

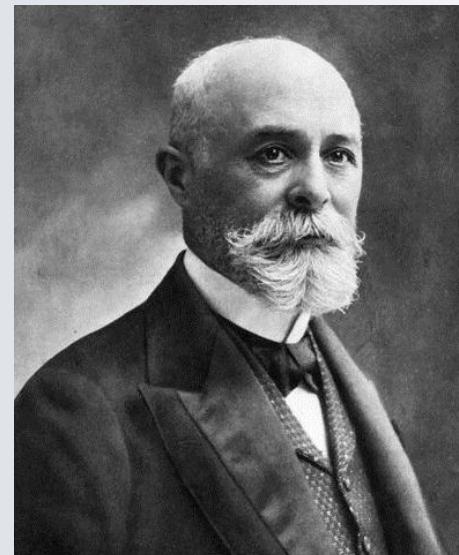
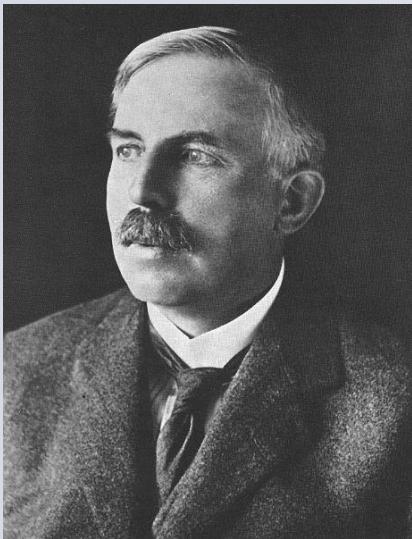
Tópicos de Física Moderna

LEI – 2011 / 2012 – 2º semestre

Teresa Viseu (regente)

*Ernest Rutherford
(1871-1937)*

Nobel (Química) em 1908



*Antoine Henri Becquerel
(1852-1908)
Nobel (Física) em 1903*

*Maria Skłodowska Curie
(1867-1934)
Nobel (Física) em 1903
Nobel (Química) em 1911*



*Pierre Curie
(1859-1906)
Nobel (Física) em 1903*

5. Introdução ao Estudo do Núcleo Atómico

- *5.1. Introdução*
- *5.2. Os constituintes do núcleo*
- *5.3. A Força Nuclear*
- *5.4. Energia de Ligação*
- *5.5. Nuclídeos radioativos*
 - *5.5.1. Desintegração ou decaimento α*
 - *5.5.2. Desintegração ou decaimento β*
 - *5.5.3. Séries radioativas*
- *5.6. Lei da desintegração radioativa*
- *5.7. Efeitos biológicos da radiação ionizante*
- *5.8. Reações nucleares*
 - *5.8.1. Reações nucleares de cisão*
 - *5.8.2. Reações nucleares de fusão*

5.1. Introdução

As primeiras informações sobre a constituição dos núcleos datam de 1896, ano em que A.H. **Becquerel descobriu a radioatividade**. No ano anterior Roentgen tinha descoberto os raios-X. Becquerel ao tentar encontrar emissão de raios-X em minerais que se tornam fluorescentes por exposição à luz do sol, verificou que estes emitiam radiação mesmo sem serem expostos a qualquer radiação. Ou seja emitiam **espontaneamente...**

Esta radiação emitida espontaneamente por alguns elementos foi muito estudada nas primeiras décadas do século XX e foi designada, por **Rutherford, por radiação α, β e γ**, de acordo com o seu poder de penetração na matéria e capacidade de ionizar o ar. **A radiação α é a mais ionizante e a menos penetrante, seguida da β enquanto que a γ é a mais penetrante e a menos ionizante.** As experiências de Rutherford mostraram que a "radiação" α são núcleos de átomos de hélio, a "radiação" β são eletrões e a radiação γ é REM de muito alta energia.

A descoberta do neutrão (J. Chadwick) e do positrão (C. D. Anderson) e a primeira reação nuclear usando partículas (protões) aceleradas artificialmente, ocorreu em 1932, ano que se considera ser o do nascimento da moderna Física Nuclear.

5.1. Introdução

Sabe-se hoje que há muitas semelhanças entre a estrutura atómica e a nuclear:

Os núcleos também estão sujeitos às leis da Física Quântica, tendo estados quantificados. Têm um estado fundamental e estados excitados e **emitem fotões (radiação gama)** nas transições entre os estados excitados e o estado fundamental;

Há, no entanto, algumas diferenças fundamentais:

Os constituintes dos núcleos movem-se sob a influência de uma **força "nova"**, a chamada **força nuclear forte**, que não é gravitacional nem eletromagnética. É uma **força muito forte** ($\sim 10^{40} F_{\text{gravítica}}$), **de muito curto alcance**, que só se manifesta para distâncias até algumas dezenas de fermi (fm), ($1fm = 10^{-15} m$) e que é **independente da carga**. Não há (ainda) uma expressão analítica que descreva as forças de interação entre os constituintes dos núcleos.

Os resultados da experiência de Rutherford, que deram origem ao modelo atómico com núcleo, permitiram também estimar o tamanho do núcleo que seria da ordem de $1-10 fm$.

5.2. Os constituintes do Núcleo

Os núcleos são constituídos por: protões
neutrões } nucleões

Embora se saiba hoje que nem o protão nem o neutrão são partículas elementares.

Propriedades dos nucleões:

Nome	carga	massa	spin
Protão (p)	$1.602 \times 10^{-19} C$	$1.6726 \times 10^{-27} kg$	1/2
Neutrão (n)	0	$1.6749 \times 10^{-27} kg$	1/2

Cada elemento químico é caracterizado pelo seu número atómico, Z, número de protões no núcleo.

Na natureza cada elemento químico é formado por uma série de isótopos em proporções bem definidas.

Os isótopos são nuclídeos que apenas diferem entre si pelo número de neutrões e consequentemente pelo

número de massa. Conhecem-se mais de 3000 nuclídeos mas só 266 são estáveis.

Como se conhecem cerca de 100 elementos químicos, existem então, em média, 2.6 nuclídeos estáveis por cada elemento. Todos os outros nuclídeos são instáveis, isto é radioativos.

Cada nuclídeo representa-se pela seguinte convenção



X - símbolo químico do elemento de que o núcleo faz parte

Z - número de protões

A - número de massa, ou seja número de nucleões (p+n)

N = A - Z - número de neutrões

5.3. A força nuclear

Ao longo da história e, sobretudo, a partir do final do século XIX, foram-se descobrindo **estruturas compostas em estruturas que até aí eram consideradas simples**. Descobriram-se as **moléculas**, os **átomos**, os **eletrões** e os **núcleos**. Por fim, por volta de 1970, descobriram-se os **quarks**.

Quarks e eletrões, ainda que agrupados em três famílias distintas, constituem, no início do século XXI, as **partículas elementares conhecidas**. Claro que, no futuro, partículas ainda mais elementares poderão vir a ser descobertas...

Ao irem-se descobrindo as partículas elementares, foram-se também definindo as **interações fundamentais** entre elas, responsáveis pela existência dessas mesmas partículas. De facto, em termos físicos, todos os processos que ocorrem na natureza, das galáxias às partículas mais elementares, quer se considerem substâncias no estado sólido, líquido, gasoso, ou plasma, no reino animal, vegetal ou na geofísica, têm por detrás só e apenas **quatro tipos de interações fundamentais conhecidas até ao momento**.

5.3. A força nuclear

As quatro interações fundamentais conhecidas são: interação gravítica, interação eletromagnética, interação nuclear forte e fraca.

Interação Gravítica: é uma força sempre atrativa e que atua em todo o universo. Está, portanto, omnipresente em todo o lado, mas só é dominante para grandes distâncias. Junta as massas, é responsável por cada um de nós ter peso, por as maçãs caírem das árvores, por a Lua se manter na sua órbita à volta da Terra, por os planetas se manterem nas suas órbitas à volta do Sol, por as galáxias se agruparem. É uma **interação fraca mas de longo alcance**.

Interação Eletromagnética: pode ser atrativa ou repulsiva e surge da unificação dos fenómenos elétricos e magnéticos. Só foi bem compreendida no século XIX, depois dos trabalhos de Maxwell. Está associada a cargas em movimento. Compreendeu-se no século XX que a **interação eletromagnética**, para além de ser responsável pelos fenómenos usuais de eletricidade e magnetismo, **está também na base de toda a estrutura atómica e molecular da matéria**, uma vez que o **eletrão é uma partícula com carga elétrica**, sendo por isso fundamental em química, biologia, física atómica e molecular, etc. A **interação eletromagnética é menos fraca (mais forte) que a gravítica e é também de longo alcance**.

5.3. A força nuclear

Interação Nuclear Forte: esta interação foi introduzida para **explicar a estabilidade dos núcleos atómicos**. No interior dos núcleos, as cargas elétricas positivas dos protões deveriam, por si só, repelir-se e levar à instabilidade e destruição dos núcleos, se só se considerassem as interações gravitacional e eletromagnética. Esta nova interação, que une protões e neutrões, é **muito forte** (**é a interação mais forte de todas**), para vencer a eletromagnética e de **muito curto alcance** (já que não se manifesta para distâncias maiores do que as do núcleo atómico, $\sim 10\text{ fm}$). Com a descoberta de que **os constituintes do núcleo, os protões e os neutrões, são eles próprios formados por partículas elementares, os quarks**, esta interação passou a ser considerada como a **interação fundamental entre os quarks** (une os quarks em grupos de três para formar protões e neutrões). A **interação nuclear forte** está para os **fenómenos nucleares** como a **interação eletromagnética** está para a **física atómica e molecular**.

A **interação gravítica** é devida à massa, a **interação eletromagnética** e a **interação fraca** são devidas às **cargas elétricas, positiva e negativa**. Para a **interação nuclear forte** consideram-se três "agentes", as chamadas **três cores dos quarks**.

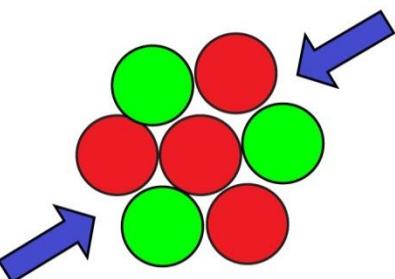
5.3. A força nuclear

Interação Nuclear Fraca: esta interação foi introduzida para explicar certas transformações que ocorrem ao nível de alguns núcleos atómicos, como por exemplo a desintegração *beta* em que um neutrão se transforma, espontaneamente, num protão, num eletrão e num antineutrino. A força nuclear fraca é assim responsável por sintetizar elementos químicos diferentes (Z aumenta de uma unidade) no interior de estrelas e em explosões de supernovas, através de processos que envolvem a captura e decaimento de neutrões. É também uma **interação de muito curto alcance mas menos intensa do que a interação nuclear forte**.

Resumo das interações fundamentais

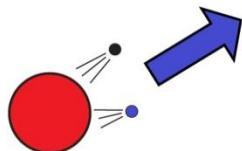
	Gravitacional	Eletromagnética	Nuclear forte	Fraca
Intensidade	Muito fraca (10^{-40})	Fraca (10^{-2})	Forte (1)	Fraca (10^{-5})
Alcance	Longo (∞)	Longo (∞)	Curto $(\leq 10^{-14})$	Muito curto $(\leq 10^{-16})$

5.3. A força nuclear



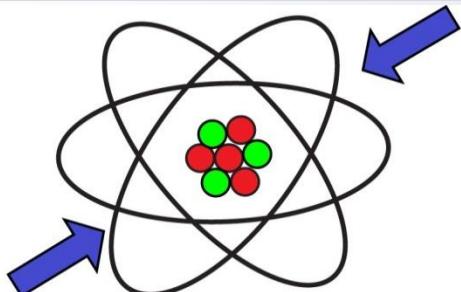
Força Forte
Mantém coesão nuclear

Exemplos:
- fusão nuclear
- bombas termonucleares



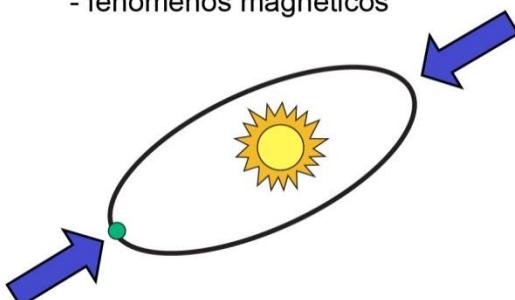
Força Fraca
Cria decaimento radioativo

Exemplos:
- fissão nuclear
- bombas atómicas



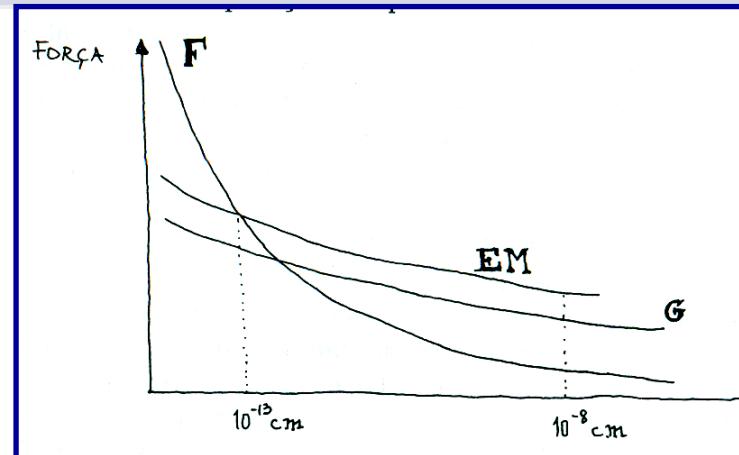
Força Electromagnética
Mantém coesão atómica

Exemplos:
- reacções químicas
- fenómenos eléctricos
- fenómenos magnéticos



Força Gravitacional
Mantém coesão universal

Exemplos:
Movimento observável a olho nu
Movimento de corpos celestes



Comparação da intensidade das forças **gravitacional, eletromagnética e nuclear forte**, em função da separação (r) entre as partículas.

Para **distâncias muito curtas** (dentro do núcleo, $r < 10^{-15} \text{ cm}$) predomina a **interação nuclear forte**, enquanto que para **distâncias maiores** predomina a **interação eletromagnética**.

5.4. Energia de ligação

A massa de um dado núcleo é sempre inferior à soma das massas das suas partículas constituintes.

Sempre que Z protões e A-Z neutrões se combinam para formar um núcleo, dá-se a libertação de uma grande quantidade de energia, igual ao módulo da energia de ligação, $E_{lig}(A,Z)$, que se pode estimar fazendo:

$$E_{lig}(A,Z) = [M(A,Z) - (Z M_H + (A - Z) m_n)] c^2$$

sendo

M_H - massa do átomo de hidrogénio

m_n - massa do neutrão

$M(A,Z)$ - massa atómica do nuclídeo em questão

O simétrico da energia de ligação, $-E_{lig}(A,Z)$ do núcleo representa a energia total que é necessário fornecer ao núcleo para o decompor nos seus Z protões e nos seus (A-Z) neutrões. Esta energia é portanto uma medida da estabilidade do núcleo. Quanto maior for tanto mais estável é o núcleo.

5.4. Energia de ligação

Exemplo: vamos comparar a massa do ${}^4\text{He}_2$ com a soma das massas dos seus constituintes, isto é, vamos **determinar a energia de ligação deste nuclídeo**.

Na **tabela periódica** temos acesso à **massa atómico dos elementos**, em que se considera uma mistura ponderada de todos os isótopos naturais desse elemento. Numa **tabela de massas atómicas** temos acesso à **massa atómica de cada um dos isótopos** em questão.

$$\text{Seja então } M({}^4\text{He}_2) = 4.0026033 \text{ u} \quad (*)$$

A massa dos seus constituintes em separado será a soma da massa de dois átomos de hidrogénio (${}^1\text{H}_0$) com a massa de dois neutrões, isto é

$$2 M_H + 2 m_n = 2 \times 1.0078252 \text{ u} + 2 \times 1.0086654 \text{ u} = 4.0329812 \text{ u}$$

Como se vê a **massa atómica do hélio é inferior à soma das massas dos seus constituintes**, sendo então a energia de ligação no interior do núcleo dada por:

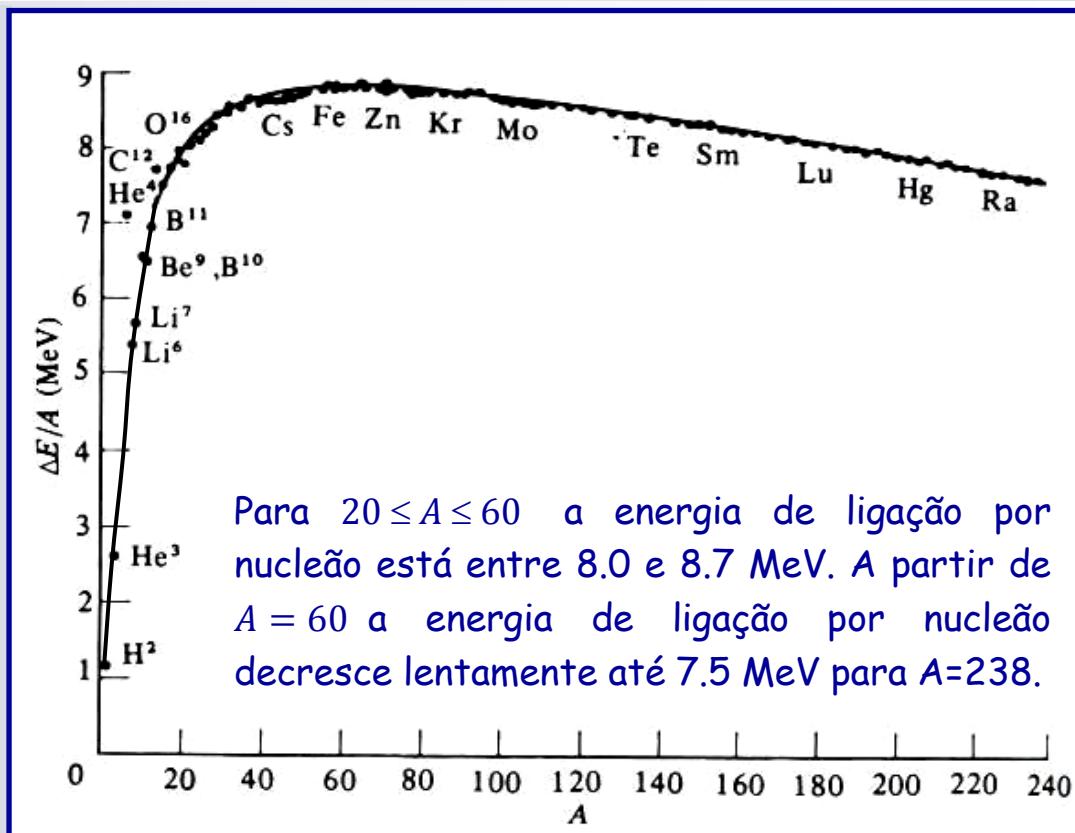
$$E_{lig}({}^4\text{He}_2) = \Delta m c^2 = (4.0026033 - 4.0329812)u c^2 = -4.54 \times 10^{-12} \text{ J} = -28.3 \text{ MeV}$$

5.4. Energia de ligação

Um parâmetro importante no estudo da estabilidade dos núcleos, é o valor do módulo da sua **energia de ligação por nucleão**, $\Delta E/A$ que se mostra na figura junta em função de A , para o isótopo mais estável de cada elemento.

Esta energia é sempre negativa logo, o núcleo é uma entidade mais estável do que o conjunto dos seus nucleões livres: a formação do núcleo a partir dos seus nucleões faz-se assim com libertação de grandes quantidades de energia.

A estabilidade nuclear máxima ocorre para $A = 56$ (ferro). $\Delta E/A$, nos elementos leves, cresce rapidamente com A , passando depois por um valor mais ou menos constante e decrescendo depois lentamente para os elementos mais pesados.



Para $20 \leq A \leq 60$ a energia de ligação por nucleão está entre 8.0 e 8.7 MeV. A partir de $A = 60$ a energia de ligação por nucleão decresce lentamente até 7.5 MeV para $A=238$.

5.5 Nuclídeos radioativos

Como já se referiu, cada elemento químico é caracterizado pelo seu **número atómico, Z, número de protões no núcleo**.

Mas, na natureza, cada elemento químico é formado por uma série de isótopos em proporções bem definidas. Os isótopos são nuclídeos que apenas diferem entre si pelo **número de neutrões** e consequentemente pelo número de massa.

Conhecem-se mais de 3000 nuclídeos mas só 266 são estáveis. Como se conhecem cerca de 100 elementos químicos, existem então, em média, 2.6 nuclídeos estáveis por cada elemento. Todos os outros nuclídeos são instáveis, isto é radioativos.

Os nuclídeos estáveis são aqueles a que é necessário fornecer energias da ordem dos MeV para vencer as energias de ligação dos seus nucleões.

Os nuclídeos instáveis (radioativos) são os que, espontaneamente, se transformam noutras nuclídeos mais estáveis emitindo partículas e/ou radiação.

A **radioatividade**, descoberta por Becquerel em 1896, consiste assim na **emissão espontânea de "radiação"** (aqui radiação pode ser REM ou partículas) por parte de um nuclídeo instável para se converter num nuclídeo de outra espécie química, mais estável que o inicial.

5.5 Nuclídeos radioativos

Sabe-se hoje que a "radiação" emitida nas **desintegrações radioativas** pode ser de três tipos:

partículas α (núcleos de 4_2He)

partículas β (eletrões... ou positrões)

radiação γ (fotões de elevado conteúdo energético)

As **desintegrações radioativas do tipo α ou β** são processos através dos quais os nuclídeos instáveis se convertem noutros mais estáveis por alteração do número de neutrões e de protões. O processo apenas termina quando se atinge um núcleo estável. Frequentemente a estabilidade só é atingida após a **emissão sucessiva de várias partículas α ou β, acompanhadas de emissão de fotões γ**. A emissão de radiação γ está sempre associada à libertação do excesso energia que os núcleos possuem quando, no processo de desintegração α ou β ficam em estados excitados.

Numa desintegração α o nuclídeo perde dois neutrões e dois protões, diminuindo Z de duas unidades e A de quatro.

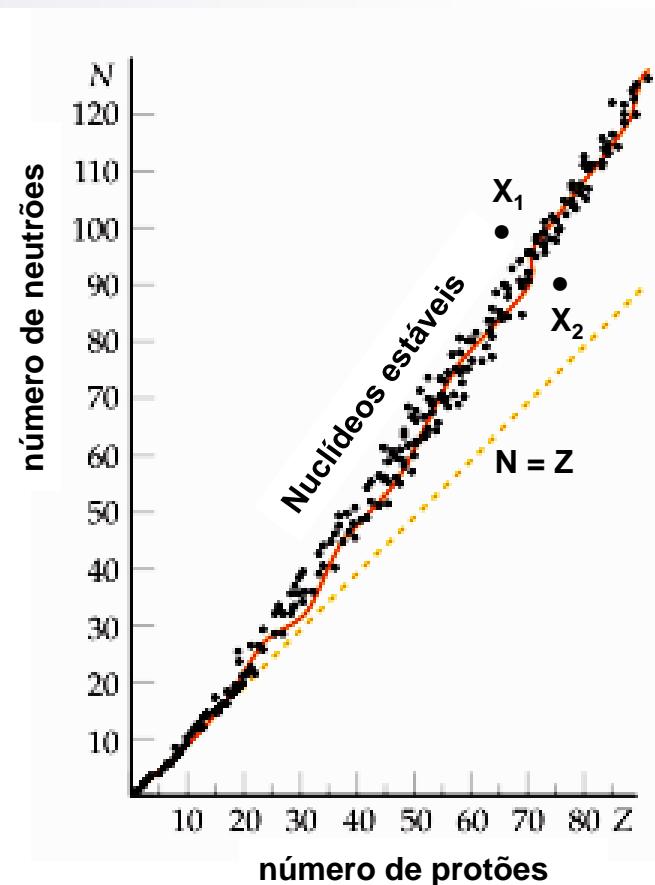
Numa desintegração β⁻ o nuclídeo perde um neutrão e ganha um protão (Z aumenta de uma unidade e A mantém-se) e numa desintegração β⁺ o nuclídeo perde um protão e ganha um neutrão (Z diminui de uma unidade e A mantém-se).

5.5 Nuclídeos radioativos

Na figura junta, **diagrama de Segré**, representa-se graficamente o número de neutrões em função do número de protões para os nuclídeos estáveis. Verifica-se que:

- os núcleos leves ($A < 20$) estáveis possuem o mesmo número de protões e neutrões;
- para núcleos mais pesados ($A > 20$) a estabilidade nuclear é conseguida à custa de um excesso de neutrões.

Um hipotético nuclídeo X_1 tem, relativamente à zona de estabilidade, excesso de neutrões e terá por isso tendência a perdê-los (decaimento β^-), enquanto que um hipotético nuclídeo X_2 tem, relativamente à zona de estabilidade, excesso de protões e teria então tendência a sofrer um decaimento β^+ . Nuclídeos instáveis com $Z > 82$ sofrem geralmente desintegrações α .



Não existem nuclídeos naturais a sofrer desintegração β^+

5.5.1 Desintegração ou Decaimento α

Ocorre normalmente em núcleos com $Z > 82$. Neste processo **um nuclídeo "pai" instável decai para um nuclídeo "filho"** através da emissão de uma partícula α .

É um fenómeno que **ocorre espontaneamente**, já que é energeticamente favorável. A massa do nuclídeo "pai" é maior que a soma da massa do nuclídeo "filho" com a massa da partícula α libertada o que significa que o processo é acompanhado de **libertação de energia, na forma de energia cinética da partícula α** (e também do núcleo, mas muito menos porque o núcleo é muito mais pesado).

A partícula α libertada é um núcleo de hélio, 4_2He_2 . Este processo radioativo pode-se representar por



A **energia Q , libertada sob a forma de energia cinética**, é da ordem dos MeV e vale

$$Q = [M(X) - M(Y) - m_\alpha] c^2$$

5.5.2 Desintegração ou Decaimento β

Designa-se por desintegração do tipo β , a transformação radioativa em que, no interior dum **núcleo**, um neutrão se transforma num protão ou vice-versa, emitindo **partículas**, um eletrão (e^-) ou um positrão (e^+) e um antineutrino ou um neutrino.

Existem dois tipos de transformações radioativas do tipo β , a desintegração β^- e a desintegração β^+ .

(a) Desintegração β^- : dá-se com a emissão de um **eletrão** (acompanhada da emissão de um **antineutrino**) e resulta da transformação de um neutrão do núcleo num protão

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

NOTA: o **núcleo não tem eletrões**! O eletrão é criado no núcleo a partir de um neutrão e libertado imediatamente... No balanço geral o **núcleo perde um neutrão e ganha um protão**.

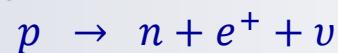
Esta desintegração pode-se então representar genericamente por:



Os **antineutrinos**, $\bar{\nu}$, têm spin 1/2, carga elétrica nula, momento magnético nulo e massa em repouso muito pequena.

5.5.2 Desintegração ou Decaimento β

(b) Desintegração β^+ : resulta da transformação de um protão do núcleo num neutrão e é acompanhada da emissão de um **positrão** e da libertação de um **neutrino**



O **núcleo não tem positrões**. O positrão é criado no núcleo a partir de um protão e é libertado imediatamente. No balanço geral **o núcleo perde um protão e ganha um neutrino**.

A desintegração β^+ pode-se então representar genericamente por:



Os **neutrinos**, ν , são partículas com spin 1/2, carga elétrica nula, momento magnético nulo e massa em repouso muito pequena. Diferem dos antineutrinos apenas na orientação do vetor momento angular de spin.

Quer os **neutrinos** quer os **antineutrinos** transportam energia e momento linear e angular. A sua emissão durante os processos de **desintegração β** assegura assim a **conservação destas quantidades**.

Nas **desintegrações β** , os nuclídeos "pai" (X) e "filho" (Y), têm o mesmo número de massa, designam-se por nuclídeos **isóbaros**.

5.5.2 Desintegração ou Decaimento β

Nos processos radioativos naturais só existem desintegrações β^- que ocorrem, em geral, para nuclídeos em que o número de neutrões é superior ao número de protões.

Os nuclídeos que se transformam por desintegração β^+ são sempre produzidos laboratorialmente.

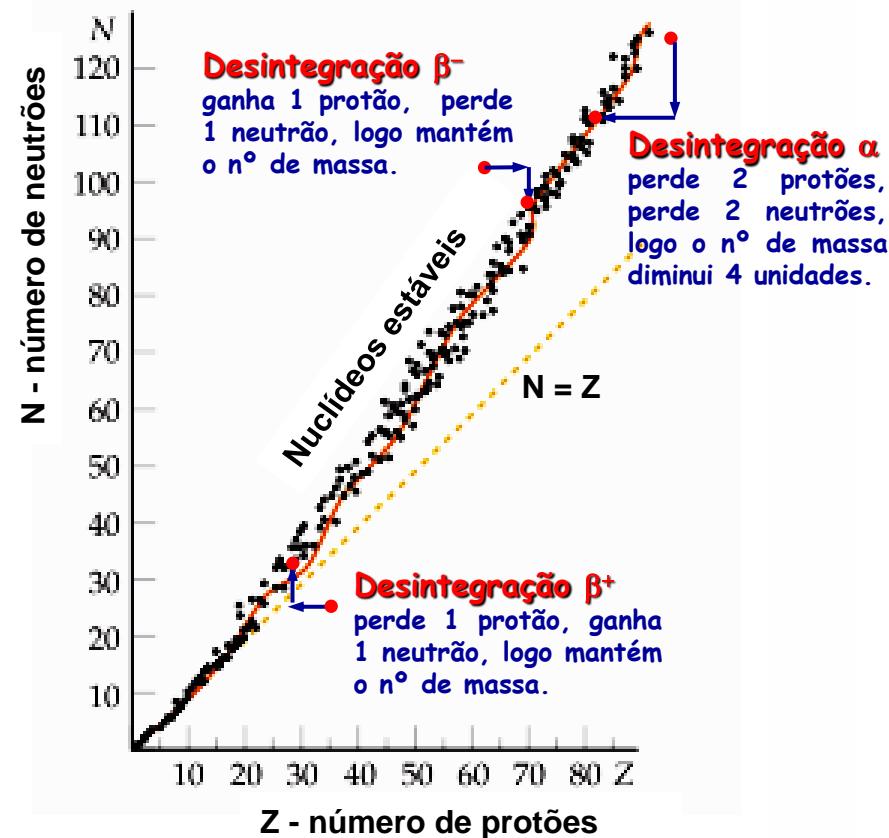
As energias Q_{β^-} e Q_{β^+} libertadas nos processos de desintegração β^- e β^+ são, respetivamente:

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

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

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

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



5.5.3 Séries Radioativas

As desintegrações α ou β deixam, frequentemente, os nuclídeos "filho" em estados excitados. O **declínio ou decaimento** consiste na emissão de um ou mais fotões de radiação eletromagnética e na transição do nuclídeo de um estado excitado para o estado fundamental.

Um **nuclídeo radioativo** pode desintegrar-se noutro também radioativo e assim sucessivamente até se obter um **nuclídeo estável**. Esta desintegração sequencial é denominada de **série ou família radioativa**.

Os **isótopos radioativos naturais** possuem na sua maioria $Z \geq 82$ ($81 < Z < 92$) e estão agrupados em quatro famílias:

Família do Tório ($A = 4n$):

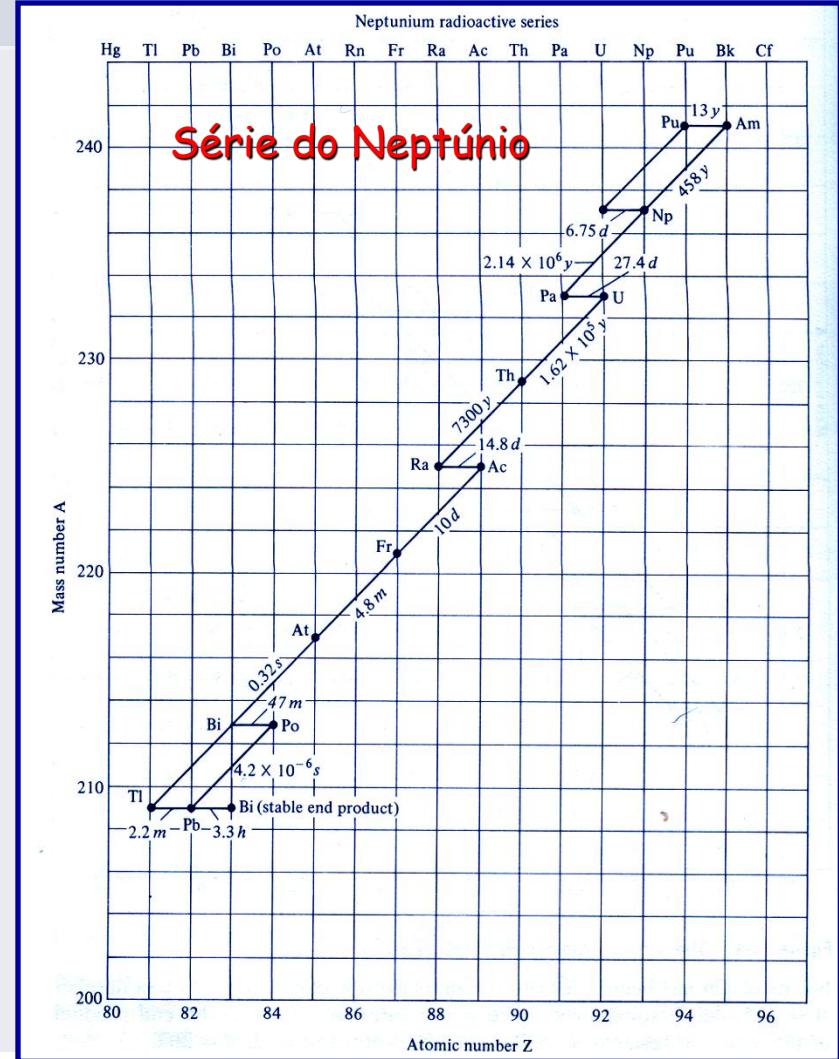
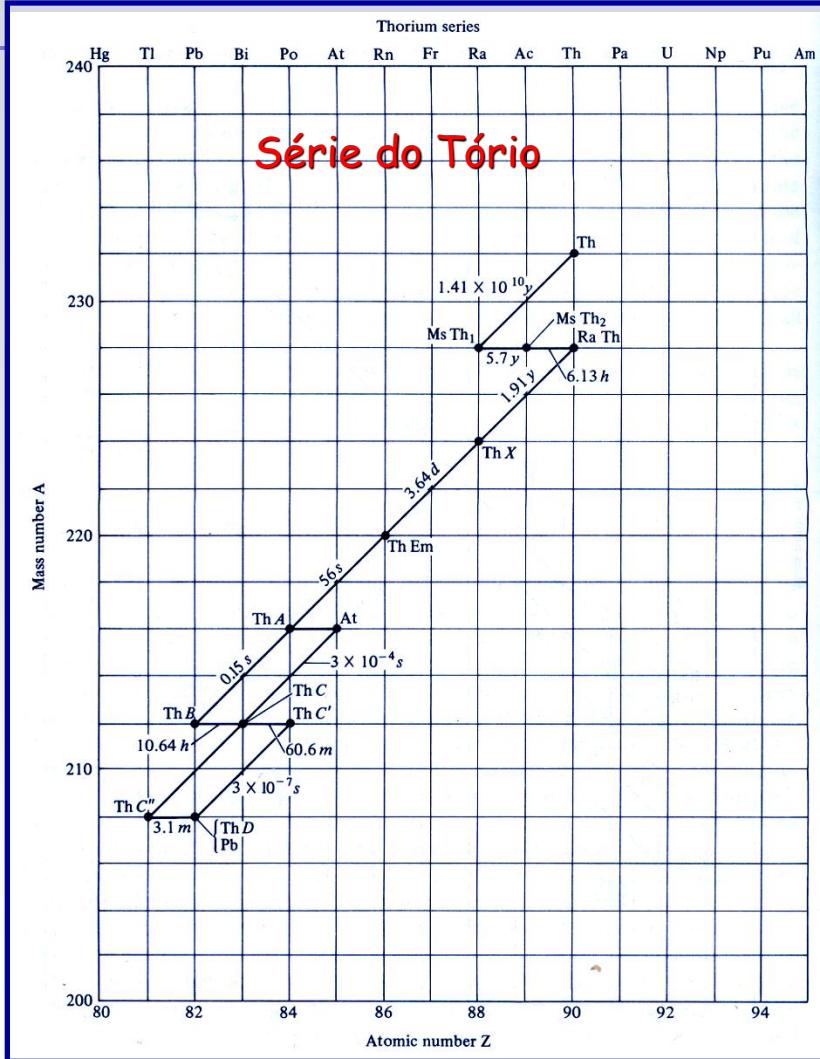
(n é um número inteiro, sendo 58 na família do tório, 60 na do neptúnio, 59 na do urânio e 58 também na do actínio)

Família do Neptúnio ($A = 4n + 1$):

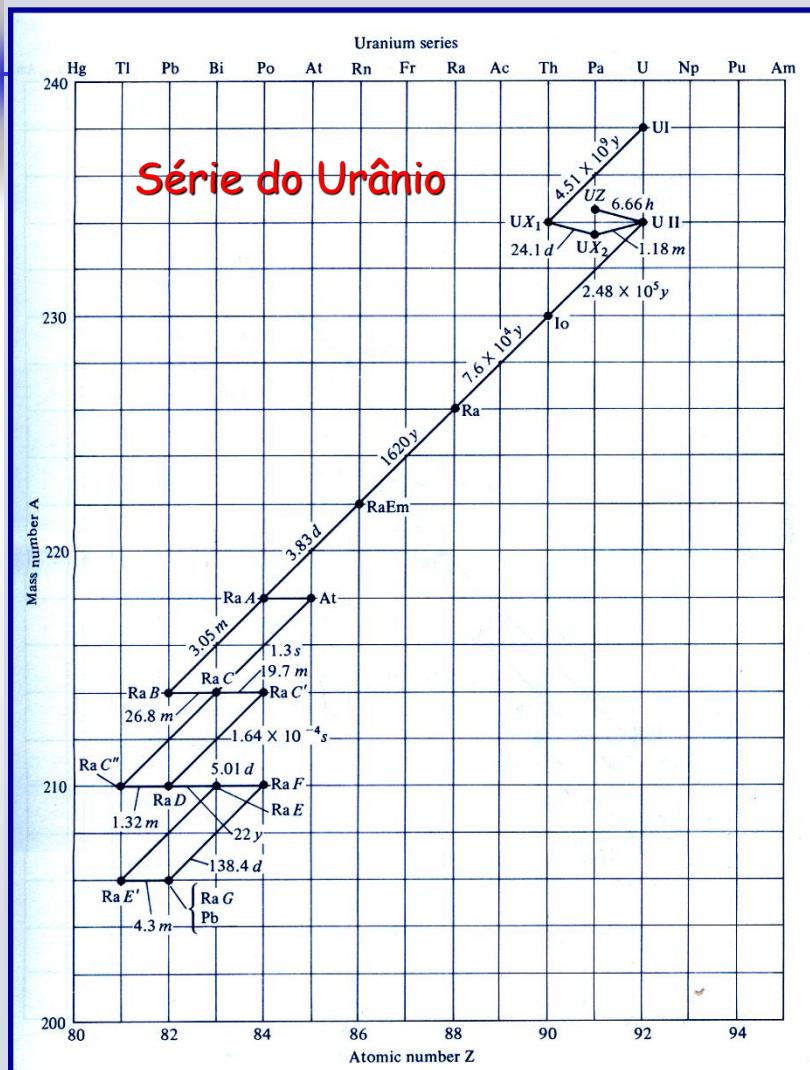
Família do Urânio ($A = 4n + 2$) - (^{238}U)

Família do Actínio ($A = 4n + 3$) - (por vezes aparece designada como a família do urânio 235, (^{235}U) que é o primeiro elemento da família)

5.5.3 Séries Radioativas



5.5.3 Séries Radioativas



5.6 Lei da Desintegração Radioativa

Verifica-se experimentalmente que:

- a taxa de desintegração de qualquer substância radioativa **decresce com o tempo de uma forma exponencial.**
- a taxa de desintegração depende do tipo de substância radioativa e do número de núcleos radioativos presentes na amostra.

O número de núcleos radioativos que se desintegra por unidade de tempo é dado por:

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = k N(t)$$

O sinal menos desta equação mostra que a atividade decresce ao longo do tempo.

em que

A - é a atividade da substância radioativa (núcleos por segundo);

N - é o número de núcleos radioativos existentes no instante t (dá-nos, em cada instante, o número de núcleos por desintegrar)

k - é a constante de desintegração do nuclídeo (representa a probabilidade de desintegração de um núcleo por unidade de tempo), e tem um valor característico para cada isótopo.

5.6 Lei da Desintegração Radioativa

Partindo de $\frac{dN}{dt} = -k N(t)$ e integrando,

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{dt} = -k \int_0^t N(t) \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N(t)} = -k \int_0^t dt$$

obtém-se $\ln N - \ln N_0 = -kt \Rightarrow \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -kt$

ou seja $N(t) = N_0 e^{-kt}$

onde N_0 é o número total de núcleos radioativos, no instante $t=0$

Como $A(t) = -\frac{dN}{dt} = k N(t)$ podemos escrever:

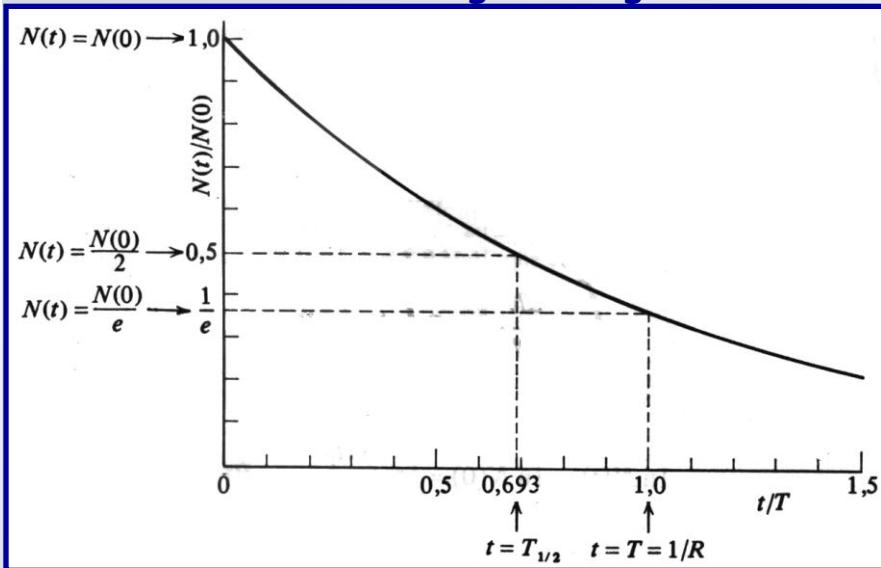
$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = k N_0 e^{-kt} = A_0 e^{-kt}$$

onde $A_0 = k N_0$ é a atividade inicial da amostra.

5.6 Lei da Desintegração Radioativa

Na figura junta representa-se a equação $N(t)/N_0 = e^{-kt}$ verificando-se o desaparecimento exponencial da espécie radioativa ao longo do tempo.

Podem-se definir as seguintes grandezas:



Tempo de meia-vida de um nuclídeo ($\tau_{1/2}$) : intervalo de tempo necessário para que um dado número de núcleos desse nuclídeo, N_0 , se reduza, por desintegração, a metade.

Vida média ou tempo de vida de um nuclídeo (τ) : intervalo de tempo necessário para um dado número de núcleos desse nuclídeo, N_0 , se reduzir, por desintegração, a N_0/e .

$$\frac{N_0}{e N_0} = e^{-k\tau} \Rightarrow \frac{1}{e} = e^{-k\tau}$$

$$e^{-1} = e^{-k\tau} \Rightarrow \boxed{\tau = \frac{1}{k}}$$

$$\frac{N_0}{2 N_0} = e^{-k\tau_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-k\tau_{1/2}}$$

$$\ln 2 = k\tau^{1/2} \Rightarrow \boxed{\tau^{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \tau \ln 2}$$

5.6 Lei da Desintegração Radioativa

Métodos de determinação da vida média de um nuclídeo

- Contagem direta ou indireta da taxa de desintegração em função do tempo. Este método só pode ser utilizado em nuclídeos radioativos com tempos de vida médios relativamente curtos (A vs t)
- No caso do nuclídeo radioativo ter um tempo de vida médio muito longo tem de se determinar, para um dado instante, o número de desintegrações por segundo e o número de núcleos radioativos presentes nesse momento na amostra ($A = k N$)

Unidades usadas para a atividade

- Unidade SI: 1 becquerel (Bq) = 1 desintegração/segundo
- Outra unidade muito usada : 1 curie (Ci) = 3.7×10^{10} desintegrações/segundo
(1 curie é igual à atividade de 1 g de rádio)

Detetores de radiação de alta energia

Os equipamentos para detetar as partículas α e β e os fotões γ emitidos nas desintegrações radioativas funcionam com base na ionização provocada pelas partículas ou pela radiação γ . Os mais importantes são os **contadores de Geiger-Muller e os detetores de cintilação**

5.7 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

Designa-se por **radiação ionizante** a que é formada por **fotões e/ou partículas que possuam energia suficiente para ionizar um átomo ou uma molécula**, nomeadamente:

radiação ultravioleta, raios-X e raios γ ;

partículas α e β emitidas durante as desintegrações radioativas.

Nota: A energia necessária para ionizar uma molécula é da ordem de 1-35 eV. Como as partículas α e β e os fotões γ , emitidos durante as desintegrações radioativas, têm energias de vários MeV, uma única destas partículas ou fotão pode ionizar milhares de moléculas, e ter assim um poder destrutivo muito grande sobre os tecidos biológicos.

Por exemplo na interação de uma partícula α com átomos de ar, esta partícula perde, em média, 33 eV por cada ionização. Então, uma partícula α emitida pelo isótopo 226 do rádio com $E_c = 4.8$ MeV produz, antes de parar, mais de 145 000 ionizações!

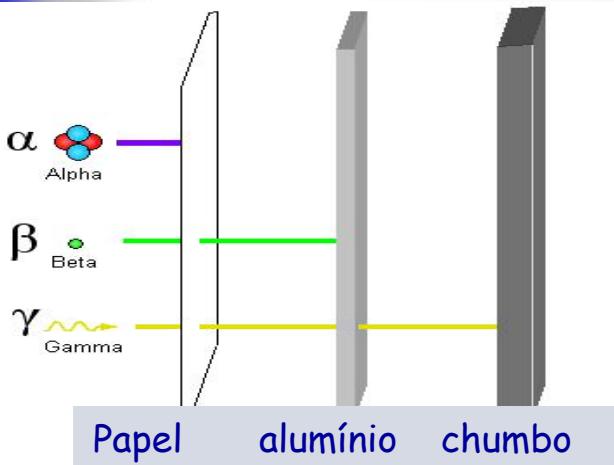
$$\frac{4.8 \times 10^6}{33} > 145000$$

5.7 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

Tipos de Radiações

- **Não-ionizantes**
 - Radiações térmicas
 - Radiações de rádio
 - Radiações de microondas
 - Campos electromagnéticos estáticos
- **Ionizantes**
 - Radiação ultravioleta (UV)
 - Partículas alfa (α)
 - Partículas beta (β)
 - Radiação de neutrões
 - Radiação X
 - Radiação gama (γ)
- A libertação de energia que ocorre quando a **radiação interage com a matéria**, através da ionização ou excitação, é o primeiro passo numa longa sequência de reações secundárias **que podem levar a um efeito biológico mais ou menos gravoso da radiação**.
- Esta interação primária difere quantitativamente e qualitativamente para os vários tipos de radiação e energias de radiação.

5.7 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante



Alcance das radiações: distância que uma partícula percorre antes de parar.

As partículas alfa, devido à sua elevada massa, carga (+2) e relativamente baixa velocidade, são facilmente paradas em poucos centímetros de ar - alcance pequeno.

A radiação β (β^- , β^+) tem um alcance maior do que a radiação α (menor massa).

Alcance das partículas α e β

Energia (MeV)	Alcance (cm)		
Partículas alfa	Ar	Tecido humano	Alumínio
1,0	0,55	$0,33 \times 10^{-2}$	$0,32 \times 10^{-3}$
2,0	1,04	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,61 \times 10^{-3}$
3,0	1,67	$1,00 \times 10^{-2}$	$0,98 \times 10^{-3}$
4,0	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$0,50 \times 10^{-3}$
5,0	3,50	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-3}$
Partículas beta	Ar	Tecido humano	Alumínio
0,01	0,23	$0,27 \times 10^{-3}$	
0,1	12,0	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-3}$
0,5	150	0,18	$5,9 \times 10^{-2}$
1,0	420	0,50	0,15
2,0	840	1,00	0,34
3,0	1 260	1,50	0,56

Os raios γ são os mais penetrantes. Requerem cerca de 1 cm de chumbo ou 6 cm de cimento para reduzirem para metade a sua intensidade .

5.7 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

Atenuação - diminuição da intensidade dos raios X e também dos raios γ quando atravessam um dado material (esta lei aplica-se a todo o tipo de radiação)

Para um dado feixe monoenergético, esse decréscimo pode ser descrito através da expressão exponencial:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

I - intensidade do feixe após atravessar um meio de espessura x ;

I_0 - intensidade inicial do feixe;

μ - coeficiente de absorção.

À espessura de um material absorvente, que reduz para metade a intensidade da radiação incidente, chama-se *camada semi-redutora* e é uma medida da penetabilidade da radiação.

$$\frac{I_0}{2} = I_0 [e^{-\mu x_{1/2}}]; \quad x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}$$

Energia (MeV)	Camada semi-redutora (cm)	
raios-X ou raios γ	Tecido humano	Chumbo
0.01	0.13	4.5×10^{-4}
0.05	3.24	0.8×10^{-2}
0.1	4.15	1.1×10^{-2}
0.5	7.23	0.38
1.0	9.91	0.86
5.0	23.10	1.44

$x_{1/2} = 0,86$ cm para raios-X ou raios γ de 1 Mev, significa que são necessários 0,86 cm de chumbo para reduzir a metade a intensidade do feixe acima referido.

$x_{1/2}$ para o mesmo feixe, no ar é de aproximadamente 25cm e num tecido biológico cerca de 10cm.

5.7 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

Do ponto de vista da proteção dos seres vivos face às radiações ionizantes, o que é mais importante é a determinação da **dose de radiação absorvida pelos tecidos**. Esta dose corresponde à energia cedida à matéria pela radiação ionizante (que se admite que é toda absorvida) por unidade de massa da substância irradiada.

$$D = \text{dose absorvida} = \frac{\text{energia absorvida}}{\text{massa de matéria irradiada}}$$

As dimensões das unidades de dose são J/kg. A unidade de dose do sistema internacional é o Gray,

$$\begin{aligned}\text{Gray (SI)} : 1 \text{ Gy} &= 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rd} \\ \text{rad} : 1 \text{ rd} &= 0.01 \text{ J/kg}\end{aligned}$$

Os efeitos químicos e biológicos que ocorrem num material exposto à radiação dependem, não só da energia absorvida pelo material, mas também do **tipo de radiação incidente** e da distribuição da energia absorvida.

Quando se pretende quantificar o efeito biológico da radiação, define-se a chamada **dose equivalente**, H : $H = D \times Q$ onde Q é o chamado fator de qualidade da radiação (adimensional)

5.7 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

O fator de qualidade, Q, leva em conta que a radiação que produz maior número de ionizações num tecido, por unidade de comprimento, causa maior dano biológico.

Tipo de radiação	Fator de qualidade (Q)
Raios X, raios gama e eletrões	1
Neutrões e protões	10
partículas alfa e de carga superior a 1	20

A unidade de dose equivalente, no Sistema Internacional (SI) é o **Sievert** (Sv).

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot Q \quad (\text{J/kg})$$

(apesar do nome da unidade ser diferente as dimensões do Sv e do Gy são as mesmas)

Tabela com os limites máximos permissíveis (LMP) recomendados pela ICRP *

Doses	Público em geral	Trabalhadores expostos
	cristalino	15 mSv/ano
Dose equivalente anual	pele	50 mSv/ano
	mãos e pés	50 mSv/ano

* Comissão Internacional para a Protecção Radiológica

5.7 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

Todas as pessoas, e obviamente todos os seres vivos, estão continuamente expostas a **radiação ionizante proveniente de fontes naturais**, tais como:

raios cósmicos - partículas de elevada energia que têm origem fora do sistema solar
materiais radioativos existentes naturalmente na natureza

núcleos radioativos, principalmente o carbono $^{14}_6\text{C}$ e o potássio $^{40}_{19}\text{K}$ existentes no nosso corpo.

Para além da radiação natural, estamos também sujeitos a uma quantidade significativa de **radiação ionizante produzida artificialmente**, nomeadamente **raios-X** provenientes de meios de diagnóstico médico, como por exemplo as radiografias e **radiação γ** usada nos tratamentos de radioterapia contra o cancro.

Os **efeitos da radiação ionizante nos seres humanos**, de acordo com o intervalo de tempo entre a absorção da radiação e o aparecimento dos efeitos fisiológicos, podem-se classificar em **agudos ou latentes**.

Efeitos agudos - aparecem ao fim de alguns minutos, dias ou semanas;

Efeitos latentes - aparecem ao fim de alguns anos, décadas ou mesmo gerações.

5.8 Reações Nucleares

Reações nucleares são processos nucleares que se podem provocar **bombardeando** núcleos (alvo) com um feixe de partículas pesadas (projéteis) ou com fotões.

Os **projéteis** podem ser:

- neutrões (${}_0^1n$);
- protões (${}_1^1H$ ou p);
- deuterões (${}_1^2H$ ou d);
- tritões (${}_1^3H$ ou t);
- partículas α (núcleos de ${}_2^4He$);
- núcleos leves, médios e pesados.

As **reações nucleares** podem-se representar por expressões parecidas com as equações químicas: **alvo + projétil = núcleo residual + partícula emitida**



Um projétil aproxima-se de um dos núcleos do alvo e **interatua com os seus nucleões**. Como resultado da reação, são emitidas uma ou mais partículas, resultando um núcleo residual normalmente diferente do núcleo alvo. Muitas vezes o núcleo residual é deixado num estado excitado, Y^* , decaindo depois para o estado fundamental, Y , por emissão de radiação γ .

5.8 Reacções Nucleares

Tipo de reacção nuclear

Reacção (p,α)

Reacção (α,p)

Reacção (d,p)

Reacção (d,n)

Reacção (d,α)

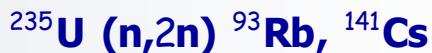
Captura radioativa de protões

Captura radioativa de neutrões

Fotodesintegração

Cisão ou fissão induzida

Representação simbólica



Como se vê, bombardear ^{39}K com deuterões pode dar origem a diversos resultados. Em princípio ocorrem todas as reacções nucleares energeticamente possíveis. As que se dão com maior probabilidade diz-se que têm maior **secção eficaz**.

5.8.1 Reações nucleares de cisão

Este tipo de reações nucleares, descoberto em 1939, consiste na **cisão de um núcleo pesado em dois núcleos mais leves**, chamados **fragmentos**. É sempre acompanhada de emissão de neutrões.

O processo de fissão nuclear pode ser provocado por:

- **absorção**, por parte do núcleo pesado, **de um neutrão** de energia cinética tal que o núcleo ganhe uma energia de excitação da ordem de alguns MeV (≥ 5 MeV);
- **absorção de radiação γ** ;
- **bombardeamento com um feixe de protões**.

As reações de cisão nuclear são muito importantes porque:

- **O núcleo ao cindir-se liberta energia Q da ordem de 200 MeV**, valor muito elevado quando comparado com a energia libertada nos processos de desintegração α (5 a 10 MeV) ou num processo de combustão (≈ 4 eV !!!).
- **Como o processo de cisão ocorre sempre com libertação de neutrões** pode, em certas condições, originar uma **reação de cisão em cadeia**, isto é um dos neutrões emitidos pode desencadear a cisão de outro núcleo original e por aí adiante...

5.8.1 Reações nucleares de cisão

O nuclídeo $^{235}_{92}\text{U}_{143}$, isótopo existente no urânio natural, se for bombardeado por neutrões, tem uma grande probabilidade de sofrer reações de cisão, que são sempre acompanhadas da emissão de 2 ou 3 neutrões e da libertação de grandes quantidades de energia.

O $^{235}_{92}\text{U}_{143}$ pode-se cindir de modo a dar diferentes fragmentos:

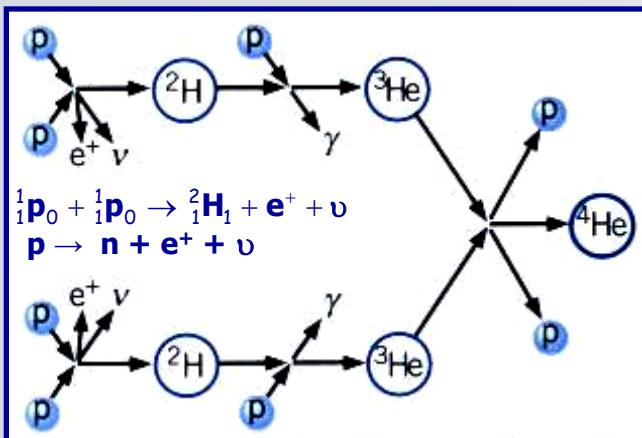


Os fragmentos formados aquando da cisão nuclear do $^{235}_{92}\text{U}_{143}$ são radioativos, e vão desintegrar-se espontaneamente por emissão β^- até atingirem núcleos estáveis.

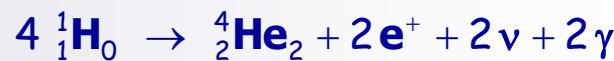
5.8.2 Reações nucleares de fusão

A **fusão nuclear** é um tipo de reação nuclear em que ocorre a **combinação de núcleos de elementos leves originando núcleos de maior número de massa**, acompanhada da libertação de grandes quantidades de energia.

A maior quantidade de energia que recebemos na Terra é proveniente do Sol e a fonte primordial de produção de energia no sol é o processo de **fusão de núcleos de hidrogénio** (protões) **originando núcleos de hélio**, de acordo com o seguinte esquema:



Globalmente este processo pode-se escrever como



e então, calculando Q, obtém-se

$$\begin{aligned}Q &= (m_i - m_f)c^2 \\&= (4 \times 1.007825 \text{ u} - 4.002603 \text{ u}) (931.5 \text{ MeV/u}) \\&= 26.7 \text{ MeV}\end{aligned}$$

(na primeira reacção dá-se a conversão de um protão num neutrão)

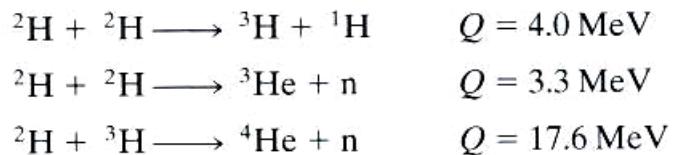
5.8.2 Reações nucleares de fusão

A energia libertada nas reações de fusão nuclear é chamada de **energia termonuclear** devido ao facto de ser produzida sempre em condições de **elevada pressão** e de **elevada temperatura**.

Estes processos de produção de **energia termonuclear** que acabámos de referir são **processos naturais e espontâneos**.

Atualmente estão em estudo vários processos de **fusão nuclear artificial**, visando a obtenção de **energia termonuclear em condições controladas** que se possa utilizar, por exemplo, na produção de energia elétrica.

De entre os processos de **fusão nuclear artificial** em estudo destacam-se os seguintes



Estes processos de fusão nuclear artificial utilizam como **matéria prima o deutério** que existe com o teor de 0.015 % nos oceanos e mares.

As condições exigidas (elevadas pressões e elevadas temperaturas) para que as reações de fusão nuclear tenham lugar levantam dificuldades de ordem tecnológica que ainda não se encontram totalmente resolvidas.