
Física Moderna II

Aula 15

Marcelo G. Munhoz

munhoz@if.usp.br

Lab. Pelletron, sala 245

ramal 6940

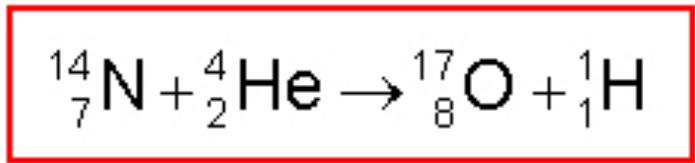
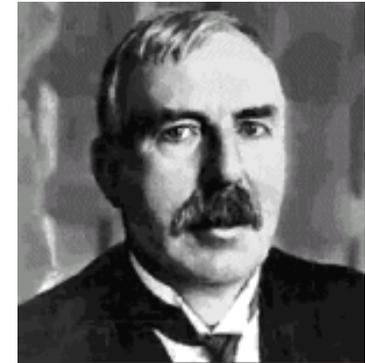
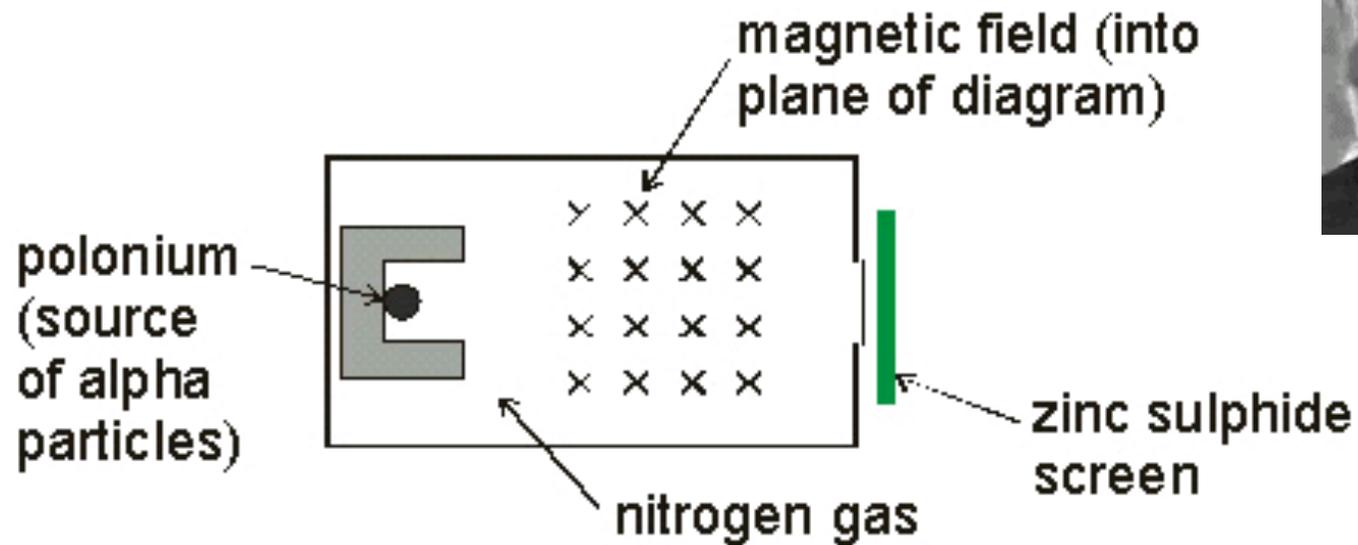
Reações Nucleares

- Reações nucleares correspondem à interação de um núcleo com outro quando promovemos a colisão de ambos;
- A física nuclear se iniciou com o estudo de reações nucleares (trabalho de Rutherford);
- Portanto, além de estudar o núcleo apenas observando seu comportamento natural, podemos “mexer” com ele e observar a sua resposta.

Classificação das Reações Nucleares

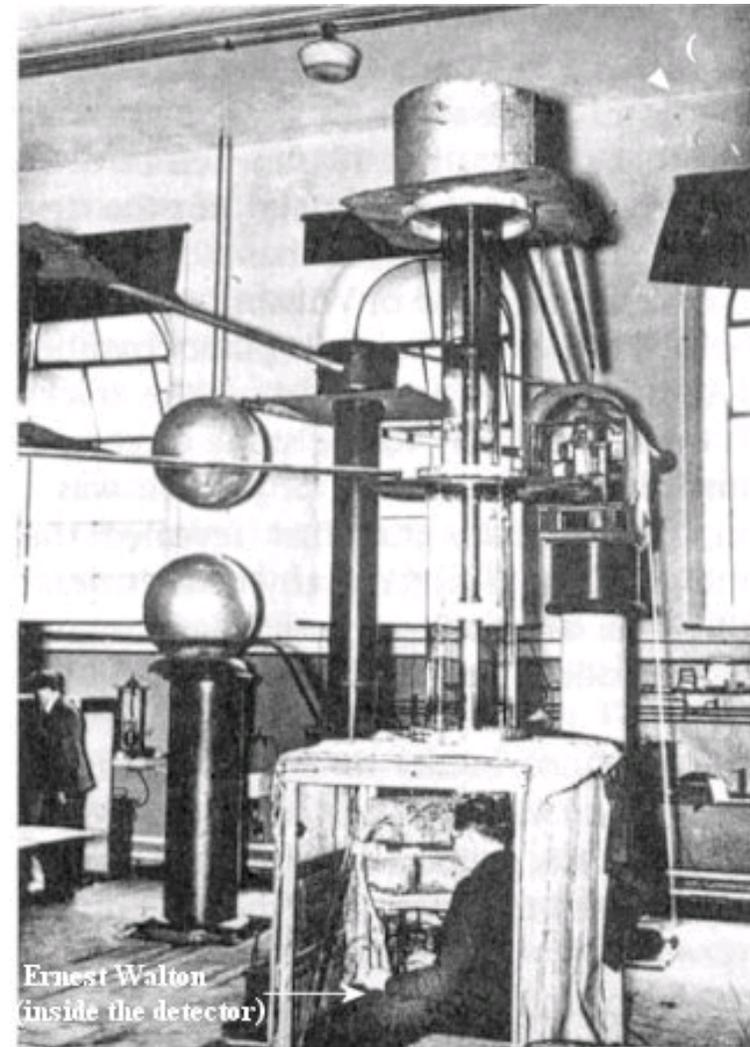
- Conforme a escala de energia envolvida na reação, diferentes fenômenos ocorrem e devemos tratá-las de maneira diferente:
 - Reações de baixa energia: $< 10 \text{ MeV}$ por nucleon;
 - Reações de energia intermediária: \sim de 10 MeV a 1 GeV por nucleon;
 - Reações de alta energia: $> 1 \text{ GeV}$ por nucleon;

1914 – Rutherford descobre o próton



1932 – Cockcroft e Walton

- Cockcroft e Walton constroem o primeiro equipamento capaz de induzir reações entre núcleos de maneira artificial;
- A primeira reação estudada nesse equipamento foi:
$$p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + \alpha$$

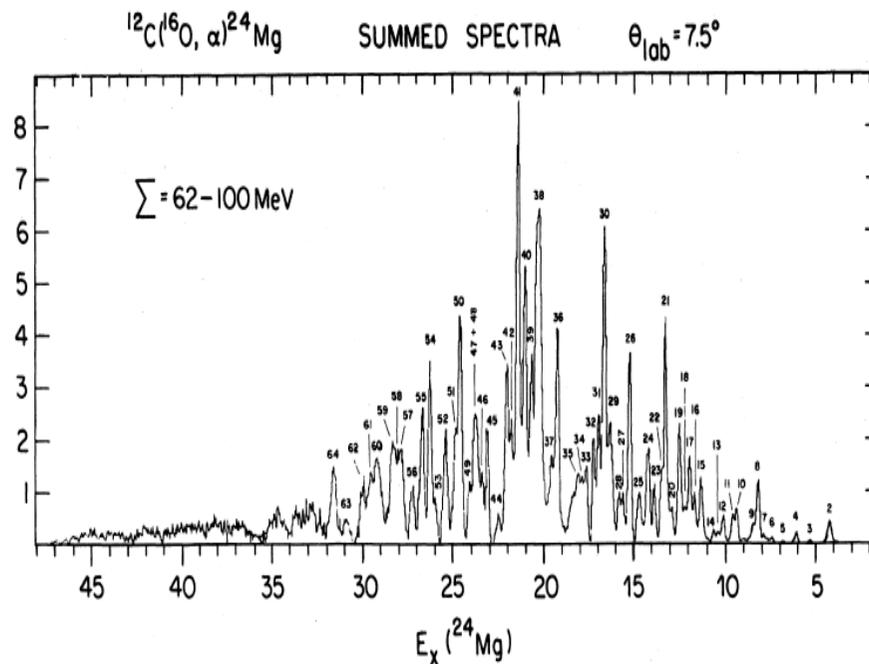


O que podemos aprender com essas reações?

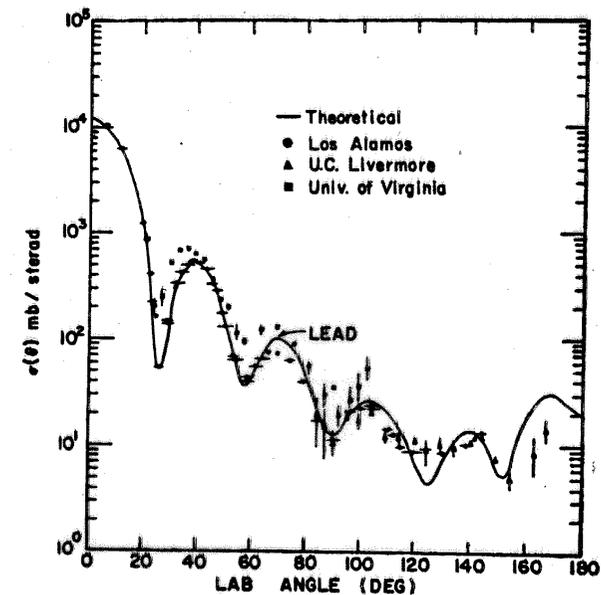
- Reações nucleares são importantes para compreender:
 - A estrutura do núcleo, pois “populamos” diferentes estados de energia ao colidir dois núcleos, que de maneira natural não aconteceria;
 - A maneira como os núcleos e nucleons interagem entre si, o que pode revelar aspectos da natureza da força forte.

O que podemos medir?

- Os produtos da reação e suas características, como energia e distribuição angular;



$^{208}\text{Pb}(n,n)^{208}\text{Pb}$, $E = 14 \text{ MeV}$



O que podemos medir?

- Através dessas medidas, podemos **quantificar** a probabilidade de ocorrência dos vários processos observados;
- Essa quantificação corresponde a medida da **seção de choque** dos vários processos em função de diferentes grandezas;
- Se conseguirmos reproduzir esses valores de seção de choque teoricamente, compreendemos o que ocorre na reação.

Como descrever e compreender uma reação nuclear?

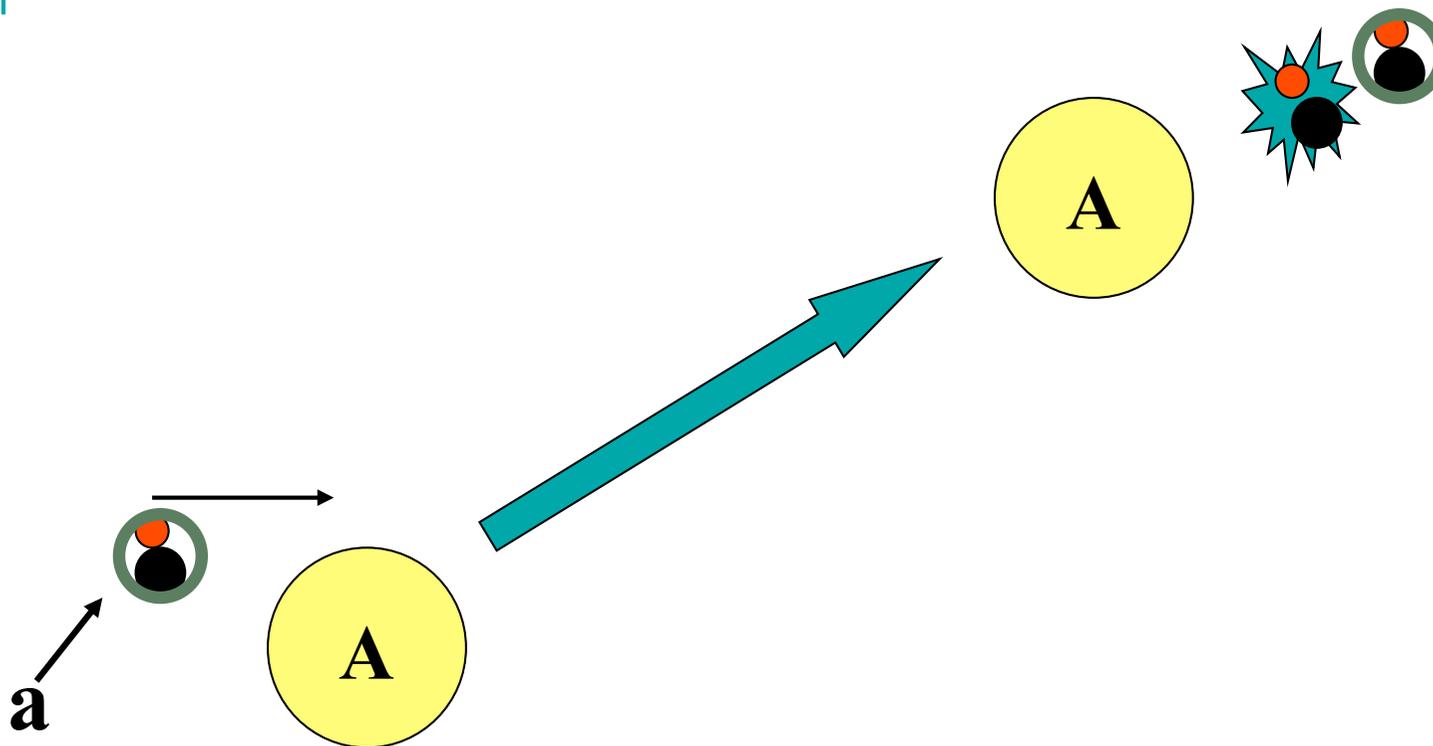
- A partir de leis de conservação, podemos descrever e compreender aspectos **cinemáticos** das reações;
- A partir de uma teoria de espalhamento (clássica ou quântica), podemos descrever e compreender a **dinâmica** da reação, incluindo diferentes mecanismos de reação, e procurando obter a seção de choque dos vários processos observados.

O que pode ocorrer ao colidirmos dois núcleos (qualitativamente)?

- Espalhamento elástico;
- Espalhamento inelástico;
- Transferência de nucleons:
 - *Stripping*;
 - *Pick-up*;
- *Knock-out*;
- Quebra nuclear;
- Fusão nuclear;
- Fissão nuclear;

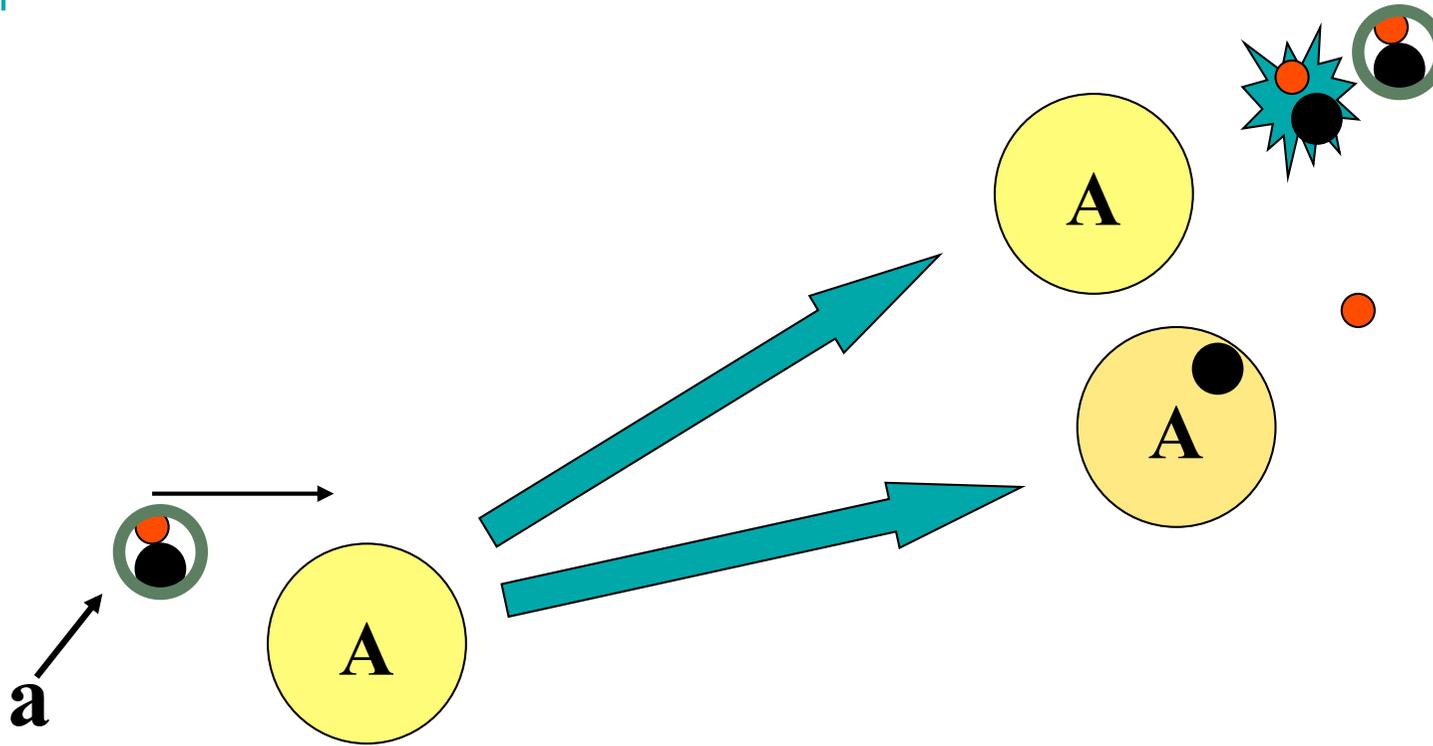
antes

depois



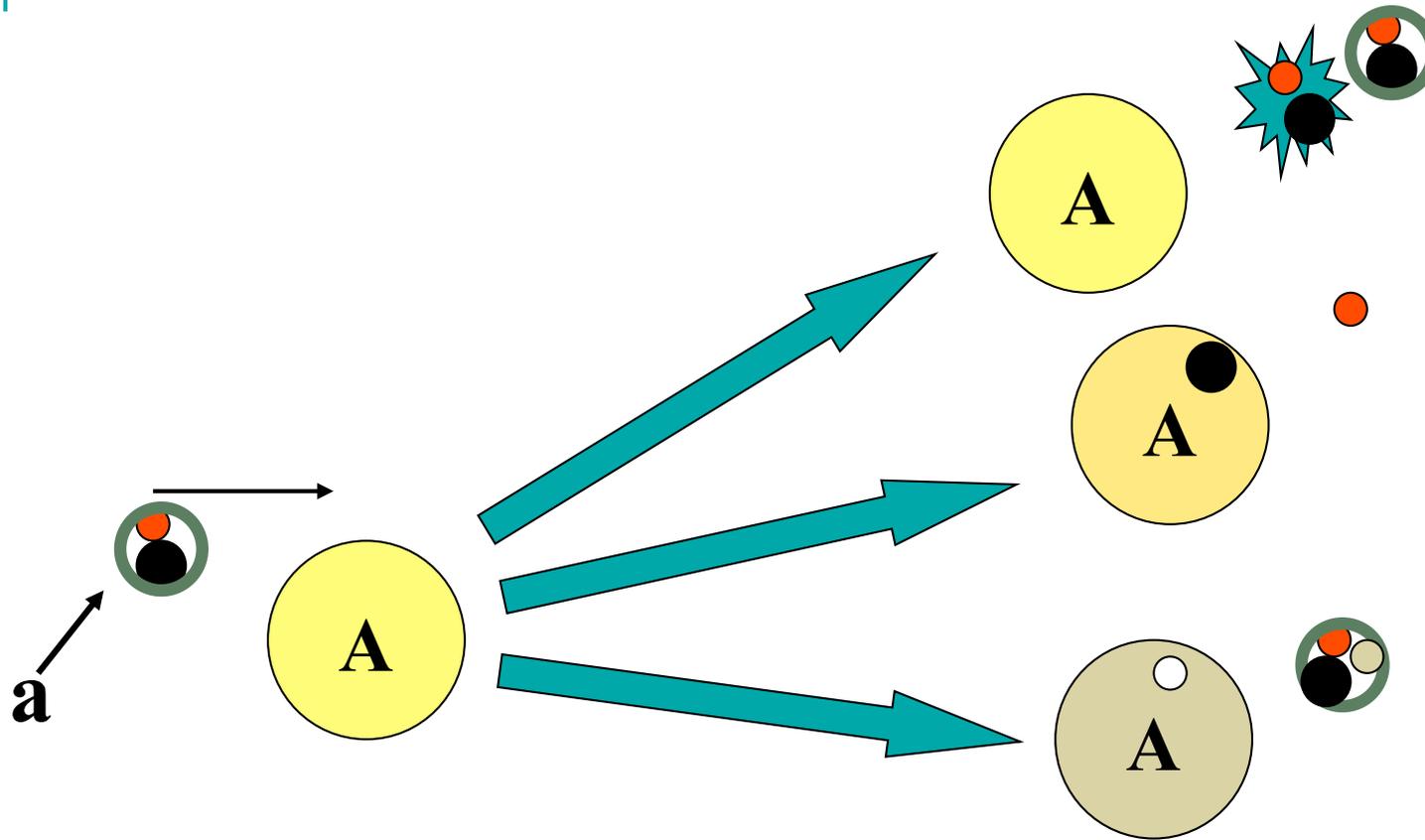
antes

depois



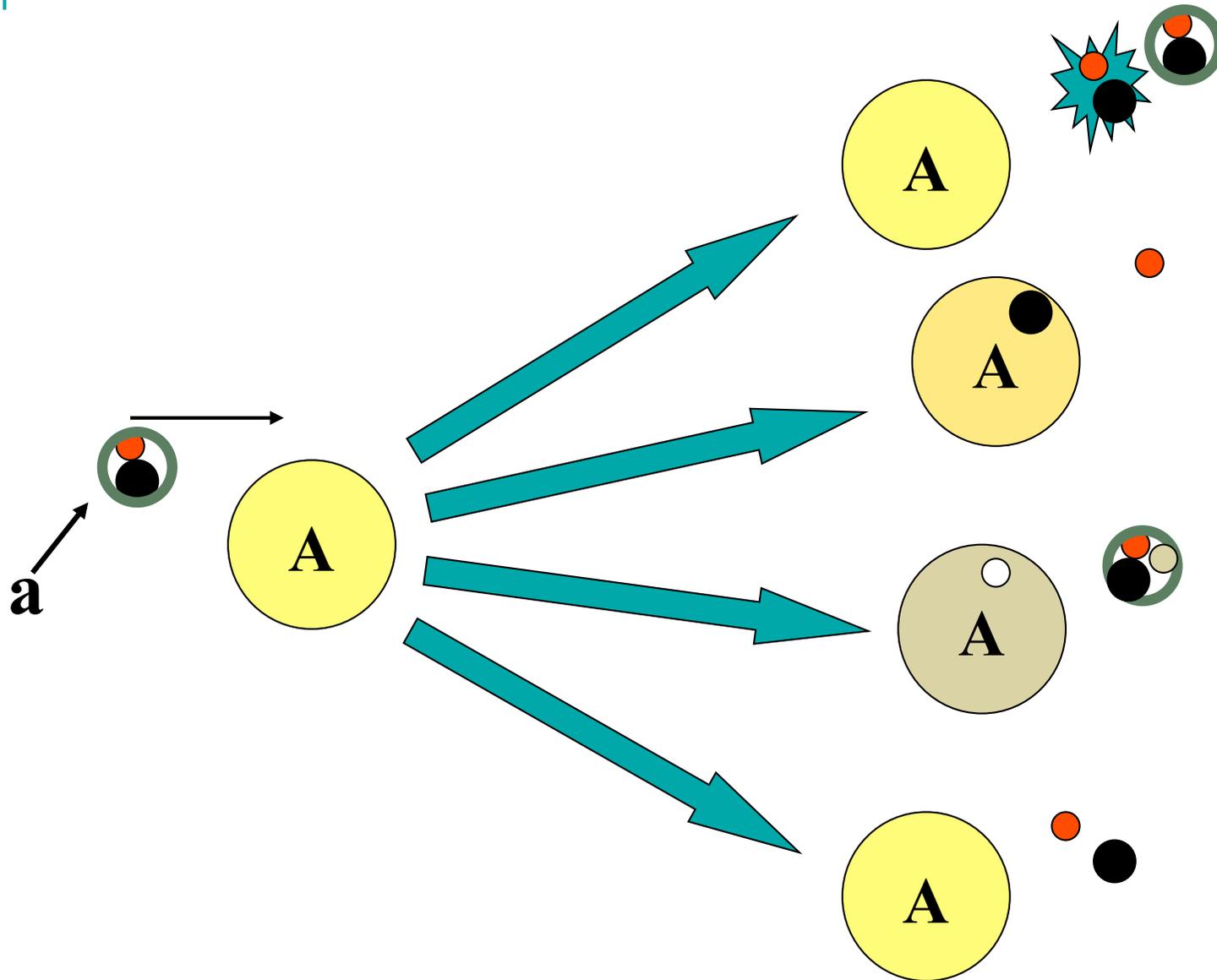
antes

depois



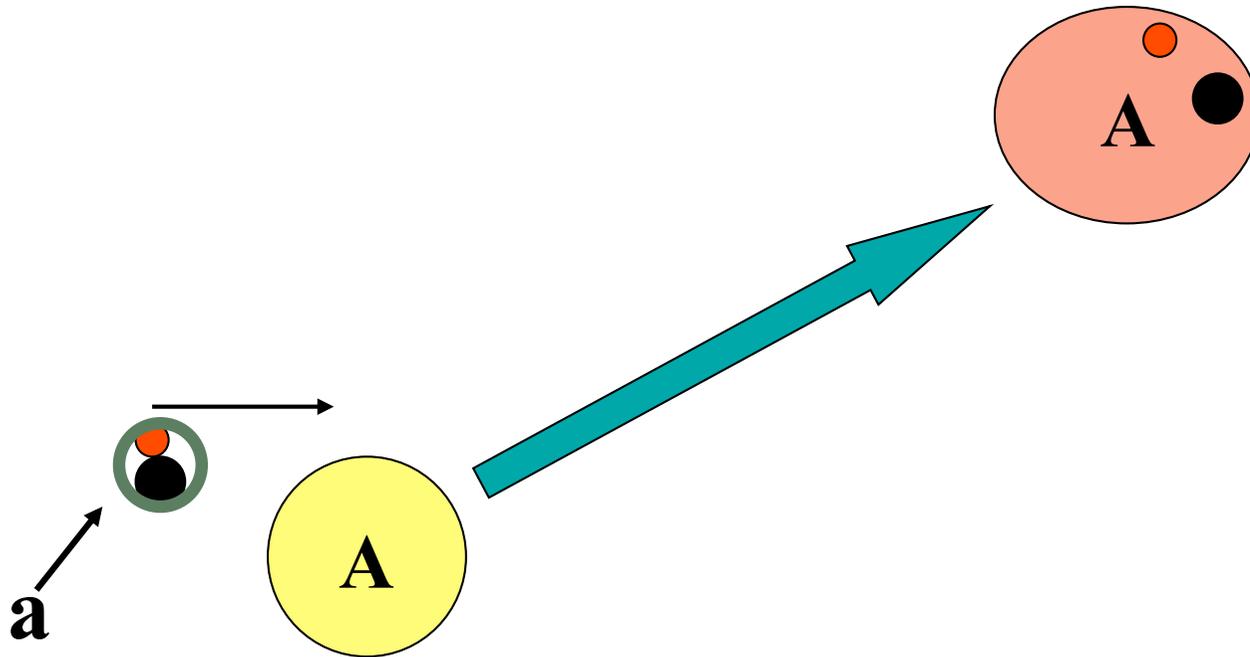
antes

depois



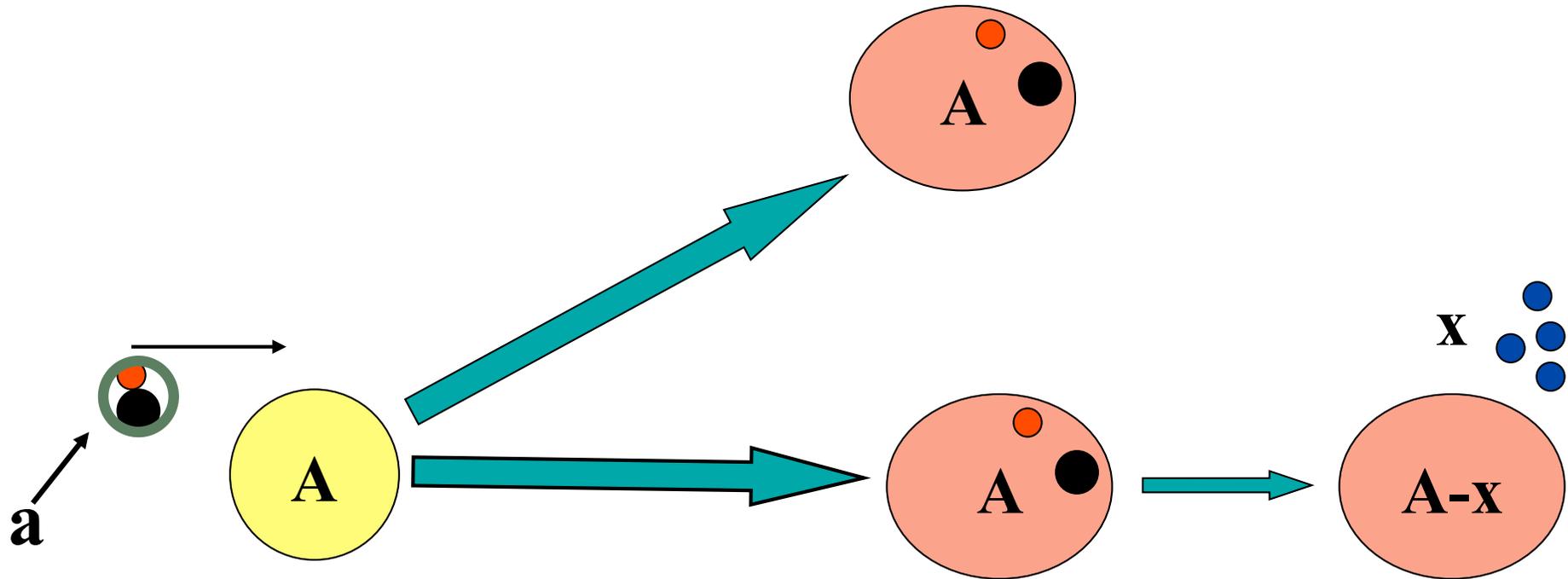
antes

depois



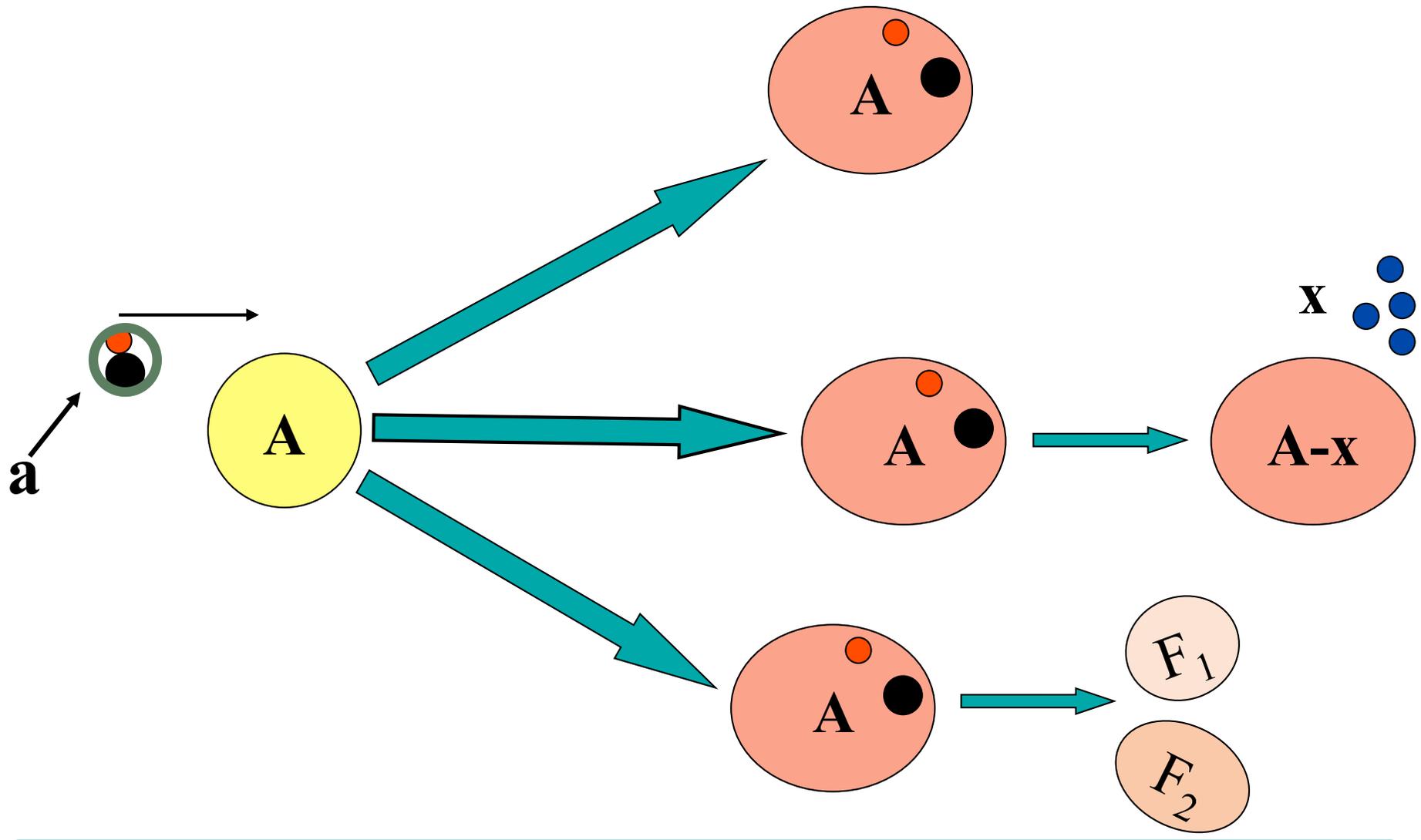
antes

depois



antes

depois

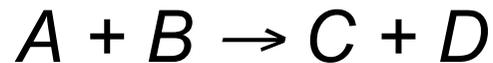


Como descrever e compreender aspectos cinemáticos das reações?

- Se considerarmos uma reação nuclear como um sistema fechado envolvendo apenas os núcleos interagentes, diversas quantidades físicas devem ser conservadas:
 - Energia;
 - Momento linear;
 - Momento angular;
 - Carga elétrica;
 - etc.

Conservação de Energia e Momento: 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, devemos ter:

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

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

Conservação de Energia e Momento: o valor Q de uma reação

- Chamamos de Q da reação a diferença entre a massa total inicial da reação e a massa final, ou seja:

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

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

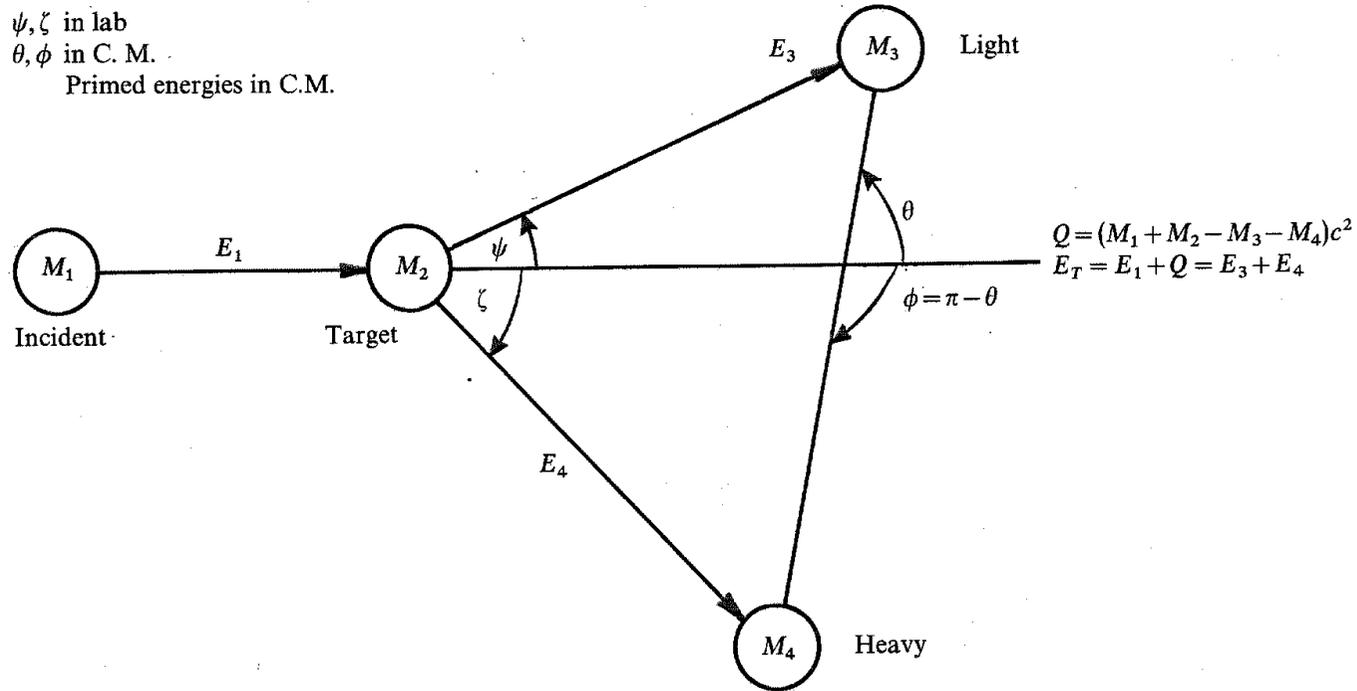
Conservação de Energia e Momento: cinemática da reação

- A partir **apenas** dos princípios de conservação de energia e de momento linear, e conhecendo-se a energia incidente e massa dos núcleos interagentes, podemos calcular como será o resultado final da reação em termos dos ângulos de emissão dos núcleos, ou seja, a cinemática da reação nuclear.

Kinematics of nuclear reactions and scattering (continued)

ψ, ζ in lab
 θ, ϕ in C. M.

Primed energies in C.M.



Define:

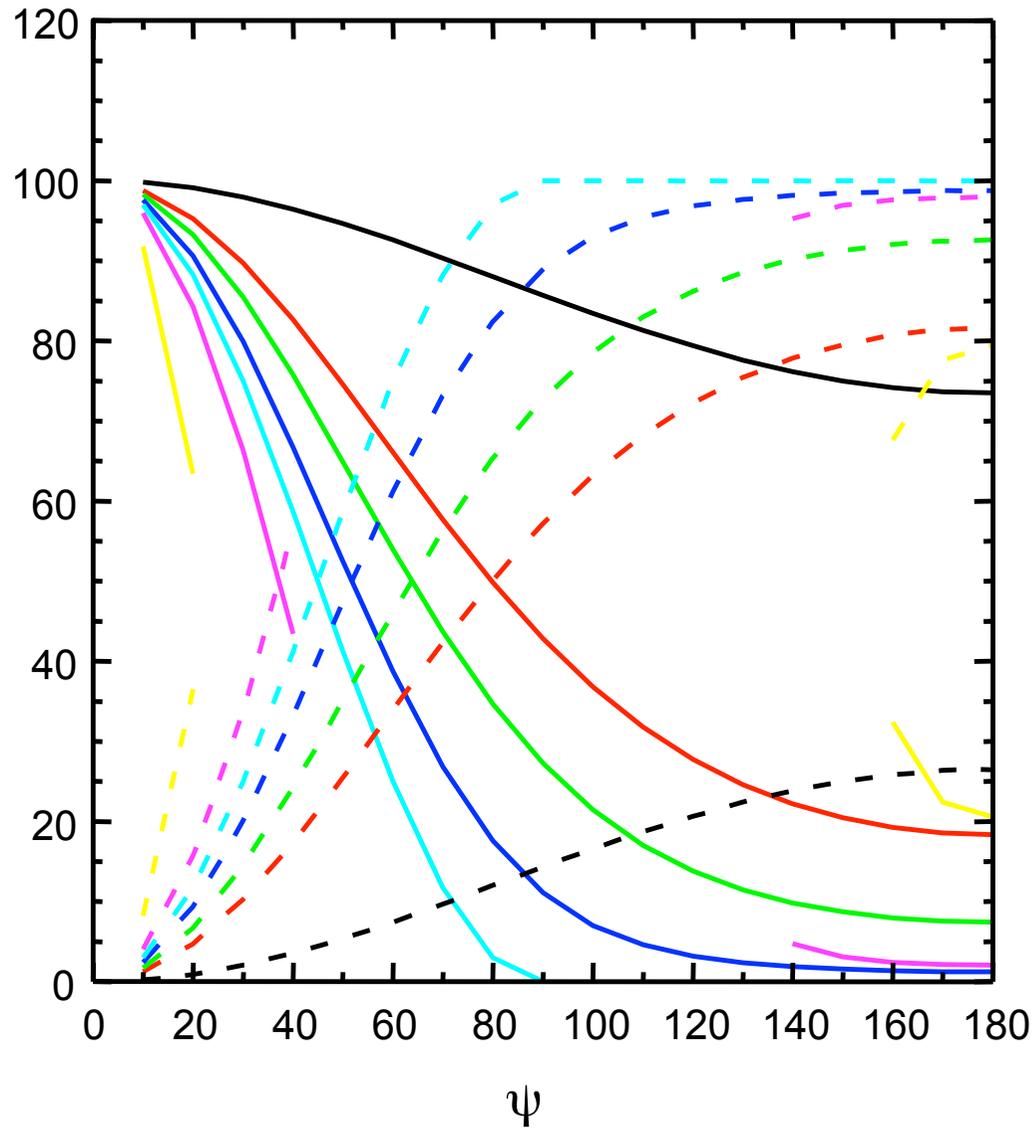
$$A = \frac{M_1 M_4 (E_1 / E_T)}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}, \quad C = \frac{M_2 M_3}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \left(1 + \frac{M_1 Q}{M_2 E_T} \right) = \frac{E_4'}{E_T}$$

$$B = \frac{M_1 M_3 (E_1 / E_T)}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}, \quad D = \frac{M_2 M_4}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \left(1 + \frac{M_1 Q}{M_2 E_T} \right) = \frac{E_3'}{E_T}$$

Note that $A + B + C + D = 1$ and $AC = BD$

E_3 (MeV)

E_4 (MeV)



$E_1 = 100$ MeV

- $^{208}\text{Pb}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})$
- $^{40}\text{Ca}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})$
- $^{28}\text{Si}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})$
- $^{20}\text{Ne}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})$
- $^{16}\text{O}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})$
- $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})$
- $^6\text{Li}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})$

Como descrever e compreender aspectos dinâmicos da reação?

- 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):

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

Como obter teoricamente a seção de choque de uma reação?

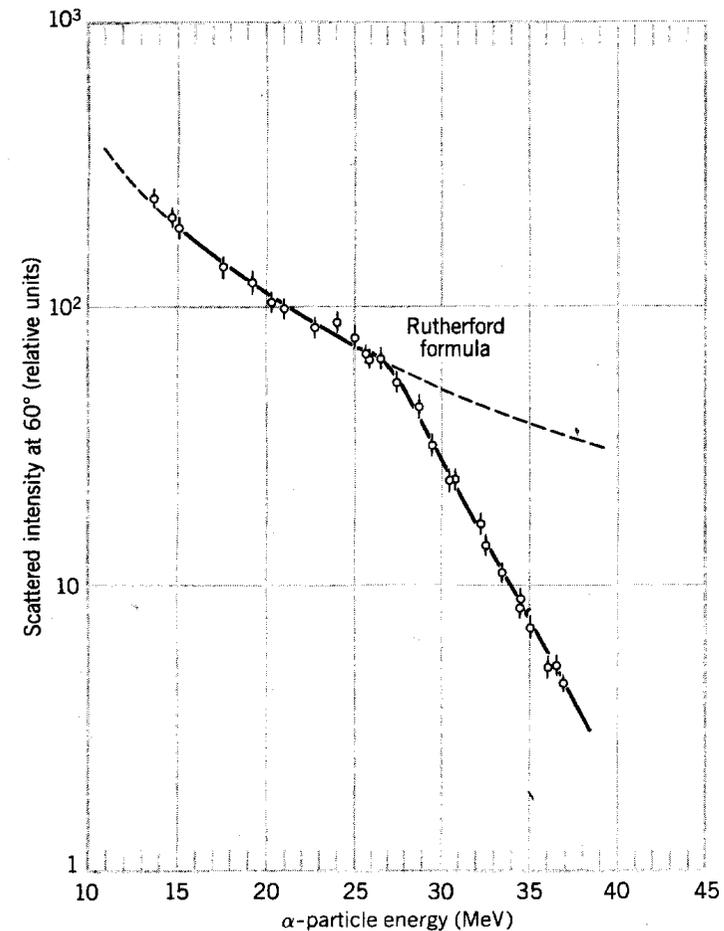
- O conceito de seção de choque é extremamente importante na física nuclear pois faz a ligação entre o experimento e a teoria, uma vez que ela pode ser medida e calculada a partir da teoria;
- A fim de calcular a seção de choque podemos usar a mecânica clássica (o chamado espalhamento Coulombiano) e a mecânica quântica não-relativística.

Como descrever e compreender aspectos dinâmicos da reação?

- Espalhamento elástico
- Reações nucleares (não-elástico)
 - Processos diretos
 - Núcleo composto
 - Reações ressonantes

Como obter teoricamente a seção de choque de choque de uma reação?

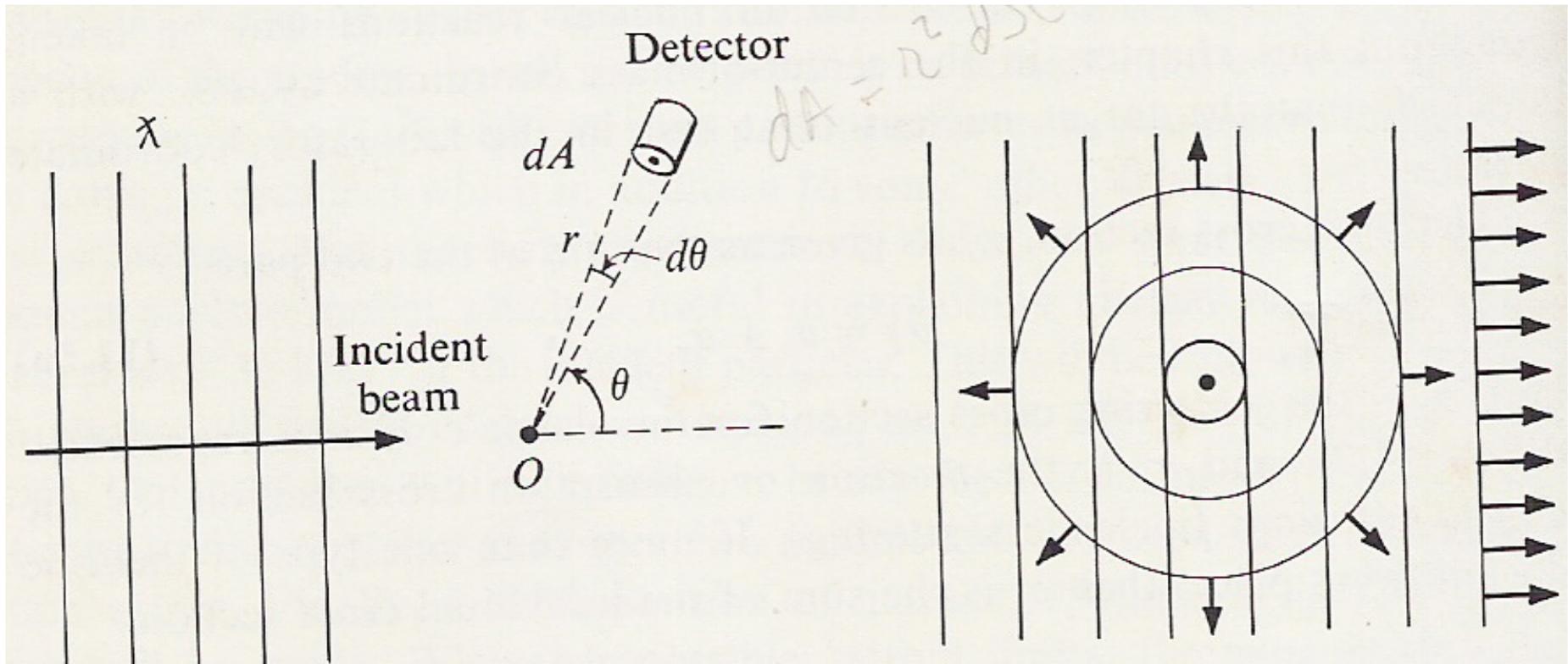
- Abordagem clássica:
 - **Espalhamento de Rutherford:** consideramos apenas a força Coulombiana e calculamos a trajetória clássica do projétil quando este interage com o campo eletromagnético do alvo;
 - Obviamente, esta abordagem tem limitações.



Como obter teoricamente a seção de choque de uma reação?

- Abordagem quântica não-relativística:
 - Consideramos que, assintoticamente, o feixe é constituído de uma frente de ondas planas incidindo sobre o alvo, cujo potencial (desconhecido) gera ondas espalhadas esféricas;

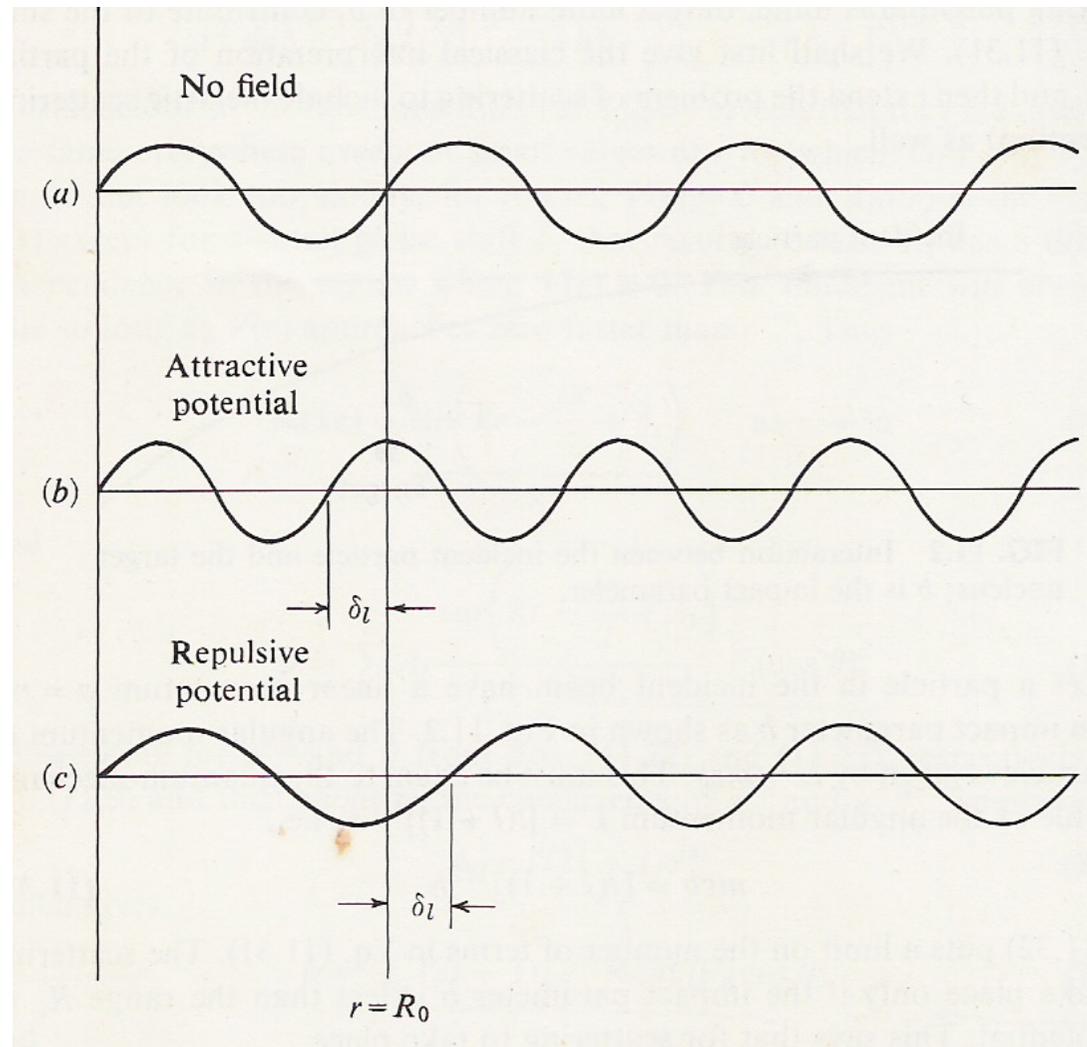
Espalhamento quântico



Espalhamento elástico

- Neste caso, consideramos o canal de entrada (projétil e alvo) igual ao canal de saída (os produtos da reação), onde toda a energia cinética é conservada, ou seja, não ocorre transmutação ou mudança na distribuição de nucleons nos níveis de energia dos núcleos envolvidos ($Q = 0$);
- Neste tipo de espalhamento, deve ocorrer apenas uma **mudança de fase** da onda incidente;

Espalhamento elástico



Espalhamento elástico

- Portanto, o objetivo é utilizar um certo potencial central e calcular o valor de δ ;
- Se o resultado teórico concordar com os dados experimentais, fizemos uma boa escolha do potencial responsável pelo espalhamento das ondas incidentes.

Mecanismos das reações nucleares

- **Espalhamento elástico:**
(Provoca apenas uma mudança de fase)
- **Reações nucleares (não-elástico)**
 - Núcleo composto
 - Processos diretos
 - Reações ressonantes

Mecanismos das reações nucleares

- **Espalhamento elástico:**
(Provoca apenas uma mudança de fase)
- **Reações nucleares (não-elástico)**
(Provoca uma mudança de fase e uma absorção)
 - Núcleo composto
 - Processos diretos
 - Reações ressonantes

Modelo óptico

- A fim de considerar o espalhamento elástico e o não-elástico (absorção), podemos utilizar um potencial da forma:

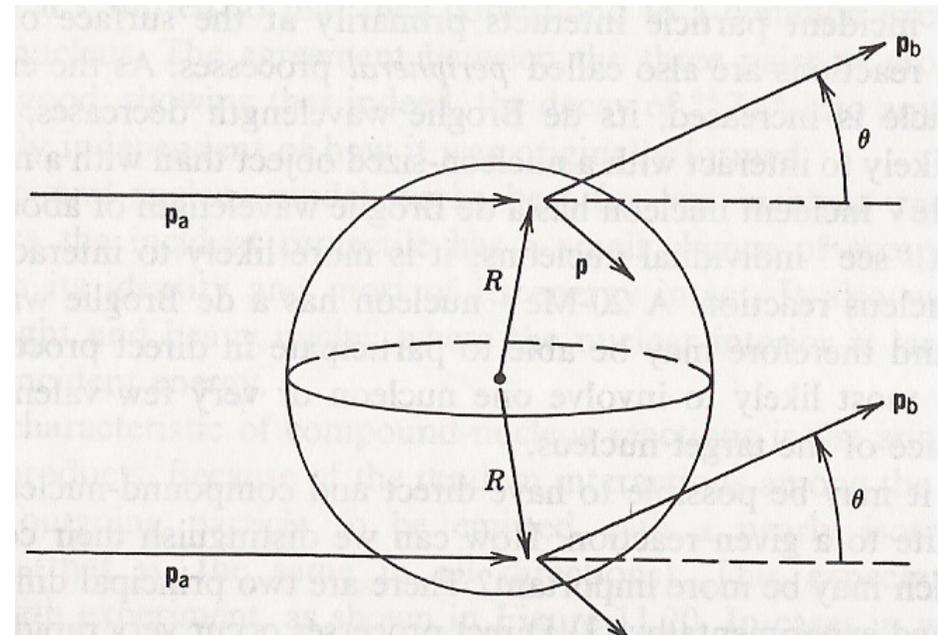
$$U(r) = V(r) + i \cdot W(r)$$

em analogia ao que acontece na óptica;

- A parte real do potencial descreve o espalhamento elástico enquanto a parte imaginária a reação.

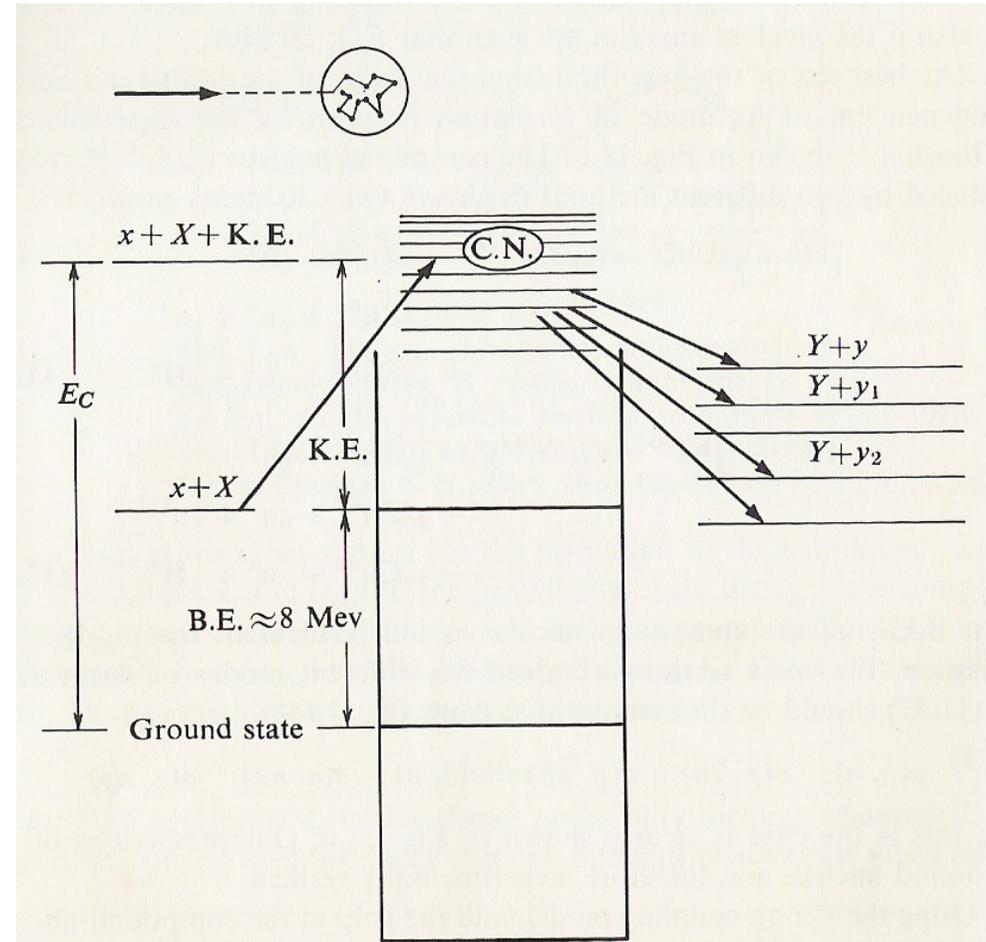
Processos diretos

- O núcleo incidente interage com apenas alguns nucleons da superfície do núcleo alvo;
- Este tipo de processo ocorre quando o projétil tem energia alta (> 10 MeV), pois seu comprimento de onda de Broglie é menor;



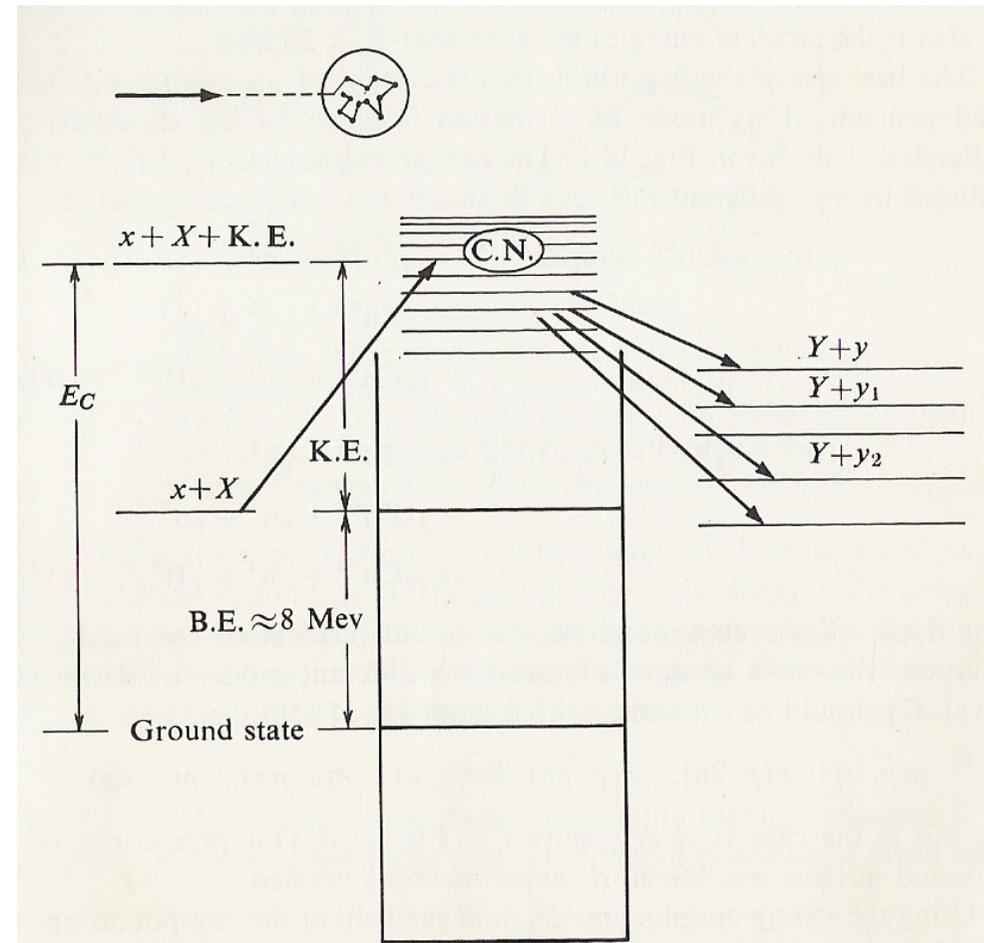
Núcleo composto

- Este mecanismo foi proposto por Bohr, em 1936;
- Ele se caracteriza por dois estágios: a formação de um núcleo composto e seu posterior decaimento:
$$a + X \rightarrow C^* \rightarrow Y + b$$



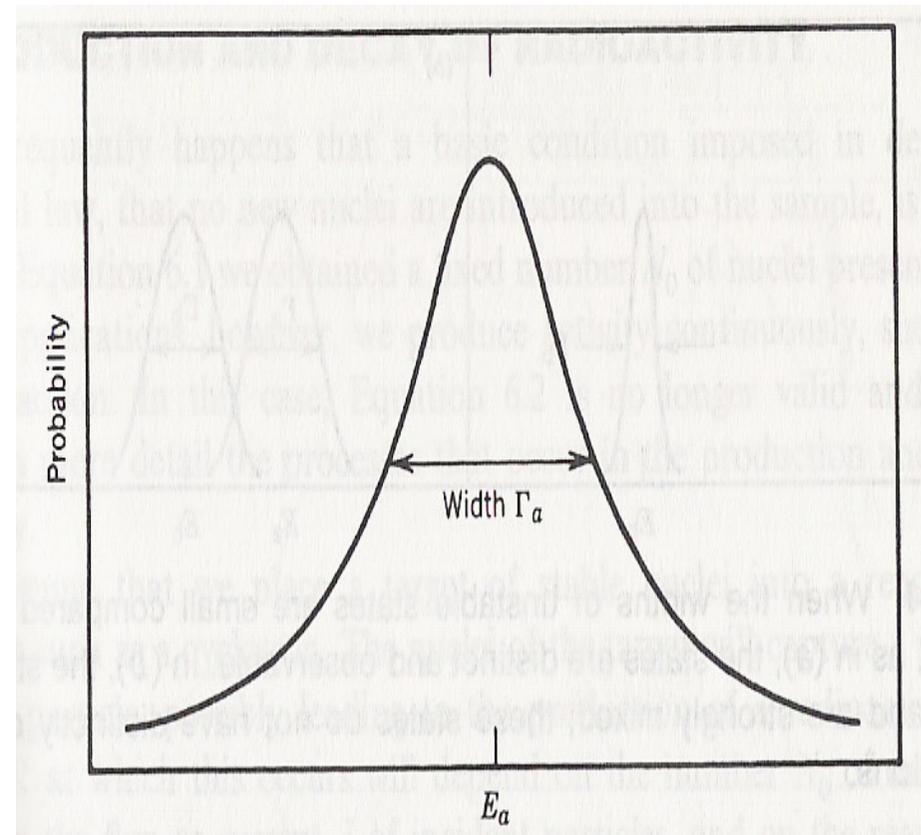
Núcleo composto

- Este mecanismo foi proposto por Bohr, em 1936;
- Um reação via núcleo composto envolve todos os nucleons dos núcleos interagentes, que entram em equilíbrio.



Reações ressonantes

- Tanto reações com o núcleo composto como processos diretos podem levar à ocupação de um estado cuja largura seja não desprezível;
- Isso dará origem a estados ressonantes (quase-estacionários);

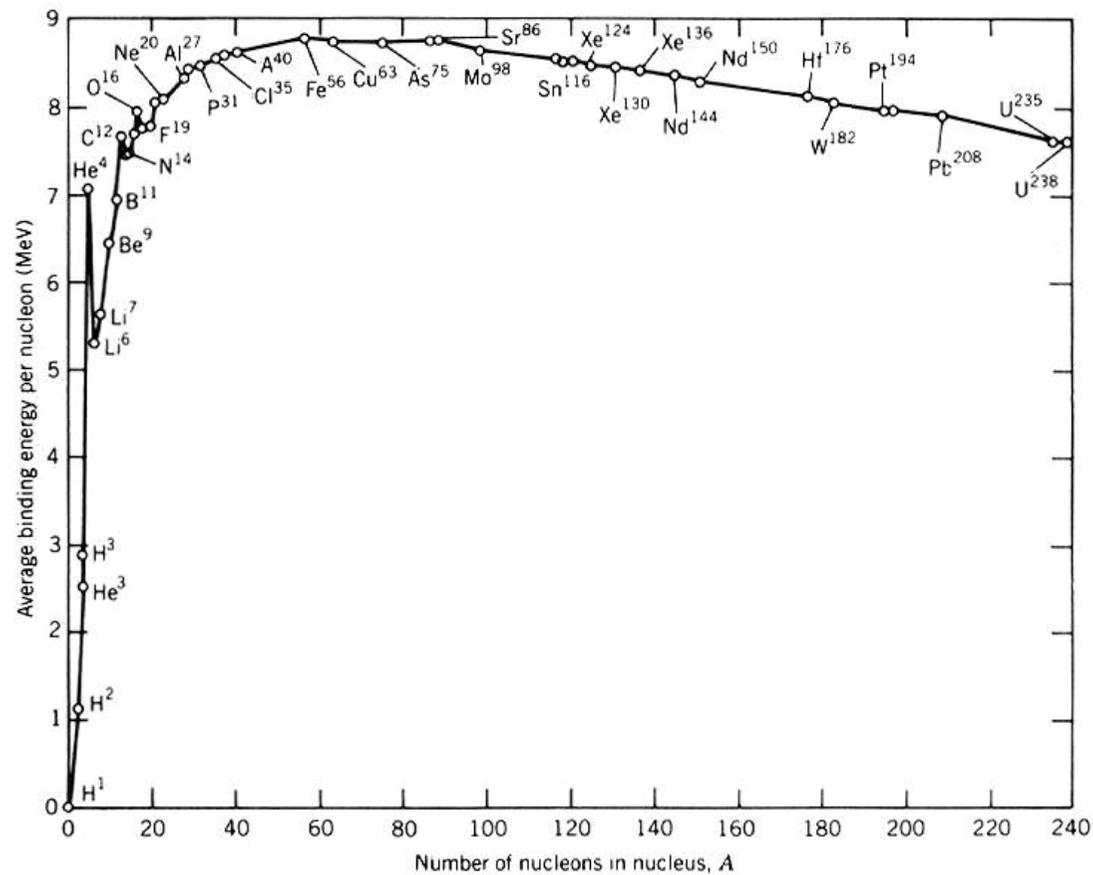


Fissão Nuclear

- Processo em que um núcleo pesado quebra em duas partes, aproximadamente, iguais;
- Como é possível ocorrer a fissão nuclear?
- Esse processo é bastante favorável para núcleos de massa maior devido a um Q positivo quando o núcleo quebra em duas partes iguais;

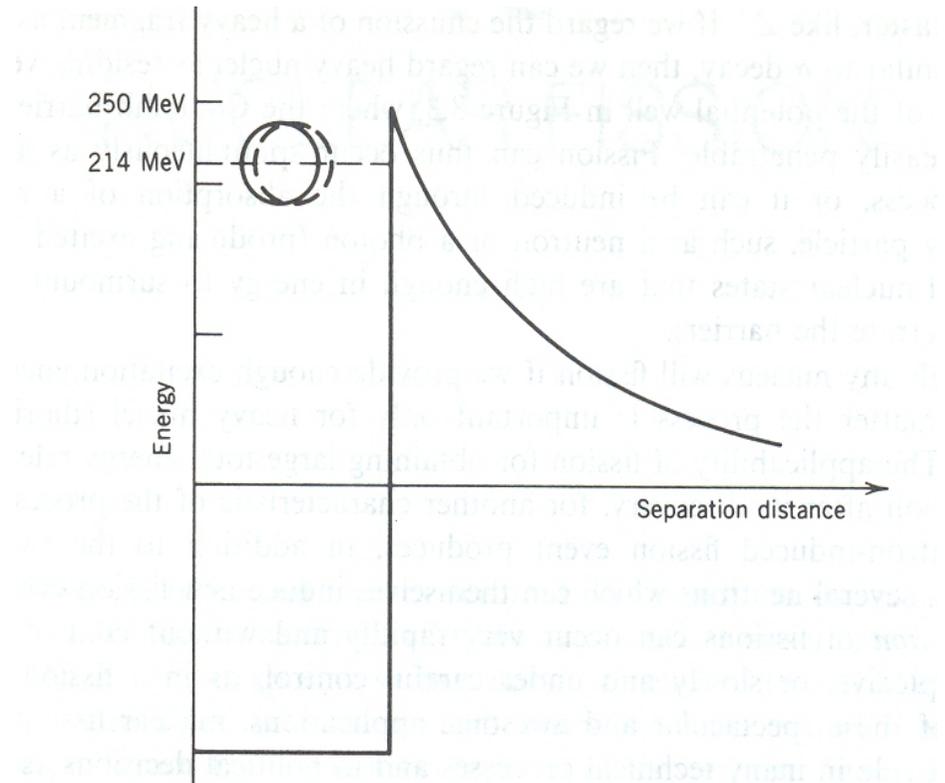
Fissão Nuclear

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



Fissão Nuclear

- Pode-se modelar a fissão da mesma maneira como se fez com o decaimento- α ;
- A fissão pode ser espontânea (como o decaimento- α) ou induzida por uma reação nuclear;

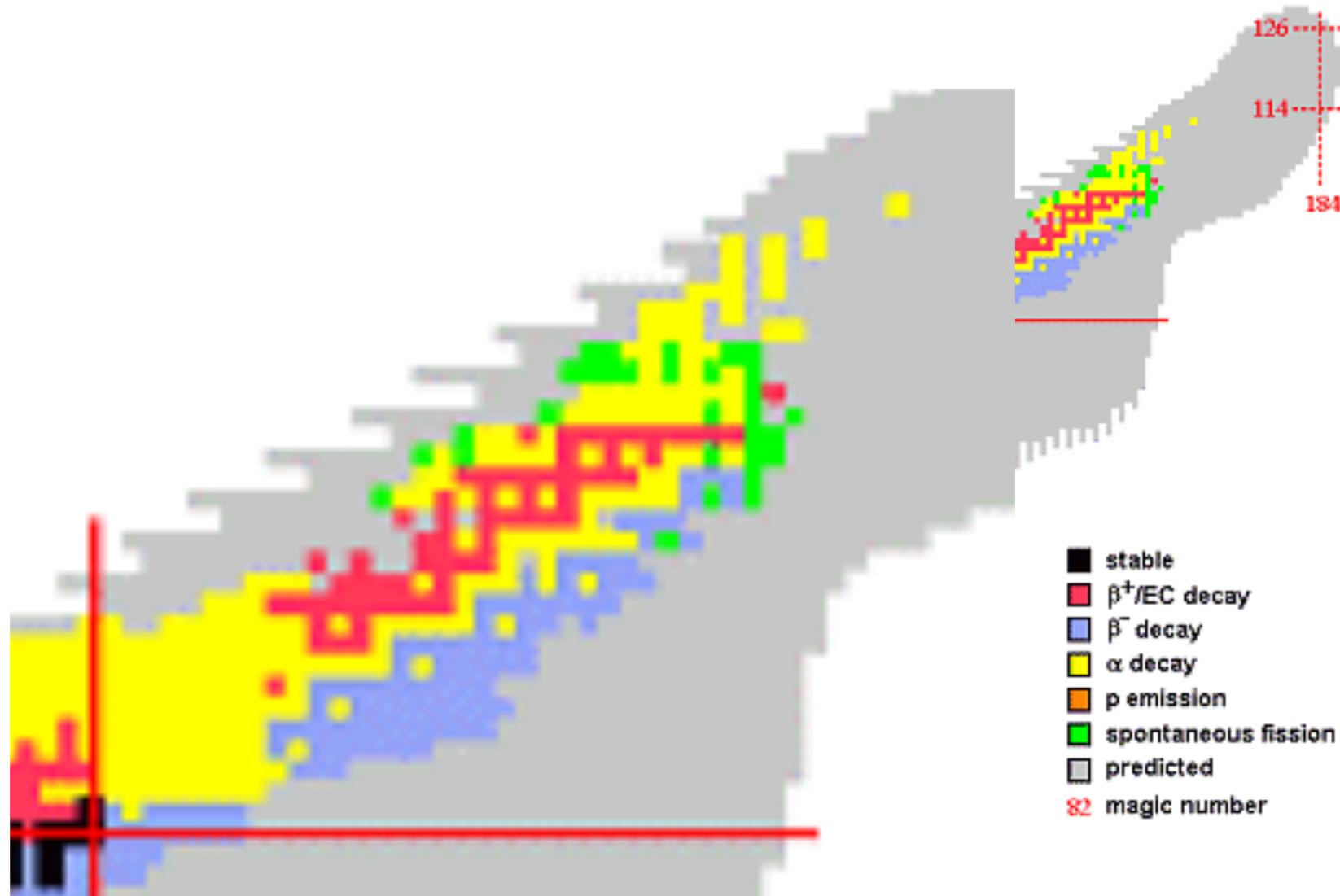


Fissão Nuclear Espontânea

- Modelo da gota-líquida;
- Um núcleo pode fissionar devido a uma mudança na forma do mesmo;
- Mantendo o volume constante e modificando apenas a superfície, a energia de ligação vai diminuir, favorecendo a quebra.

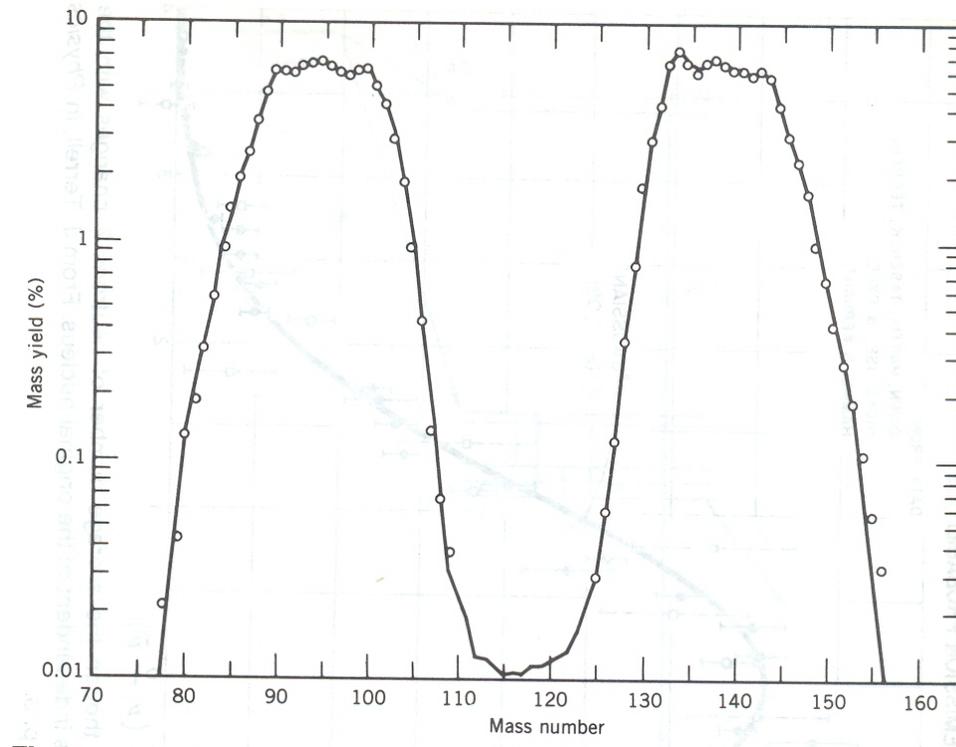
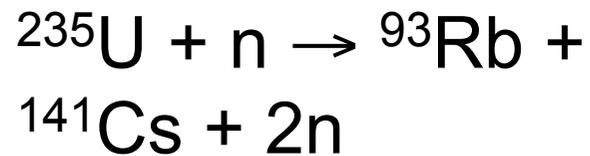


Fissão Nuclear Espontânea



Fissão Nuclear Induzida

- Uma reação típica de fissão nuclear induzida corresponde a captura de um nêutron pelo ^{235}U :



Reatores de fissão nuclear

- Reações de fissão induzida podem ser usadas para se converter energia nuclear em energia elétrica para a utilização humana;
- Esse processo, que ocorre em reatores nucleares, utilizam-se de algumas características da fissão nuclear induzida:
 - Grande seção de choque para captura de nêutrons;
 - Emissão de energia dessa reação;
 - Emissão de nêutrons;

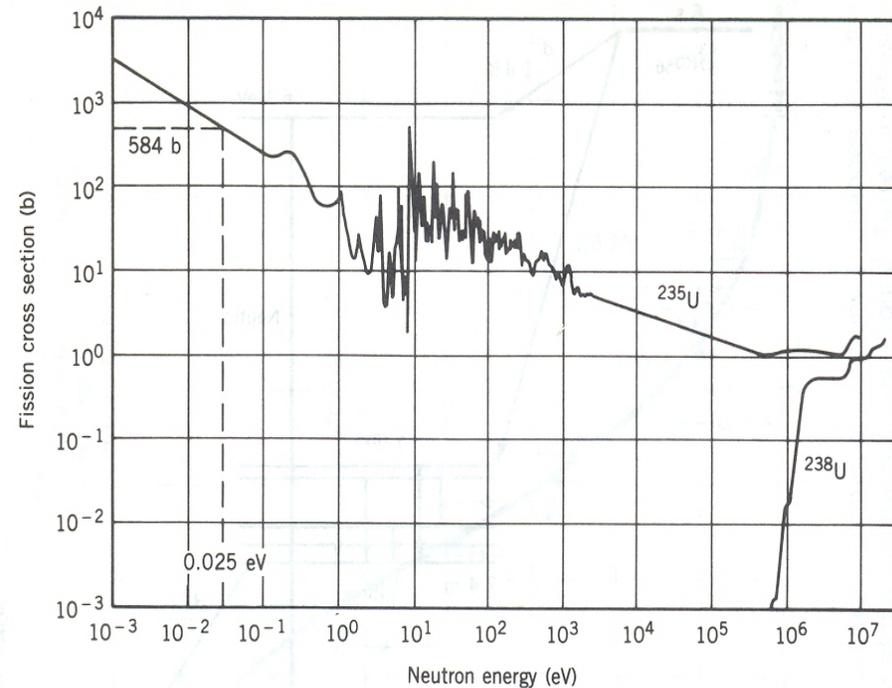
Seção de choque para captura de nêutrons



$$\begin{aligned} m(^{236}\text{U}^*) &= m(^{235}\text{U}) - m_n \\ &= 6,5 \text{ MeV} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} m(^{239}\text{U}^*) &= m(^{238}\text{U}) - m_n \\ &= 4,8 \text{ MeV} \end{aligned}$$



Emissão de energia na fissão nuclear

- Considerando, por exemplo, a reação:



tem-se que a energia emitida é dada por:

$$\begin{aligned} Q &= m({}^{93}\text{Rb}) + m({}^{141}\text{Cs}) - m({}^{235}\text{U}) - m_{\text{n}} \\ &= 181 \text{ MeV} \end{aligned}$$

mais a energia cinética do nêutron, que normalmente é desprezível.

Emissão de energia na fissão nuclear

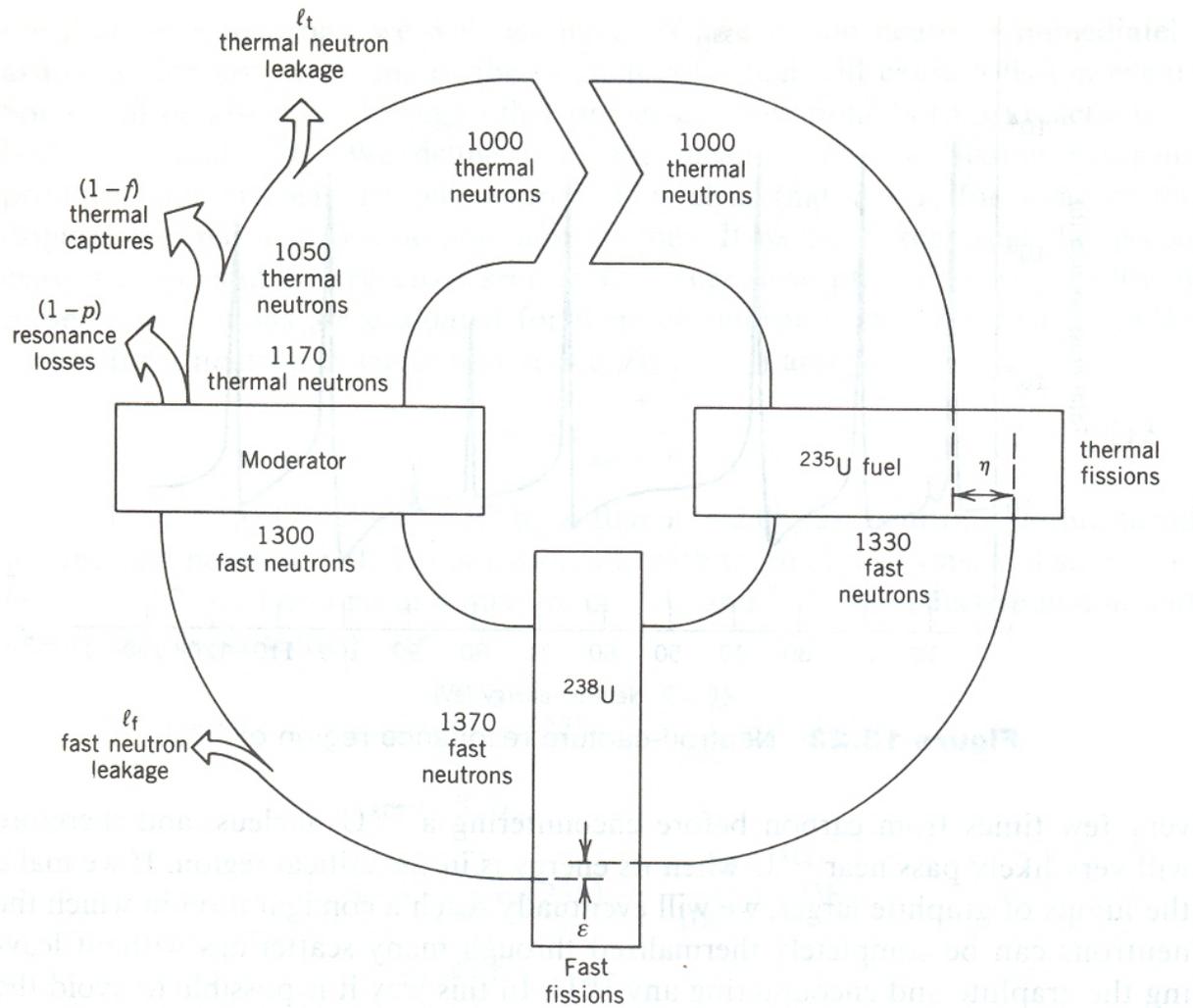
- Essa energia pode se manifestar em termos:
 - Emissão de radiação γ no decaimento de estados excitados formados;
 - Energia cinética dos produtos da reação;
 - Decaimento radioativo (β e γ) dos produtos da reação:



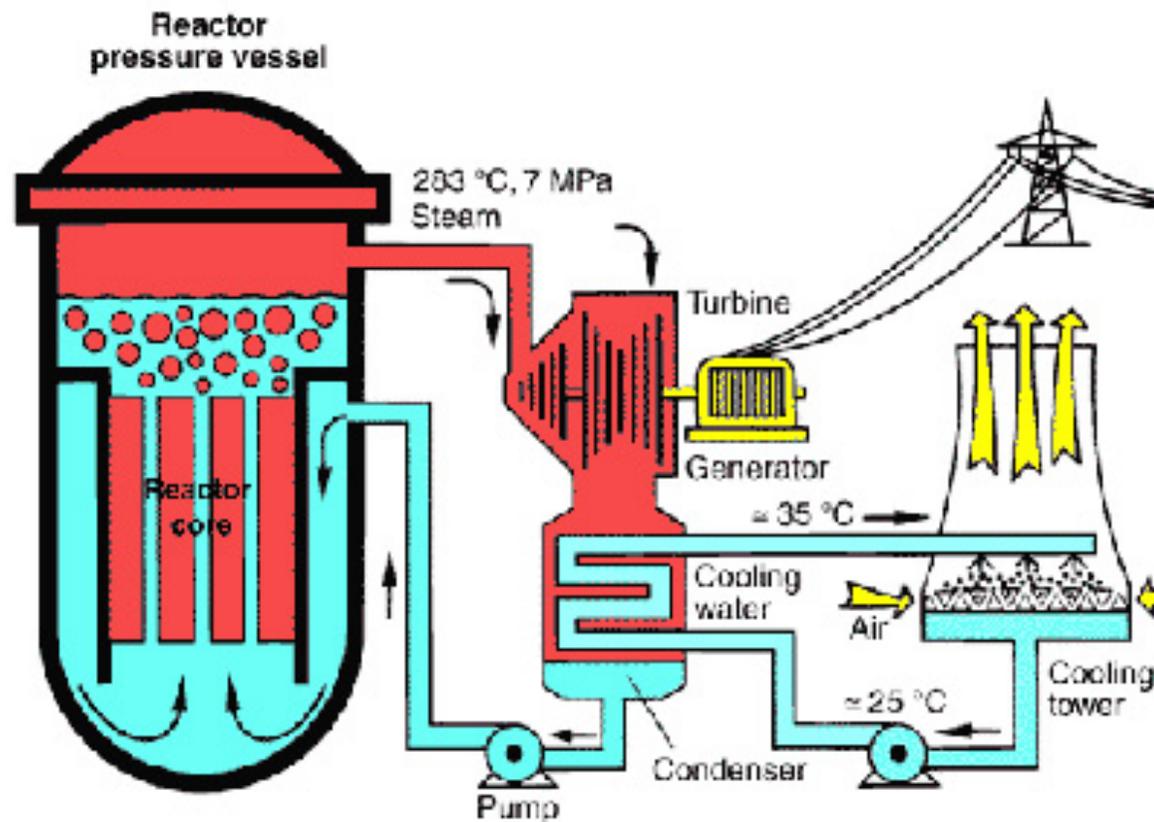
Emissão de nêutrons

- Como os produtos “imediatos” da fissão são “ricos em nêutrons”, eles tendem a emitir nêutrons para perder energia;
- Com isso, nêutrons são emitidos instantaneamente (10^{-16} s) ao ocorrer a fissão. São os chamados *prompt neutrons*;
- Esse fato é muito importante, pois permite a ocorrência da **reação em cadeia** em reatores;

Ciclo em um reator nuclear

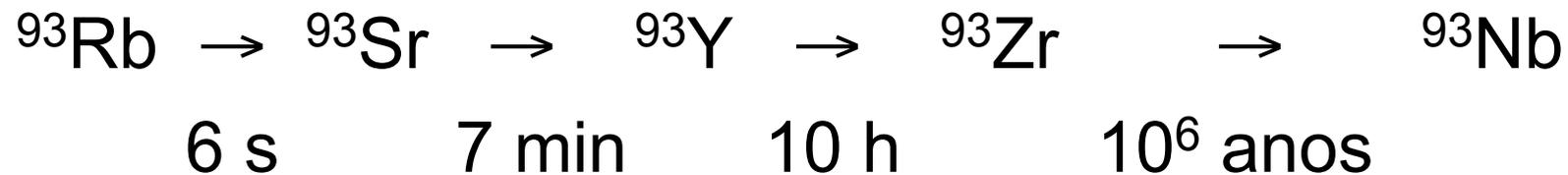


Ciclo em um reator nuclear



Alguns problemas com a utilização da fissão nuclear

- Produtos da fissão são radioativos e podem levar milhões de anos para decair:



- É possível criar armas com esse processo;

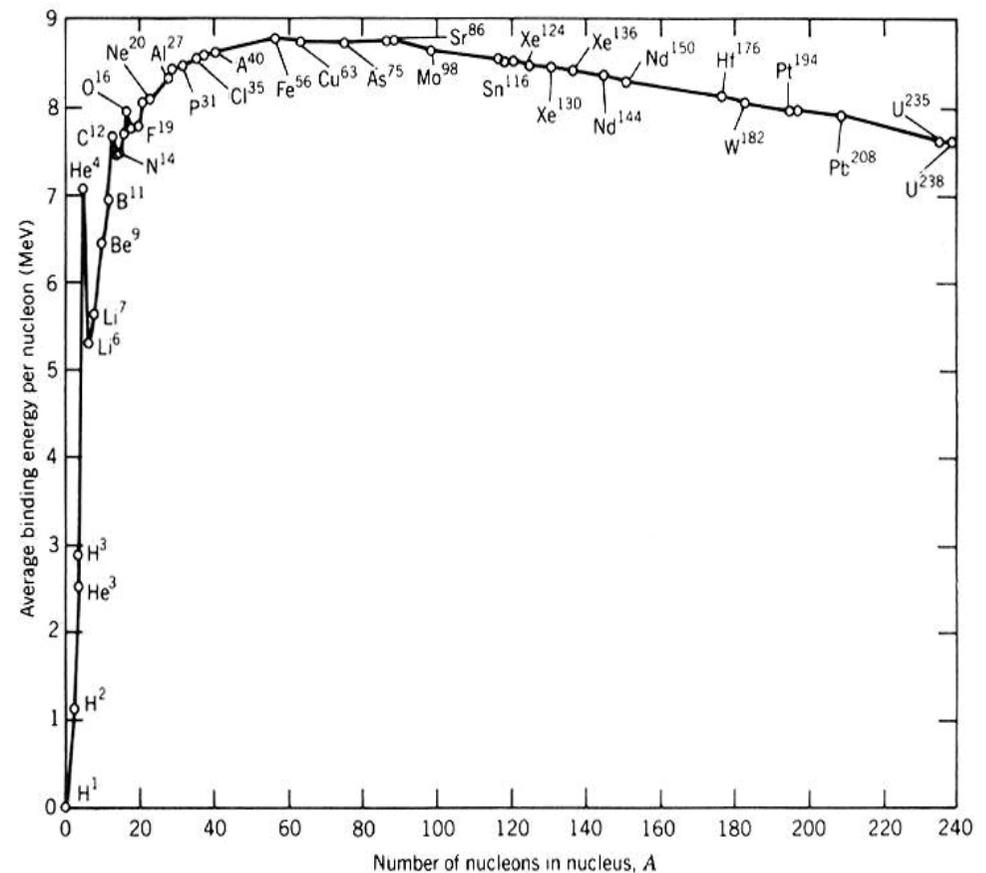
Fusão Nuclear

- O estudo detalhado da fusão nuclear é importante, não apenas pelo processo nuclear em si, mas também porque:
 - Ocorre naturalmente em estrelas e outros sistemas cosmológicos;
 - Pode ser uma fonte de energia.

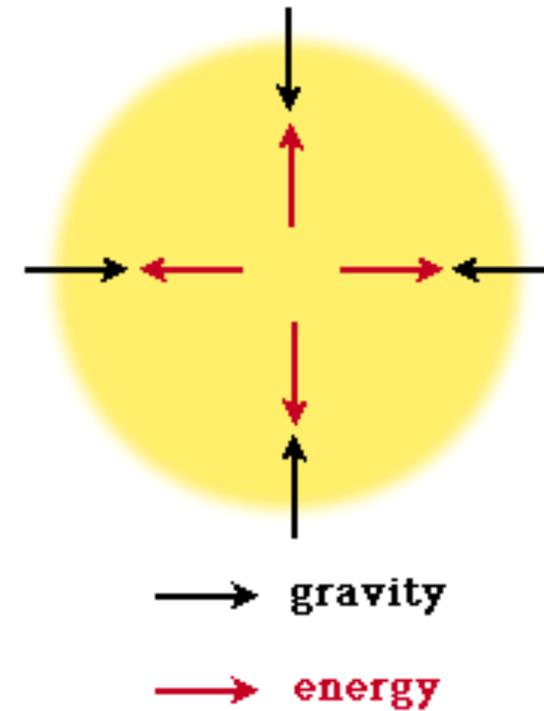
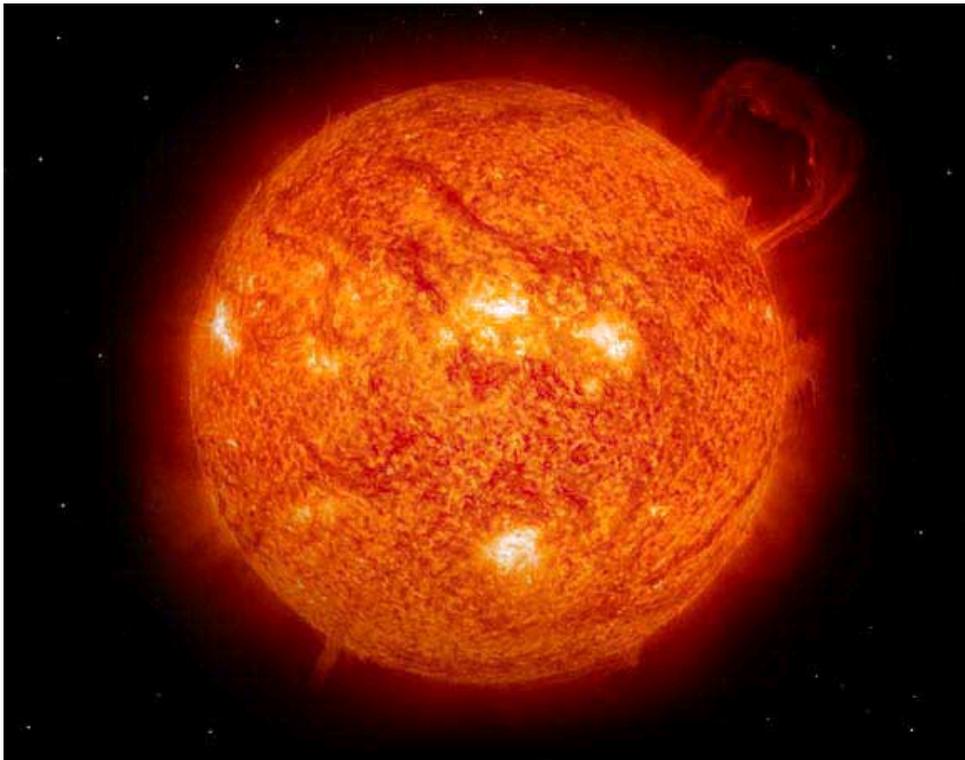
Fusão Nuclear

- As reações de fusão nuclear mais interessantes desses pontos de vista são aquelas que envolvem núcleos leves, pois apresentam uma barreira Coulombiana menor e liberam energia ($Q > 0$)

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



Processos Estelares



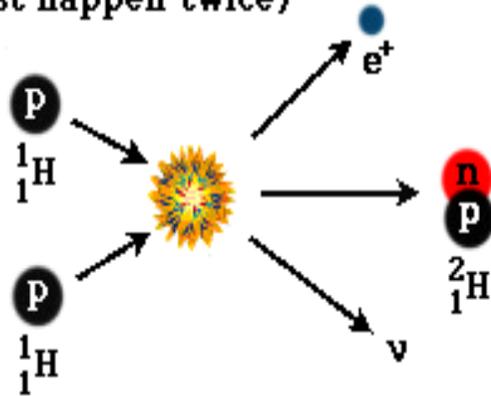
gravity > energy = contraction

energy > gravity = expansion

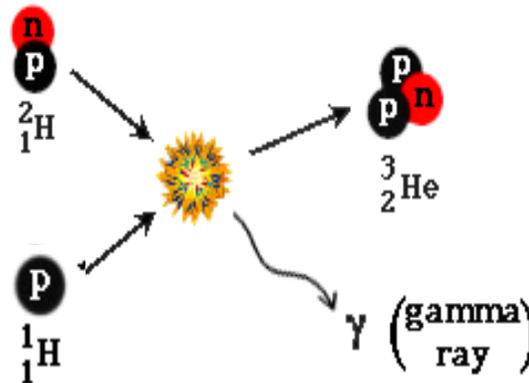
Fusão Nuclear no Sol

- Ciclo p-p: produz, aproximadamente, 25 MeV de energia por ciclo

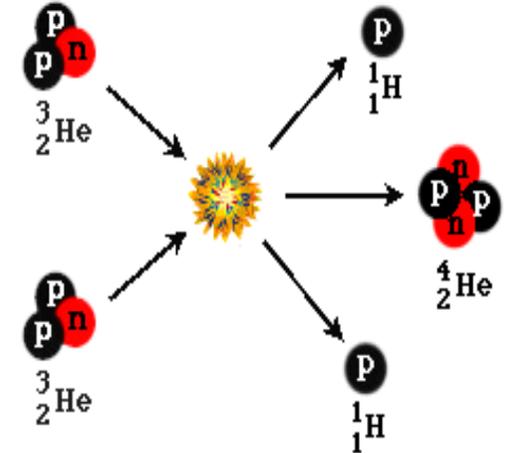
Step 1
(must happen twice)



Step 2
(must happen twice)

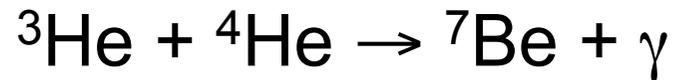


Step 3:

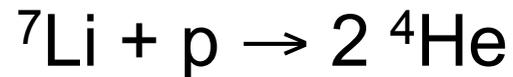
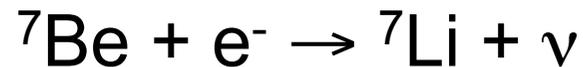


Fusão Nuclear no Sol

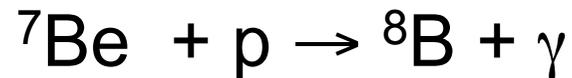
- Processos alternativos que consomem ^3He :



seguido de:



ou



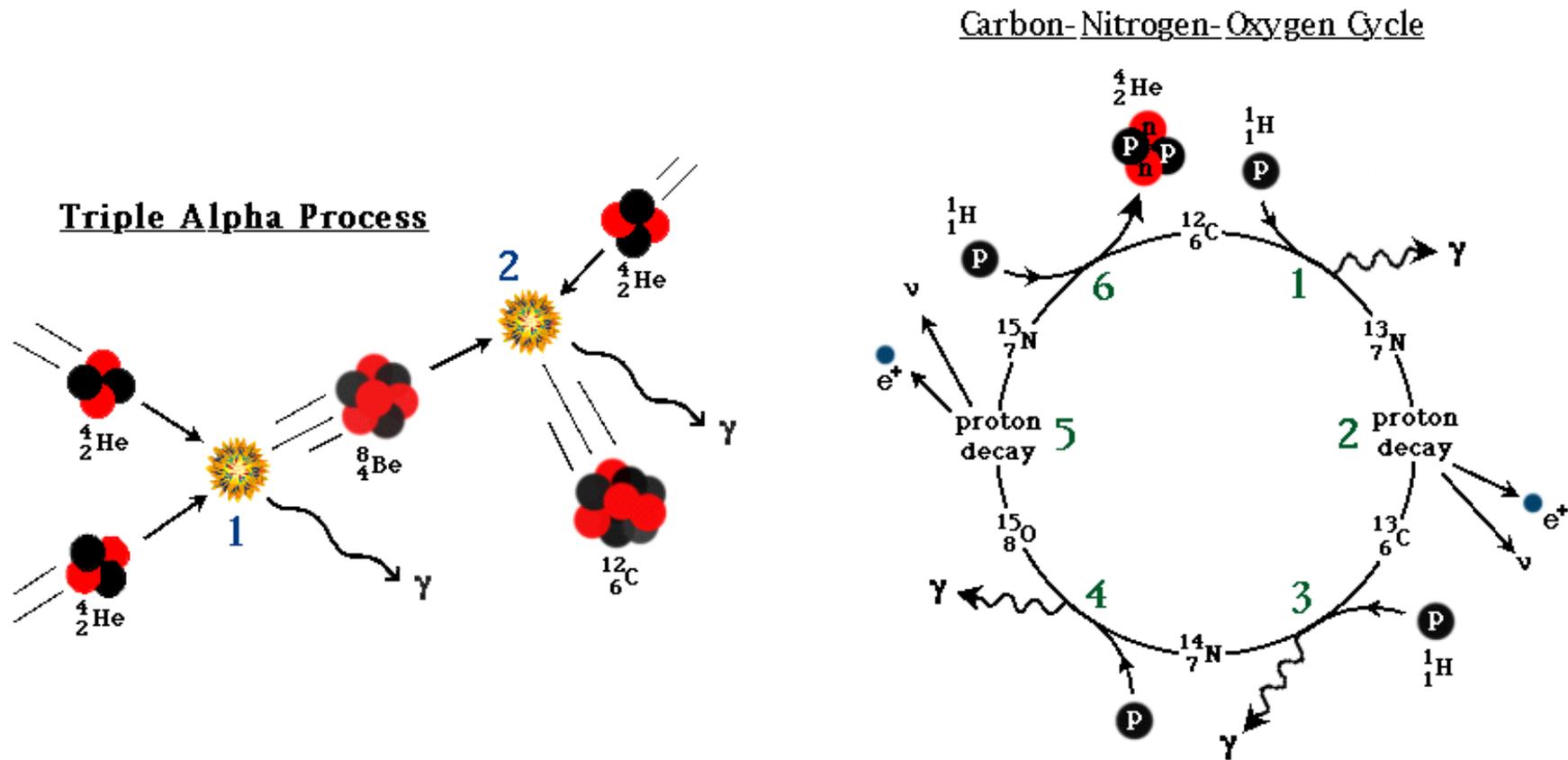
Processos Estelares

- O aumento de energia devido a esses processos faz a estrela expandir, tornando-se uma **Gigante Vermelha**



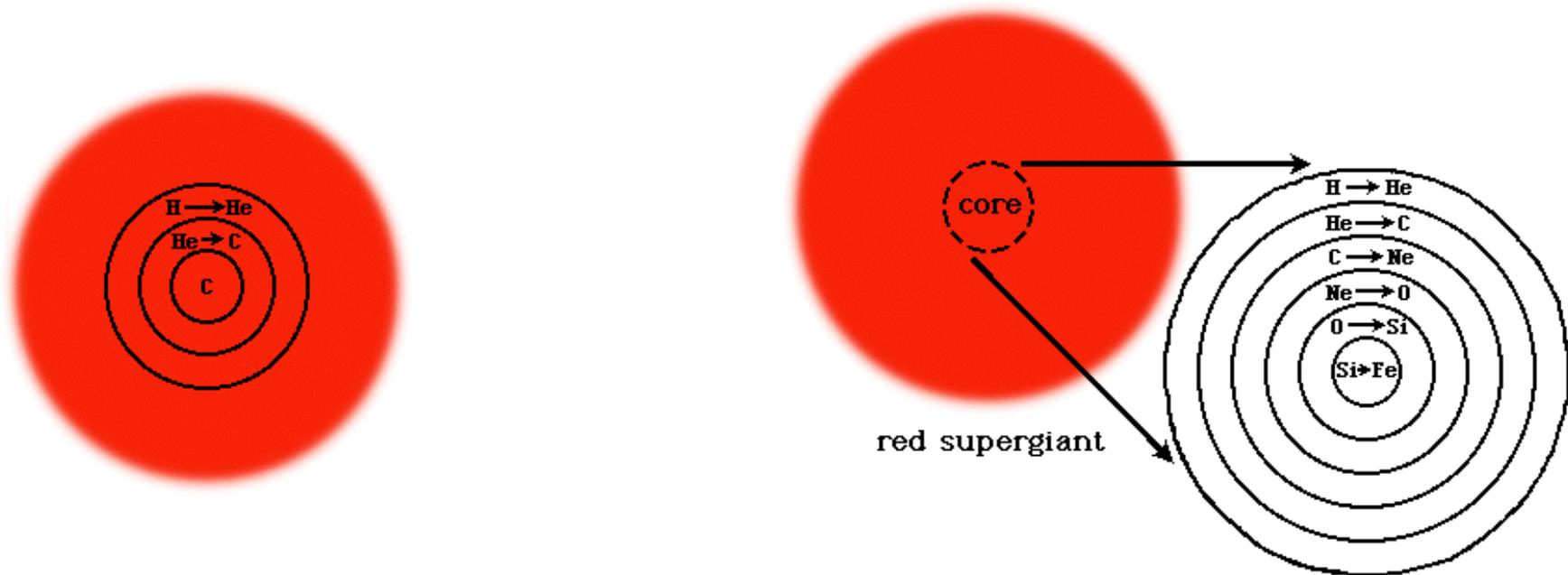
Fusão Nuclear no Sol

■ Ciclo CNO:



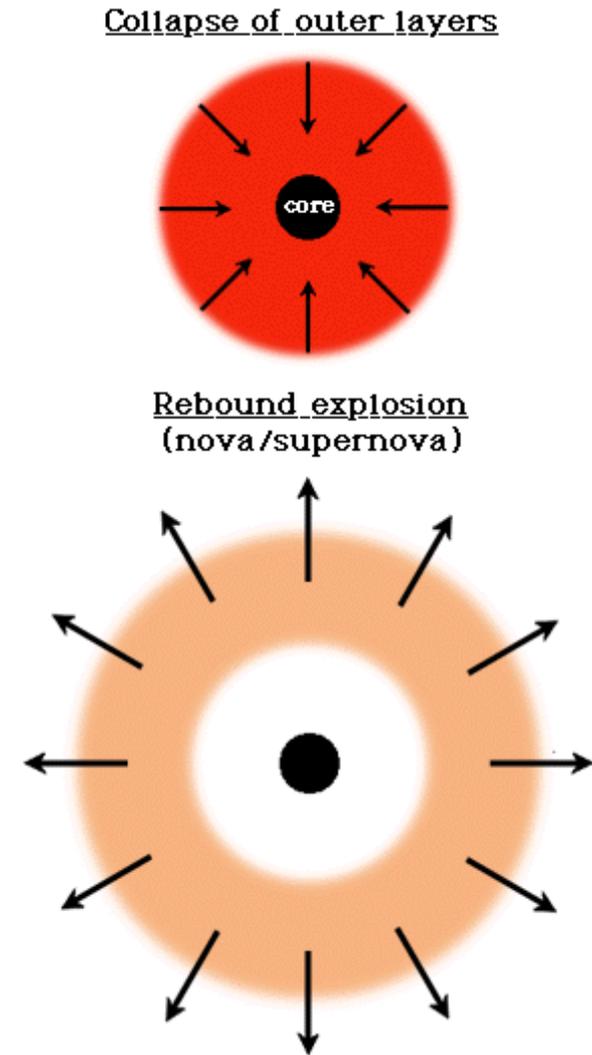
Processos Estelares

- Se a massa da estrela é grande, o Carbono pode fundir em outros elementos, sempre gerando mais energia (processo exotérmico)

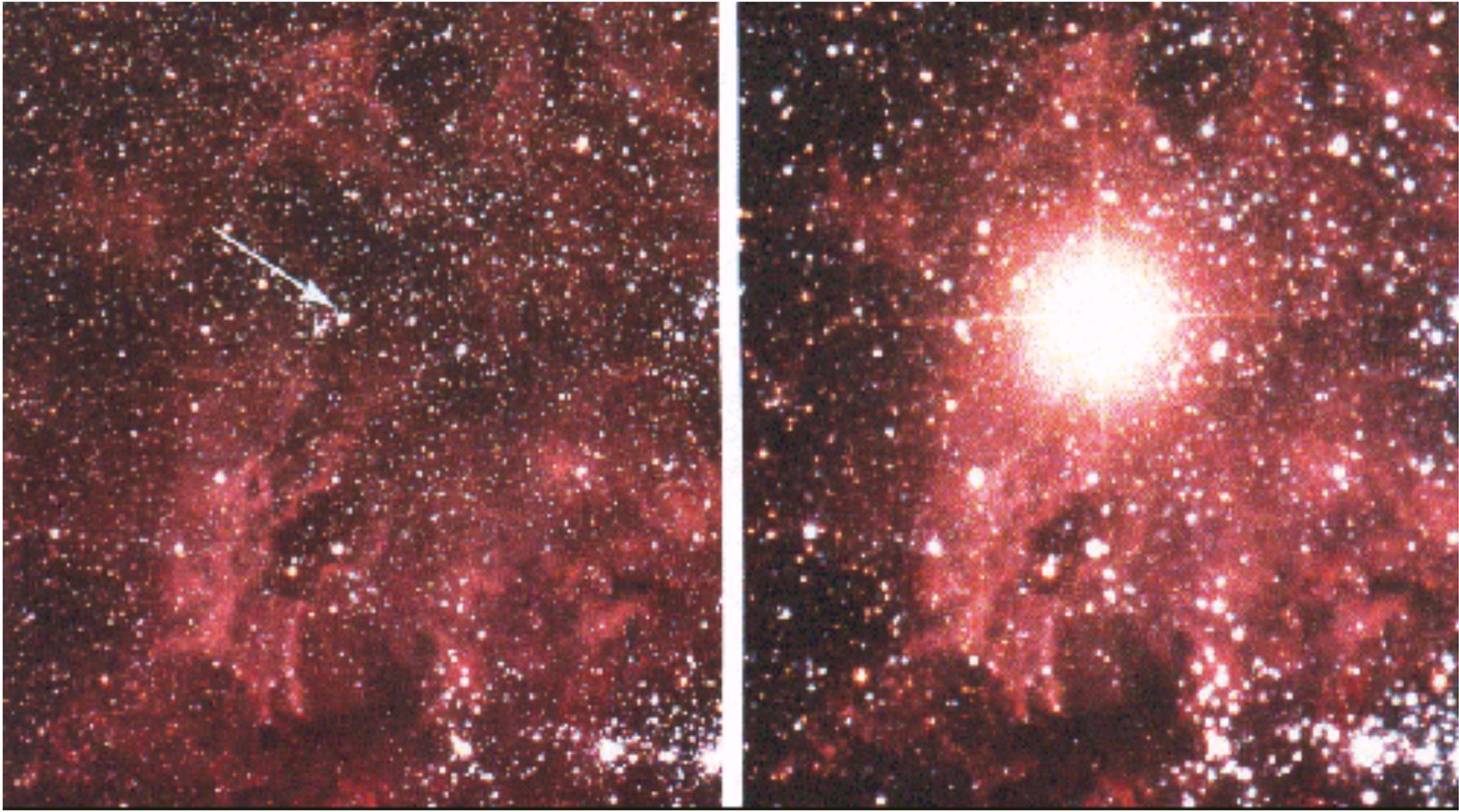


Processos Estelares

- A fusão do Ferro é endotérmica (absorve energia), que causará o colapso da estrela;
- Esta irá “ricochetear”, criando uma grande explosão: uma Supernova



Processos Violentos no Universo



Fusão Nuclear Controlada

- A fusão nuclear pode ser induzida e controlada em laboratório como uma fonte de energia;
- O principal processo utilizado é:
$${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} \quad (Q = 17,6 \text{ MeV})$$

Fusão Nuclear Controlada

- A extração de energia resume-se em obter esse material em uma temperatura e densidade suficiente para haver um número de reações para a extração de energia;
- Isso pode ser conseguido por confinamento magnético de um plasma ou um confinamento inercial através de laser;

Fusão Nuclear Controlada

