NOÇÕES BÁSICAS DE FÍSICA NUCLEAR

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS NÚCLEOS ATÔMICOS

1) Átomos e núcleos

● Átomo – menor parte constituinte da matéria que preserva suas propriedades químicas.

● Átomo $\begin{cases} \text{Núcleo (nêutrons e prótons +)} \rightarrow \text{caroço central} \rightarrow \text{níveis de energia} \\ \text{Eletrosfera (elétrons −)} \rightarrow \text{em torno do núcleo} \rightarrow \text{níveis de energia (camadas eletrônicas)} \end{cases}$

● Massa das partículas em repouso → massa de um nêutron = $1{,}6749543.10^{-27}$ kg; massa de um próton = $1{,}6726485.10^{-27}$ kg; massa de um elétron = $9{,}109534.10^{-31}$ kg.

● Átomo eletricamente neutro ⇒ número de prótons + = número de elétrons − → define as propriedades *químicas* do átomo.

● Átomo que recebe *ou* cede elétrons ⇒ número de prótons + ≠ número de elétrons − → o átomo passa a ser denominado <u>íon</u>. Um íon positivo é denominado cátion e um íon negativo é denominado ânion.

● Número de prótons + = Z, denominado <u>número atômico</u> → define elemento químico.

● Número de nêutrons = N

● Número de nucleons = A = Z + N, denominado <u>número de massa</u> → define as propriedades *nucleares* do átomo.

● Identificação de um átomo → $^{A}_{Z}\text{Símbolo do elemento}$

exemplo: átomo de Alumínio (Z = 13, A = 27, Símbolo do elemento = Al) → $^{27}_{13}\text{Al}$ *ou* ^{27}Al

● Átomos com Z igual e A diferente → <u>isótopos</u> do elemento químico identificado por Z.

exemplo: o elemento químico Oxigênio (Z = 8) é constituído por três isótopos – ^{16}O, ^{17}O e ^{18}O

● Fração isotópica ou abundância relativa → percentual com que um isótopo é encontrado em uma amostra *natural* de um elemento químico.

exemplo: as abundâncias relativas dos isótopos do Oxigênio são ^{16}O – 99,76%, ^{17}O – 0,04% e ^{18}O – 0,20%

● Um elemento químico que possui um único isótopo natural é denominado <u>elemento monoisotópico</u>.

exemplos: Flúor (^{19}F), Alumínio (^{27}Al), Cobalto (^{59}Co), Iodo (^{127}I), Ouro (^{197}Au), Bismuto (^{209}Bi)

● A maioria dos elementos químicos é constituída por mais do que um isótopo natural. O elemento químico que possui o maior número de isótopos naturais é o Estanho (Sn, Z = 50), com dez isótopos.

2) Tamanho do núcleo atômico

● O núcleo atômico é cerca de 10.000 vezes menor que a órbita do elétron mais interno.

● O raio R do núcleo atômico é calculado por meio da expressão $R = R_0 A^{1/3}$, sendo $R_0 \cong 1{,}2.10^{-13}$ cm uma constante cujo valor foi determinado experimentalmente e A o número de massa do núcleo.

3) Principais unidades utilizadas em física nuclear

● u.m.a. (unidade de massa atômica) $\Rightarrow$ massa de um átomo de Carbono-12 (^{12}C) neutro / 12

$$1 \text{ u.m.a.} = 1{,}6604.10^{-27} \text{ kg}$$

● Número de Avogadro $\Rightarrow$ número de átomos existente em um mol do elemento químico

$$N_0 = 6{,}023.10^{23} \text{ átomos}$$

● eV (elétron-Volt) $\Rightarrow$ energia adquirida por uma partícula com carga elétrica fundamental (igual a $1{,}602.10^{-19}$ C) ao ser submetida a uma diferença de potencial igual a 1 Volt, ou seja:

$$E = q.V = 1{,}602.10^{-19} \cdot 1 \Rightarrow E = 1{,}602.10^{-19} \text{ J}$$

portanto

$$1 \text{ eV} = 1{,}602.10^{-19} \text{ J}$$

O elétron-Volt é a unidade de energia usada em física atômica, nuclear e de partículas subatômicas, geralmente na forma dos seguintes múltiplos:

$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ $\quad$ $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ $\quad$ $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ $\quad$ $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

● Equivalência massa-energia $\Rightarrow$ definida por meio da equação $E = m c^2$, onde m é a massa em kg e c é a velocidade da luz no vácuo ($2{,}998.10^8$ m/s).

Para m = 1 u.m.a., a equivalência em energia resulta:

$$E = 1{,}6604.10^{-27} (2{,}998.10^8)^2 \Rightarrow E = 1{,}4924.10^{-10} \text{ J}$$

mas $1 \text{ eV} = 1{,}602.10^{-19}$ J, portanto

$$1 \text{ u.m.a.} \equiv 931{,}5 \text{ MeV}$$

4) Energia de ligação de um núcleo atômico

● A massa M de um núcleo atômico é <u>menor</u> do que a soma das massas dos prótons e nêutrons que o constituem, ou seja:

$$M(Z,N) < Z \cdot M_p + N \cdot M_n$$

Há, portanto, uma diferença de massa, dada por:

$$\Delta = Z \,.\, M_p + N \,.\, M_n - M(Z,N) \qquad \text{[u.m.a.]}$$

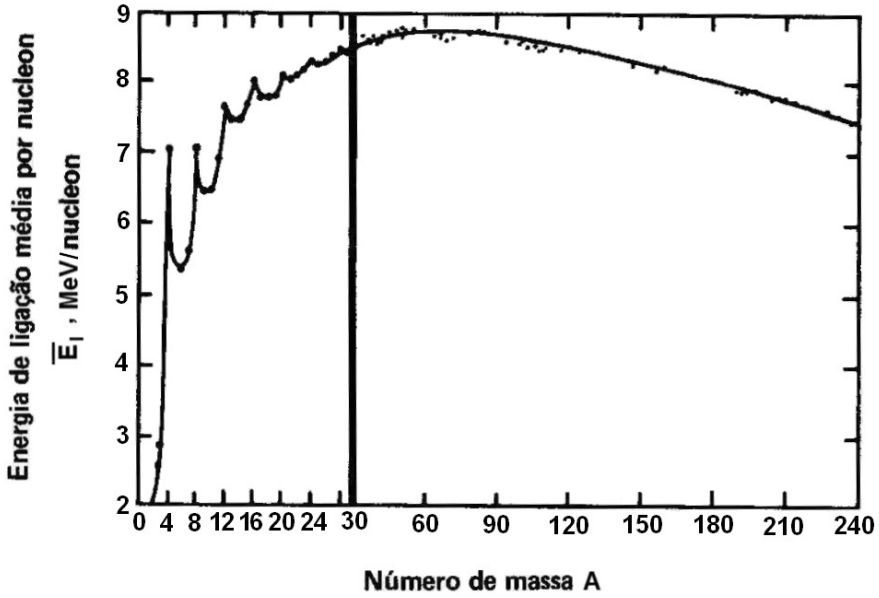
O equivalente em energia dessa diferença de massa é a <u>energia de ligação</u> E_l do núcleo atômico

$$E_l = 931{,}5 \,.\, \Delta \qquad \text{[MeV]}$$

de maneira que a <u>energia de ligação média por nucleon</u> resulta

$$\overline{E}_l = \frac{931{,}5 \cdot \Delta}{A} \qquad \text{[MeV/nucleon]}$$

onde A = Z + N é o número de massa do núcleo atômico.



Energia de ligação média por nucleon $\overline{E}_l$ *em função do número de massa* A *para os diversos isótopos. A mudança de escala efetuada no eixo do número de massa para* A > 30 *se encontra assinalada.*

● A partir do gráfico mostrado na figura acima, observa-se que:

- Para ^{4}He, ^{12}C, ^{16}O, ^{20}Ne e ^{24}Mg aparecem picos, em decorrência dos valores de $\overline{E}_l$ serem relativamente elevados para esses isótopos leves, o que indica alta estabilidade nuclear

- O maior valor de $\overline{E}_l$ perfaz 8,8 MeV/nucleon, para A ~ 60

- Nas extremidades do gráfico, $^{238}U \rightarrow \overline{E}_l$ = 7,6 MeV/nucleon; $^{2}H \rightarrow \overline{E}_l$ = 1,1 MeV/nucleon

- <u>Liberação de energia nuclear</u> { Fusão de núcleos mais leves ; Fissão de núcleos mais pesados

● Força que mantém os nucleons unidos no interior do núcleo atômico ⇒ <u>força nuclear forte</u>, que é atrativa, de alta intensidade, de curto alcance (~ 3.10^{-15} m) e supera a força de repulsão Coulombiana existente entre os prótons no núcleo.

5) Números mágicos

● A interação coletiva entre os nucleons dentro do núcleo atômico cria um potencial de poço, em que cada nucleon se move sob o efeito médio criado pelos demais. O potencial de poço nuclear resultante possui níveis de energia, que são preenchidos por nucleons de maneira análoga à qual os orbitais atômicos são ocupados por elétrons. Tal qual no caso do átomo, há um número máximo de nucleons que pode ocupar cada nível.

● No núcleo atômico existem dois conjuntos de nucleons, um constituído por prótons e o outro por nêutrons, havendo, portanto, dois potenciais de poço nuclear, um para cada conjunto. A diferença desses dois potenciais de poço nuclear consiste na interação Coulombiana entre os prótons.

● O preenchimento de cada nível de energia do potencial de poço nuclear por prótons e nêutrons obedece ao princípio da exclusão de Pauli, ou seja, se a um dado nível de energia é associado um momento angular total j (resultante da soma do momento angular orbital l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc. com o momento angular de spin = ± ½), existem $2j + 1$ subníveis possíveis para esse nível de energia.

● Os valores dos momentos angulares orbital, de spin e total são respectivamente dados pelas expressões $[l\ (l + 1)]^{1/2}\ \hbar$, $[½\ (½ + 1)]^{1/2}\ \hbar$ e $[j\ (j + 1)]^{1/2}\ \hbar$, onde $\hbar = h/2\pi = 1{,}0552.10^{-34}$ J.s, mas $l\hbar$, $½\hbar$ e $j\hbar$ são os valores máximos das componentes desses momentos angulares ao longo de qualquer direção e, por isso, os números quânticos l, ½ e j são usualmente designados como momentos angulares.

● A notação utilizada para designar um nível de energia do potencial de poço nuclear é constituída por um primeiro número quântico n inteiro não nulo, seguido por uma letra minúscula do alfabeto latino que representa o momento angular orbital l (conforme mostrado na Tabela 1) a qual, por fim, tem o momento angular total j indicado como subscrito.

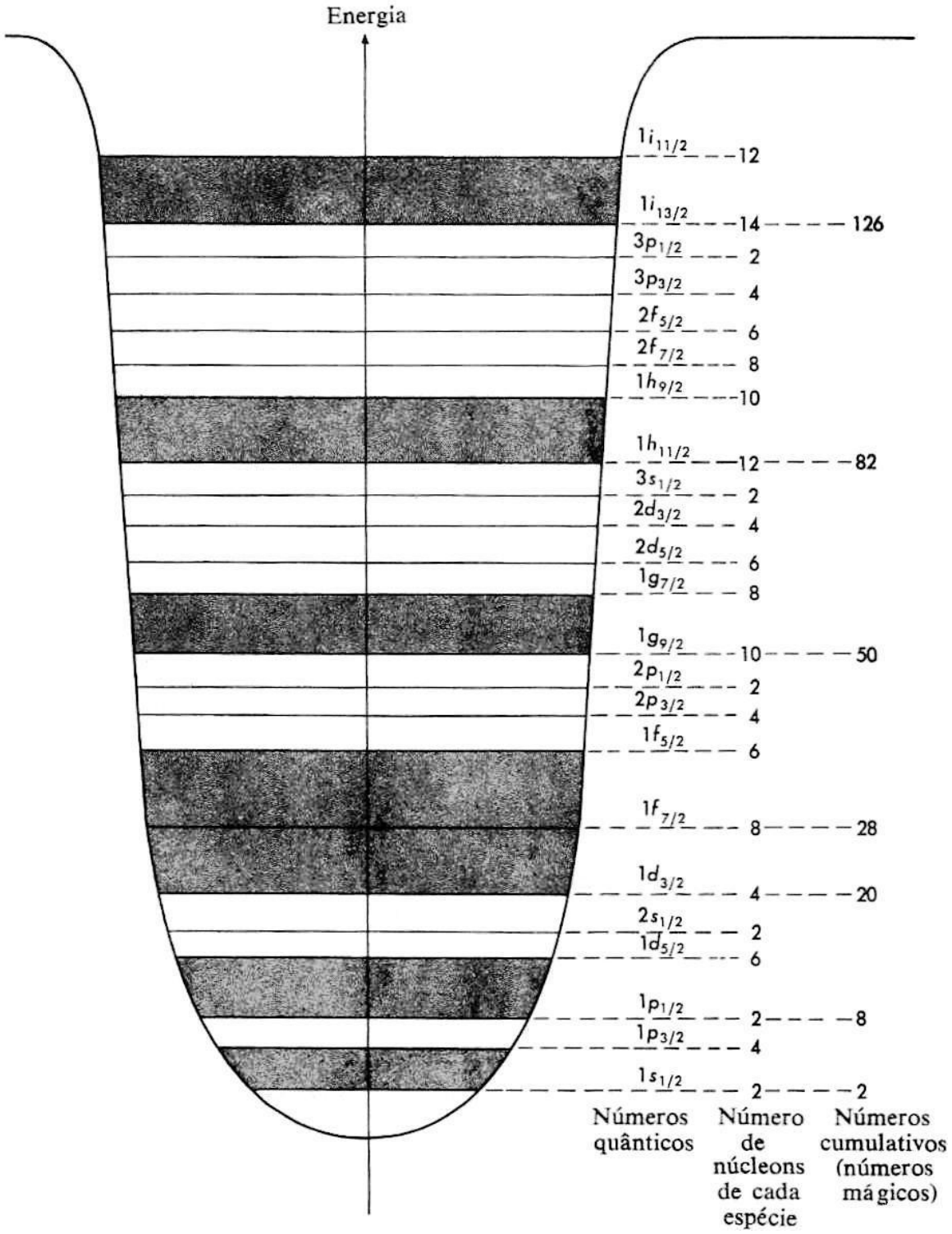
Valor do número quântico l	Letra correspondente
0	*s*
1	*p*
2	*d*
3	*f*
4	*g*
5	*h*
6	*i*

Tabela 1 – Letras correspondentes aos valores do número quântico l.

● Na notação utilizada para designar um nível de energia do potencial de poço nuclear, o número n que precede a letra é análogo ao número quântico principal utilizado para indicar um determinado nível de energia da eletrosfera do átomo. Entretanto, deve ser destacado que esse número n não está sujeito às limitações do caso atômico, constituindo no núcleo apenas um parâmetro de indexação.

● O intenso acoplamento spin-órbita, que é característico da força nuclear, causa uma separação em energia entre os níveis de energia do potencial de poço nuclear, os quais se desdobram em oito grupos, cada qual formado por níveis relativamente próximos. Cada grupo fica separado do outro por um intervalo de energia relativamente grande. Denomina-se *camada* a cada grupo de níveis de energia do potencial de poço nuclear.

● A ordem de preenchimento dos níveis de energia do potencial de poço nuclear é apresentada no diagrama esquemático abaixo, onde os intervalos de energia correspondentes ao preenchimento das camadas são indicados pelas áreas sombreadas.



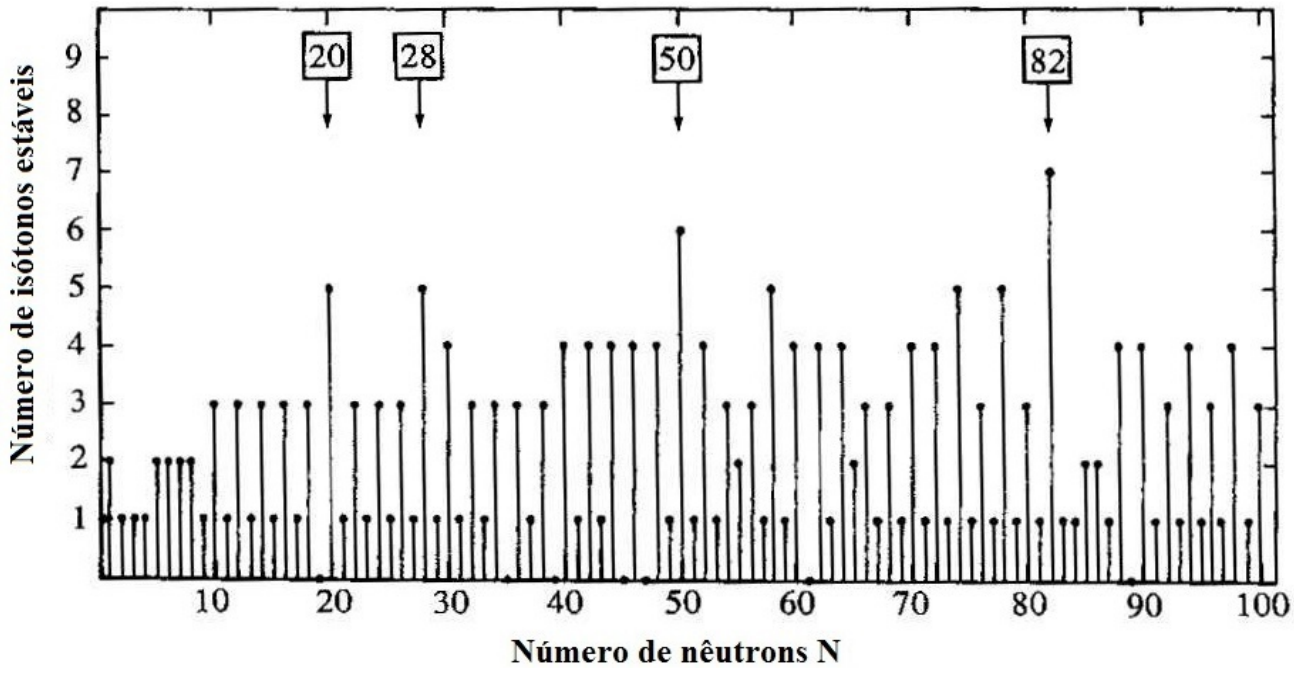
● No potencial de poço nuclear, a primeira e a quarta camadas possuem apenas um nível de energia cada uma (respectivamente $1s_{1/2}$ e $1f_{7/2}$), enquanto a sétima camada possui seis níveis de energia ($1h_{9/2}$, $2f_{7/2}$, $2f_{5/2}$, $3p_{3/2}$, $3p_{1/2}$ e $1i_{13/2}$).

● As aproximações para o potencial de poço nuclear variam ligeiramente, originando diagramas esquemáticos cujas sequências são um pouco diferentes. A validade de um determinado diagrama esquemático desse tipo depende apenas da concordância com as evidências experimentais. Assim, é possível encontrar, na literatura técnica, diagramas esquemáticos com pequenas diferenças em relação ao apresentado na presente sessão.

● Os nucleons na posição energética inferior dentro do potencial de poço nuclear são designados por $1s_{1/2}$, significando que $n = 1$, $l = 0$ e $j = 1/2$. Já o terceiro nucleon na sequência não pode estar no nível $1s_{1/2}$, porque, se tal acontecesse, teria todos os números quânticos idênticos aos de um dos dois primeiros nucleons, o que violaria o princípio da exclusão de Pauli. Os nucleons seguintes têm os movimentos descritos pelos números quânticos designados por $1p$, ou seja, $n = 1$, $l = 1$. Para esses nucleons, j pode ser 3/2 ou 1/2, sendo que o valor $j = 3/2$ corresponde ao nível com menor energia.

● Alterações significativas nas propriedades nucleares ocorrem quando se inicia o preenchimento de uma nova camada, em ordem de energia crescente dentro do potencial de poço nuclear. Os números de prótons e de nêutrons em que essas alterações têm lugar são denominados *números mágicos*, uma expressão surgida na época em que tal fenômeno ainda não era compreendido e que foi mantida desde então. Os *números mágicos*, que correspondem a *camadas completas* e ocorrem em núcleos atômicos com alta estabilidade, têm valores iguais a 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126.

● A alta estabilidade dos núcleos atômicos que possuem números mágicos de nucleons é evidenciada, entre outros aspectos, pela existência na natureza de um maior número relativo de isótonos (núcleos atômicos que possuem diferente número de prótons, mas mesmo número de nêutrons) estáveis cujo número de nêutrons N é igual a 2, 8, 20, 28, 50 ou 82, conforme mostrado no gráfico abaixo.



● O fato do estanho (Sn, Z = 50) ser o elemento químico com o maior número de isótopos estáveis (dez, conforme mencionado anteriormente) constitui outra evidência da alta estabilidade de núcleos atômicos que possuem números mágicos.

● Tanto o potencial de poço nuclear para prótons quanto para nêutrons podem ter camadas completas, sendo que um núcleo atômico é muito estável quando ambos os potenciais possuem camadas completas (núcleos atômicos denominados *duplos mágicos*), porém bem menos estável quando nenhum dos potenciais possui camadas completas.

● A existência de estado isomérico (estado excitado nuclear com meia-vida longa, ou seja, maior que 0,1 segundo) em núcleos atômicos com $38 \leq Z \leq 50$ ou $64 \leq Z \leq 82$ é explicada pela grande diferença de momento angular total entre níveis de energia adjacentes disponíveis para o último próton.

6) Dualidade partícula – onda

● Toda e qualquer partícula tem a ela associado um comprimento de onda λ dado por:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\,v}$$

onde $h = 6{,}63.10^{-34}$ J.s é a constante de Planck, p é o momento da partícula, m é a massa da partícula e v é a velocidade da partícula.

● O momento p de uma partícula não relativística (com v muito menor do que c, a velocidade da luz no vácuo) pode ser escrito como:

$$p = \sqrt{2\ m_0\ E}$$

onde m_0 é a massa de repouso da partícula e E é a energia cinética da partícula.

● O momento p de uma partícula relativística (com v da mesma ordem de grandeza do que c, a velocidade da luz no vácuo) pode ser escrito como:

$$p = \frac{E}{c} \cdot \sqrt{1 + \frac{2\ m_0\ c^2}{E}}$$

onde m_0 é a massa de repouso da partícula e E é a energia cinética da partícula.

● Inversamente, um fóton de radiação eletromagnética com energia E possui momento p dado por:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\,f}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

onde h é a constante de Planck, f é a frequência da radiação eletromagnética e λ é o comprimento de onda da radiação eletromagnética.

7) Reações nucleares

● Reações causadas pela interação de partículas leves (nêutrons, prótons, dêuterons, etc.), íons pesados ou fótons de alta energia (raios-gama) com núcleos atômicos.

exemplo:

$$^{10}B + ^{1}n \rightarrow ^{7}Li + ^{4}He$$

como $^{4}He \equiv$ partícula α, a reação também pode ser representada da seguinte maneira

$$^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$$

● As principais grandezas que se conservam em todas as reações nucleares são:

- energia (incluindo massa)
- número de nucleons
- carga elétrica
- momento linear
- momento angular

● Balanço de energia *ou* valor de Q para reações nucleares:

$$X(a,b)Y$$

$$Q = [M_X + m_a - M_Y - m_b].c^2$$

Se $\begin{cases} Q > 0 \rightarrow \text{reação exotérmica } ou \text{ exoérgica} \\ Q < 0 \rightarrow \text{reação endotérmica } ou \text{ endoérgica} \end{cases}$

exemplo: no caso da reação $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$, o valor de Q resulta

$$Q = [\, M_{^{10}B} + m_n - M_{^{7}Li} - m_\alpha \,] \cdot c^2 \Rightarrow$$

$$Q = \underbrace{[10{,}01294 + 1{,}00867 - 7{,}01600 - 4{,}00260]}_{\text{u.m.a.}} \cdot 931{,}5 \Rightarrow$$

$$Q = [11{,}02161 - 11{,}01860] \,.\, 931{,}5 \Rightarrow Q = 2{,}80 \text{ MeV (Q > 0, reação exotérmica)}$$

A energia liberada é repartida como energia cinética entre os produtos da reação ^{7}Li e partícula α *ou* como energia de excitação do ^{7}Li mais energia cinética do ^{7}Li e da partícula α.

● No caso da reação nuclear ser endotérmica, é necessário que a energia cinética da partícula incidente *a* possua um valor mínimo, denominado *energia de limiar*, para que a reação ocorra. O valor da energia de limiar é dado por:

$$E_0 = \frac{M_X + m_a}{M_X} \cdot |\, Q \,|$$

Portanto, no caso específico de uma reação nuclear endotérmica induzida por fótons de alta energia (raios-gama), $m_a = 0$ e a energia de limiar resulta igual a $|\, Q \,|$.

● A probabilidade de ocorrência de uma reação nuclear é expressa em termos do conceito de *seção de choque*.

● Para ilustrar o conceito de *seção de choque*, deve ser considerada uma folha muito fina de um dado material, com espessura uniforme Δx, na qual incide perpendicularmente um feixe monoenergético constituído por I partículas por unidade de tempo, uniformemente distribuídas em uma área A. Na folha há n núcleos-alvo por unidade de volume. Em decorrência da interação das partículas do feixe com os núcleos-alvo da folha, são emitidas N partículas de um dado tipo por unidade de tempo.

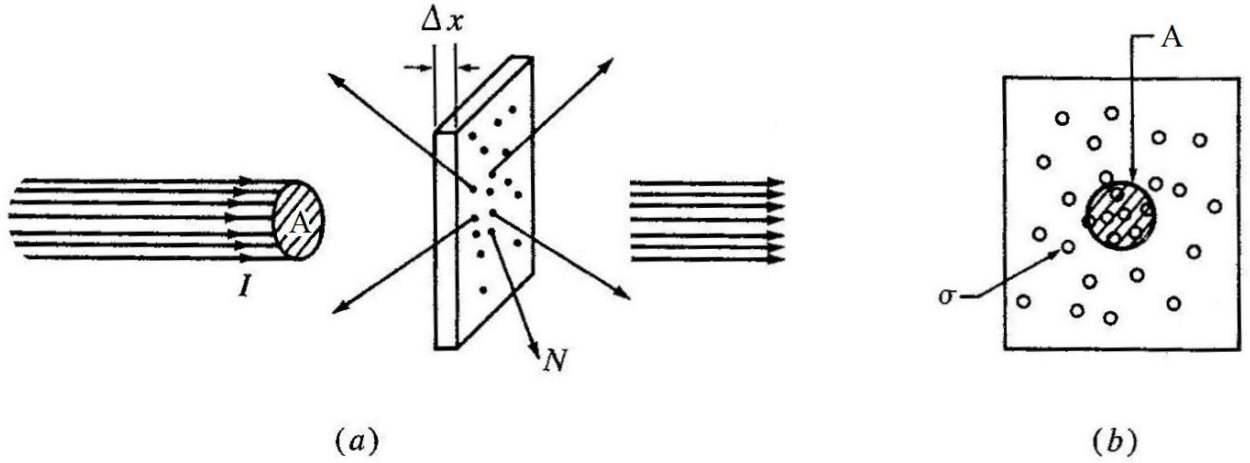


Diagrama ilustrativo de um experimento realizado com a finalidade de determinar a seção de choque para uma reação nuclear: (*a*) *vista lateral;* (*b*) *vista ao longo da direção de incidência do feixe.*

● Nas circunstâncias descritas anteriormente, a probabilidade de que um núcleo-alvo da folha seja atingido por uma partícula do feixe e reaja dando origem a uma partícula do tipo observado é dada por N/I. Essa mesma probabilidade é proporcional ao número de núcleos-alvo existentes no volume da folha atingido pelo feixe, dividido pela área A da seção transversal do feixe, ou seja:

$$\frac{N}{I} = \sigma \cdot \frac{n\,\mathrm{A}\,\Delta x}{\mathrm{A}}$$

● A constante de proporcionalidade σ é denominada *seção de choque* para a reação nuclear, sendo definida como:

$$\sigma = \frac{N}{(I/\mathrm{A})\,(n\,\mathrm{A}\,\Delta x)}$$

onde N é o número de partículas de um dado tipo emitidas por unidade de tempo em decorrência da reação nuclear, I/A é denominado fluxo de partículas incidente e $n\,\mathrm{A}\,\Delta x$ é o número de núcleos-alvo existentes no volume da folha atingido pelo feixe.

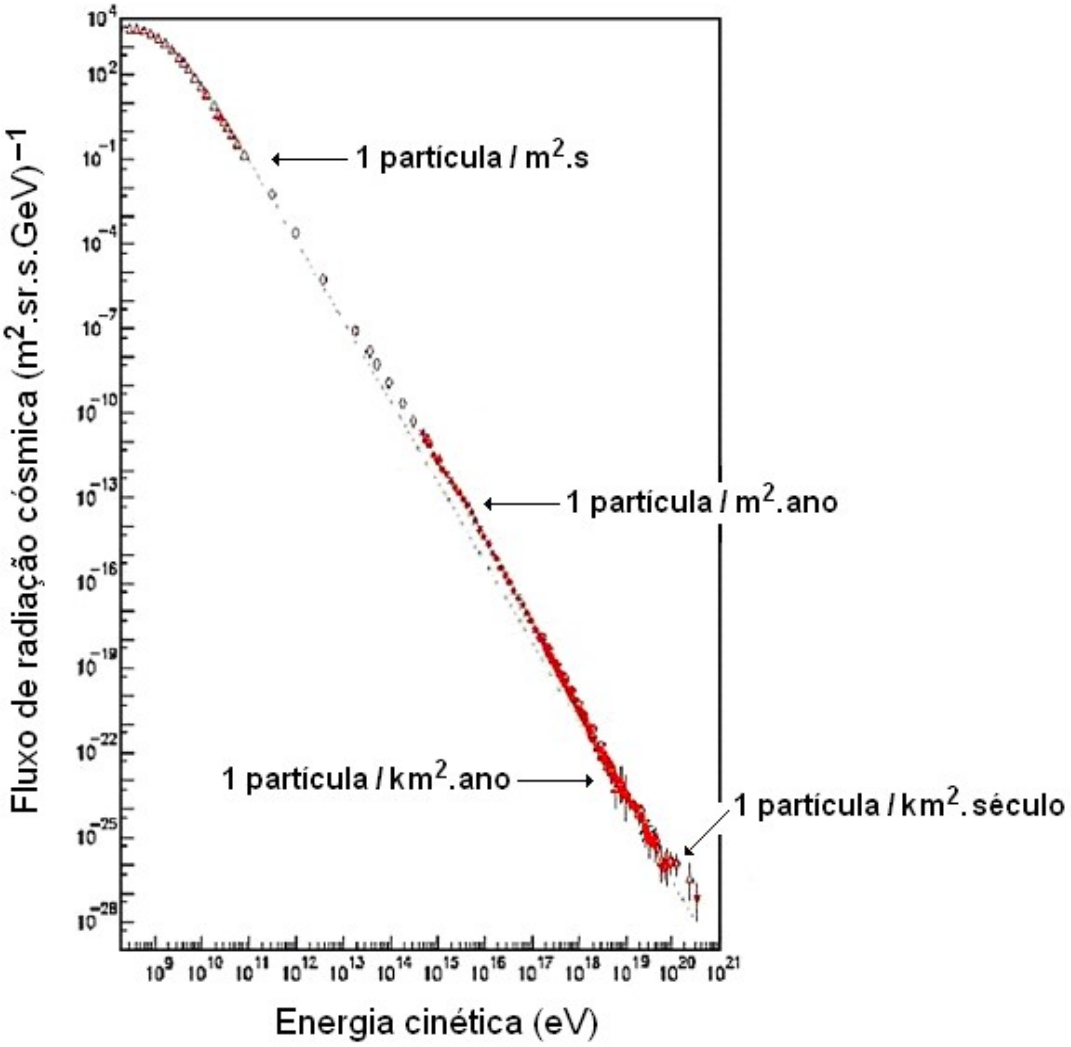
● A *seção de choque* σ tem dimensão de área, sendo medida em unidades de barn ($1\ \mathrm{b} = 10^{-24}\ \mathrm{cm}^2$).

● A *seção de choque* σ é uma propriedade intrínseca da reação nuclear, cujo valor depende do tipo da partícula incidente, da energia cinética da partícula incidente, do número atômico do núcleo-alvo e do número de massa do núcleo-alvo, mas que *não necessariamente* está relacionado à área da seção transversal de um núcleo-alvo.

8) Radiação cósmica

● Existe uma radiação cósmica primária proveniente do espaço interestelar que, ao atingir o topo da atmosfera terrestre, é constituída de prótons (85%), partículas α (14%) e núcleos com número atômico entre 3 e 26 (1%).

● As partículas que constituem a radiação cósmica primária possuem energia cinética extremamente elevada, na grande maioria dos casos compreendida entre 10^9 eV e 10^{18} eV, com uma média de 10^{10} eV (ou seja, 10 GeV).



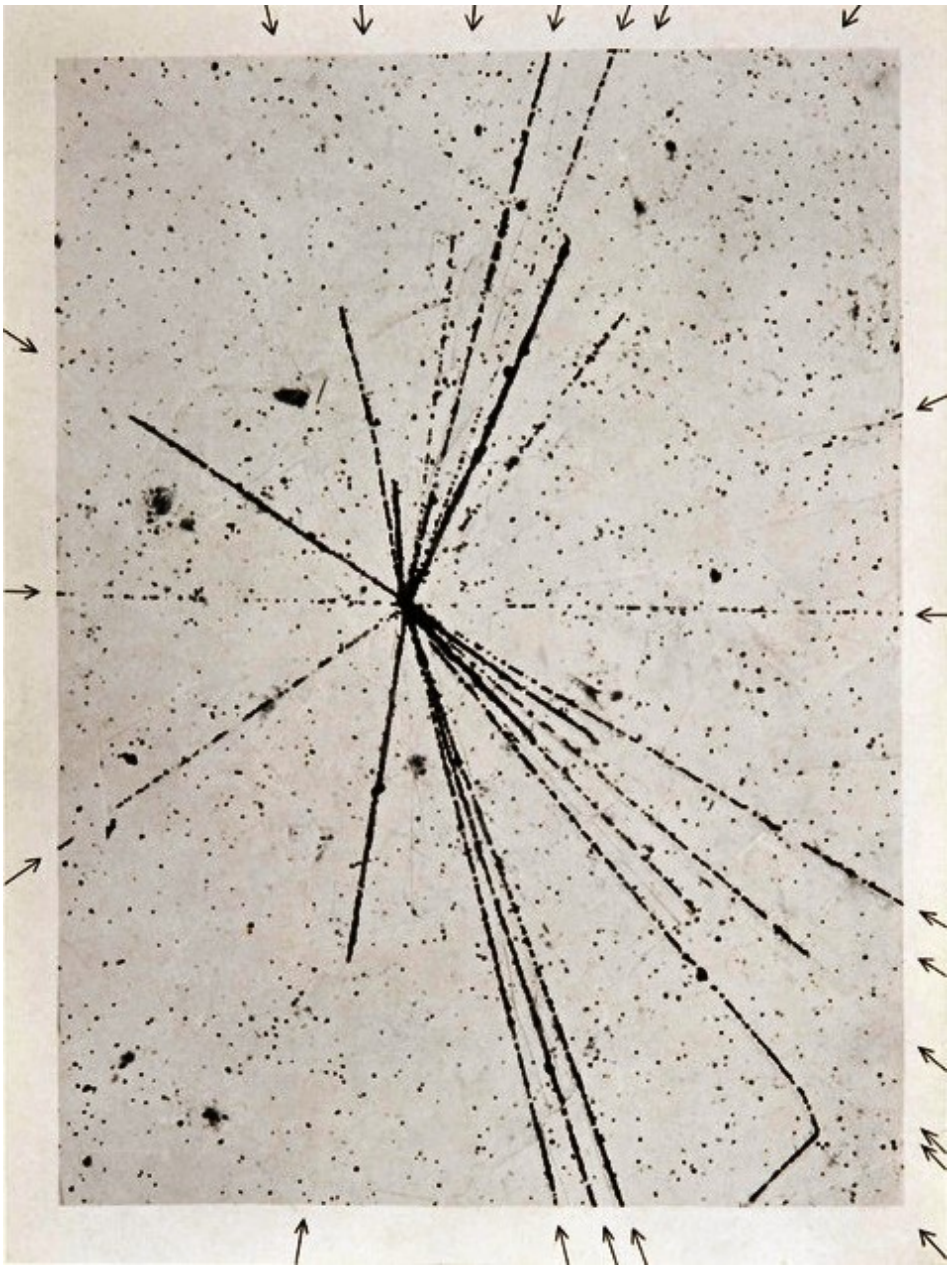
Fluxo de radiação cósmica primária, mostrado em função da energia cinética E das partículas que a constituem. Constatou-se uma variação desse fluxo segundo E^{-X} com o índice espectral $X \cong 3$.

● Devido ao fato do campo magnético terrestre desviar partículas carregadas, a intensidade da radiação cósmica é mínima na região do equador e máxima nos pólos.

● A atmosfera terrestre atenua a radiação cósmica, cuja intensidade a 2000 metros e a 3000 metros de altitude é, respectivamente, cerca de duas a três vezes maior que aquela ao nível do mar.

• Além do aspecto científico, o estudo da radiação cósmica possui grande interesse tecnológico e prático, devido ao dano que as partículas que a constituem podem causar em componentes microeletrônicos e em sistemas biológicos fora da proteção de uma atmosfera e de um campo magnético.

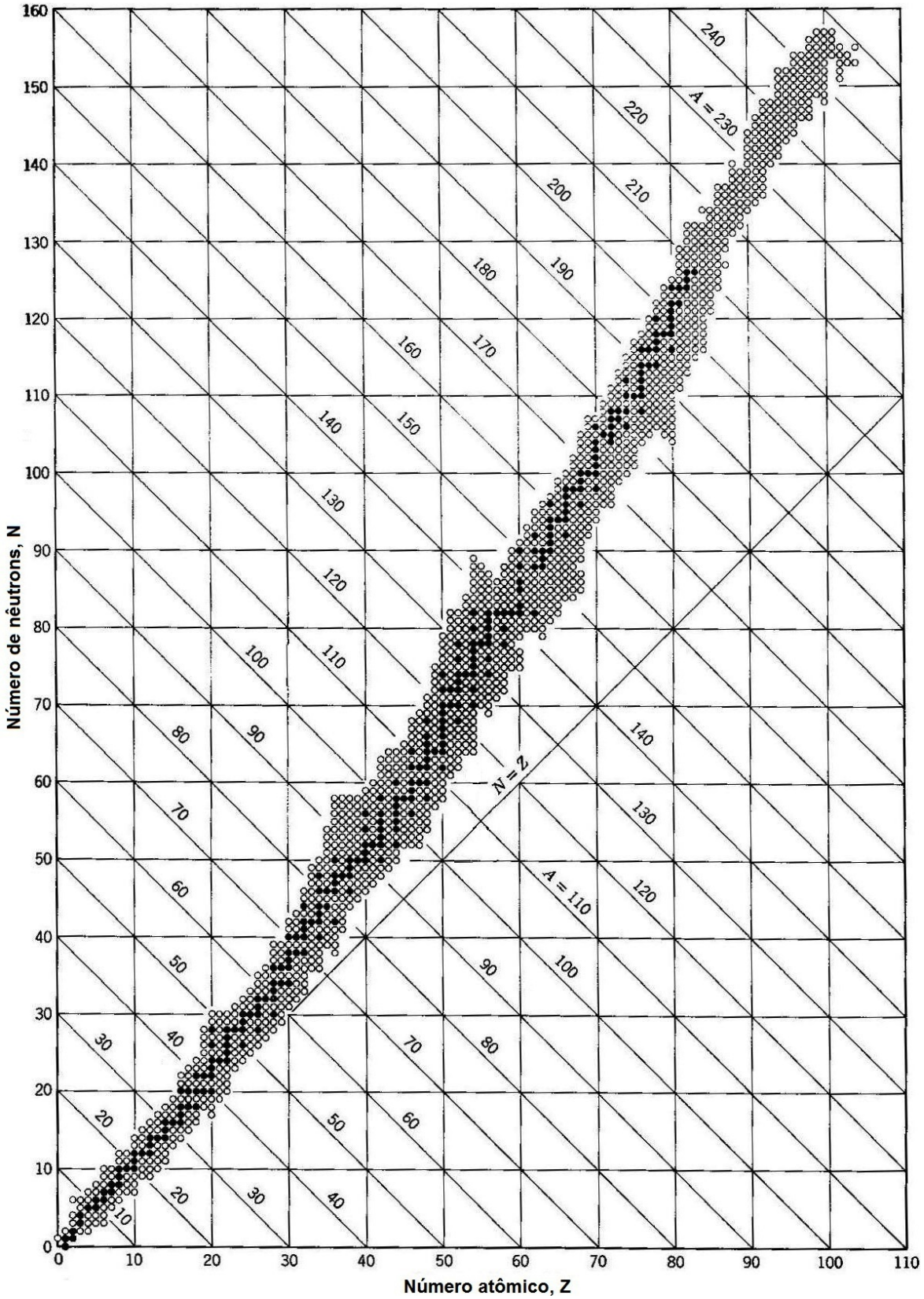
● Ao interagirem com núcleos atômicos presentes nas moléculas da atmosfera terrestre, essas partículas causam reações nucleares que produzem novas partículas.



Placa contendo uma emulsão fotográfica na qual se observa um mosaico de fotomicrografias da desintegração "explosiva" do núcleo de um átomo de prata atingido por uma partícula de radiação cósmica que tinha energia cinética muito alta. As trilhas de 25 fragmentos foram identificadas com o uso do microscópio, incluindo aquelas de prótons, partículas α e núcleos-produto mais pesados. Nas margens da fotografia, setas indicam algumas das trilhas identificadas. Muitas das trilhas "mergulharam" perpendicularmente no plano da placa e terminaram em uma das superfícies da emulsão.

RADIOATIVIDADE

● O gráfico do número de nêutrons N em função do número atômico Z, abrangendo todos os nuclídeos conhecidos, resulta na figura abaixo, em que os nuclídeos estáveis são assinalados como pontos pretos. Aproximadamente 3000 nuclídeos são conhecidos, dentre os quais apenas cerca de 10% são estáveis.



● Os nuclídeos estáveis estão situados em uma faixa bem definida do gráfico e constituem a grande maioria dos nuclídeos existentes na natureza. Para nuclídeos estáveis leves $N \cong Z$, enquanto para nuclídeos estáveis mais pesados $N \cong 1{,}5.Z$. O limite superior da faixa de estabilidade é atingido com o elemento químico Bismuto (Bi, Z = 83).

● Os nuclídeos situados fora dessa faixa geralmente não são estáveis e seus núcleos sofrem transformações espontâneas denominadas decaimento radioativo. O conjunto dessas transformações é denominado radioatividade e os nuclídeos não estáveis são denominados nuclídeos radioativos ou radionuclídeos.

● A maioria dos nuclídeos radioativos não existe na natureza. Entretanto, esses nuclídeos podem ser produzidos, mediante reações nucleares, em aceleradores de partículas ou reatores nucleares. Por exemplo, o radionuclídeo Cobalto-60, utilizado na indústria para detectar falhas em soldas por intermédio de gamagrafia, é produzido irradiando-se uma amostra de Cobalto natural em um reator nuclear, onde ocorre a reação:

$$^{59}Co + {}^{1}n \rightarrow {}^{60}Co + \gamma$$

ou

$$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$$

● O intervalo de tempo necessário para que o número inicial de átomos de um determinado radionuclídeo caia pela metade é uma constante denominada meia-vida e denotada por $T_{1/2}$.

● Ao sofrer decaimento radioativo, um radionuclídeo dá origem a novo núcleo, denominado nuclídeo produto, que pode ou não ser estável. Se o nuclídeo produto não for estável, este também sofrerá decaimento radioativo, e assim sucessivamente até que um dos nuclídeos gerados seja estável. Nesse caso, o nuclídeo radioativo inicial dá origem a uma série radioativa ou cadeia de decaimento radioativo, representada esquematicamente como:

$$X \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow E$$

onde X é o radionuclídeo inicial (usualmente denominado radionuclídeo pai), G e D são nuclídeos radioativos e E é um nuclídeo estável.

● Há um número pequeno de nuclídeos que, embora radioativos, são encontrados na natureza. Os principais nuclídeos radioativos existentes na natureza são:

a) ^{3}H (trítio) → resulta do bombardeamento do nitrogênio atmosférico por nêutrons rápidos gerados pela radiação cósmica, segundo a reação:

$$^{1}n \text{ (rápido)} + {}^{14}N \rightarrow {}^{12}C + {}^{3}H$$

e possui meia-vida de 12,35 anos.

b) ^{14}C → resulta do bombardeamento do nitrogênio atmosférico por nêutrons lentos gerados pela radiação cósmica, segundo a reação:

$$^{1}n\ (lento) + {}^{14}N \rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H$$

e possui meia-vida de 5736 anos.

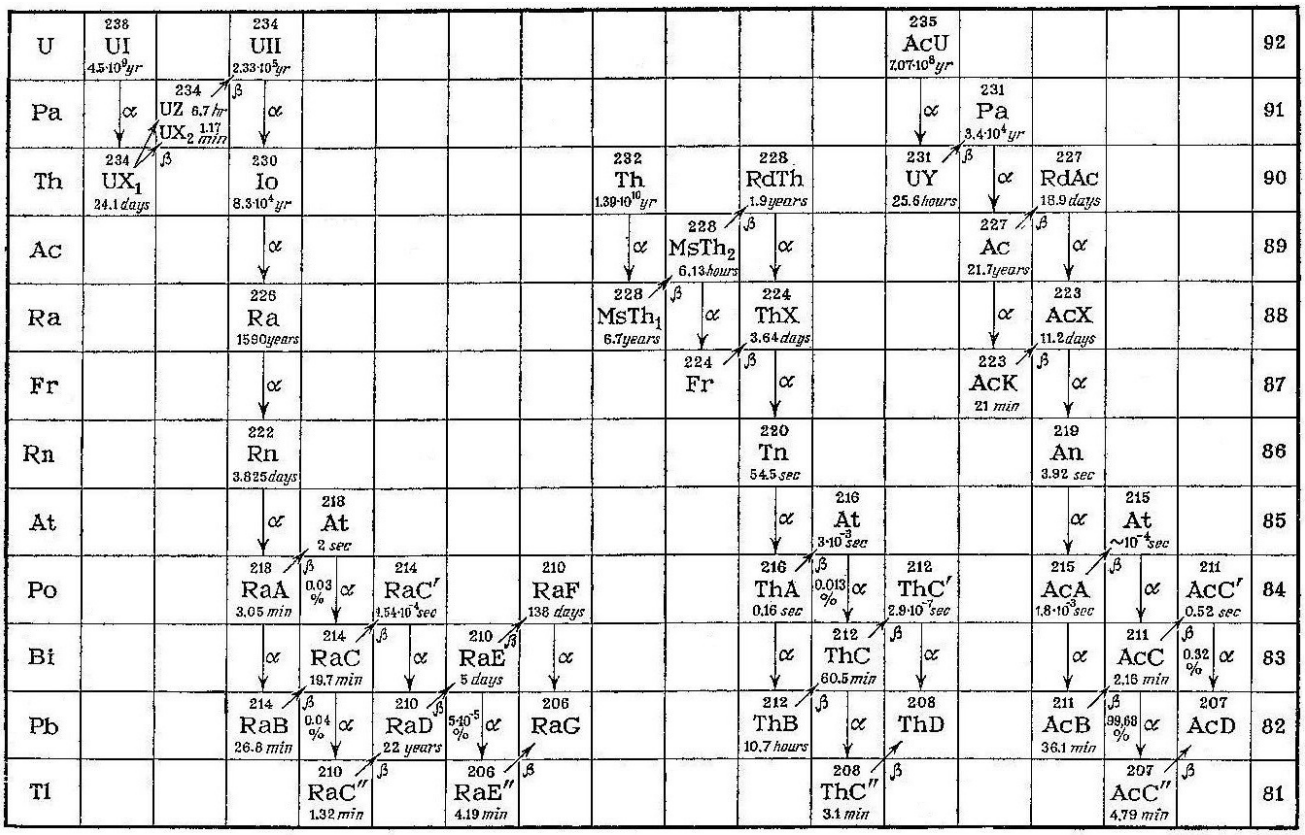
c) ^{40}K → possui meia-vida de $1{,}26.10^{9}$ anos.

d) ^{232}Th e respectiva série radioativa → o ^{232}Th possui meia-vida de $1{,}41.10^{10}$ anos. A série radioativa do ^{232}Th possui 14 nuclídeos e termina com o ^{208}Pb (estável).

e) ^{235}U e respectiva série radioativa → o ^{235}U possui meia-vida de $7{,}10.10^{8}$ anos. A série radioativa do ^{235}U possui 15 nuclídeos e termina com o ^{207}Pb (estável).

f) ^{238}U e respectiva série radioativa → o ^{238}U possui meia-vida de $4{,}51.10^{9}$ anos. A série radioativa do ^{238}U possui 18 nuclídeos e termina com o ^{206}Pb (estável).

Os nuclídeos das séries radioativas do ^{232}Th, do ^{235}U e do ^{238}U possuem todos $81 \leq Z \leq 92$, conforme mostrado no diagrama abaixo.

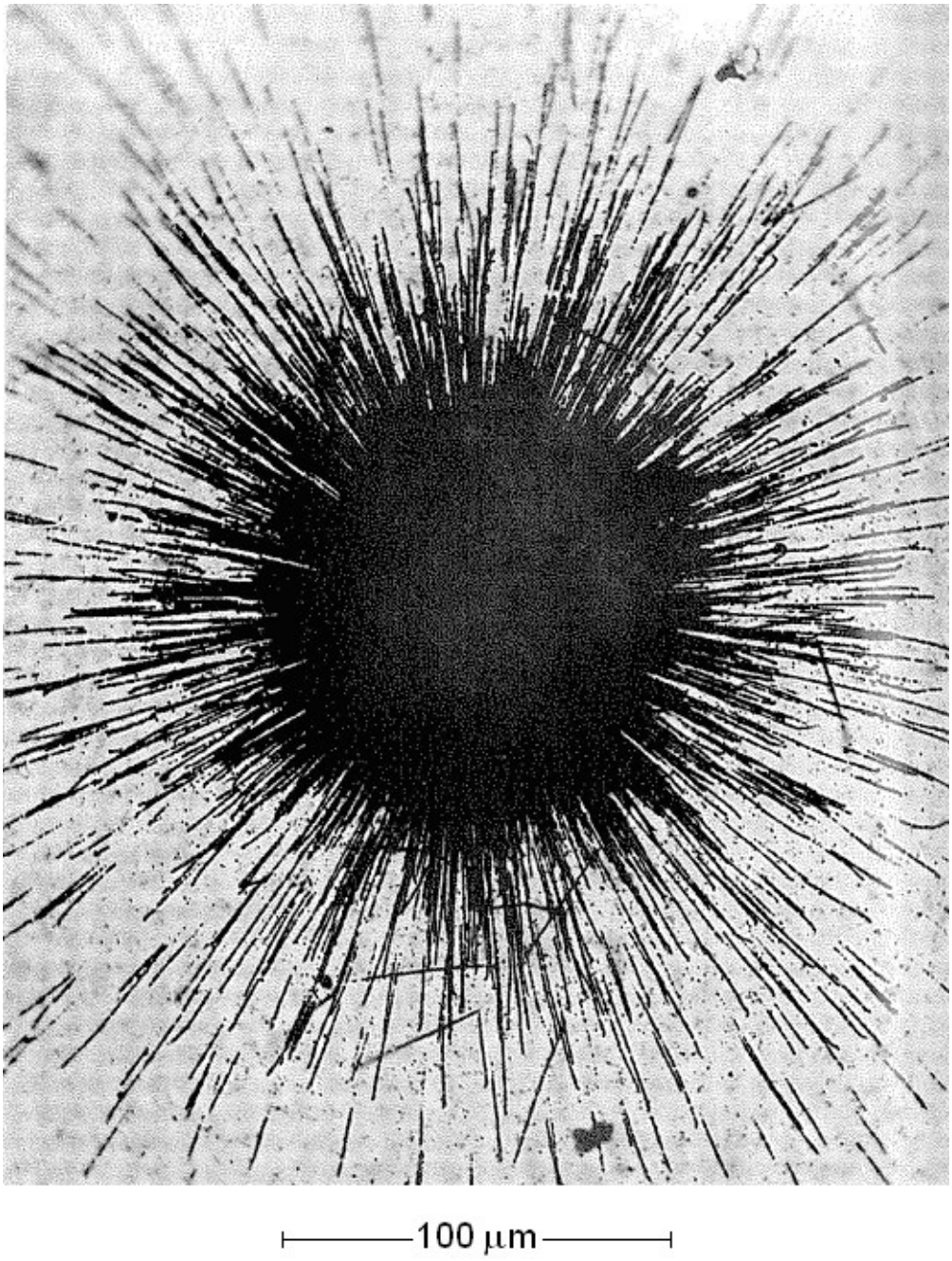


● O decaimento radioativo varia conforme o radionuclídeo, existindo os seguintes tipos principais:

a) Emissão de partícula alfa → Ocorre quando um nuclídeo radioativo emite uma partícula alfa e o nuclídeo produto, portanto, fica com seu número atômico reduzido em duas unidades e seu número de massa reduzido em quatro unidades em relação ao nuclídeo radioativo inicial. Em geral, o nuclídeo produto é formado em um estado excitado e, para voltar ao estado fundamental, emite radiação eletromagnética de frequência muito alta, de maneira que o decaimento por emissão de partícula alfa quase sempre é acompanhado da emissão de raios-gama. Exemplo:

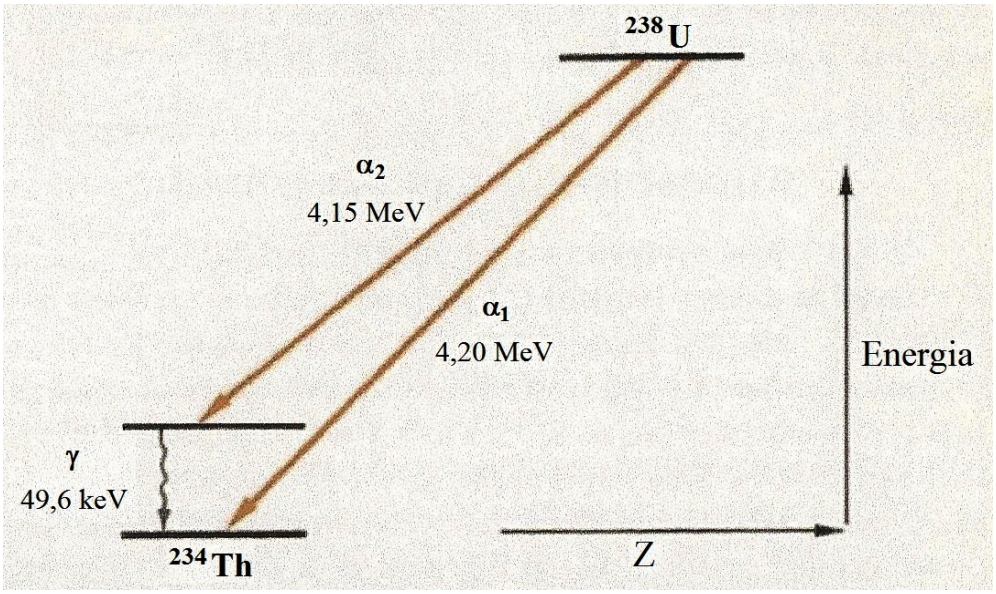
$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\alpha + \gamma$$

O decaimento por emissão de partícula alfa é o principal tipo de decaimento observado em nuclídeos radioativos pesados (com $Z \geq 84$).



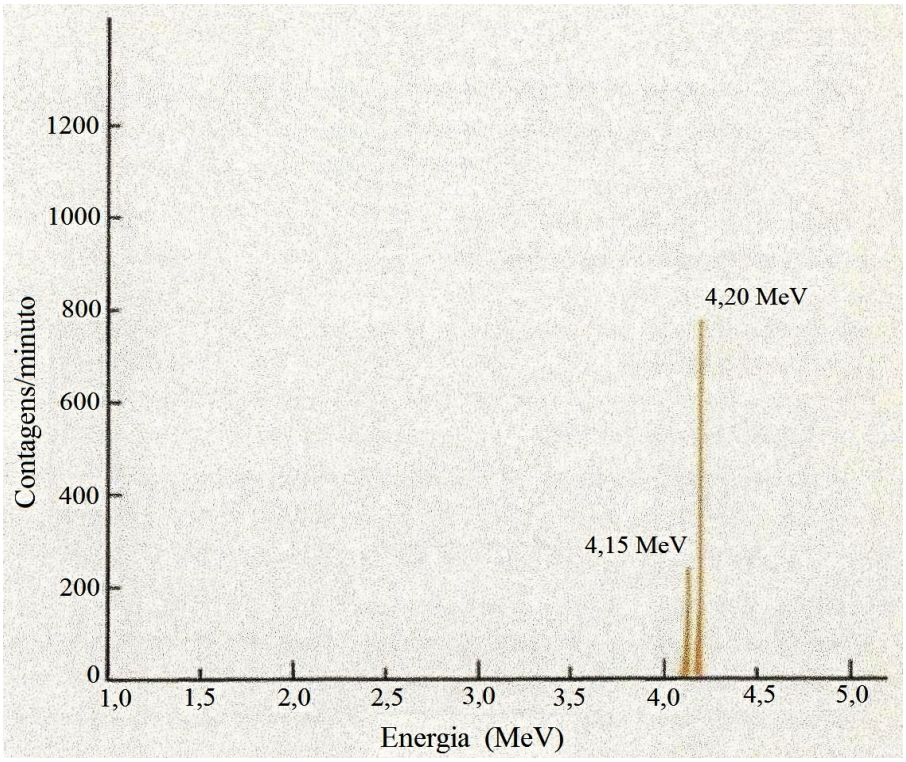
Fotografia obtida agitando-se uma agulha fina, sobre a qual uma pequena quantidade de ^{226}Ra (rádio) havia sido previamente depositada, em cima de uma placa fotográfica. Pitadas minúsculas de material radioativo, em muitos casos demasiadamente pequenas para serem vistas ao microscópio, desprenderam-se assim da agulha e depositaram-se sobre a placa. Após alguns poucos dias, a placa foi revelada e então, mediante exame microscópico, constatou-se que ela estava coberta com muitas "estrelas" das quais a fotografia é um exemplo. A fotografia mostra as trajetórias das partículas alfa irradiadas a partir de uma única área com extensão pequena localizada no centro da "estrela", ilustrando o número elevado de partículas emitidas por uma quantidade de ^{226}Ra tão pequena a ponto de não ser visível sequer com um microscópio. Uma vez que apenas um em cada cem mil núcleos de ^{226}Ra decaiu durante a exposição da placa a esse material radioativo, a fotografia fornece uma indicação do número enorme de átomos existente mesmo em quantidades ínfimas de matéria.

A energia cinética das partículas alfa emitidas no decaimento de nuclídeos radioativos geralmente está situada entre 4 MeV e 9 MeV, com o valor médio sendo aproximadamente igual a 6 MeV.



Esquema de decaimento do radionuclídeo ^{238}U para o nuclídeo produto ^{234}Th, mostrando as principais relações de energia envolvidas. Partículas alfa com energias cinéticas de 4,20 MeV e 4,15 MeV são observadas juntamente com um raio-gama de 49,6 keV.

A distribuição de energia cinética das partículas alfa emitidas no decaimento de um nuclídeo radioativo é sempre discreta, ou seja, com energias e intensidades absolutas de emissão bem definidas.

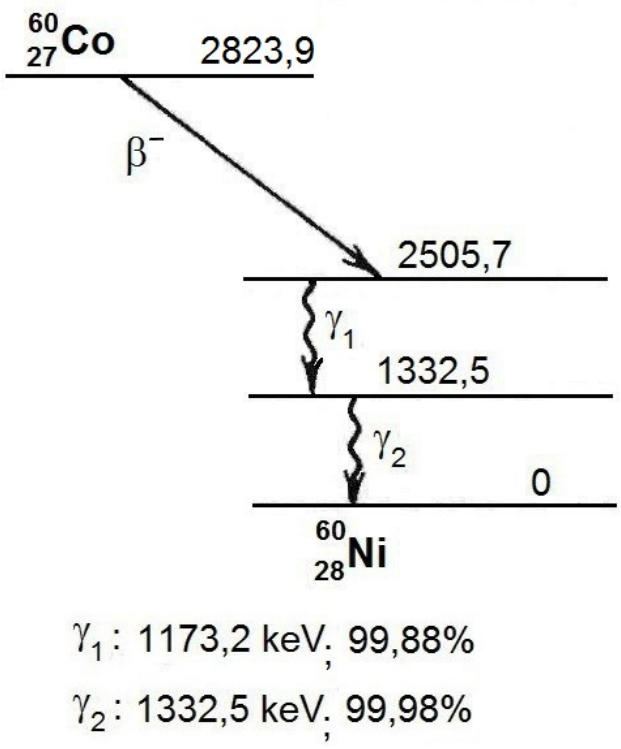


Distribuição das partículas alfa emitidas no decaimento do nuclídeo radioativo ^{238}U em função das respectivas energias cinéticas. A diferença observada nas taxas de contagem decorre da intensidade absoluta de emissão ser igual a 79% para as partículas alfa com energia cinética de 4,20 MeV e igual a 21% para as partículas alfa com energia cinética de 4,15 MeV.

b) Emissão de partícula beta → Ocorre quando, em um nuclídeo radioativo, um nêutron se transforma em um próton e um elétron, sendo este último emitido. O elétron emitido é denominado partícula beta. Em relação ao nuclídeo radioativo inicial, o nuclídeo produto fica com o número atômico acrescido de uma unidade e o número de nêutrons diminuído em uma unidade, de maneira que o número de massa permanece inalterado. A emissão de partícula beta é acompanhada sempre da emissão de outra partícula, que praticamente não interage com a matéria, pois não tem carga elétrica e tem massa quase nula. Essa partícula é denominada antineutrino ($\overline{\nu}$) e carrega em média cerca de dois terços da energia total envolvida no decaimento. Também neste tipo de decaimento o nuclídeo produto é, na maioria das vezes, formado no estado excitado, chegando ao estado fundamental mediante emissão de raios-gama. Exemplo:

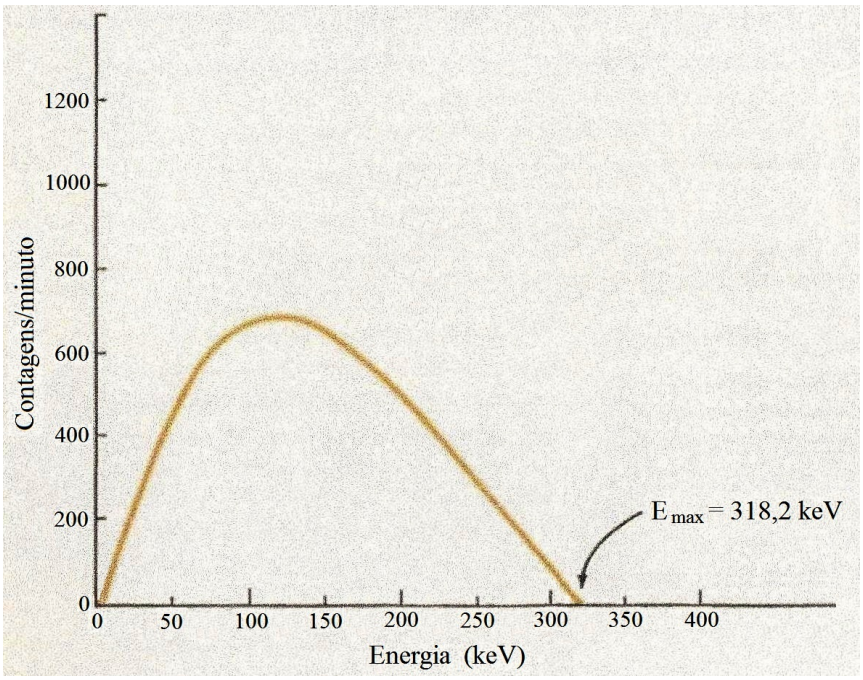
$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} + {}^{0}_{-1}\beta + \overline{\nu} + \gamma$$

O decaimento por emissão de partícula beta ocorre principalmente em nuclídeos radioativos com excesso de nêutrons em relação à faixa de estabilidade.



Esquema de decaimento do radionuclídeo ^{60}Co mostrando apenas as transições gama principais no nuclídeo produto ^{60}Ni. As energias (em keV) e intensidades absolutas (em %) dos raios-gama emitidos nessas transições são indicadas abaixo do diagrama.

Ao contrário do que ocorre no decaimento por emissão de partícula alfa, a distribuição de energia cinética das partículas beta emitidas no decaimento de um nuclídeo radioativo é sempre contínua, abrangendo uma faixa de energia cinética que vai de zero até um valor máximo igual à energia total envolvida no decaimento. O valor médio da energia cinética das partículas beta emitidas no decaimento corresponde a aproximadamente um terço do valor máximo porque, conforme foi mencionado anteriormente, o antineutrino ($\overline{\nu}$) carrega em média cerca dos outros dois terços da energia total envolvida no decaimento. No caso citado nesse exemplo, o valor da energia total envolvida no decaimento por emissão de partícula beta é (2823,9 – 2505,7) = 318,2 keV.



Distribuição das partículas beta emitidas no decaimento do nuclídeo radioativo ^{60}Co em função das respectivas energias cinéticas. Observa-se uma distribuição contínua que vai de zero até um valor máximo igual à energia total envolvida no decaimento, com média que perfaz aproximadamente um terço desse valor máximo.

A maioria das partículas beta emitidas no decaimento de nuclídeos radioativos possui energia cinética máxima menor ou igual a 4 MeV.

c) Emissão de pósitron → Ocorre quando, em um nuclídeo radioativo, um próton se transforma em um nêutron e um pósitron, sendo este último emitido. O pósitron é uma partícula idêntica ao elétron, porém carregada positivamente. Em relação ao nuclídeo radioativo inicial, o nuclídeo produto fica com o número atômico diminuído em uma unidade e o número de nêutrons acrescido de uma unidade, de maneira que o número de massa permanece inalterado. Nesse caso há emissão de um neutrino (ν) e raios-gama acompanhando o decaimento. O neutrino possui essencialmente as mesmas propriedades do antineutrino no que se refere à carga elétrica, à massa e à interação com a matéria. Adicionalmente, porém, o pósitron é instável e reage ao encontrar um elétron, causando a aniquilação das duas partículas e a produção de raios-gama. Exemplo:

$$^{53}_{26}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{53}_{25}\mathrm{Mn} + {}^{0}_{+1}\beta + \nu + \gamma$$

O decaimento por emissão de pósitron ocorre geralmente em nuclídeos radioativos com excesso de prótons em relação à faixa de estabilidade.

d) Captura de elétron → Ocorre quando um elétron de alguma camada eletrônica é capturado pelo núcleo atômico e se combina com um próton, formando um nêutron e emitindo um neutrino (ν). O elétron que é capturado pelo núcleo pode vir de qualquer camada eletrônica do átomo, porém mais provavelmente será oriundo da camada K, que é a mais próxima do núcleo. Em relação ao nuclídeo radioativo inicial, o nuclídeo produto fica com o número atômico diminuído em uma unidade e o número de nêutrons acrescido de uma unidade, de maneira que o número de massa permanece inalterado. Exemplo:

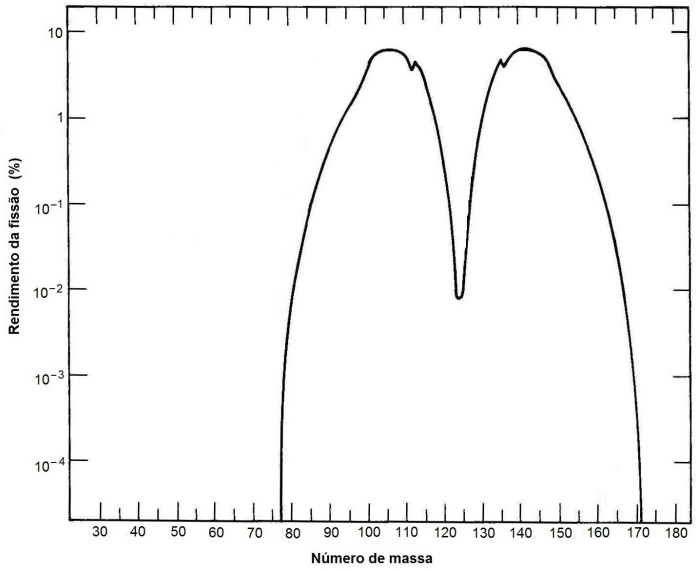
$$^{7}_{4}\mathrm{Be} + {}^{0}_{-1}\beta \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + \nu + \gamma$$

O decaimento por emissão de captura de elétron ocorre em nuclídeos radioativos com excesso de prótons em relação à faixa de estabilidade. No caso da captura de elétron, o neutrino é a partícula emitida. Em decorrência de o neutrino ser muito difícil de detectar, seria razoável supor que o decaimento por captura de elétron fosse também muito difícil de ser detectado. Entretanto, isto não ocorre, pois o processo de captura de elétron cria uma vaga em uma das camadas eletrônicas e essa vaga causa, imediatamente, efeitos mais facilmente detectáveis. Por exemplo, caso a vaga surja na camada K, como geralmente ocorre. Essa vaga poderá ser preenchida por um elétron proveniente de uma camada com menor energia de ligação, como a camada L. O preenchimento da vaga na camada K provoca, assim, uma liberação de energia igual à diferença de energia de ligação existente entre as duas camadas eletrônicas, a qual poderá aparecer como raio-X. A vaga criada na camada L poderá ser preenchida por um elétron da camada M, por exemplo, dando origem assim a mais um raio-X. Outro processo possível nesse caso é a energia, que é liberada quando ocorre o preenchimento da vaga, ser transferida diretamente a outro elétron, provocando a expulsão deste do átomo. Esse processo é denominado efeito Auger e deixa, por sua vez, uma vaga adicional em uma das camadas eletrônicas. Portanto, um chuveiro de raios-X e de elétrons pode ser emitido como consequência da captura de um elétron inicial. Esses efeitos secundários permitem que o decaimento por captura de elétron possa ser detectado.

e) Fissão espontânea → Ocorre quando um nuclídeo radioativo muito pesado (com $Z \geq 90$ e $A \geq 232$) se divide espontaneamente, dando origem em geral a dois nuclídeos com número de massa intermediário ($66 \leq A \leq 172$) e emitindo simultaneamente raios-gama, antineutrinos e de dois a quatro nêutrons rápidos. O nuclídeos gerados na fissão espontânea podem ser radioativos (maioria) ou estáveis. Exemplo:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{55}\mathrm{Cs} + {}^{92}_{37}\mathrm{Rb} + 3\ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \gamma + \bar{\nu}$$

Na grande maioria dos nuclídeos radioativos pesados em que ocorre, a fissão espontânea é um tipo de decaimento muito mais raro do que a emissão de partícula alfa.



Distribuição dos fragmentos de fissão espontânea do radionuclídeo ^{252}Cf em função do número de massa.

● A descrição quantitativa do decaimento de um radionuclídeo é fornecida por intermédio da lei de decaimento radioativo. A taxa de decaimento de um nuclídeo radioativo é diretamente proporcional ao número de átomos do nuclídeo existente na amostra naquele instante. Em termos matemáticos:

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

onde N é o número de átomos do radionuclídeo no instante de tempo t (o sinal negativo indica que esse número diminui com o passar do tempo) e λ é uma constante, denominada constante de decaimento, cujo valor é característico de cada radionuclídeo. O número de átomos N(t) de um nuclídeo radioativo no instante t é determinado integrando-se a equação acima, resultando:

$$N(t) = N_O\, e^{-\lambda t}$$

onde N_O é o número de átomos do nuclídeo radioativo no instante t = 0. A constante de decaimento é dada por:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \qquad [s^{-1}]$$

onde $T_{1/2}$ é a meia-vida do radionuclídeo.

● Define-se atividade *A* de uma amostra radioativa contendo N átomos de um radionuclídeo com constante de decaimento λ, no instante t, como:

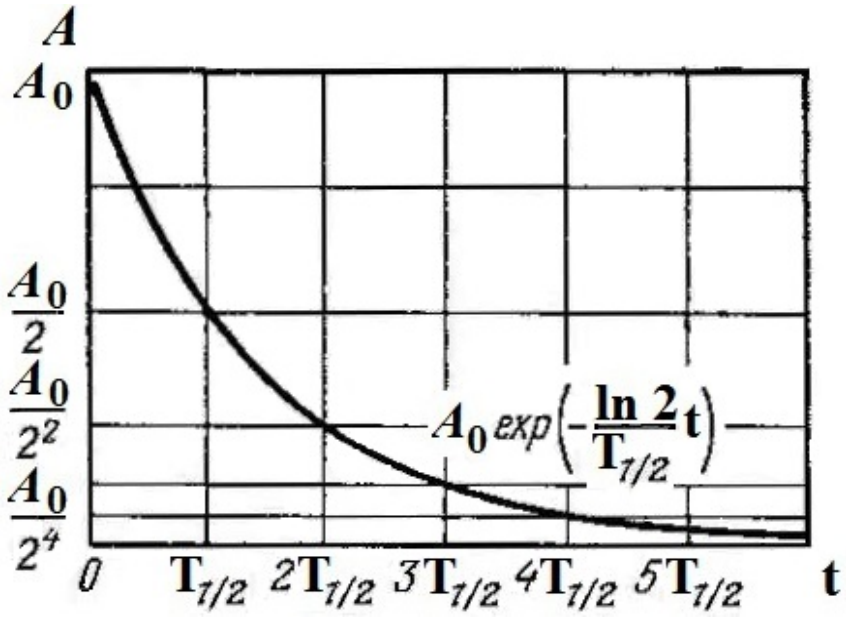
$$A = \lambda N \Rightarrow A(t) = \lambda N(t) \Rightarrow A(t) = \lambda N_O\, e^{-\lambda t} \Rightarrow A(t) = A_0\, e^{-\lambda t}$$

onde N_O é o número de átomos desse radionuclídeo no instante t = 0. As unidades de atividade são:

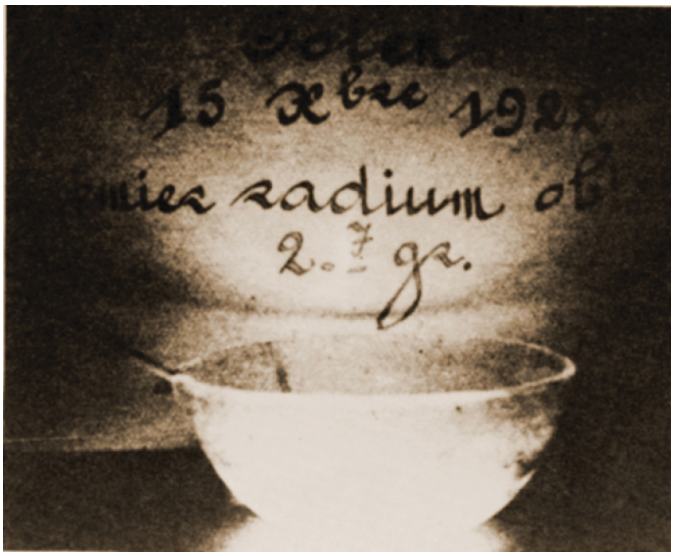
Becquerel → Bq = 1 decaimento/s [Sistema Internacional – SI]

Curie → Ci = $3{,}7.10^{10}$ decaimentos/s

A atividade varia em função do tempo conforme mostrado no gráfico abaixo.



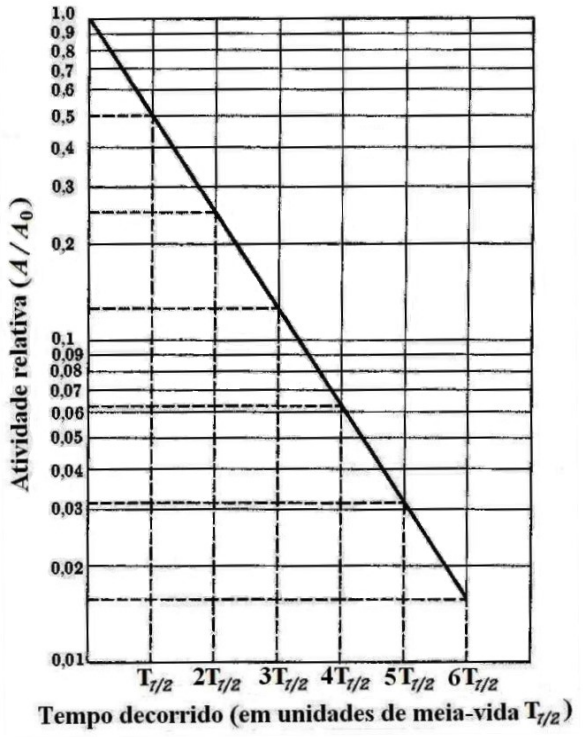
● A unidade histórica de atividade foi o Curie (Ci), cuja definição original corresponde à melhor estimativa da atividade de 1 grama de ^{226}Ra (rádio) puro. Embora ainda encontrado comumente em livros e periódicos técnico-científicos, o Curie (Ci) vem sendo gradualmente substituído pelo respectivo equivalente no Sistema Internacional (SI), o Becquerel (Bq), desde que na Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), realizada em 1975, foi adotada uma resolução declarando o Bq como a unidade padrão de atividade.



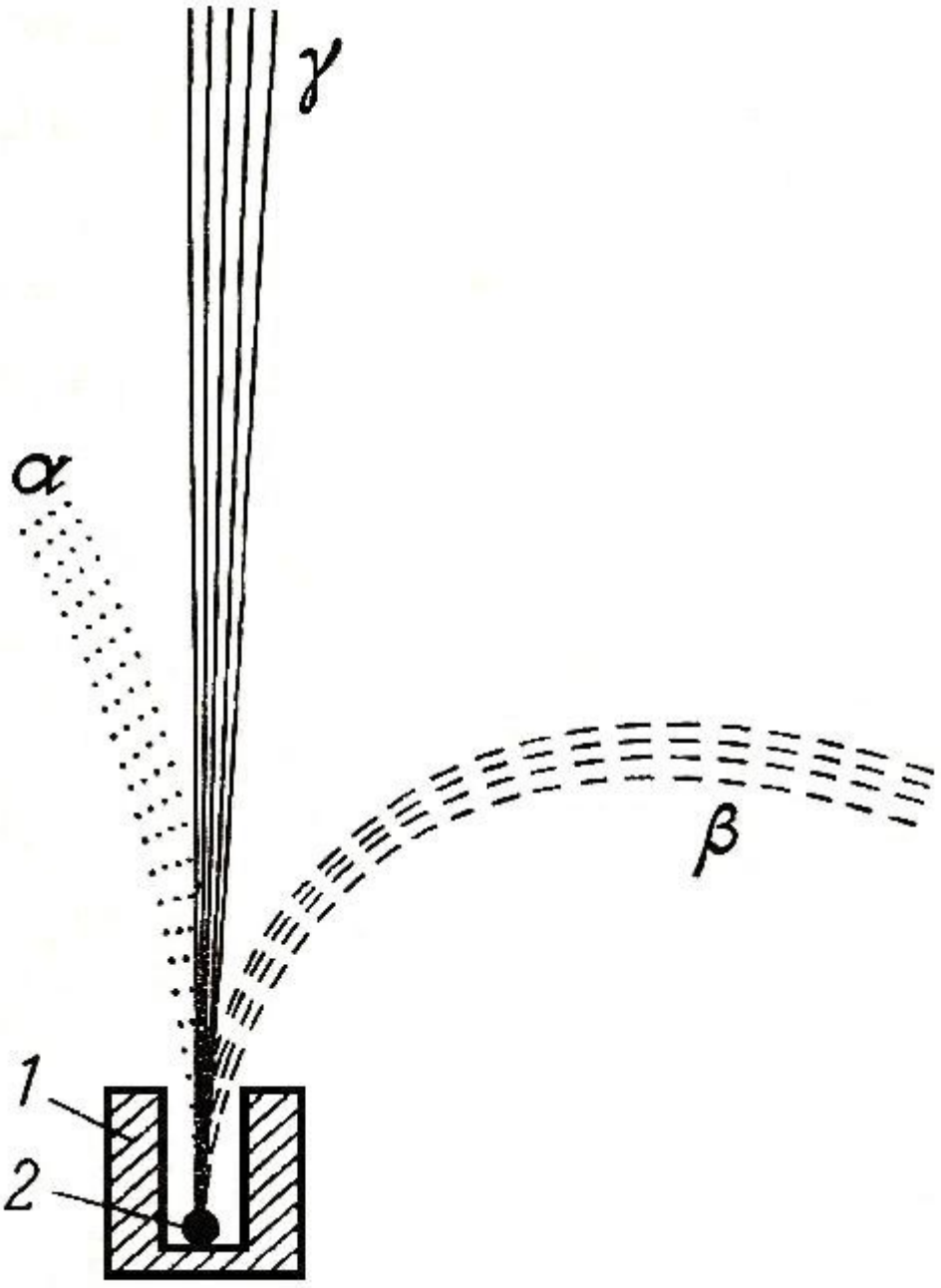
Pequeno recipiente de vidro transparente incolor contendo 2,7 gramas de brometo de rádio ($RaBr_2$, sal com 58,6% em massa de ^{226}Ra), iluminado (juntamente com o cartaz posicionado acima dele) pelo próprio brilho que emite. Essa fotografia foi tirada em 1922 no escuro do laboratório onde trabalhou Marie Curie.

● Convém ressaltar que a atividade mede a taxa de desintegração de uma dada fonte radioativa, não sendo sinônimo da taxa de emissão de radiação produzida no decaimento dessa mesma fonte. Frequentemente, um determinado tipo de radiação é emitido em apenas uma fração do número total de decaimentos, de maneira que se torna necessário conhecer o esquema de decaimento do radionuclídeo que constitui uma dada fonte radioativa para determinar a taxa de emissão de radiação a partir da atividade dessa fonte.

● A meia-vida $T_{1/2}$ de um radionuclídeo que não seja muito curta (menor que alguns poucos segundos) ou demasiado longa (maior que muitas dezenas de anos) pode ser determinada experimentalmente por meio do procedimento geral que consiste em medir a atividade de uma amostra deste radionuclídeo em função do tempo e apresentar os resultados em escala semi-logarítmica. Desse modo, obtém-se uma linha reta e a meia-vida $T_{1/2}$ do radionuclídeo em questão pode ser extraída diretamente a partir do gráfico, conforme ilustra o diagrama ao lado.



• A natureza das radiações ionizantes mais comumente emitidas por radionuclídeos pode ser demonstrada de maneira direta, inserindo-se uma amostra de minério de urânio em um recipiente selado de chumbo que contém uma fenda colimadora e fazendo com que as radiações, ao saírem da fenda, atinjam perpendicularmente as linhas de força de um campo de indução magnética homogêneo e constante posicionado defronte ao arranjo experimental. Em decorrência de possuírem cargas elétricas de sinal contrário, as partículas alfa e as partículas beta são desviadas para lados opostos, enquanto os raios-gama, por se tratarem de radiação eletromagnética, não são desviados.



Separação das radiações ionizantes quando submetidas a um campo de indução magnética homogêneo e constante, posicionado com as linhas de força entrando perpendicularmente no plano da ilustração do arranjo experimental, no qual: 1 – recipiente selado de chumbo; 2 – amostra de minério de urânio.