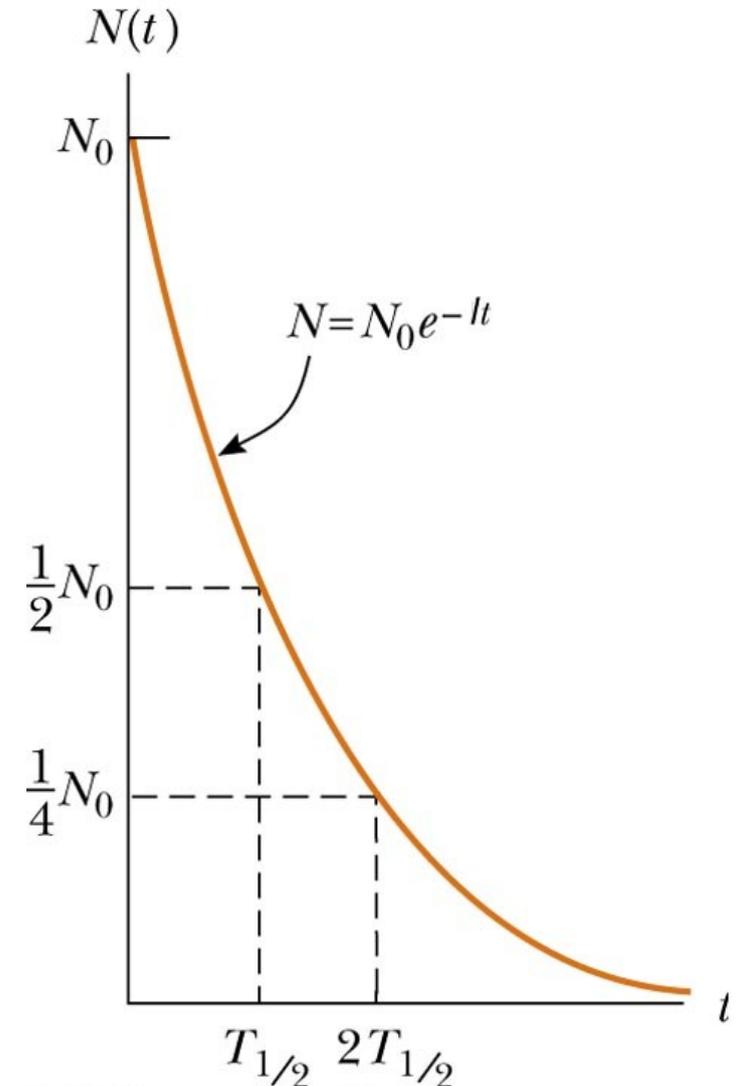
Probabilidade por unidade de tempo

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

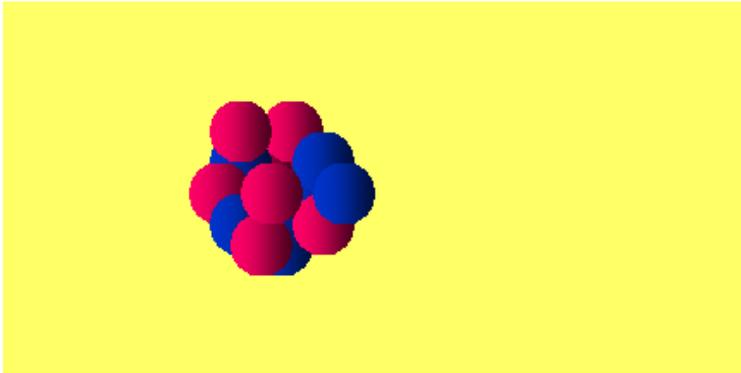
Vida-média = tempo médio que leva um núcleo a decair

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

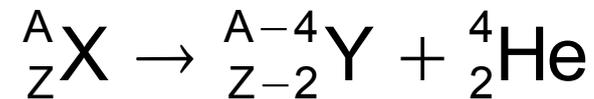
Período de semi-desintegração ou tempo de meia-vida



Decaimento alfa



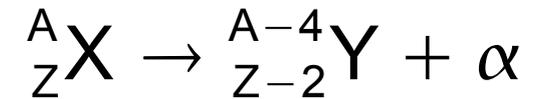
O núcleo desintegra-se emitindo uma partícula alfa = núcleo de hélio



- A repulsão colombiana aumenta com Z^2
- A partícula alfa é um estado muito estável
- Existem outras possibilidades de emissão de agregados nucleares mas são energeticamente menos favoráveis
- Existe decaimento alfa para **$A > 150$** e é dominante para **$A > 190$**

Energia disponível no decaimento

$$Q = \{M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - M(4, 2)\}c^2$$



O decaimento alfa é possível quando $Q > 0$

$$m_X c^2 = m_Y c^2 + T_Y + m_\alpha c^2 + T_\alpha \quad (+ E^*)$$

conservação da
massa-energia

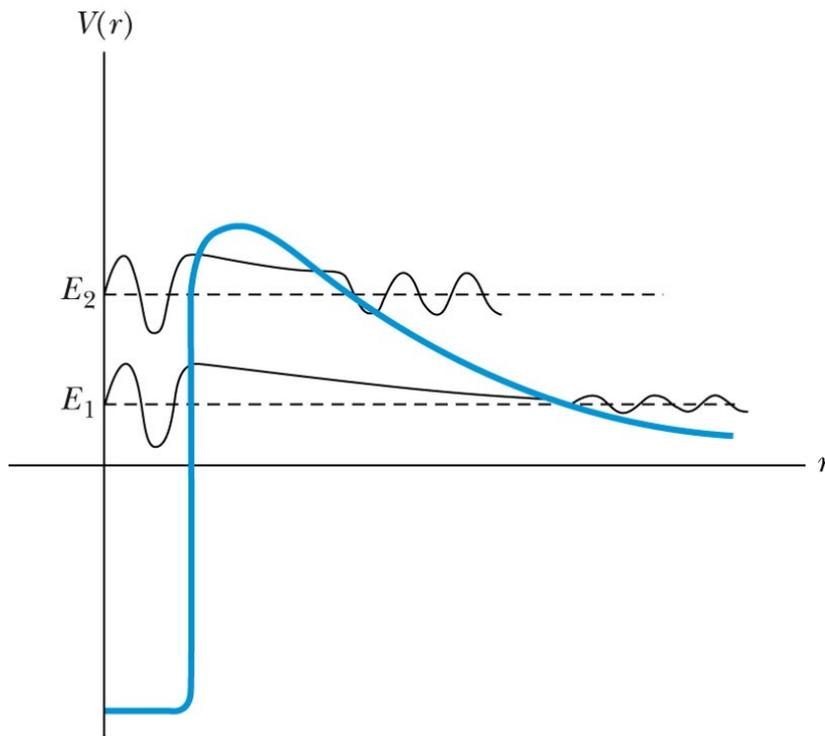
$$\vec{P}_Y = -\vec{P}_\alpha \quad \text{conservação do momento linear}$$

$$Q = T_Y + T_\alpha = \frac{P_Y^2}{2m_Y} + \frac{P_\alpha^2}{2m_\alpha}$$

Energia cinética da partícula alfa
(decaimento para o estado fundamental $E^*=0$)

$$T_\alpha = \frac{Q}{\left(1 + \frac{m_\alpha}{m_Y}\right)}$$

Passagem da barreira de potencial



Consideramos a partícula a pré-formada

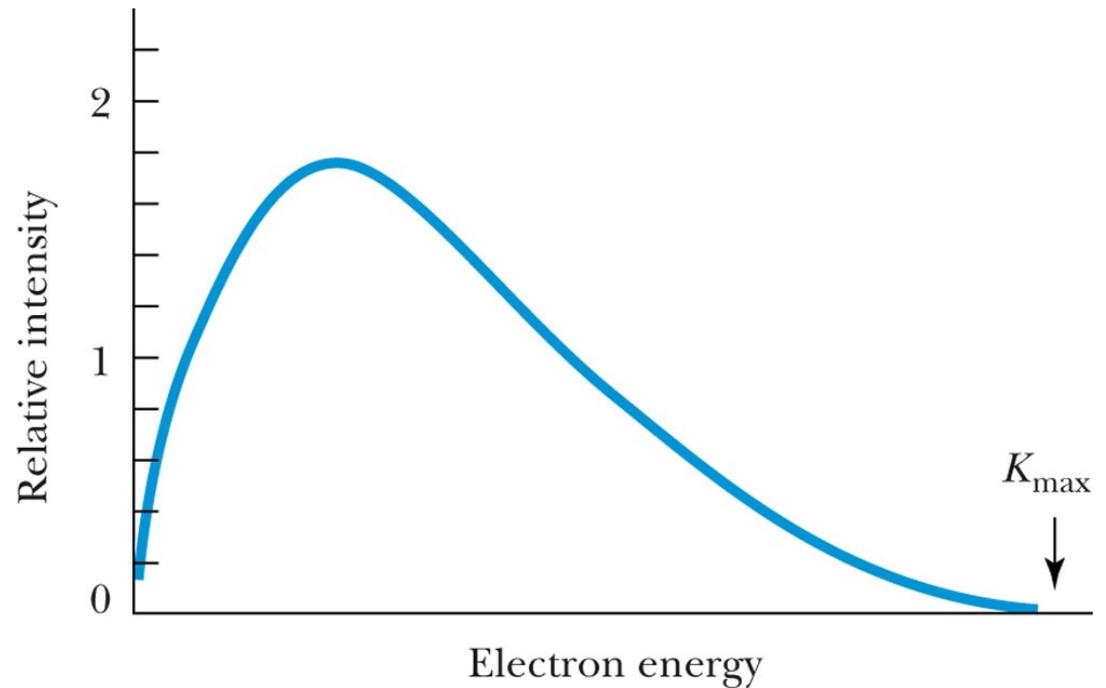
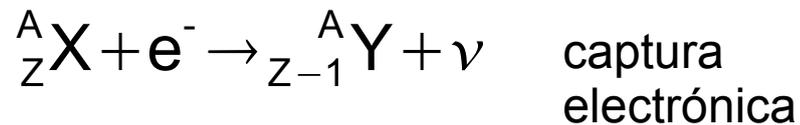
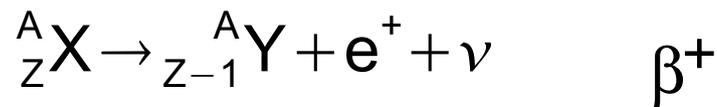
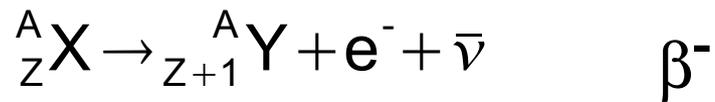
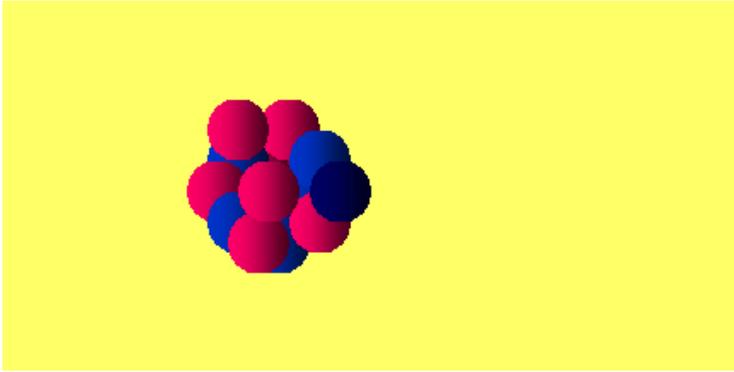
A partícula a não tem energia suficiente para vencer a barreira de potencial colombiana

A partícula a pode realizar mais de 10^{21} tentativas /s para sair do núcleo

Quanto maior é a energia da partícula a menos espessa é a barreira e maior a probabilidade de sair

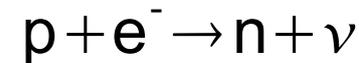
Maior energia disponível $Q \Rightarrow$ **Menor** tempo semi-vida

Decaimento beta



O espectro de energia continuo sugeriu a existência de uma partícula não identificada no decaimento

Na captura electrónica um electrão atómico é capturado dando-se a reacção:



Balanço energético

$$Q_{\beta^-} = \{m(A,Z) - m(A,Z+1) - m_e + (Zm_e - Zm_e)\}c^2 \quad (\text{massas nucleares})$$

$$Q_{\beta^-} = \{M(A,Z) - M(A,Z+1)\}c^2 \quad (\text{massas atómicas})$$

$$Q_{\beta^+} = \{m(A,Z) - m(A,Z+1) - m_e + (Zm_e - Zm_e)\}c^2$$

$$Q_{\beta^+} = \{M(A,Z) - M(A,Z+1) - 2m_e\}c^2$$

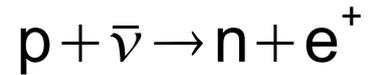
O decaimento β^+ é o energeticamente mais restritivo

$$Q_{CE} = \{m(A,Z) + m_e - m(A,Z-1) + (Zm_e - Zm_e)\}c^2$$

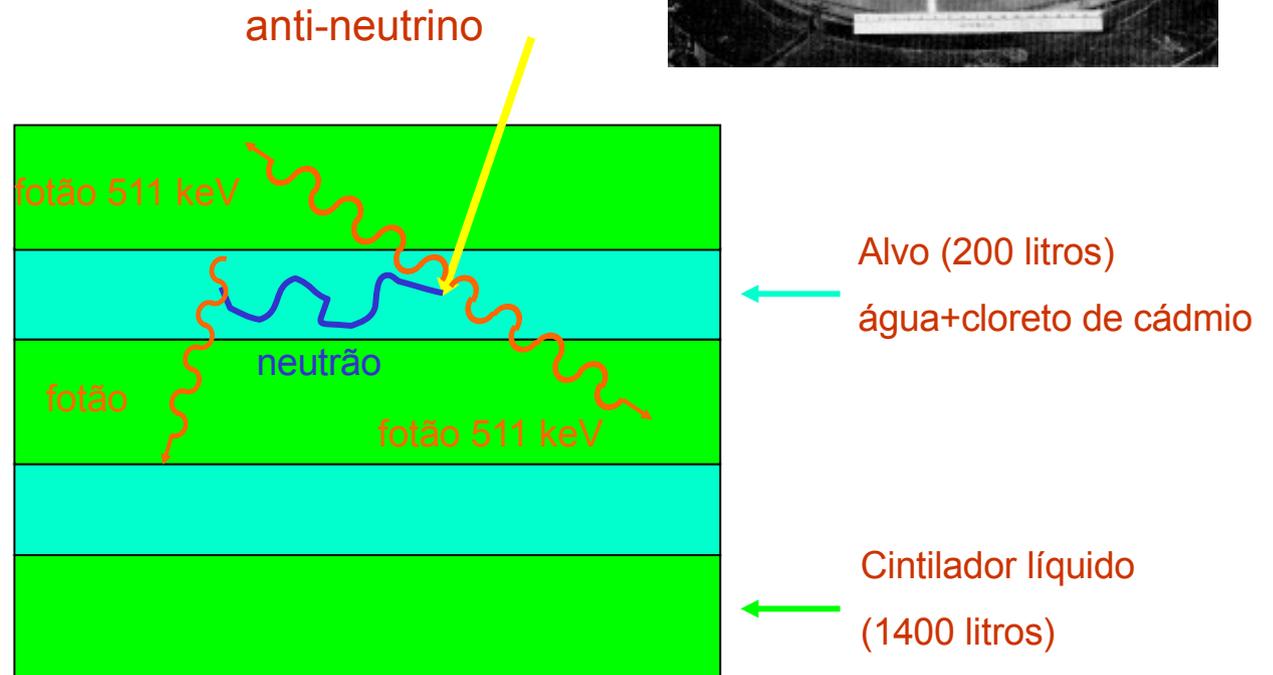
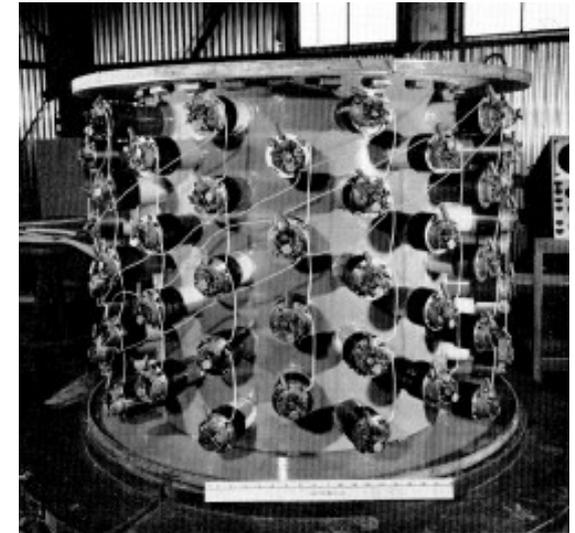
$$Q_{\beta^-} = \{M(A,Z) - M(A,Z+1)\}c^2$$

Descoberta do neutrino

Cowan & Reines 1953



reactor nuclear

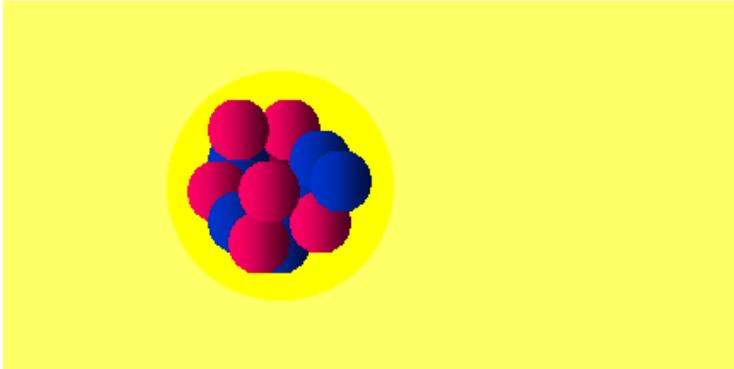


Livre percurso médio do neutrino produzido no reactor em água $\approx 2 \times 10^{14}$ km

(distância Terra-Sol = 1.5×10^8 km !!!)

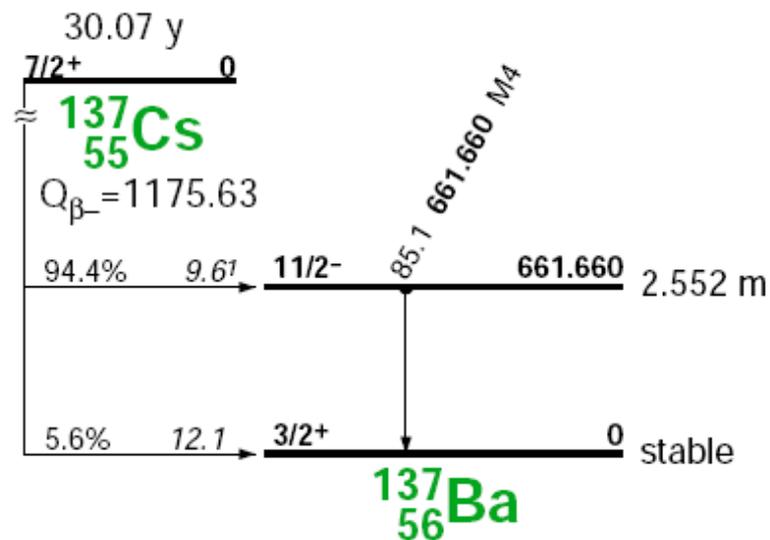
FCUL- Acção de Formação de Professores

Decaimento gama



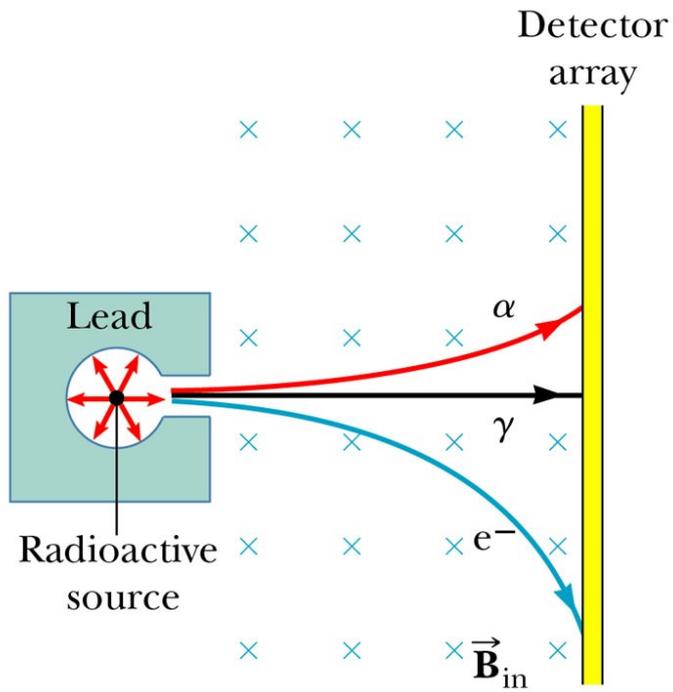
Após decaimento alfa/beta os núcleos podem ficar em níveis excitados

A desexcitação pode dar-se via emissão gama ou conversão interna



A conversão interna é um processo concorrente da desexcitação gama em que a energia do núcleo é cedida a um electrão atómico, que é então ejectado do átomo.

Tipos de radiações nucleares



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Poder de penetração das radiações

