UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

"LOM3055 - FÍSICA PARA ENGENHARIA DE MATERIAIS II"

Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)
Escola de Engenharia de Lorena (EEL)
Universidade de São Paulo (USP)
Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970
durval@demar.eel.usp.br

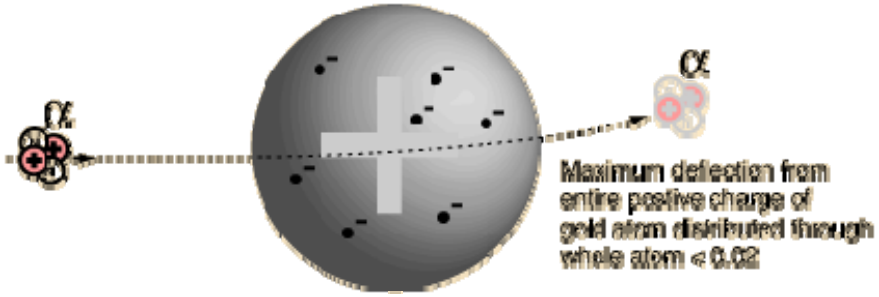
UNIDADE 11 -

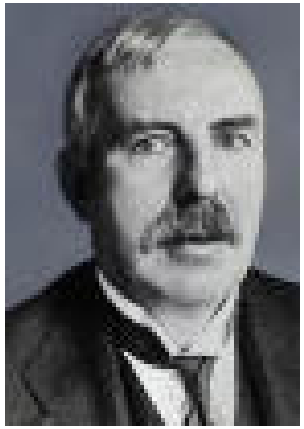
Física Nuclear

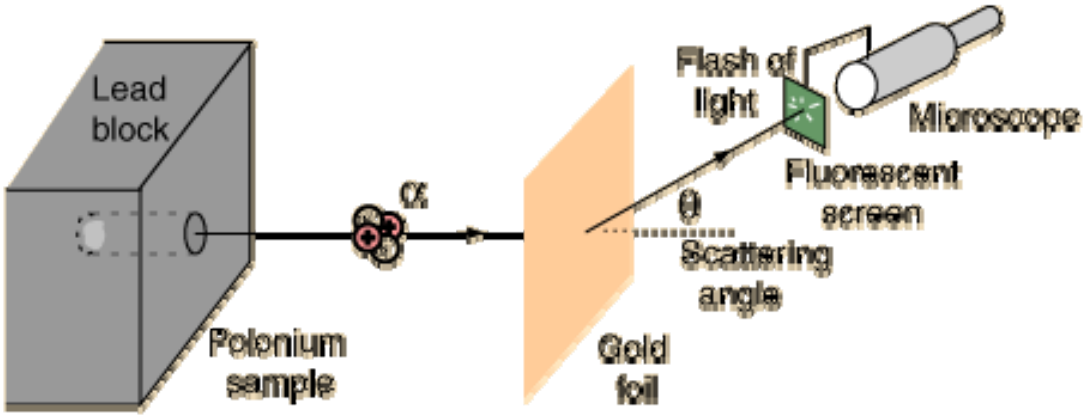
A descoberta do núcleo atômico

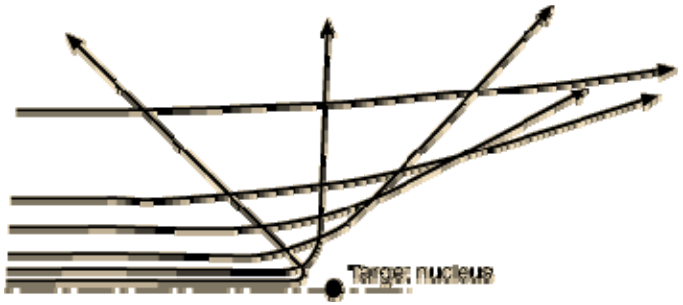
Modelo de Thomson (1910)

Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas α

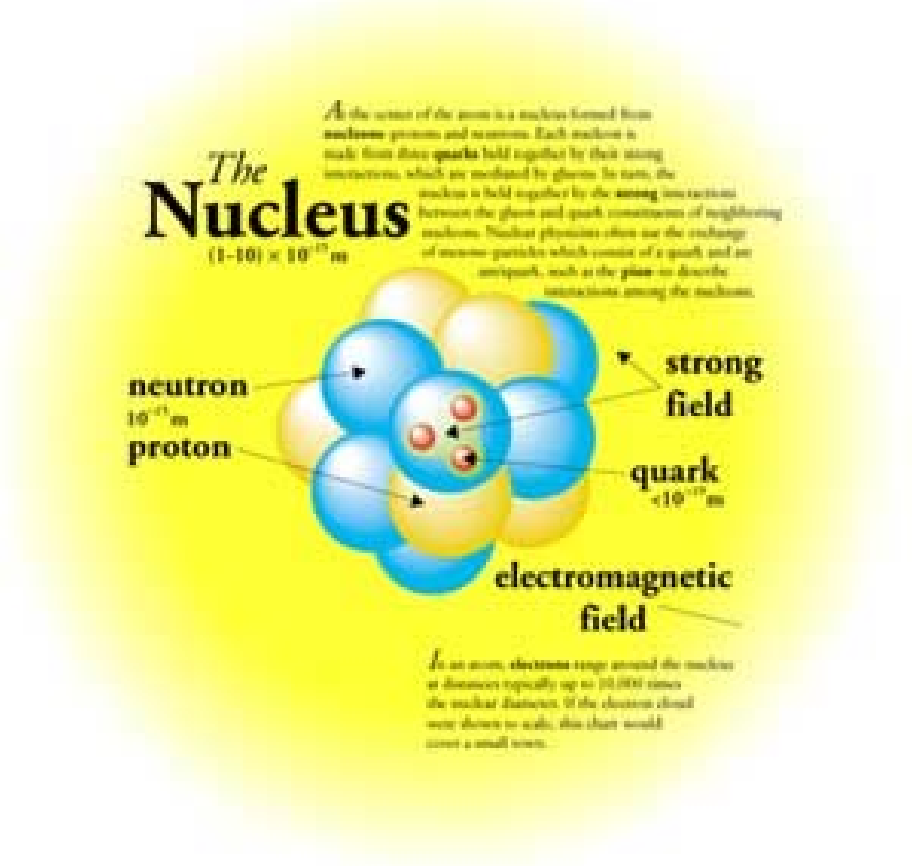


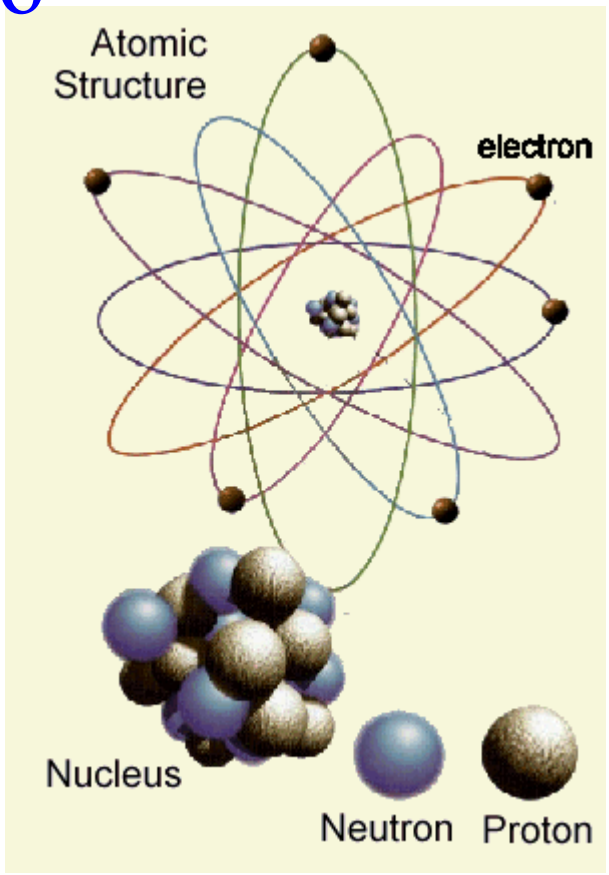






A descoberta do núcleo atômico





Rutherford propôs um modelo no qual toda a carga positiva dos átomos, que comportaria praticamente toda a sua massa, estaria concentrada numa pequena região do seu centro, chamada de ***núcleo***.

Algumas propriedades dos núcleos:

Número Atômico (Z) – número de prótons do núcleo.

Número de Nêutrons (N) – número de nêutrons do núcleo.

Número de Massa (A) – soma do número de prótons e nêutrons:

$$A = Z + N$$

Símbolo:

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{14}_{6}C$$

Nomenclatura:

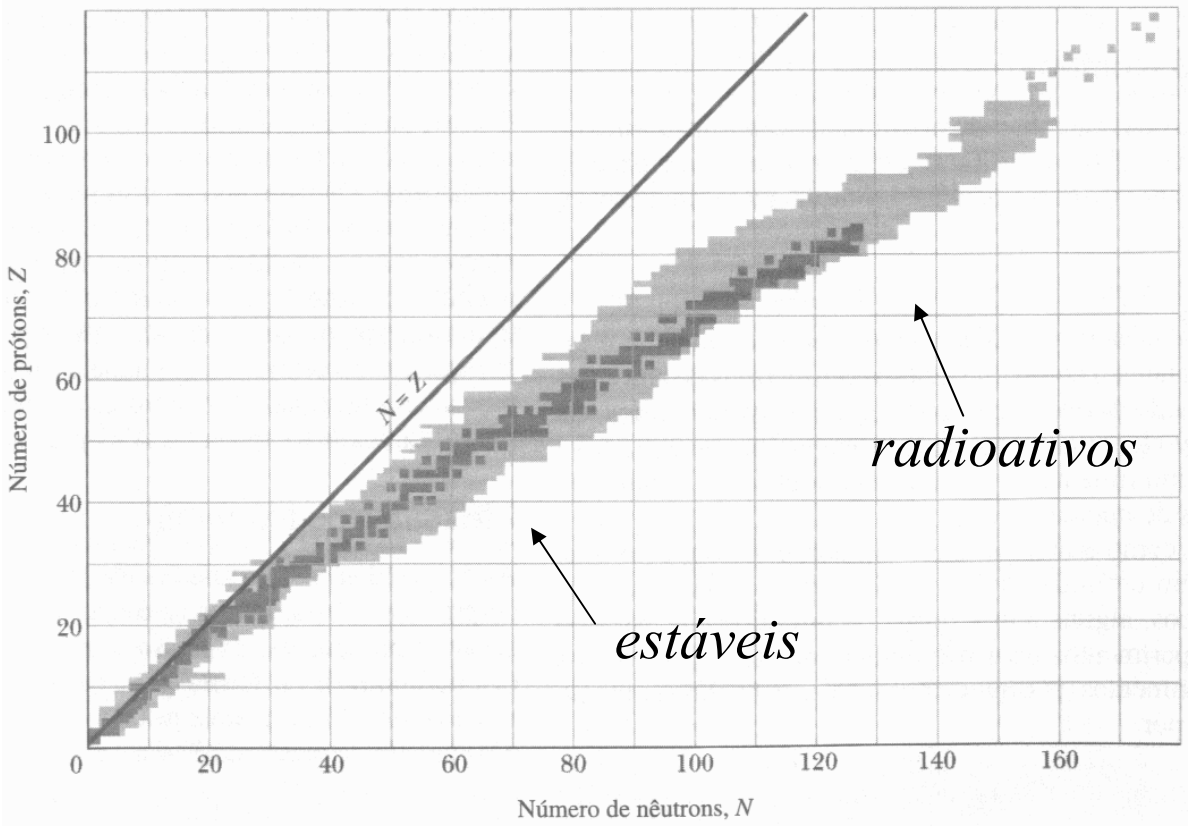
Isótopos – Os isótopos de um elemento têm o mesmo valor ***Z***, mas diferentes números de ***N*** e ***A***.

Exemplos:

$^{11}_{6}C$, $^{12}_{6}C$, $^{13}_{6}C$, $^{14}_{6}C$

$^{1}_{1}H$, $^{2}_{1}H$, $^{3}_{1}H$

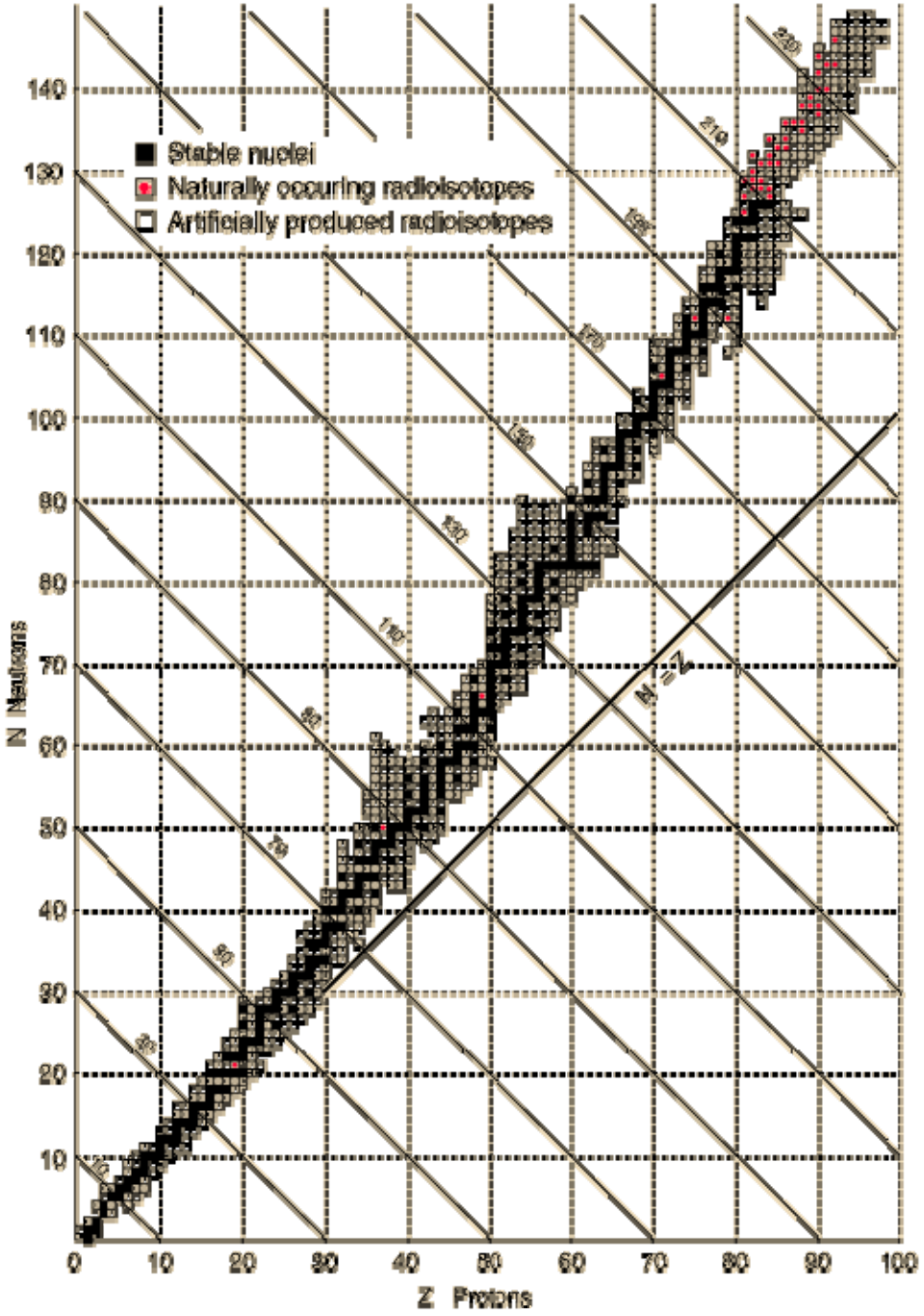
deutério *trítio*



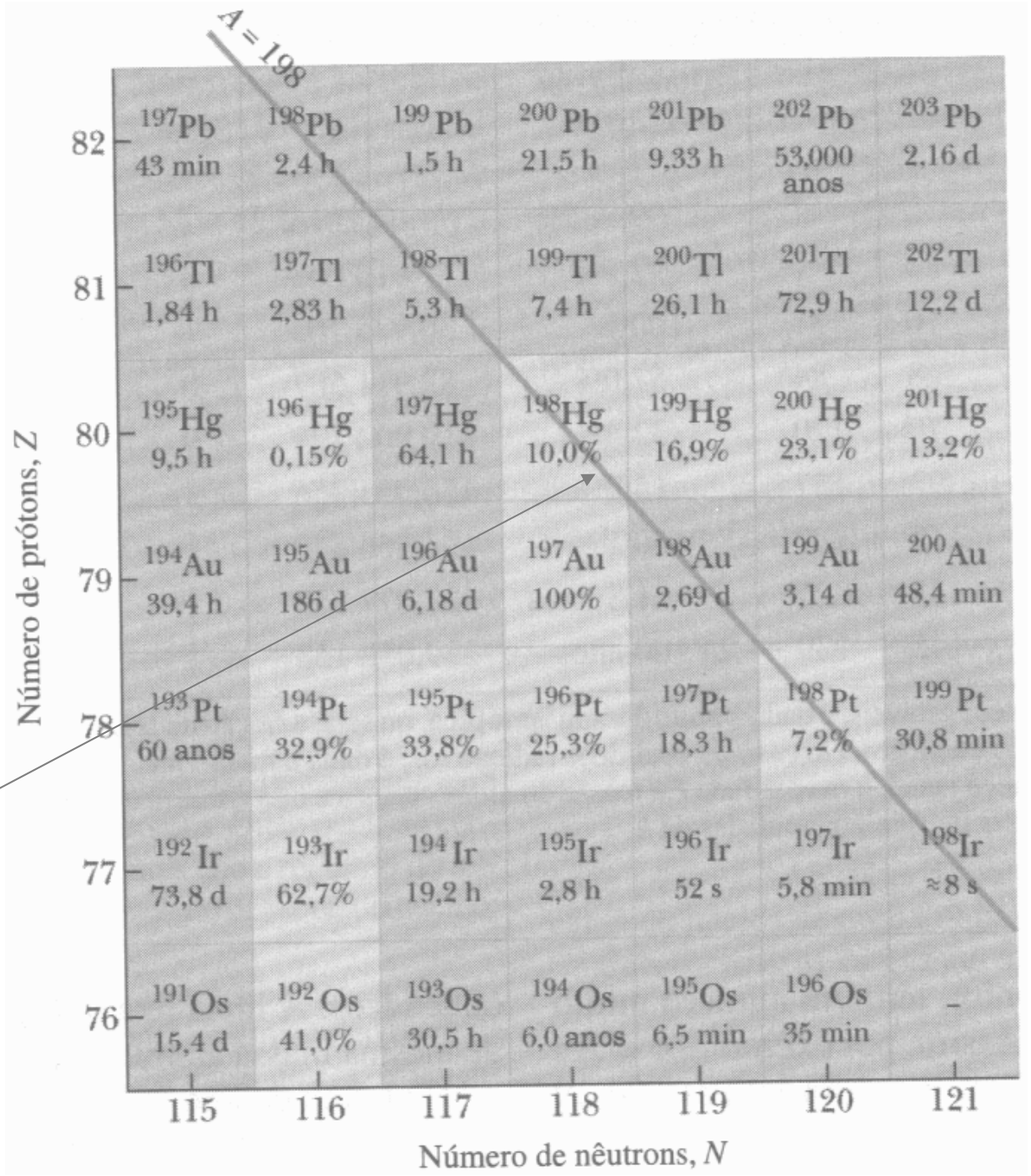
Carta de Nuclídeos

Carta de Nuclídeos

Átomos neutros de todos os isótopos do mesmo elemento apresentam as mesmas propriedades químicas, porém propriedades nucleares bastante diferentes. Assim, é conveniente definirmos os *nuclídeos*.



Vista ampliada da carta de nuclídeos:



$A = N+Z = const.$

Isóbaros

Raio do núcleo

A unidade apropriada é o *fermi :*

1 fermi = 1fm = 10^{-15} m

O raio do núcleo pode ser estimado por:

$$r = r_0 A^{1/3}$$

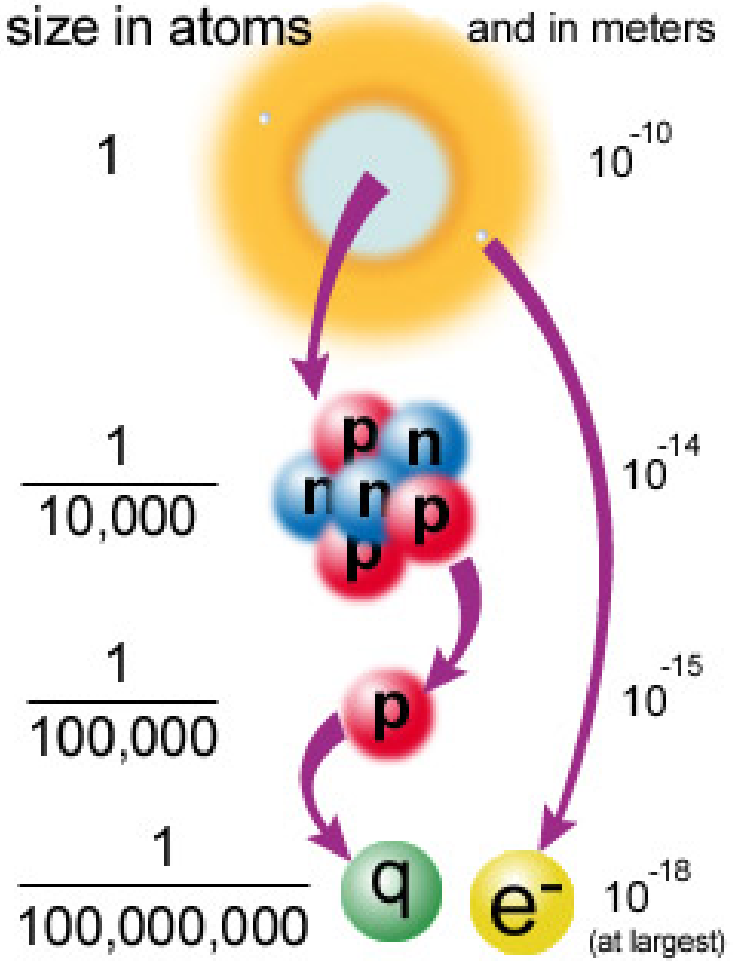
Onde ***A*** é o número de massa e $r_0 \approx 1{,}2$ fm

Compare:

1 Å = 10^{-10} m ou 1 nm = 10^{-9} m

usado em matéria condensada

As escalas dos átomos e núcleos



Carga e massa dos núcleos

• A unidade de massa atômica, ***u***, é definida de modo que a massa atômica do isótopo ^{12}C seja exatamente ***12u***. Assim, temos:

$$1u = 1{,}661 \times 10^{-27}\ kg$$

• Utilizando a relação $E = mc^2$ verificamos que ***1u*** em repouso corresponde a uma energia de ***~ 931,5 MeV***.

A massa de prótons, nêutrons e elétrons isolados também podem ser expressas em termos de *u* :

TABELA 30.1 Massas do Próton, do Nêutron e do Elétron em Várias Unidades

	Massa		
Partícula	kg	u	MeV/c^2
Próton	$1{,}6726 \times 10^{-27}$	1,007 276	938,28
Nêutron	$1{,}6750 \times 10^{-27}$	1,008 665	939,57
Elétron	$9{,}109 \times 10^{-31}$	$5{,}486 \times 10^{-4}$	0,511

Estabilidade nuclear

• Os núcleos são estáveis devido a existência da *força nuclear*. Trata-se de uma força atrativa intensa (muito superior à força Coulombiana) de curto alcance (da ordem de 2 fm), que age sobre todas as partículas nucleares.

• Atualmente acredita-se que a força nuclear seja uma manifestação da *interação forte*, que mantém os quarks unidos para formarem os prótons e os nêutrons.

Matéria Nuclear

Nuclídeos são formados por prótons e nêutrons.

Qual a densidade da matéria nuclear?

$$\rho = \frac{Am}{(4/3)\pi r^3}$$

Substituindo r pelo raio nuclear r_0...

$$\rho = \frac{1{,}67 \times 10^{-27}\, kg}{(4/3)\pi\left(1{,}2 \times 10^{-15}\, m\right)} \approx 2 \times 10^{17}\, kg/m^3$$

O resultado vale para qualquer núcleo.

Isto é 2×10^{14} maior que a densidade da água!!!

Energia de ligação dos núcleos

• A massa M de um núcleo é menor que a soma das massas isoladas, m_i, das partículas que o compõem.

• A energia de ligação de um núcleo é dada por:

$$\Delta E_{el} = \sum_i \left(m_i c^2\right) - Mc^2$$

Quantidade de energia que deve ser fornecida ao sistema (núcleo) para separá-lo em todas a suas partículas constituintes, que apresentem massas de repouso isoladas de valor m_i.

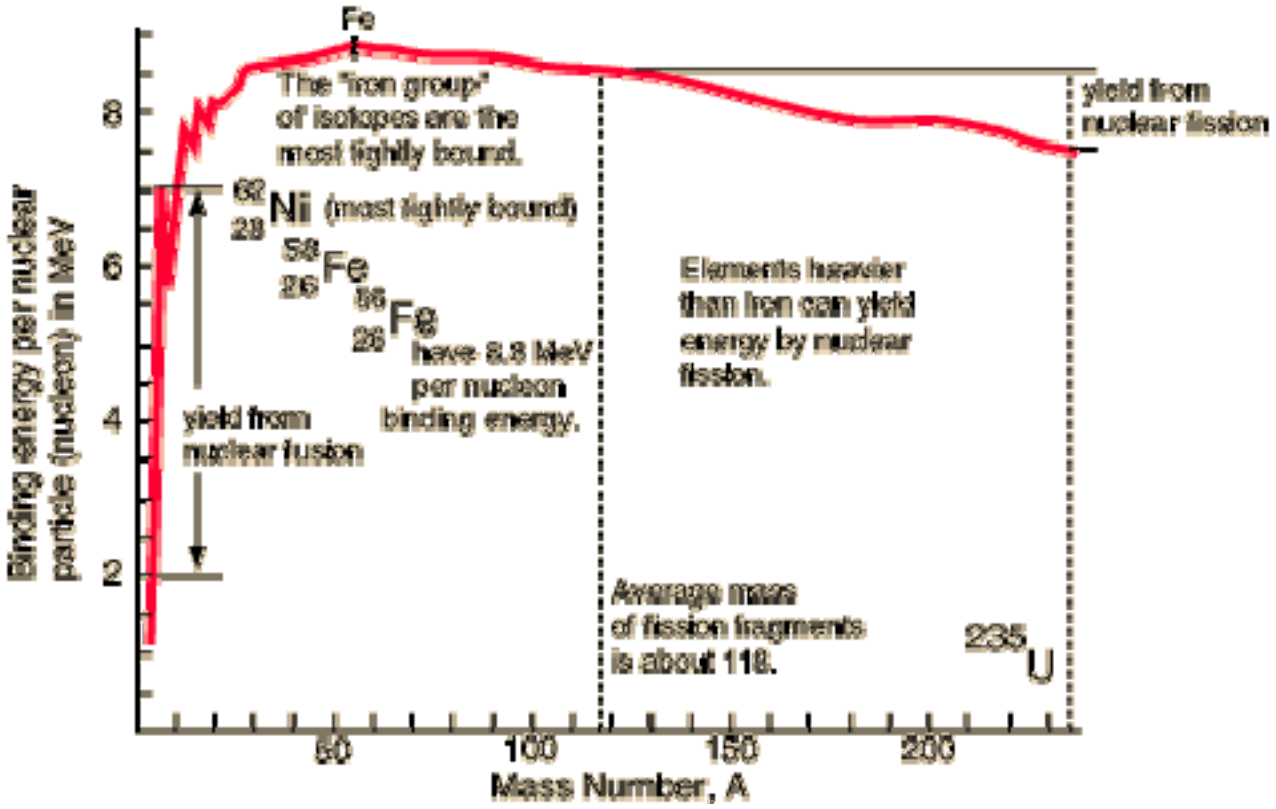
• *Assim, a Energia de Ligação é uma medida da estabilidade do núcleo*.

Energia de ligação dos núcleos

• Uma medida ainda melhor é a energia de ligação por núcleon (próton ou nêutron):

$$\Delta E_{eln} = \frac{\Delta E_{el}}{A}$$

Esta é a energia média necessária para arrancar um núcleon do núcleo.



Ex.: Energia de ligação do ^{120}Sn

O ^{120}Sn tem Z = 50 e N = 70

ou

(núcleo de ^{120}Sn) $\leftrightarrow$ 50 prótons + 70 nêutrons

(átomo de ^{120}Sn) $\leftrightarrow$ 50 átomos de H + 70 nêutrons

$$\Delta E_{el} = \sum_i \left(m_i c^2\right) - Mc^2$$

$$\Delta E_{el} = 50\ m_H\ c^2 + 70\ m_n c^2 - M_{Sn}\ c^2$$

$$\Delta E_{el} = [50\ (1{,}0078252) + 70(\ 1{,}008644) - 119{,}902]\ c^2$$

$\Delta E_{el} = 1{,}095553\ c^2 = 1020{,}5$ MeV

$\Delta E_{eln} \cong$ 8,50 MeV/núcleon

Q de uma reação nuclear

• A energia Q (ou de decaimento) de uma reação envolvendo produtos nucleares iniciais e finais é o negativo da energia de ligação :

$$\Delta E_{el} = -Q$$

ou

$$Q = -\Delta m\, c^2 = (m_i - m_f)\, c^2$$

Que pode ser endotérmica ($Q < 0$) ou exotérmica ($Q > 0$).

Prob.1:

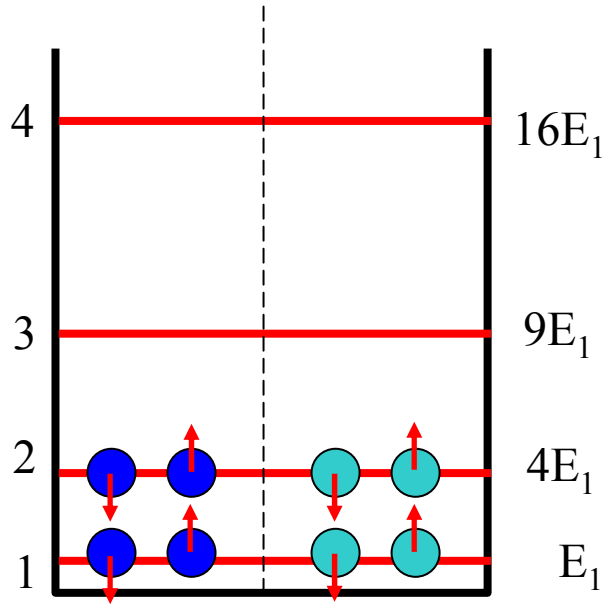
Determine a energia Q da reação:

$$p + {}^{7}Li \rightarrow {}^{4}He + 4\ {}^{1}H$$

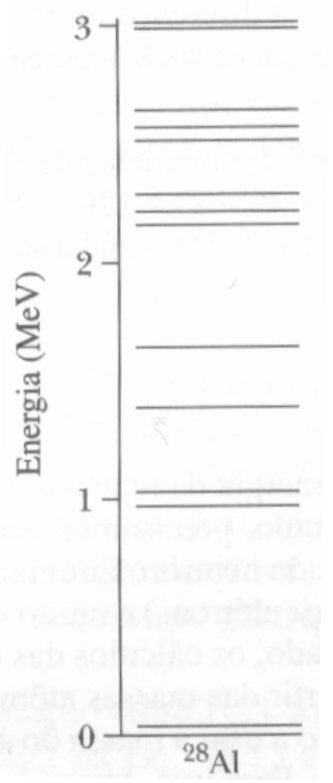
e verifique se a reação é endotérmica ou exotérmica.
A massa atômica do ^{7}Li é 7,016004 u, a do ^{4}He é 4,002603u, a do ^{1}H é 1,007825 e a do próton é 1,007276 u .

Níveis de energia dos núcleos

• A energia dos núcleos, como a dos átomos, é quantizada. Quando um núcleo sofre uma transição para um estado de menor energia geralmente emite um fóton na ***região gama*** do espectro eletromagnético.



Quatro nêutrons e quatro prótons numa caixa unidimensional



Níveis de energia do nuclídeo ^{28}Al

Decaimento radioativo

A maioria dos núcleos conhecidos são instáveis e, portanto, ***radioativos***. Este núcleos emitem espontaneamente uma ou mais partículas, transformando-se em um outro nuclídeo.

A taxa R de decaimento radioativo, ou atividade de um radionuclídeo, na qual ocorre um processo de decaimento em uma amostra radioativa, é proporcional ao número N de nuclídeos radioativos presentes na amostra:

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

onde λ é a constante de desintegração do radionuclídeo.

Decaimento radioativo

Integrando de $t = 0$ (quando temos N_0 núcleos radioativos não desintegrados) a t (quando nos restam N núcleos):

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad \Rightarrow \quad ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

Logo,

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

onde N_0 é o número de radionuclídeos na amostra em t=0 e N é o número remanescente em qualquer instante t.

Decaimento radioativo

Podemos também determinar diretamente a evolução da taxa de decaimento $R = - dN/dt$.
Derivando a eq. anterior em relação ao tempo:

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$$

Logo, podemos definir:

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

onde $R_0 = \lambda N_0$ é a taxa de decaimento em t=0 e R é a taxa em qualquer instante subsequente t.

Decaimento radioativo

Freqüentemente chama-se de *atividade* a taxa de decaimento total de uma amostra.

A unidade para a atividade (no SI) é o ***becquerel*** :

1 becquerel = 1 Bq = 1 decaimento por segundo

Eventualmente utiliza-se também o ***curie***, definido por:

1 curie = 1 Ci = 3,7 x 10^{10} Bq = 3,7 x 10^{10} decaimentos por segundo

Decaimento radioativo

Meia-Vida ($T_{1/2}$):

Tempo necessário para que N e R caiam a metade do valor inicial:

$$R(T_{1/2}) = \frac{1}{2} R_0 = R_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$2 = e^{\lambda T_{1/2}}$$

Tomando o logarítmo natural temos: $\ln 2 = \lambda T_{1/2}$

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

Decaimento radioativo

Vida média (τ):

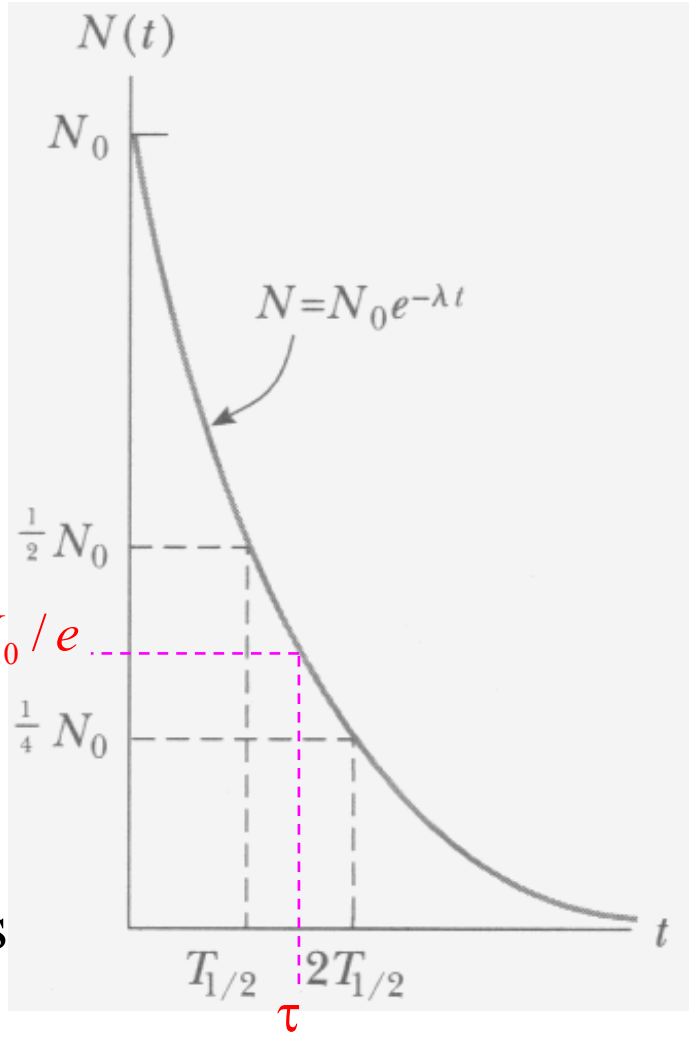
Tempo necessário para que N e R caiam a $1/e$ do valor inicial:

$$R(\tau) = \frac{1}{e} R_0 = R_0 e^{-\lambda \tau} \rightarrow \boxed{\tau = 1/\lambda}$$

Observe ainda que temos a relação:

$$\boxed{T_{1/2} = \tau \ln 2 \approx 0{,}693\,\tau}$$

• Não existe maneira de determinarmos qual nuclídeo decairá num dado instante. Podemos apenas determinar a probabilidade deste decaimento ocorrer e, portanto, as taxas de decaimento acima.



Prob.2:

Na mistura de isótopos que se encontra atualmente na Terra o ^{238}U tem uma abundância de 99,3% e o ^{235}U tem uma abundância de 0,7%. Observou-se que os tempos de vida médios destes isótopos são, respectivamente, $6{,}52 \times 10^{9}$ anos e $1{,}02 \times 10^{9}$ anos. Supondo que eles eram igualmente abundantes quanto o urânio foi formado inicialmente na Terra, estime quanto tempo decorreu desde essa época.

Processos de decaimento radioativo

• Os núcleos radioativos desintegram-se espontaneamente pelos decaimentos ***alfa*** e ***beta***.

a) O decaimento alfa :

No decaimento alfa o núcleo X, emite uma partícula alfa (núcleo de ^{4}He, dois prótons e dois nêutrons) transformando-se no núcleo Y :

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He $$

Processos de decaimento radioativo

Exemplos:

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He $$

$$ {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He $$

Q = 4,25 MeV

$T_{1/2} = 4{,}47 \times 10^{9}$ anos (idade da Terra)

$$ {}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He $$

Q = 4,87 MeV

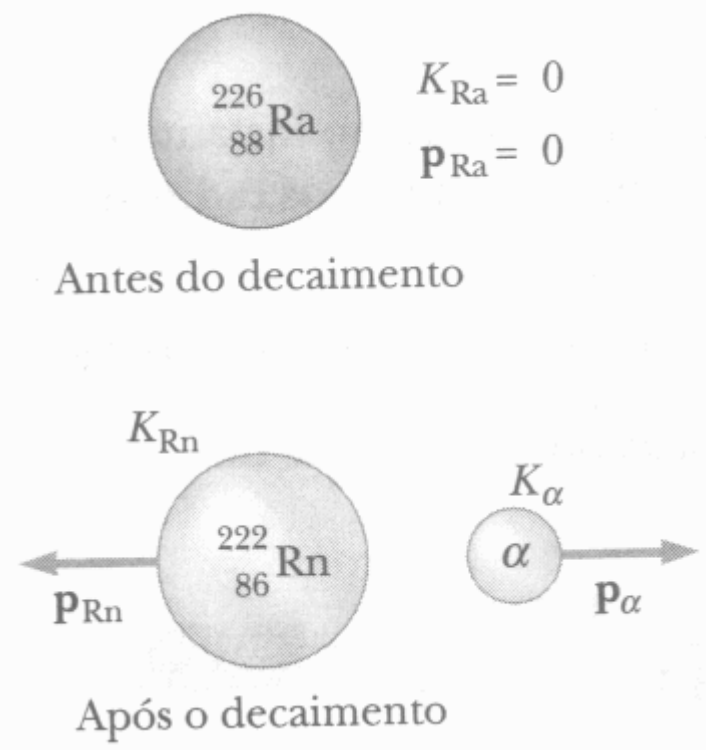
A quantidade Q é a energia de desintegração do processo, isto é, a quantidade de energia liberada durante o decaimento.

Processos de decaimento radioativo

• O decaimento alfa pode ocorrer espontaneamente porque o núcleo pai, X, apresenta uma energia de repouso (massa) maior que a soma das energias de repouso (massas) do núcleo filho, Y, e da partícula α. A energia de desintegração é dada por:

$$Q = \left(M_X - M_Y - M_\alpha\right)c^2$$

Esta energia corresponde à diminuição da energia de ligação do sistema e aparece como energia cinética do núcleo filho e da partícula α.
A partícula α, por ser mais leve, carregará quase toda a energia cinética.



Processos de decaimento radioativo

O mecanismo do decaimento alfa

- A meia vida do ^{238}U é de $4{,}5 \times 10^{9}$ anos (idade da Terra). Se o processo de decaimento é "energeticamente favorável" porque os núcleos não decaem todos rapidamente?

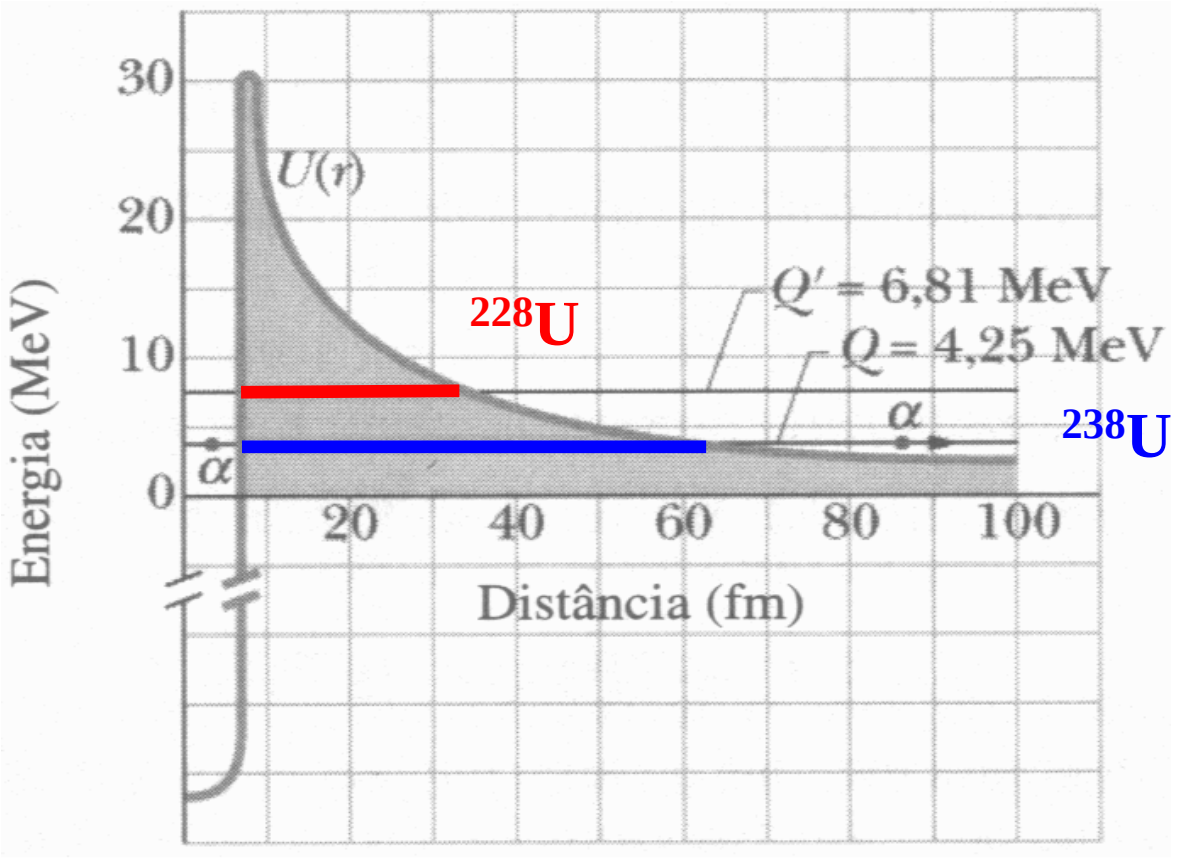
(O processo de decaimento α foi explicado em 1928 por Gamow, Gurney e Condon.)

No modelo, considera-se a partícula α previamente existindo no interior do núcleo.

A partícula α só é capaz de atravessar a barreira de potencial gerada pelo núcleo através de um processo quântico de tunelamento, que para diferenças apreciáveis de energia é bastante improvável.

O mecanismo do decaimento alfa

O isótopo ^{228}U, que apresenta uma Q = 6,81 MeV, tem uma meia vida de apenas $T_{1/2}$ = 9,1 minutos.



Barreiras de potencial semelhantes são encontradas também em reações químicas. Nestes casos elas são geradas pela repulsão eletrônica, ao invés da atração entre os núcleons. Mas da mesma forma representam a existência de "estados intermediários" energeticamente proibitivos. Normalmente elas são superadas pela elevação da temperatura no sistema, não sendo necessário "esperar" pelos processos de tunelamento.

Processos de decaimento radioativo

Exemplo 1: $^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$

A carga e o número de núcleons se conserva.
A energia liberada na desintegração é

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2$$

$c^2 \approx 931{,}494$ MeV/u

$Q = [238{,}05079 - (234{,}04363 + 4{,}00260)]c^2 \rightarrow Q \approx 4{,}25$ MeV

Exemplo 2: $^{238}_{92}U \rightarrow {}^{237}_{91}Pa + {}^{1}_{1}H$

$Q = [238{,}050 - (237{,}0512 + 1{,}007)]c^2 \rightarrow Q \approx -7{,}64$ MeV (proibida)

Processos de decaimento radioativo

b) O decaimento beta

• O decaimento beta ocorre em núcleos que têm excesso, ou falta, de nêutrons para adquirir estabilidade.

• No decaimento ***beta menos*** um dos nêutrons no interior do núcleo emite um elétron e um anti-neutrino, transformando-se em um próton:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \overline{\nu}$$

Processos de decaimento radioativo

No decaimento ***beta mais*** um dos prótons no interior do núcleo emite um pósitron (anti-elétron) e um neutrino, transformando-se em um nêutron:

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu$$

• O neutrino (pequeno nêutron) foi postulado para dar conta da conservação do momento angular e linear nas reações acima.

• O neutrino, ν, apresenta carga nula e massa, possivelmente, também nula (menor que 7 eV/c^2).

• Além disso apresentam uma interação muito fraca com a matéria (um livre caminho médio que pode atingir milhares de anos luz). Foram detectados pela primeira vez em 1953, por Reines e Cowan.

Processos de decaimento radioativo

Em termos dos nuclídeos as fórmulas para os decaimentos beta são:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^{-} + \overline{\nu} $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + e^{+} + \nu $$

Como exemplos de decaimentos beta temos a decaimento do carbono 14 e do nitrogênio 12:

$$ {}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^{-} + \overline{\nu} $$

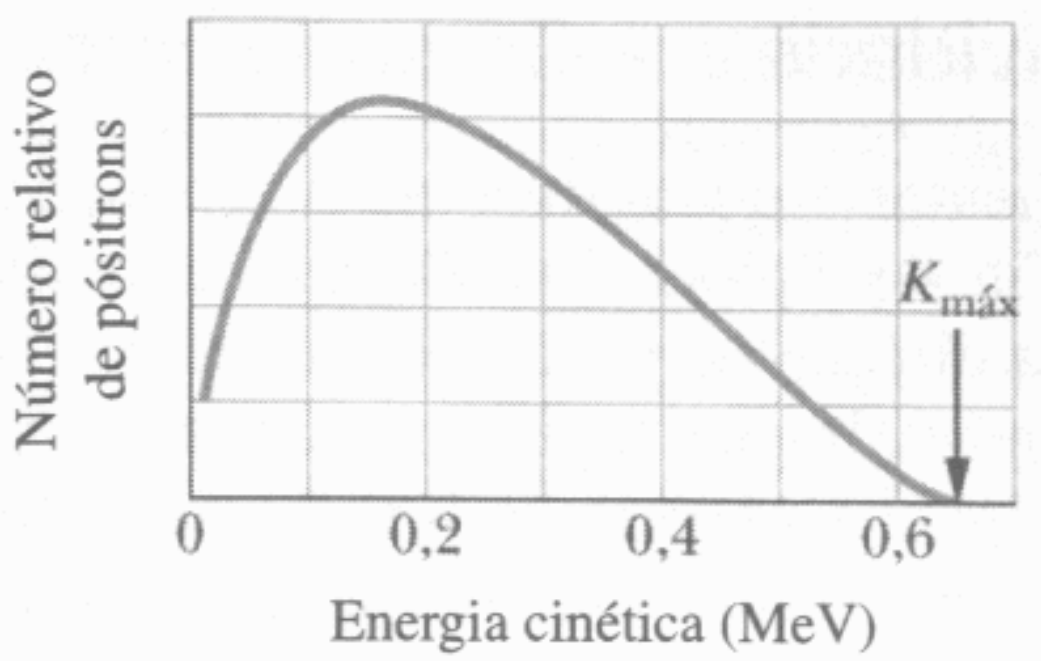
$$ {}^{12}_{7}N \rightarrow {}^{12}_{6}C + e^{+} + \nu $$

Processos de decaimento radioativo

• Enquanto no decaimento α praticamente toda a energia liberada, Q , vai para a partícula α, no decaimento β esta energia pode se distribuir de diferentes formas entre a energia do elétron (pósitron) e do anti-neutrino (neutrino).

• Porém, os pósitrons apresentam uma energia cinética máxima igual a Q, no caso em que os neutrinos saem com energia nula (ver Figura):

$$K_{\max}^{el} = Q$$



Medida da dose de radiação

a) Dose absorvida:

Energia absorvida por unidade de massa:

1 Gy (gray) = 1 J/kg = 100 rad (radiation absorbed dose)

Uma dose de raios gama de 3 Gy = 300 rad aplicados ao corpo inteiro causa a morte de 50% das pessoas envolvidas.

b) Dose equivalente:

Dose Equivalente = Dose Absorvida x Efeito Biológico (RBE)

Raios gama e elétrons: RBE =1, nêutrons: RBE = 5 e partículas alfa: RBE = 10.

Unidade (sievert): 1 Sv = 100 rem.

Prob.3:

Os únicos núcleos conhecidos com A = $^{7}_{3}Li$ e o $^{7}_{4}Be$ cujas massas atômicas são $M_{3,7}$ = 7,01600u e $M_{4,7}$ = 7,01693u, respectivamente. Qual destes núcleos é mais estável em relação ao decaimento beta?

Datação radioativa de rochas

- Feita pelo decaimento de nuclídeos de vida muito longa.

  Por exemplo: 1) Uso do decaimento de ^{40}K para o isótopo estável ^{40}Ar com $T_{1/2} = 1{,}25 \times 10^9$ anos.

  2) Decaimento de ^{235}U para ^{207}Pb.

Prob. 4:

A análise por espectrometria de massa dos átomos de potássio e argônio presentes em uma rocha lunar mostra que a razão entre o número de átomos de ^{40}Ar (estáveis) e o número de átomos de ^{40}K (radioativos) é 10,3. Suponha que todos os átomos de argônio tenham sido produzidos pelo decaimento de átomos de potássio, com uma meia-vida de $1{,}25 \times 10^9$ anos. Qual é a idade da rocha?

Datação radioativa de matéria orgânica

• O decaimento do ^{14}C é utilizado para datar amostras orgânicas.
A razão entre o ^{14}C e o ^{12}C na nossa atmosfera é de $1,3 \times 10^{-12}$.
(O ^{14}C é produzido pelo choque de raios cósmicos com o nitrogênio do ar na alta atmosfera.)

• Todos os organismos vivos apresentam esta mesma razão em sua constituição, graças à respiração ou fotossíntese.

• Porém, quando morrem esta troca com o ambiente cessa; o ^{14}C do organismo sofre o decaimento beta, com uma meia-vida de 5730 anos.

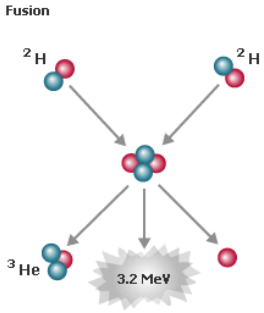
• Assim, pode-se determinar a idade do material orgânico medindo a razão entre os isótopos de carbono.

Prob. 5:

Um osso tem 200g de carbono e um atividade beta de 400 desintegrações/min. Qual a idade do osso?

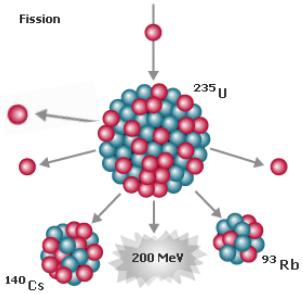
Energia nuclear

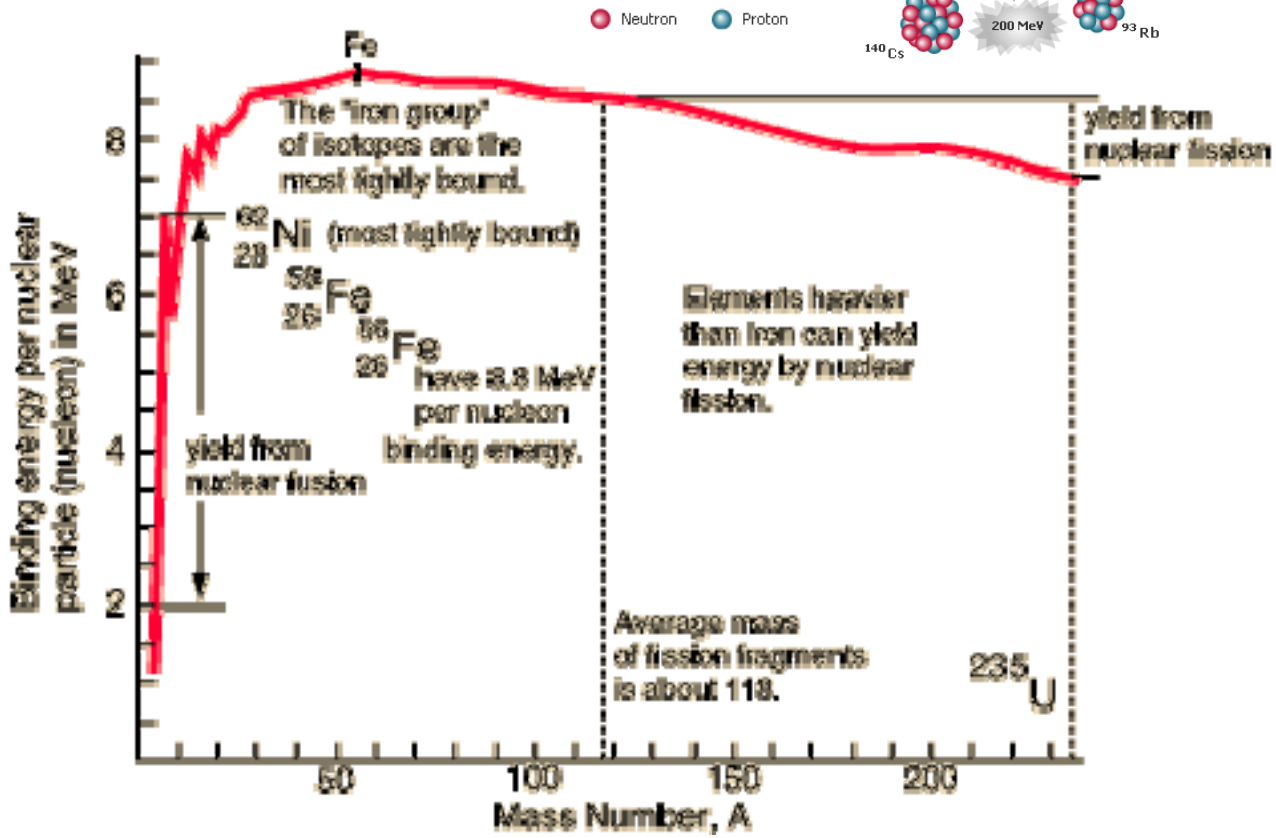
- Vimos que $\Delta E_{eln} = \frac{\Delta E_{el}}{A}$ é a energia média necessária para arrancar um núcleon do núcleo.



Fusão nuclear

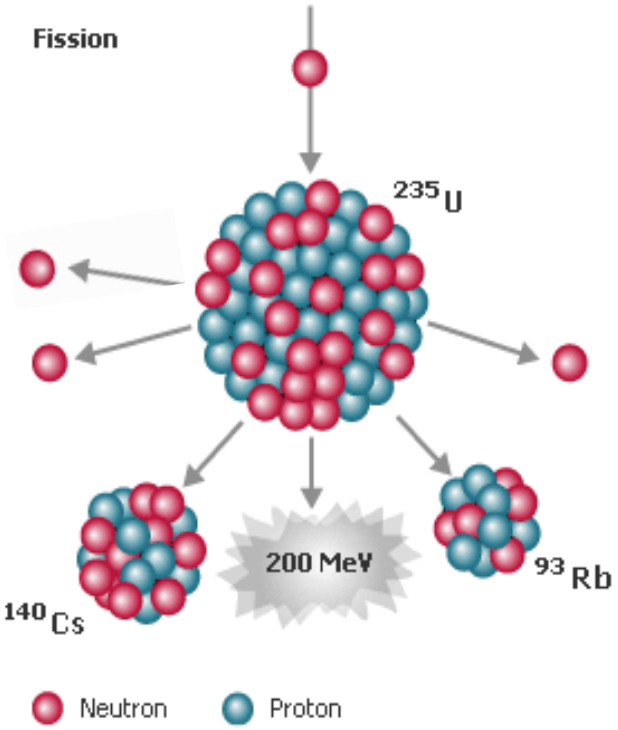
Fissão nuclear





Energia nuclear

Fissão nuclear



Os primeiros experimentos de fissão nuclear foram feitos por Enrico Fermi em 1935 e por Otto Hahn e Fritz Strassman, em 1939.

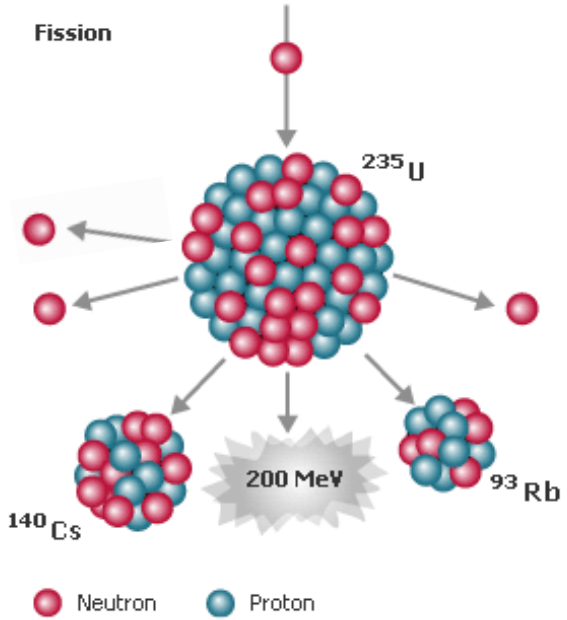
As reações típicas são:

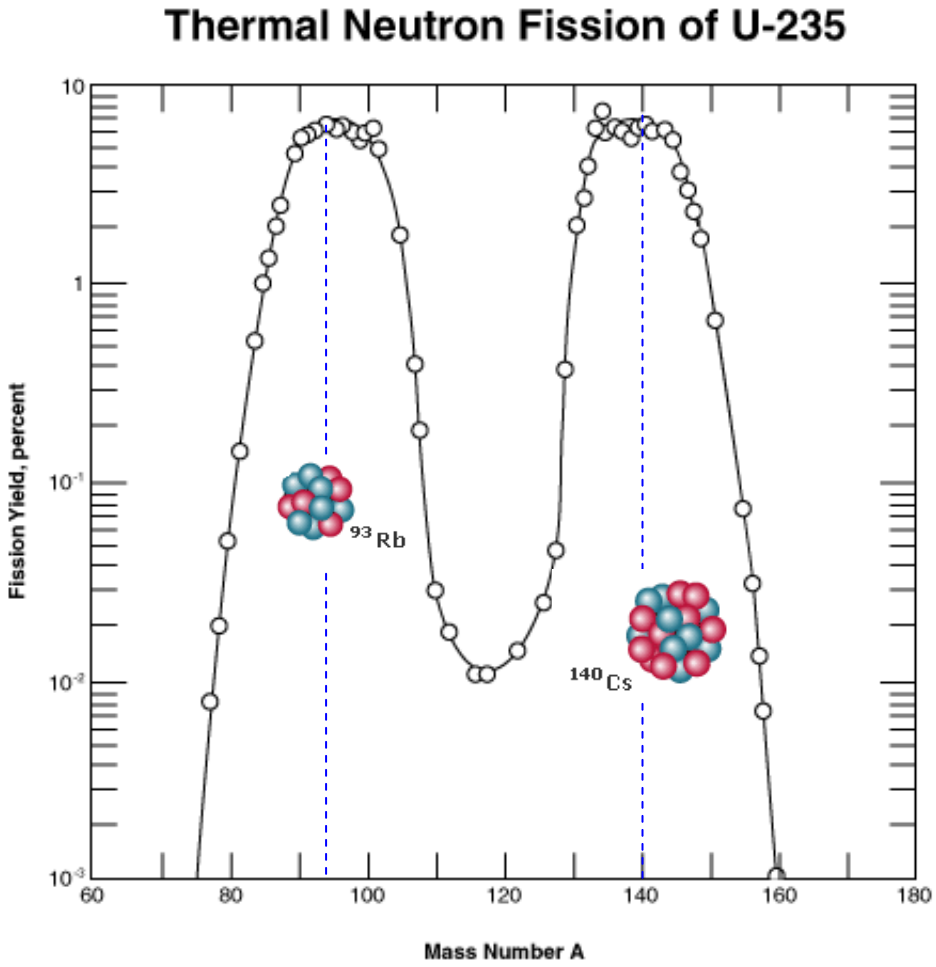
$$^{235}U + n \longrightarrow {}^{236}U \longrightarrow {}^{140}Xe + {}^{94}Sr + 2n$$

$$^{235}U + n \longrightarrow {}^{236}U \longrightarrow {}^{140}Cs + {}^{93}Rb + 3n$$

Energia nuclear

Distribuição dos fragmentos de fissão do ^{235}U





Energia nuclear

Fissão nuclear

$$^{235}U + n \rightarrow {}^{236}U \rightarrow {}^{140}Xe + {}^{94}Sr + 2n$$

	$^{140}Xe \rightarrow$	$^{140}Cs \rightarrow$	$^{140}Ba \rightarrow$	$^{140}La \rightarrow$	^{140}Ce
$T_{1/2}$	**14 s**	**64 s**	**13 dias**	**40 h**	**Estável**
Z	**54**	**55**	**56**	**57**	**58**

	$^{94}Sr \rightarrow$	$^{94}Y \rightarrow$	^{94}Zr
$T_{1/2}$	**75 s**	**19 min**	**Estável**
Z	**38**	**39**	**40**

Finalmente:

$$^{235}U \rightarrow {}^{140}Ce + {}^{94}Zr + n$$

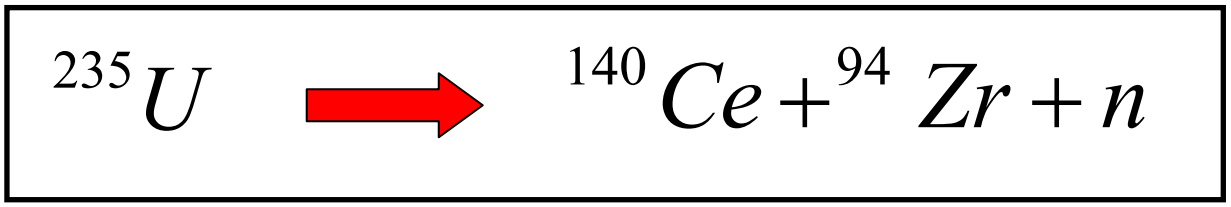
Energia nuclear

Fissão nuclear

Prob. 6:

Determine a energia de desintegração Q para o evento de fissão da equação abaixo, típica para a fissão do ^{235}U, levando em conta o decaimento dos fragmentos da fissão. As massas necessárias para realizar o cálculo são:

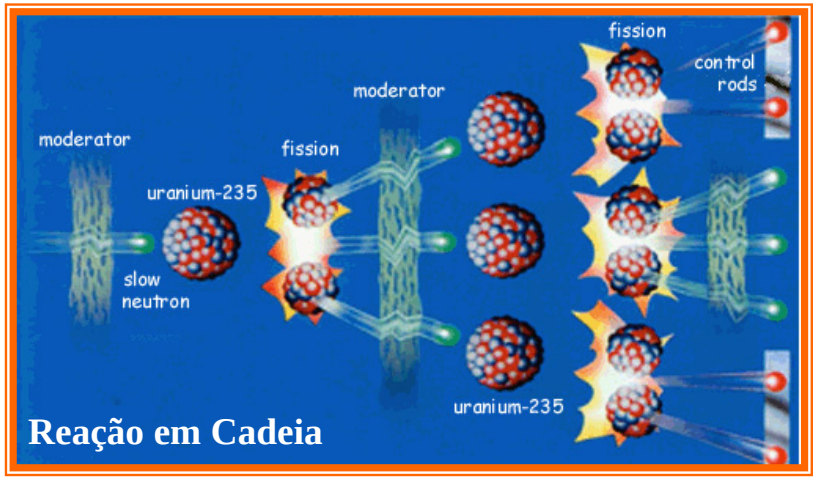
^{235}U	235,0439 u
^{140}Ce	139,9054 u
^{94}Zr	93,9063 u
n	1,00866 u



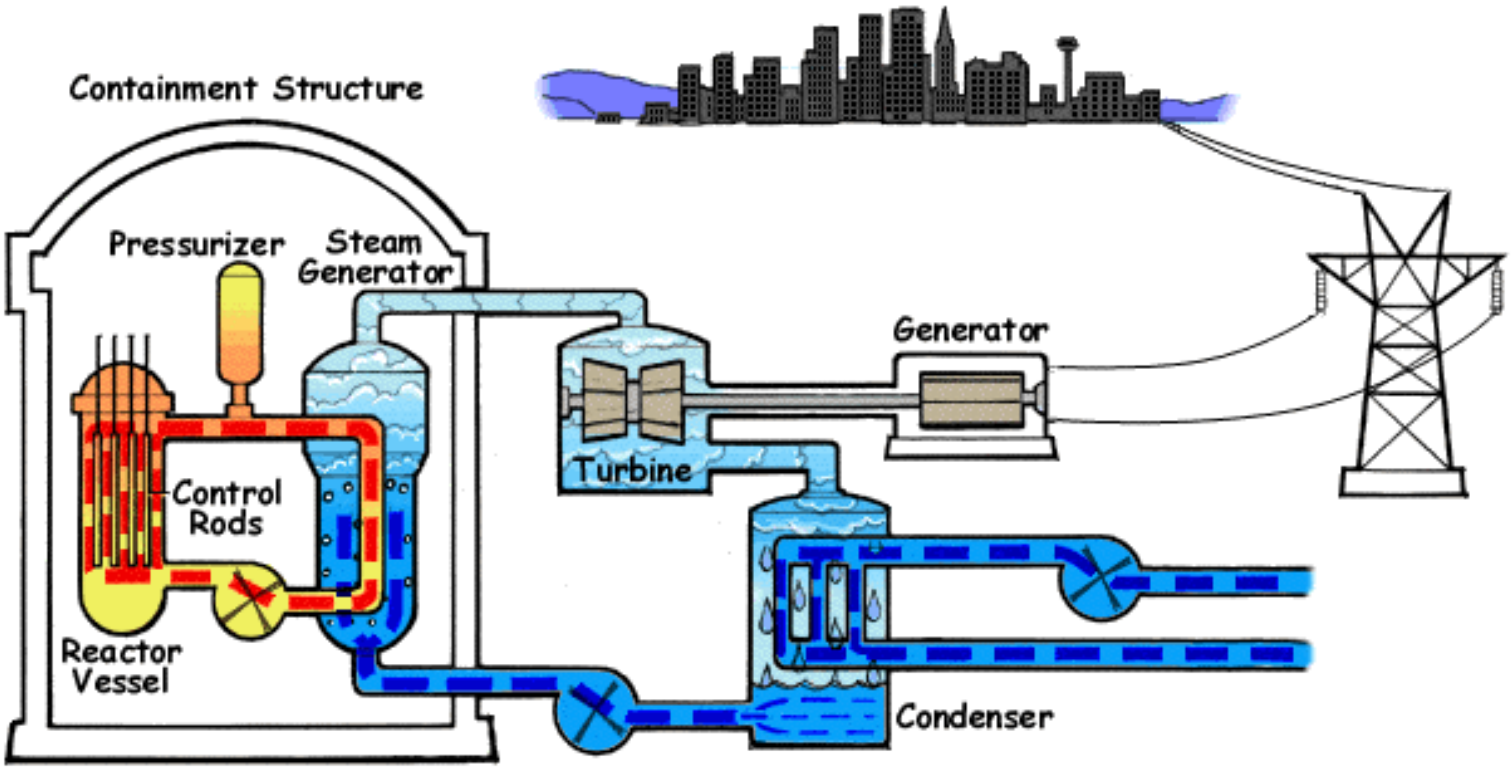
$Q = - \Delta m.c^2$

$\Delta m = (139,9054\ u + 93,9063\ u + 1,00866\ u) - (235,0439\ u) = -0,22354\ u$

$Q = - \Delta m.c^2 = - (- 0,22354\ u) \times (931,5\ MeV/u) = 208\ MeV$ (por nuclídeo)

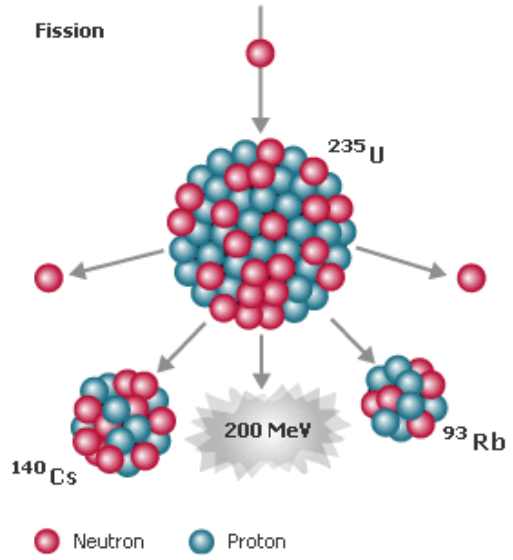


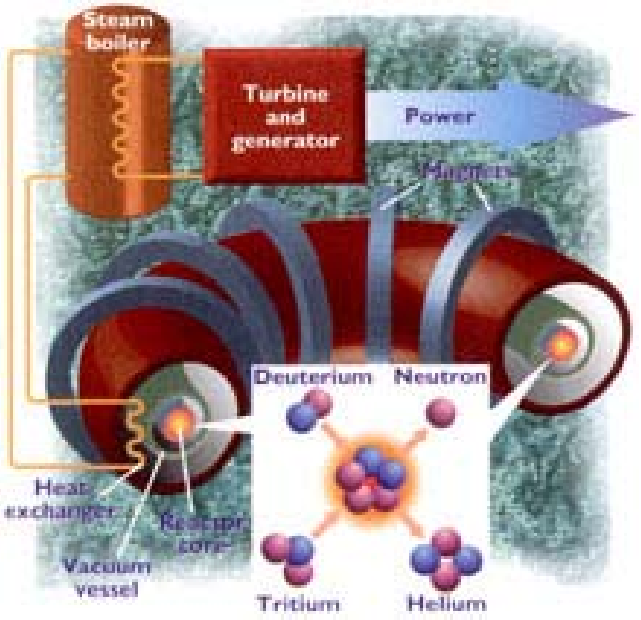
Reator Nuclear



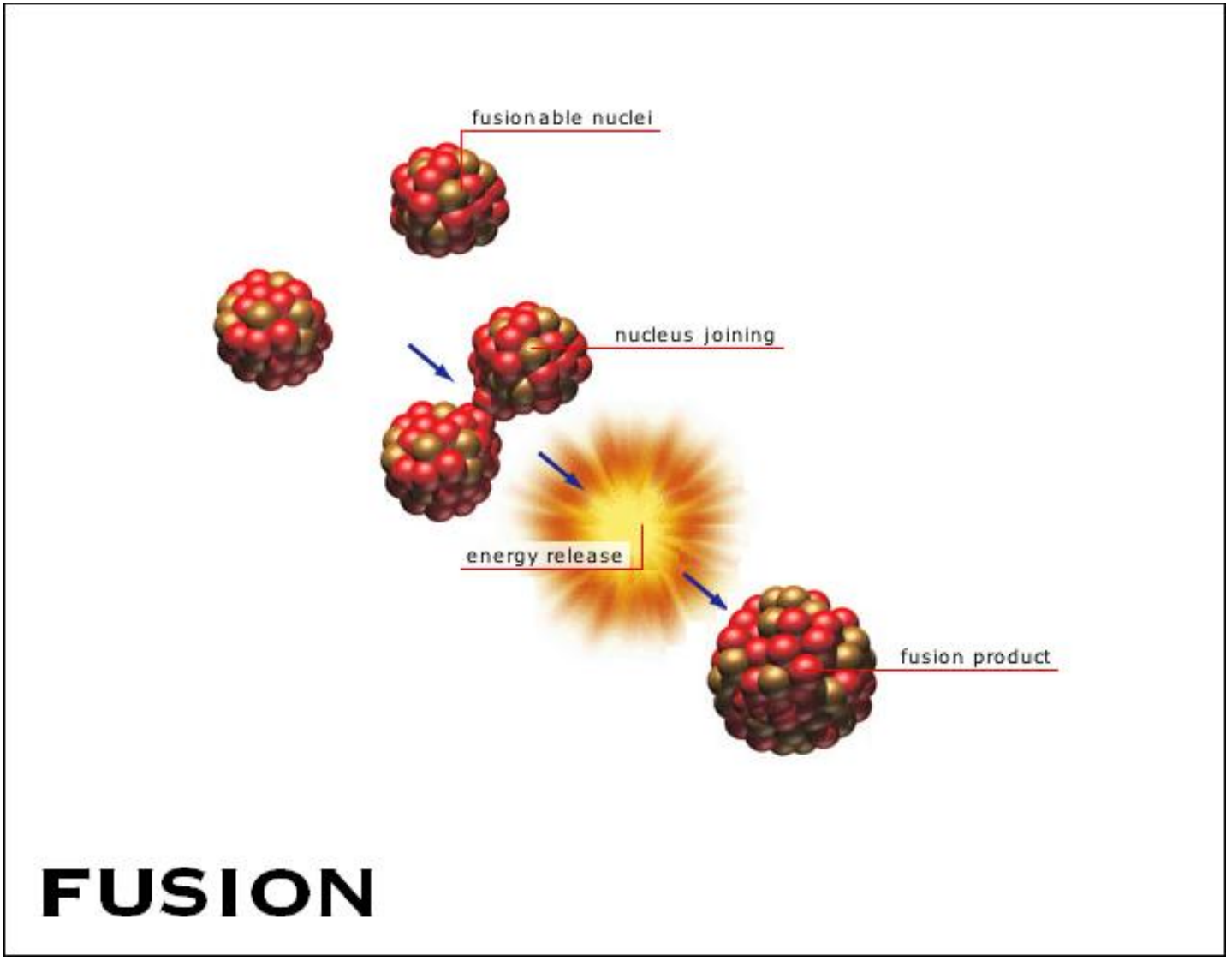
Energia nuclear

- A fissão nuclear já é controlada há muito tempo.
  - Seria possível controlar a fusão nuclear?





Confinamento do plasma


fusionable nuclei
nucleus joining
energy release
fusion product
FUSION

Energia nuclear

Fusão termonuclear controlada

As reações utilizadas são deutério-deutério (d-d) e deutério-trítio (d-t):

$$^{2}H + ^{2}H \longrightarrow ^{3}He + n \qquad \text{(d-d)} \qquad Q = +3{,}27 \text{ MeV}$$

$$^{2}H + ^{2}H \longrightarrow ^{3}H + ^{1}H \qquad \text{(d-d)} \qquad Q = +4{,}03 \text{ MeV}$$

$$^{2}H + ^{3}H \longrightarrow ^{4}He + n \qquad \text{(d-t)} \qquad Q = +17{,}59 \text{ MeV}$$

Energia nuclear

Fusão termonuclear controlada

O deutério, cuja abundância isotópica é uma parte em 6700, está disponível na água do mar em quantidades ilimitadas.

São três as exigências para a operação bem-sucedida de um reator de fusão termonuclear:

1) Elevada densidade n de partículas
2) Elevada temperatura T do plasma
3) Um tempo de confinamento τ dilatado

Exemplos: Tokamak, fusão a laser, ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

SISTEMAS SUPERCONDUTORES PARA TESTES DE FUSÃO NUCLEAR

9/12/2011 12:01

FUSÃO NUCLEAR

Condições necessárias:

1) O Plasma de dêuterons e elétrons tem que estar a altas temperaturas para que a barreira coulombiana possa ser penetrada.

   Em laboratório, 23×10^7 K (20 keV).
   No Sol $1{,}5 \times 10^7$ K (1,3 keV).

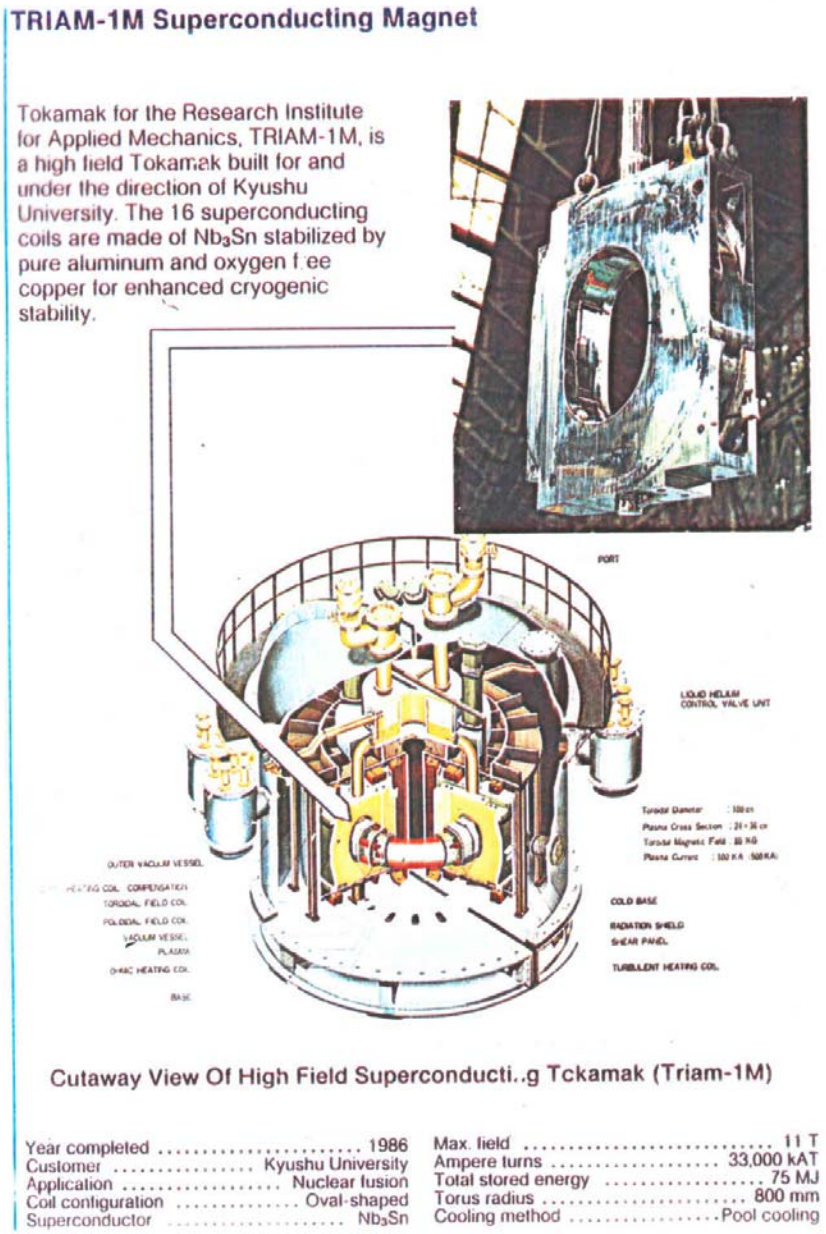
2) Densidade alta de partículas, para que a taxa de colisões d-d seja alta. Na temp. requerida, o deutério estará ionizado.

3) Tempo de confinamento longo. Critério de Lawson: $n\tau > 10^{20}$ s/m^3

$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3He + n$ Q=+3,27 MeV (d-d)

$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3H + {}^1H$ Q=+4,03 MeV (d-d)

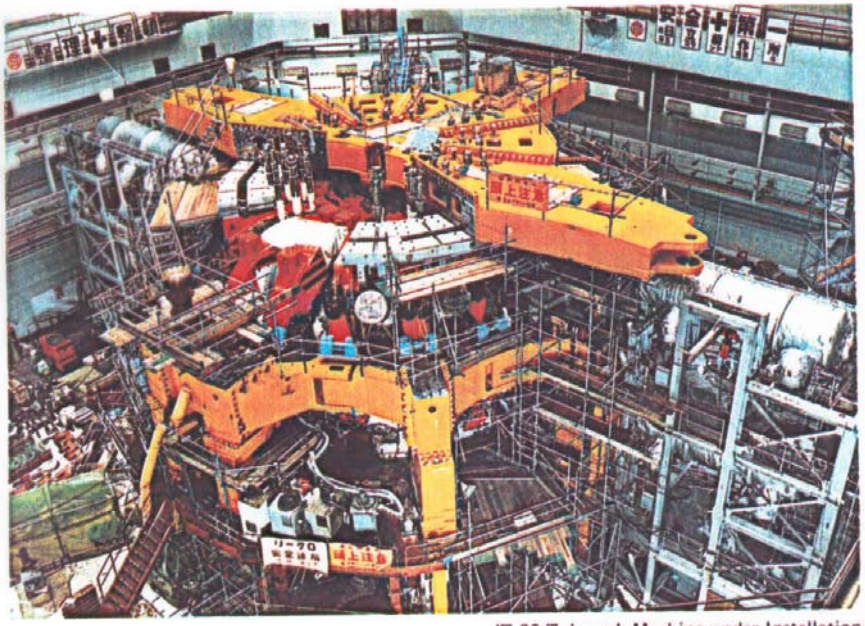
$^2H + {}^3H \rightarrow {}^4He + n$ Q=+17,59 MeV (d-t)



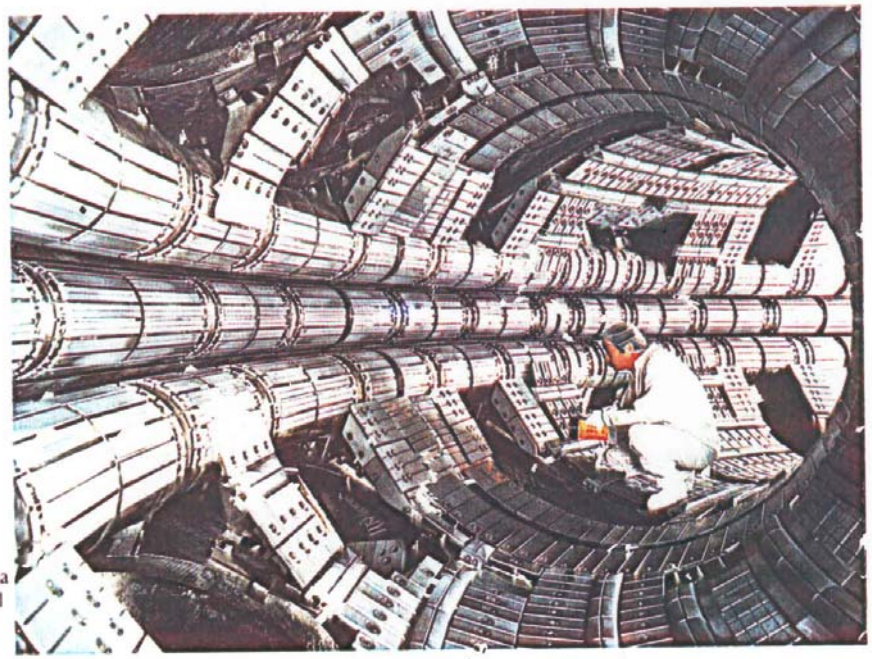
© HITACHI

TOKAMAK JT-60 (HITACHI)

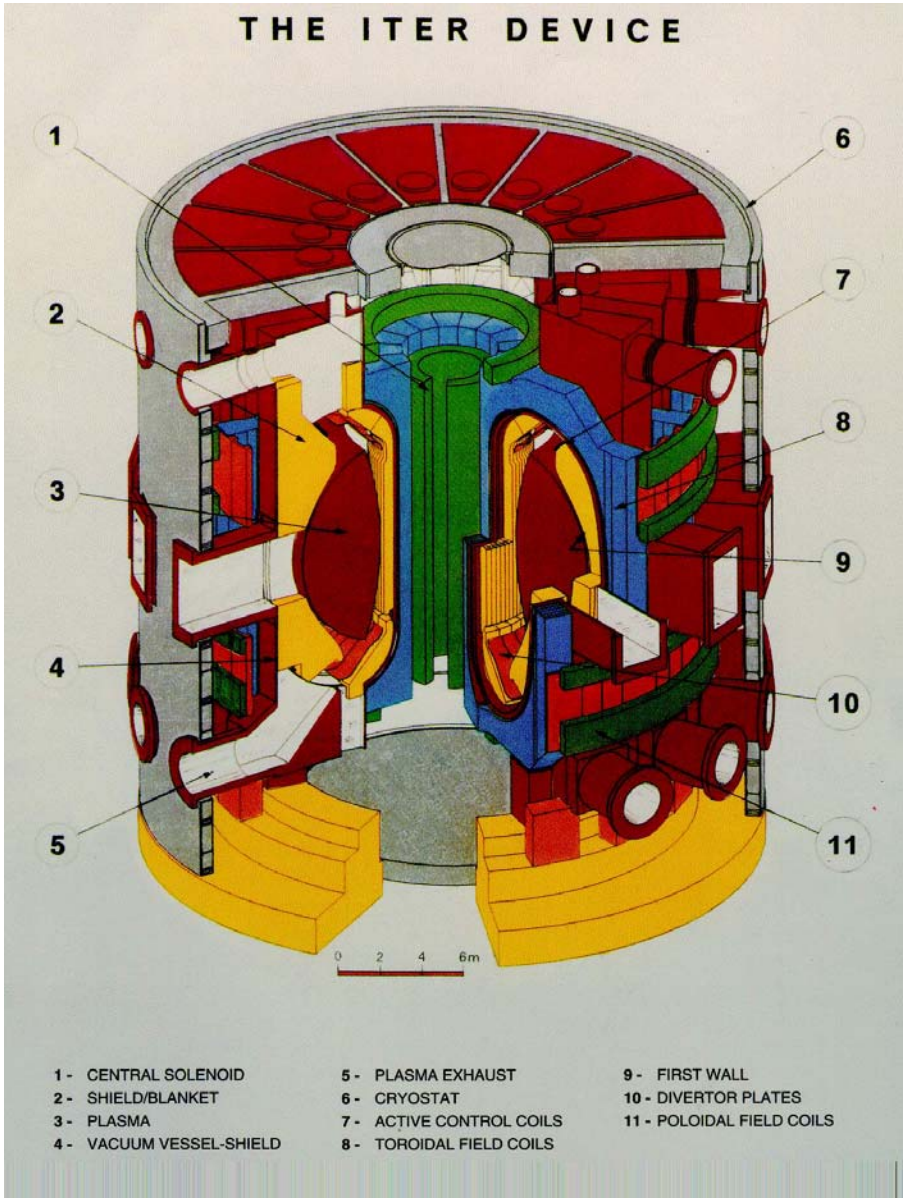
- Raio maior 3 m
- Raio menor 0,95 m
- Campo central 4,5 T
- Corrente plasma 27 mA
- Temperatura dos íons 5-10 keV
- Tempo de confinamento 0,2-1 s



JT-60 Tokamak Machine under Installation



Interior of Vacuum Vessel, where the first wall to plasma made of TiC coated Mo, and the can type magnetic limiter coil are installed.



Características dos supercondutores de Nb_3Sn para o Projeto ITER.

Tipo	Jc não-Cu a 4,2 K e 12 T (A/mm^2)	Perda por Histerese para ciclo ±3 T (mJ/cm^3 não-Cu)	Quantidade (toneladas de fio)
High Performance 1 (HP1)	700	600	6,5
High Performance 2 (HP2)	550	200	16,5

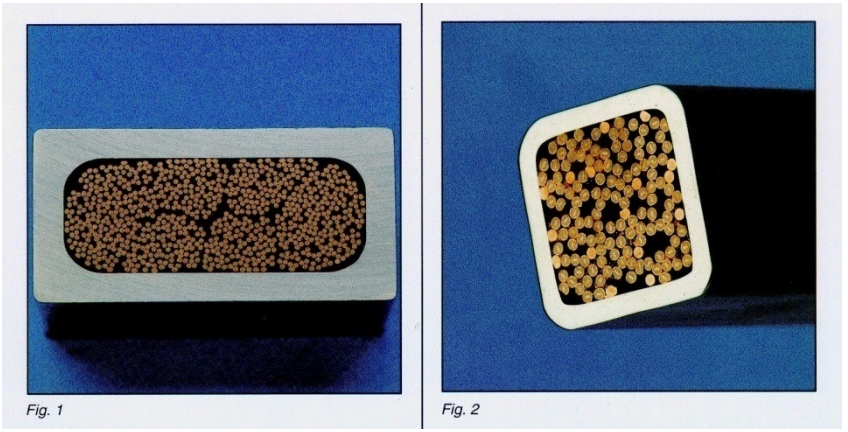


Fig. 1

Fig. 2

Sendo construído em Cadarache, França.

Problemas Adicionais

Problema 42.16 –

Uma moeda pequena tem uma massa de 3g. Calcule a energia que seria necessária para separar todos os nêutrons e prótons da moeda. Para facilitar os cálculos, suponha que a moeda é feita inteiramente de átomos de ^{63}Cu (de massa 62,92960 u). As massas dos prótons e dos nêutrons são 1,00783 u e 1,00866 u, respectivamente.

Problemas Adicionais

Problema 42.33 –

O radionuclídeo ^{64}Cu tem uma meia-vida de 12, 7 h. Se no instante t = 0 uma amostra contém 5,50 g de ^{64}Cu inicialmente puro, quantas gramas de ^{64}Cu se desintegram entre t = 14,0 h e t = 16,0 h?

Problemas Adicionais

Problema 42.53 –

O ^{238}U decai para ^{206}Pb com uma meia-vida de 4,47 x 10^9 anos. Embora este decaimento ocorra em várias etapas, a meia-vida da primeira destas etapas é muito maior do que as das etapas subsequentes. Assim, podemos supor que este decaimento leva diretamente ao chumbo e escrever: $^{238}U \rightarrow {}^{206}Pb$ + etc.
Uma certa rocha contém 4,20 mg de ^{238}U e 2,135 mg de ^{206}Pb. Estudos geológicos revelam que a rocha provavelmente não continha nenhum chumbo quando se formou, de modo que todo o chumbo presente pode ser atribuído ao decaimento do urânio.

a) Quantos átomos de ^{238}U e ^{206}Pb contém a rocha?

b) Quantos átomos de ^{238}U a rocha continha quando se formou?

c) Qual é a idade da rocha?

Problemas Adicionais

Problema 43.38 –

Calcule e compare a energia liberada

(a) pela fusão de 1,0 kg de hidrogênio no interior do Sol;

(b) pela fissão de 1,0 kg de ^{235}U em um reator nuclear.