

Física para Ciências Biológicas

Ignez Caracelli

Capítulo 9

Física da Radiação

1. INTRODUÇÃO
2. RADIAÇÃO NA NATUREZA
3. TIPOS DE RADIAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS
4. DECAIMENTO α
5. DECAIMENTO β
6. EMISSÃO DE PRÓTON E DE NÊUTRON
7. RAIOS X E RAIOS GAMA
8. POR QUE UM ÁTOMO É RADIOATIVO?
9. LEIS DE DECAIMENTO RADIOATIVO
10. UNIDADES DE RADIAÇÃO
11. LIMITES MÁXIMOS PERMISSÍVEIS (LMP)
12. EFEITOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO SOBRE A MATÉRIA
13. APLICAÇÕES GERAIS DAS RADIAÇÕES
14. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES EM MÉTODOS RADIOQUÍMICOS
15. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES EM DATAÇÃO
16. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES EM BIOLOGIA

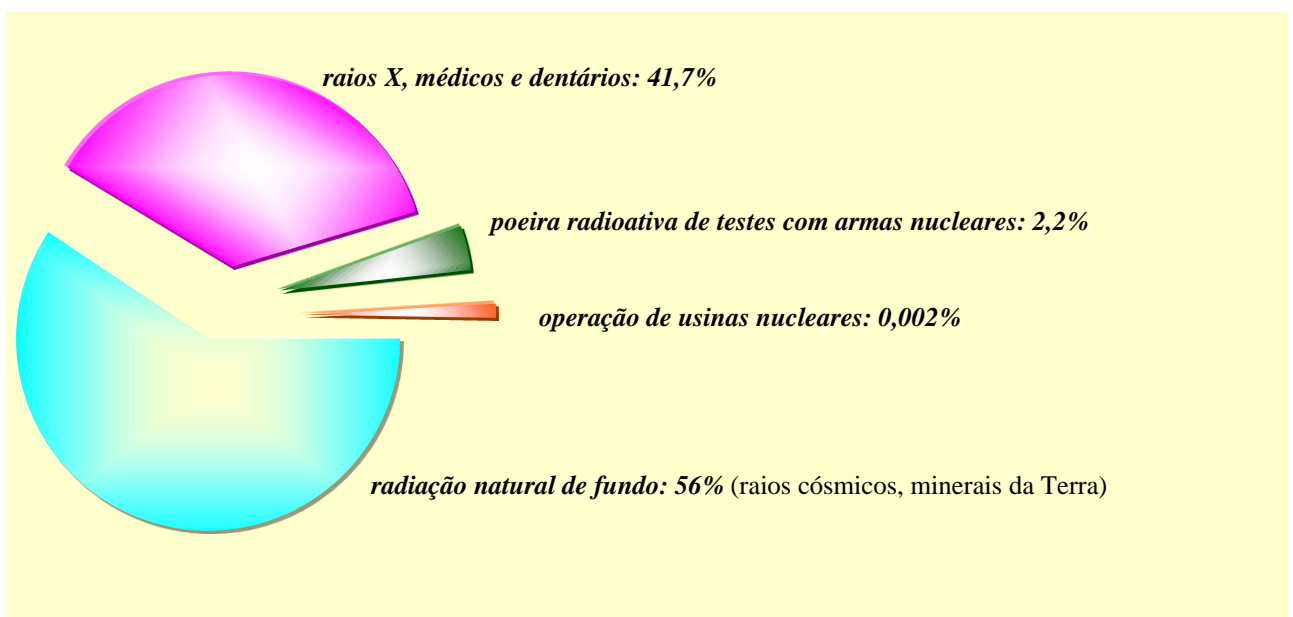
1. INTRODUÇÃO

Veremos neste capítulo o que é radiação e suas características, medidas da radiação, princípios de proteção radiológica, e uma série de aplicações em vários campos da vida.

2. RADIAÇÃO NA NATUREZA

Nosso planeta e tudo que ele contém está exposto à radiação cósmica (partículas com grande energia provenientes do espaço) e à radiação proveniente de elementos naturais radioativos existentes na crosta terrestre, como potássio, cério, etc. A intensidade dessa radiação tem permanecido constante por milhares de anos. Essa radiação se chama de **radiação natural** ou **radiação de fundo** (background), e constitui cerca de 56% da radiação a que estamos submetidos, sendo que cerca de 30 a 40% dessa radiação se deve a raios cósmicos. O restante se deve aos alimentos que contêm elementos radioativos como potássio-40, carbono-14, urânio, tório, etc., aos elementos radioativos que presentes no solo, em materiais de construção. Assim, a radiação de fundo pode variar de um local para outro. As outras parcelas de radiação se devem a fontes não-naturais (raios X provenientes de usos médicos, industriais, poeiras radioativas provenientes de usinas de carvão ou nucleares, aparelhos de televisão, etc.).

Também o local que está ao nível do mar apresenta um nível de radiação menor do que um com mesmas características mas em altitudes maiores (2000, 3000 m acima do nível do mar). Ao nível do mar, a camada protetora da atmosfera reduz a intensidade dos raios cósmicos, e a grandes altitudes,



é maior (a cerca de 3000 m, a intensidade é da ordem de 20% maior). Uma viagem de avião de cerca de

10000 km nos expõe a tanta radiação quanto a que recebemos de uma radiografia do tórax. Essa é uma das razões, que limita o tempo que os funcionários de uma linha aérea podem permanecer no ar.

O próprio corpo humano é uma fonte radioativa natural, principalmente devido ao potássio que ingerimos. Nossos corpos contêm cerca de 200 gramas de potássio, e cerca de 20 miligramas é do isótopo potássio-40. Durante cada batimento cardíaco, cerca de 5000 átomos de potássio-40 sofrem decaimento radioativo espontâneo. A isso, pode-se acrescentar cerca de 3000 partículas β emitidas por segundo pelo carbono-14 que existe no nosso corpo. Nós e todas as criaturas vivas apresentamos algum grau de radioatividade.

O valor médio da radiação de fundo em lugares habitados é de 1,25 mSv/ano. Para altitudes de cerca de 3000 m, essa média é cerca de 20% maior. Mas, há locais que se apresentam com médias bem superiores e têm sido alvo de investigação, como a cidade de Guarapari (ES), e o Morro do Ferro, em Poços de Caldas (MG) onde a média é maior que 3 mSv/ano. Em Guarapari, atribui-se esse valor acima da média à presença das areias monazíticas (que contêm urânio, tório, etc...) e no outro caso, à presença de minas de tório e de urânio.

3. TIPOS DE RADIAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS

Radiação Eletromagnética

Quando tratamos com física das radiações, as principais radiações eletromagnéticas consideradas e suas muitas aplicações, são os raios X e os raios γ (radiação gama).

Os raios X e os raios γ têm exatamente as mesmas características em relação à sua interação com a matéria, embora difiram quanto à sua origem; enquanto os raios X são produzidos por processos extranucleares, os raios γ são produzidos por processos nucleares.

No capítulo anterior vimos que a luz pode ser considerada como uma onda. Muitos fenômenos, tais como reflexão, refração, difração, interferência, podem ser explicados considerando-se a luz como uma onda, constituída de campos elétricos e magnéticos oscilantes que viaja, no vácuo, com a velocidade da luz $v = c$, ou seja, podemos dizer que **a luz é uma onda eletromagnética**.

Nesse caso, a velocidade de propagação da onda $v = \lambda f$, onde λ é o comprimento de onda da radiação e f sua frequência.

Outros fenômenos, porém, não podem ser explicados se olharmos para esse aspecto da luz. Assim, foi necessário evidenciar o outro aspecto de partícula : **a luz sendo constituída de pacotes de energia** (o fóton). Focalizando a atenção nesse aspecto da luz, o caráter de partícula, foi possível explicar o efeito fotoelétrico, o efeito Compton, o espectro de raios do hidrogênio, entre outros fenômenos.

Nesse caso, a energia é dada por $E = hf$, sendo f a frequência e h a constante de Planck, $h = 6,625 \times 10^{-34}$ J.s.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

*energia do fóton
da radiação eletromagnética X e γ*

Radiação Corpuscular

Entre os processos de radiação corpuscular encontramos o decaimento α , o decaimento β , a emissão de prótons e nêutrons. Chamamos de **núcleo-pai** (NP) o núcleo do átomo em seu estado inicial e de **núcleo-filho** (NF) o átomo após sua transmutação.

Para as partículas de massa m , como elétrons, prótons, partículas α , neutrons, deuterons, mésons π , a energia cinética é dada por

$$E = K = \frac{1}{2}mv^2$$

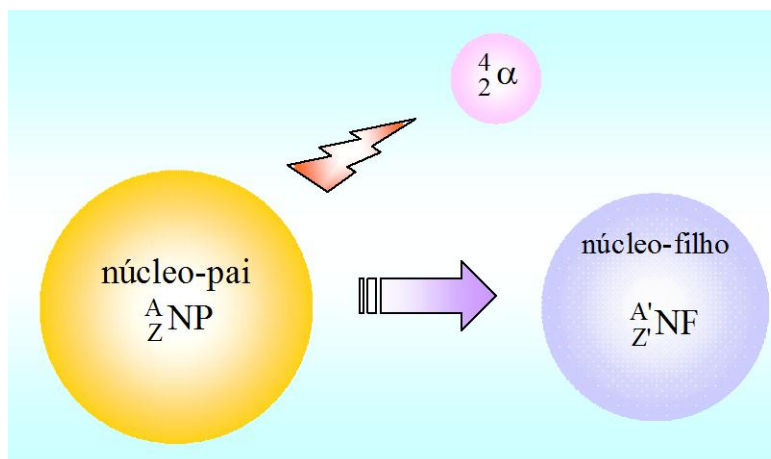
energia da partícula de massa m

Entre os mais importantes tipos de radiação decorrentes do decaimento radioativo, com aplicações no campo de física das radiações, encontramos: partículas α , partículas β , fótons de raios γ e fótons de raios X.

4. DECAIMENTO α

O decaimento alfa é um processo radioativo comum encontrado nos isótopos mais pesados. Os isótopos com números de massa menores que cerca de 150 ($Z < 60$) raramente emitem partículas α . A partícula α é um núcleo de hélio que tem massa igual a 4 e carga +2.

Quando um núcleo-pai (NP) ejeta uma partícula α , o número atômico (Z) do átomo decresce de 2 unidades e o número de massa (A) decresce de 4 unidades.

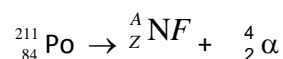


$$A_{\text{NP}} = A'_{\text{NF}} + 4$$

$$Z_{\text{NP}} = Z'_{\text{NF}} + 2$$

Exemplo:

Para identificar o núcleo-filho produzido através do decaimento α do polônio-211, escrevemos a equação nuclear para a reação:



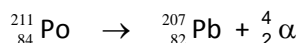
Devemos ter:

$$A_{NP} = A'_{NF} + 4 \quad e \quad Z_{NP} = Z'_{NF} + 2$$

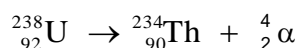
Portanto:

$$A'_{NF} = A_{NP} - 4 = 211 - 4 = 207 \quad e \quad Z'_{NF} = Z_{NP} - 2 = 84 - 2 = 82.$$

Ao consultarmos uma tabela periódica, verificamos que o elemento com $Z = 82$ é o chumbo, Pb, então o núcleo-filho produzido é o chumbo-207; a equação nuclear para o **decaimento α** é portanto:



Exemplo:



Aqui, o urânio-238 (${}^{238}\text{U}$) é convertido em tório-234 (${}^{234}\text{Th}$), um núcleo-filho que tem número atômico duas unidades menor que a do núcleo-pai.

As partículas α de um processo de decaimento particular ou são monoenergéticas ou estão distribuídas entre umas poucas energias discretas. O primeiro, que envolve 77% dos decaimentos, produz uma partícula alfa com uma energia de 4,196 MeV. O segundo caminho (23% dos decaimentos) produz uma partícula alfa que tem uma energia de 4,149 MeV; esta reação é acompanhada da liberação de raios gama de 0,047 MeV.

As partículas α perdem progressivamente sua energia como resultado das colisões com a matéria, e finalmente se convertem em átomos de hélio pela captura de dois elétrons de suas vizinhanças.

Sua massa e carga relativamente grandes tornam as partículas α altamente efetivas na produção de pares de íons quando interagem com a matéria que atravessam; esta propriedade torna a sua detecção e medida, fáceis. Pela sua alta massa e carga, as partículas α têm um baixo poder de penetração na matéria. A identidade de um isótopo que é um emissor de partículas alfa pode geralmente ser estabelecida pela medida do comprimento (ou alcance) sobre o qual as partículas alfa emitidas produzem pares de íons em um meio particular (geralmente o ar).

Alcance da partícula α

energia (MeV)	alcance (cm)		
	ar	tecido humano	alumínio
1	0,55	$0,33 \times 10^{-2}$	$0,32 \times 10^{-3}$
2	1,04	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,61 \times 10^{-3}$
3	1,64	$1,00 \times 10^{-2}$	$0,98 \times 10^{-3}$
4	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-3}$
5	3,50	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-3}$

Pelo seu baixo poder de penetração, as partículas α são relativamente ineficientes para produção de isótopos artificiais.

5. DECAIMENTO β

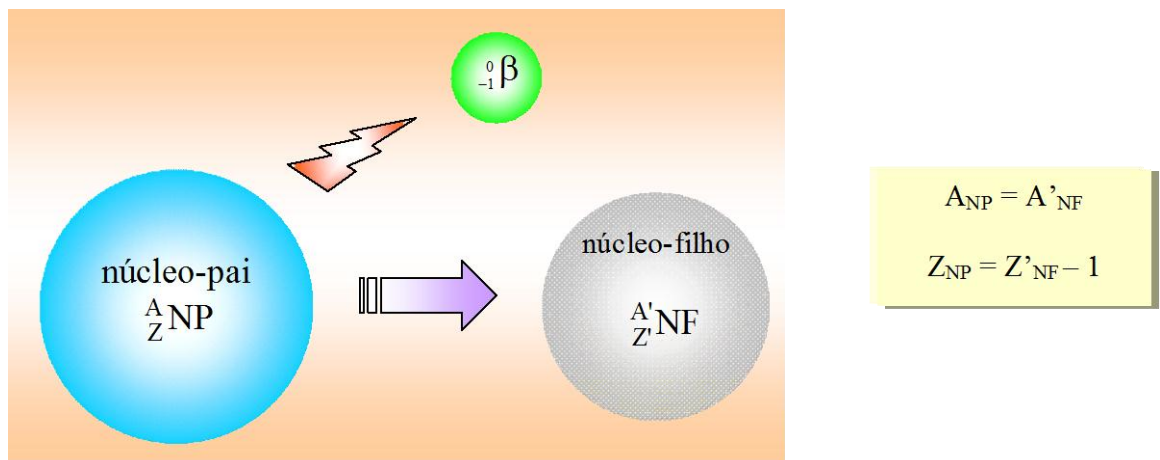
Qualquer reação nuclear na qual o número atômico Z varia mas o número de massa A não, é classificado como um decaimento β . São encontrados três tipos de decaimento β : *emissão de elétrons* (β^-), *emissão de pósitrons* (β^+) e *captura de elétrons*.

Dois tipos de partículas β são criados pelo decaimento radioativo. As partículas β^- , são elétrons negativos; as partículas β^+ são pósitrons, os quais têm uma existência transitória, possuem a massa de um elétron mas apresentam carga positiva.

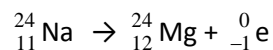
Emissão de elétrons β^-

Quando um núcleo-pai ejeta uma partícula β^- , o número atômico do núcleo-filho aumenta de uma unidade e o número de massa permanece o mesmo.

Como o núcleo-filho fica com um próton adicional, seu número atômico é acrescido de uma unidade a mais que o núcleo-pai. O número de massa não se modifica, porque o número total de núcleons no núcleo não é modificado.



Por exemplo, quando o sódio-24 sofre um decaimento β^- , o núcleo-filho é um átomo de um elemento com número atômico 12 (magnésio), mas com o mesmo número de massa do núcleo-pai:



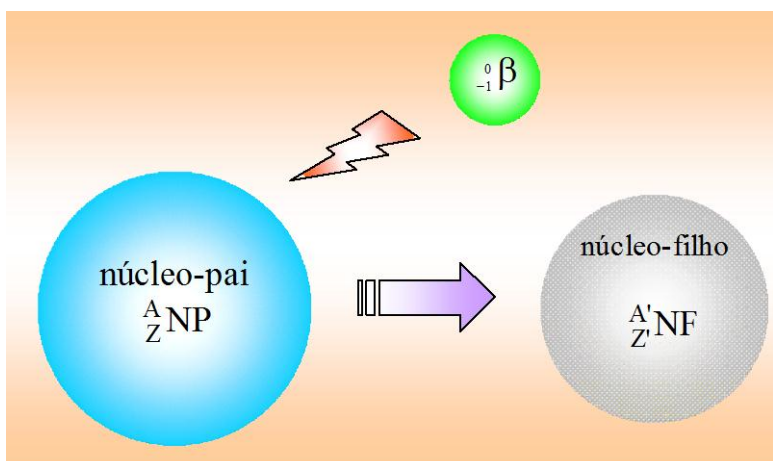
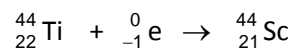
Em contraste com a emissão alfa, a emissão beta é caracterizada pela produção de partículas com um espectro contínuo de energia em um intervalo que vai de quase zero a um máximo que é característico para cada processo de decaimento. A partícula beta não é tão efetiva quanto a partícula alfa na produção de pares iônicos por causa de sua massa pequena (cerca de 1/7000 daquela de uma partícula alfa); ao mesmo tempo, seu poder de penetração é substancialmente maior. As energias β ,

em geral, são expressas em termos da espessura de um absorvedor, normalmente alumínio, necessário para deter a partícula, ou seja, da mesma forma que com as partículas α , falamos em alcance.

energia (MeV)	alcance (cm)		
	ar	tecido humano	alumínio
0,01	0,55	$0,33 \times 10^{-2}$	$0,32 \times 10^{-3}$
0,1	1,04	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,61 \times 10^{-3}$
0,5	1,64	$1,00 \times 10^{-2}$	$0,98 \times 10^{-3}$
1,0	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-3}$
2,0	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-3}$
3,0	3,50	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-3}$

Captura eletrônica

No processo de captura eletrônica, um núcleo-pai captura um elétron da vizinhança. Como resultado, o número atômico decresce de uma unidade mas o número de massa permanece o mesmo. Um exemplo é a reação nuclear seguinte:

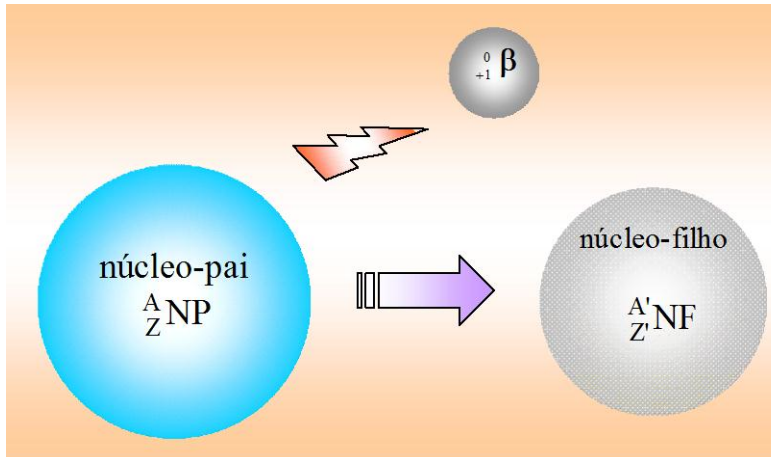


$$A_{NP} = A'_{NF}$$

$$Z_{NP} - 1 = Z'_{NF}$$

Emissão de pósitron β^+

Na emissão de pósitron (β^+), o núcleo-pai, ejeta um pósitron. Como resultado, o número atômico decresce de uma unidade mas o número de massa permanece o mesmo. Um pósitron é representado por ${}^0_{+1}e$ ou, de uma forma mais simplificada, β^+ ; possui a mesma massa do elétron mas possui uma carga positiva.



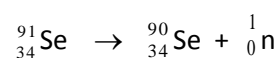
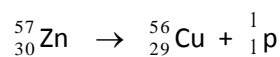
$$A_{NP} = A'_{NF}$$

$$Z_{NP} = Z'_{NF} + 1$$



6. EMISSÃO DE PRÓTON E DE NÊUTRON

Estes dois processos são menos comuns e tendem a ocorrer somente em casos especiais. A perda de um próton decresce de uma unidade ambos, massa e número atômico. A perda de um nêutron decresce somente o número de massa de uma unidade:



7. RAIOS X E RAIOS GAMA

Emissão de Raios γ - Um processo nuclear

Muitos processos de emissão α e β deixam um núcleo em um estado excitado, o qual retorna então ao estado fundamental em um ou mais passos quantizados com a liberação de raios γ monoenergéticos. É importante notar que os raios gama, exceto pela sua fonte, são indistinguíveis dos raios X de igual energia. Assim, os raios γ são produzidos por processos de relaxação nuclear, enquanto que os raios X aparecem dos processos de relaxação eletrônica. O espectro de emissão de raios gama é característico de cada núcleo, o que pode ser útil na identificação de radioisótopos. Por

exemplo, o átomo de ^{60}Co , apresenta emissões com duas energias características: 1,17 e 1,33 MeV, e o ^{137}Cs , com uma energia de 0,66 MeV.

Emissão de Raios X - Um processo extranuclear

Muitos processos resultam na perda de elétrons mais internos de um átomo. Os raios X são então formados a partir de transições *eletrônicas* nas quais os elétrons mais externos preenchem as vacâncias criadas pelo processo nuclear. Os raios X são emitidos quando se desaceleram (ou aceleram) elétrons em uma colisão com um alvo metálico (por exemplo, cobre, molibdênio, cromo), num tubo de raios X. O espectro de raios X é constituído de raios nítidas, característico do material do tubo e varia de elemento para elemento (por exemplo, $\lambda_{\text{Mo}} = 0,7107 \text{ \AA}$ e $\lambda_{\text{Cu}} = 1,542 \text{ \AA}$), que constituem o espectro característico, superpostas ao espectro contínuo da radiação de frenamento (*bremstrahlung*) — radiação provocada pela desaceleração dos elétrons bombardeantes quando incidem contra um alvo.

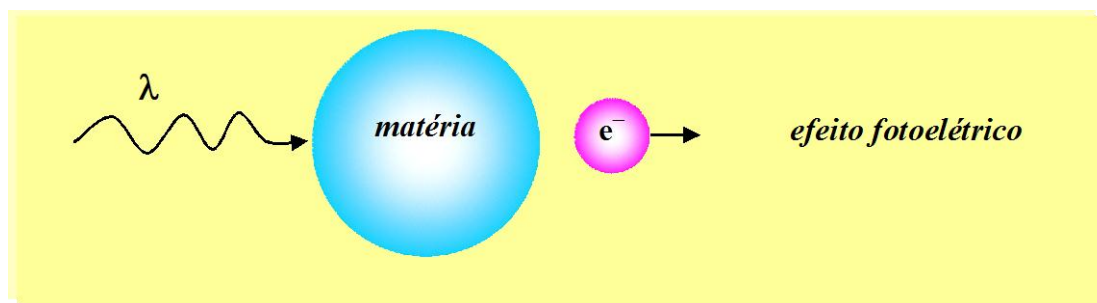
Características dos Raios X e Raios γ

As radiações X ou γ são altamente penetrantes e são chamadas de **radiação ionizante**. Após sua interação com a matéria, perdem energia por três mecanismos; a energia do fóton da radiação ionizante, determina o processo predominante.

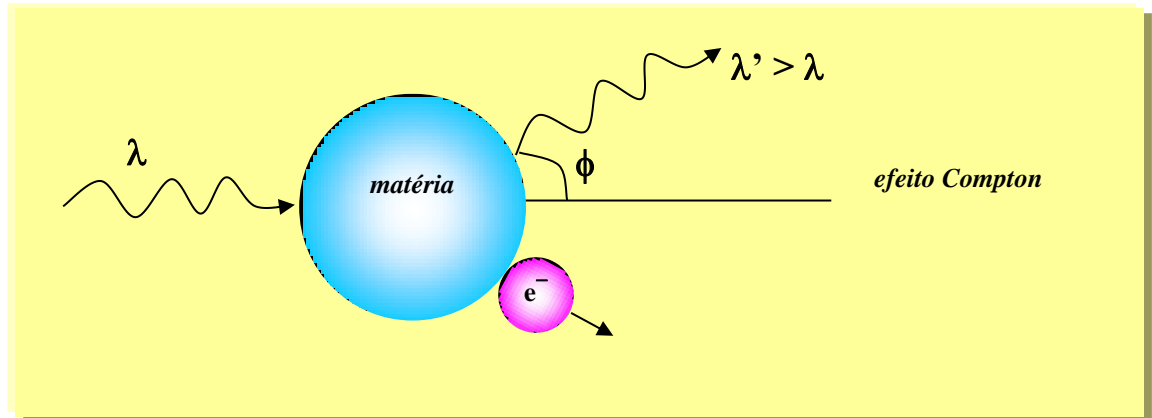
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

*energia do fóton
da radiação ionizante*

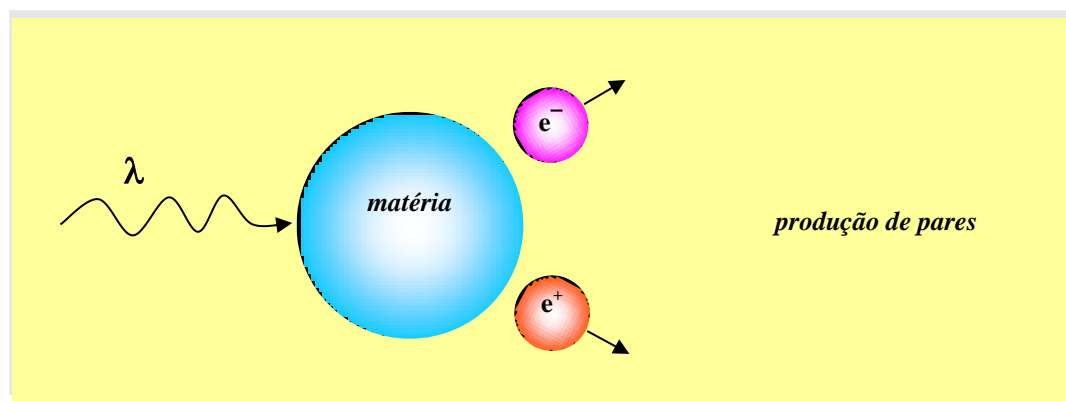
No caso de radiação ionizante de baixa energia, predomina o *efeito fotoelétrico*. Neste caso, o fóton da radiação ionizante desaparece após a ejeção de um elétron de um orbital atômico (usualmente um orbital K) do átomo-alvo. A energia do fóton é totalmente perdida, em parte para vencer a energia de ligação do elétron e outra parte transferida ao elétron ejetado na forma de energia cinética.



Para radiação ionizante relativamente energética, ocorre o *efeito Compton*. Neste caso, um elétron é também ejetado de um átomo, mas adquire somente uma parte da energia do fóton. O fóton, agora com energia diminuída, recua, afastando-se do elétron e segue para outras interações Compton ou fotoelétricas.



Se o fóton da radiação ionizante possui energia suficientemente alta (pelo menos 1,02 MeV), pode ocorrer o processo de *produção de pares*. Neste processo, o fóton é totalmente absorvido na criação de um pósitron (β^+) e um elétron (β^-) nas vizinhanças do núcleo.



Para um feixe monoenergético de raios X ou γ , a intensidade do feixe decai quando atravessa certos meios. Esse decaimento apresenta uma forma exponencial que pode ser descrito como:

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

onde I_0 é a intensidade inicial do feixe, I , a intensidade do feixe após ter atravessado um meio de espessura x , e μ , é o coeficiente de atenuação linear do meio, e depende do meio e da radiação. A espessura de um absorvedor, que reduz à metade a intensidade da radiação incidente é chamada de **camada semi-redutora**.

A camada semi-redutora $X_{1/2}$ é dada por

$$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu}$$

Um fóton de radiação X ou γ pode perder quase todas a energia em uma única interação, w a distância que ele percorre antes de interagir não pode ser prevista. Tudo que se pode prever é a distância em que ele tem 50% de chance de interagir (a camada semi-redutora). A tabela que segue fornece as camadas semi-redutoras para o tecido humano e chumbo. A blindagem a esse tipo de radiação pode ser feita como chumbo, concreto, aço ou terra.

Camada semi-redutora para raios X ou γ

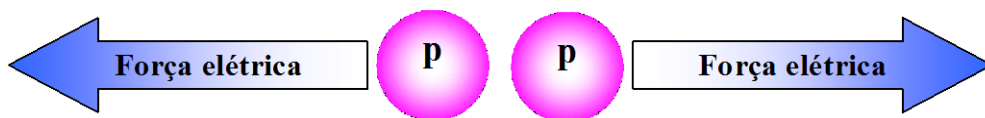
energia (MeV)	camada semi-redutora (cm)	
	tecido humano	chumbo
0,01	0,13	$4,5 \times 10^{-4}$
0,05	3,24	$0,8 \times 10^{-2}$
0,1	4,15	$1,1 \times 10^{-2}$
0,5	7,23	0,38
1,0	9,91	0,86
5,0	23,10	1,44

Um resumo do que foi discutido até o momento, está apresentado na tabela abaixo, onde aparecem as principais radiações com aplicações no campo de física das radiações. Na coluna onde aparece partícula, apresentam-se as diversas representações encontradas para uma dada partícula.

RADIÇÃO NUCLEAR			
Tipo	Velocidade	Partícula	Exemplo
α	0,1 c	núcleo de hélio-4 ${}^4_2\text{He}^{2+}$, ${}^4_2\alpha$, α	${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\alpha$
β^-	< 0,9 c	elétron, ${}^0_{-1}e$, β^- , β	${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^0_{-1}e$
β^+	< 0,9 c	pósitron, ${}^0_{+1}e$, β^+	${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^0_{+1}e$
p	0,1 c	próton, ${}^1_1\text{H}^+$, 1_1p , p	${}^{53}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{52}_{26}\text{Fe} + {}^1_1p$
n	< 0,1 c	nêutron, 1_0n , n	${}^{137}_{53}\text{I} \rightarrow {}^{136}_{53}\text{I} + {}^1_0n$
γ	c	fóton (onda eletromagnética)	${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$
RADIÇÃO EXTRANUCLEAR			
Tipo	Velocidade	Exemplo	
X	c	fóton (onda eletromagnética)	desaceleração contra um alvo de molibdênio ou cobre

8. POR QUE UM ÁTOMO É RADIOATIVO?

Com uma exceção, todos os núcleos dos átomos são constituídos de prótons e nêutrons; a exceção, é claro, é o núcleo de hidrogênio que consiste de um único próton. No núcleo dos outros átomos encontramos os prótons, que são carregados positivamente. As forças devido às suas cargas, são repulsivas. *Por que eles não se afastam?*



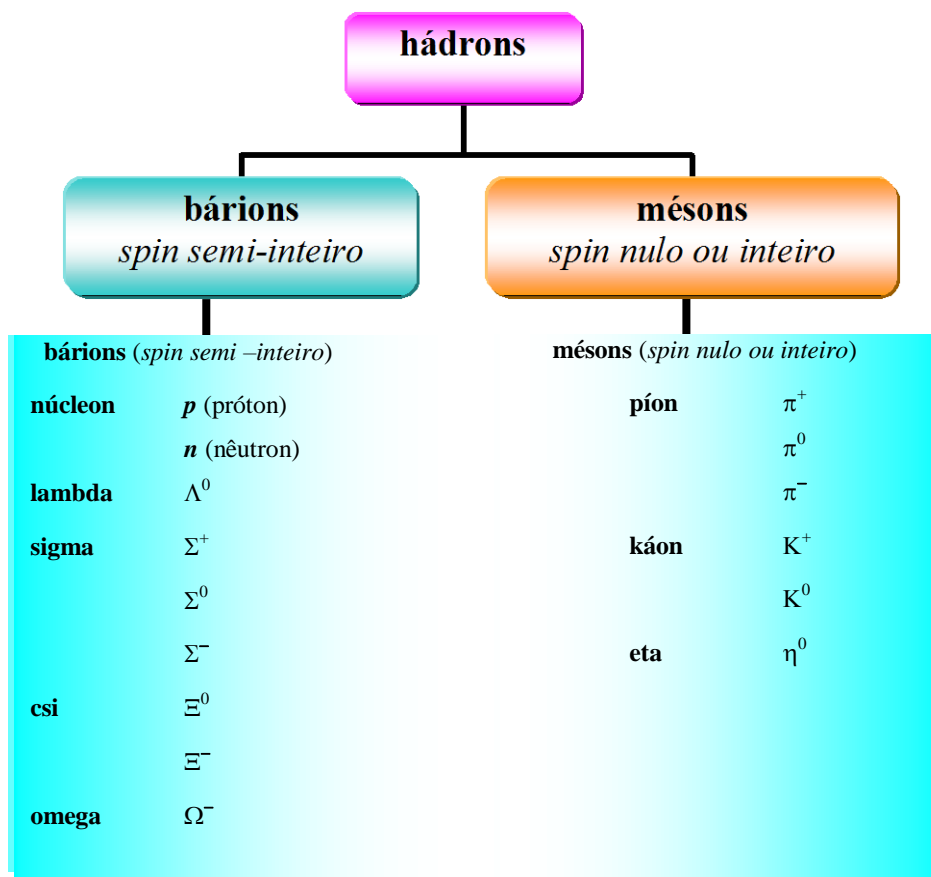
Se eles não se afastam, devido às suas cargas iguais e positivas, então deve haver uma outra força que os mantêm juntos. *Que força é essa?* Essa força é uma força nuclear forte, chamada de interação hadrônica. É uma força de curto alcance. Podemos reduzir todos os tipos de forças a apenas quatro tipos fundamentais:

- a) as interações gravitacionais
- b) as interações eletromagnéticas, entre as quais encontramos as forças elétricas,

- c) as interações fracas,
- d) as interações fortes, responsáveis pelas forças nucleares.

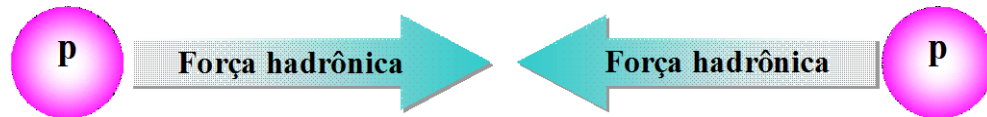
Os prótons e nêutrons em um átomo estão localizados dentro de uma região de cerca de 10^{-15} m. A força de repulsão coulombiana entre prótons a distâncias tão pequenas é muito grande; apesar disso, temos núcleos que são estáveis, e sabemos que para fragmentá-los é necessário bombardeá-los com partículas de energias elevadas. Portanto as interações fortes devem ser de intensidades ainda maiores que as interações eletromagnéticas, porém devem ser de curto alcance.

As partículas cujas interações são fortes são os **hádrons**. Há duas espécies de hádrons: os **bárions** (com spin semi-inteiro) e os **mésons** (com spin nulo ou inteiro).



Os elétrons são classificados como *léptons* e sofrem interações fracas. Os léptons parecem ser partículas elementares, enquanto que os hádrons são partículas complexas: são constituídos por *quarks*. Os hádrons sofrem uma interação forte resultante da interação entre os quarks que os constituem. Há três tipos de quarks: up, down e strange (representados respectivamente por **u**, **d** e **s**). Um próton é constituído de três quarks: **u,u,d**; um nêutron é constituído de três quarks: **u,d,d**.

Quando os prótons estão muito próximos a interação atrativa hadrônica forte supera a força repulsiva elétrica.



As interações entre os prótons são fortes quando estes estão afastados .

Consideremos agora, um átomo de **número atômico** Z , onde Z é o número de prótons contidos em seu núcleo e de **número de massa** A , onde A é soma do número de nêutrons e prótons em um núcleo.

Quando temos $Z < 20$, temos um átomo com mesmo número de prótons e nêutrons. Quando $20 < Z < 82$, o número de prótons e de nêutrons já não é mais o mesmo. Há uma tendência no aumento do número de nêutrons; isto permite aumentar a estabilidade do átomo.

Em um átomo pequeno a força elétrica é superada pela interação forte, mas à medida que o átomo cresce, se, por exemplo, tomamos dois prótons que ocupam posições diametralmente opostas, a tendência é de que a importância da repulsão elétrica aumente. Quanto maior Z , mais instável fica o átomo. Todos os átomos com $Z > 82$ são instáveis, e para alcançarem a estabilidade, se desintegram, emitindo partículas α , β , γ , ... Um átomo se desintegra até tornar-se estável.

Os **isótopos** dos elementos são átomos que tem *mesmo o número atômico* mas *diferente número de massa*. Isto é, o núcleo dos isótopos de um elemento contém o mesmo número de prótons mas diferente número de nêutrons.

Isótopos estáveis são aqueles para os quais nunca foi observado decaimento espontâneo. Os **isótopos instáveis** são radioativos (radionuclídeos ou *radioisótopos*), em contraste, sofrem desintegração espontânea, até tornarem-se isótopos estáveis. A desintegração ou decaimento radioativo de isótopos ocorre com a emissão de radiação eletromagnética na forma de raios X ou raios gama (raios γ); com a formação de elétrons (β^-), pósitrons (β^+), e núcleos de hélio (α); ou por fissão na qual um núcleo se quebra em núcleos menores.

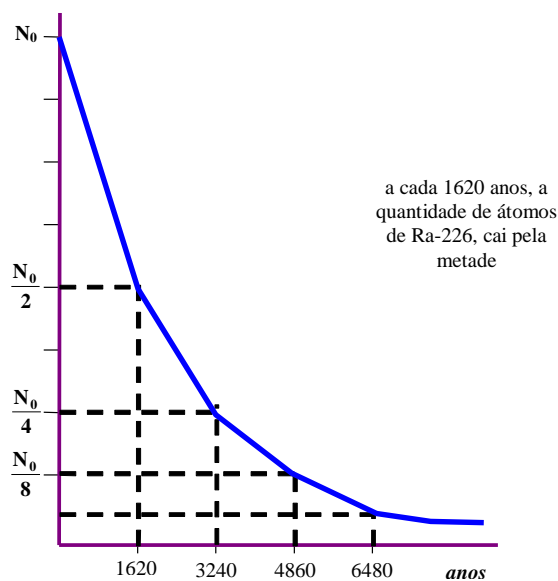
Por exemplo, para o carbono, são estáveis os isótopos ^{12}C , ^{13}C , e instáveis, ou radioisótopos ^{11}C , ^{14}C , ^{15}C .

Para os elementos de 1 a 92, os radioisótopos encontrados são naturais, enquanto que os com $Z > 92$, são radioisótopos artificiais.

9. LEIS DE DECAIMENTO RADIOATIVO

A taxa de decaimento radioativo (ou velocidade de decaimento) é medida em termos de um tempo característico, a meia-vida. **Meia-vida** ($T_{1/2}$) é o tempo transcorrido para que a quantidade de um dado radioisótopo decaia à metade. O rádio-226, por exemplo, tem meia-vida igual a $T_{1/2} = 1620$ anos. Ou seja, a cada 1620 anos a quantidade de Ra-226 decai pela metade. A partir da contagem estatística do decaimento, pode-se construir uma curva como a que esta apresentada na figura que segue.

Alguns elementos apresentam meias-vidas muito curtas (10^{-6} segundos) e outras, muito longas (milhões de anos). Elementos como o ^{131}I , usado em exame de funcionamento da tireóide apresenta meia-vida de 8 dias; o ^{14}C , usado no estudo do metabolismo de proteínas, açúcares e gorduras, tem meia vida de 5760 anos.



A maneira de representar matematicamente a curva mostrada na figura é

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

onde N_0 é o número de átomos inicialmente presentes, N é o número de átomos que ainda não desintegraram após um tempo t , λ é a constante de desintegração por unidade de tempo. Cada isótopo possui uma λ característica (não confundir com λ , comprimento de onda).

Lembrando que meia-vida $T_{1/2}$ de um isótopo radioativo é definida como o tempo necessário para que metade do número de átomos radioativos em uma amostra sofra decaimento; isto é, para que N seja igual a $N_0/2$. A substituição de $N_0/2$ por N , e de t por $T_{1/2}$ na equação acima leva a

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \longrightarrow \quad \ln 2 = -\lambda T_{1/2}$$

como $\ln 2 = 0,693$, então temos:

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

*relação entre
constante de desintegração λ
e meia-vida $T_{1/2}$*

A atividade A de um radionuclídeo é definida como o número de desintegrações dos núcleos dos átomos constituintes por unidade de tempo, isto é a velocidade de desintegração de seus átomos. A atividade de uma amostra radioativa num dado instante pode ser expressa por

$$A = \lambda N$$

*relação entre
constante de desintegração λ
e atividade A*

A atividade é expressa em unidades de s^{-1} . O becquerel (Bq), corresponde a 1 decaimento por segundo. Isto é, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$.

Uma unidade de atividade mais antiga, mas ainda largamente usada é o curie (Ci), que originalmente era definida como a atividade de 1 g de rádio-226. Um curie é igual a $3,70 \times 10^{10}$ Bq ($1 \text{ Ci} = 3,70 \times 10^{10} \text{ Bq}$). Usualmente, as atividades dos analitos estão no intervalo de um nanocurie (nCi) ou menos até uns poucos microcuries (μCi).

Exemplos

1. Calcule a constante de desintegração do ^{198}Au , cuja meia-vida é de 2,7 dias.

Resolução:

Temos que : $0,693 = \lambda T_{1/2}$

e foi dado que : $T_{1/2} = 2,7 \text{ dias}$

então: $\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{2,7} = 0,257 \text{ desintegrações/dia} = 2,97 \times 10^{-6} \text{ desintegrações/s}$ ou

$$\lambda = 2,97 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

2. Calcule o número de átomos de ^{198}Au , após 12,15 dias, se inicialmente a amostra possuía 10^8 átomos.

Resolução:

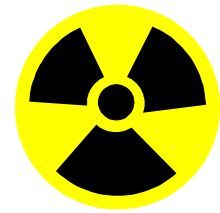
Temos que : $\lambda = 0,257 \text{ desintegrações/dia}$ (valor obtido no exemplo anterior)

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

então: $N = N_0 e^{-\lambda t} = 10^8 \times e^{-(0,257 \text{ desintegrações/dia}) \times (12,15 \text{ dias})} = 10^8 \times e^{-3,123}$

$$N = 4,4 \times 10^6 \text{ átomos.}$$

10. UNIDADES DE RADIAÇÃO



Três grandezas físicas são usadas na medida da radiação ionizante, como a produzida pelos **raios X** e pelos **raios γ** , quando interagem com a matéria: exposição (X), dose absorvida (D) e dose equivalente (H). Estas unidades são recomendadas pelos organismos International Commission Radiation Units and Measurements (ICRU) e International Commission Radiological Protection (ICRP), que definem as grandezas de medida da radiação e estabelecem os limites máximos permissíveis de dose que uma pessoa pode receber. O símbolo ao lado é usado internacionalmente para indicar uma área onde esta sendo manuseado ou produzido material radioativo.

É preciso lembrar que uma exposição a uma radiação mais intensa que a radiação de fundo, deveria ser evitada pelos danos que pode causar. As células vivas são capazes de reparar a maior parte dos danos que lhe são causados, se a radiação não for muito intensa. Quando a radiação é suficiente para matar algumas células, as células mortas podem ser substituídas por outras novas. Uma exceção importante ocorre com as células nervosas, que são insubstituíveis. Por isso, há essa preocupação em cuidar para limitar as doses de radiação.

Exposição (X)

A grandeza usada quando os fótons de raios X ou de raios γ interagem com o ar, é chamada de exposição. Define-se exposição X da seguinte forma:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

onde ΔQ representa a soma das cargas elétricas, de mesmo sinal, produzidas no ar quando todos os elétrons e pósitrons liberados pelos fótons de raios X ou de raios γ , são completamente absorvidos no ar, considerando-se um elemento de volume de ar, cuja massa é Δm .

A unidade para a grandeza exposição é o roentgen (R):

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Dose absorvida (D)

Como exposição é definida em termos da ionização que ocorre no ar, esta grandeza não é adequada para descrever a interação dos fótons da radiação ionizante com a matéria. Nesse caso, define-se a *dose absorvida*, que leva em conta a energia absorvida pelo meio que é atingido pela radiação ionizante, da seguinte forma:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

onde ΔE representa a energia cedida pela radiação ionizante ao meio, considerando um elemento de volume do meio, cuja massa é Δm .

A unidade para a grandeza dose absorvida, recomendada, a partir do ano de 1975, é o gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

A unidade para dose absorvida, utilizada antes de 1975, era o rad (radiation absorbed dose):

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^4 \text{ erg/g.}$$

Da forma como foram definidas a unidade atual e a usada anteriormente, podemos relacioná-las da seguinte forma:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Dose equivalente (H)

Os efeitos químicos e biológicos decorrentes da ionização do meio não dependem apenas da energia absorvida pelo meio, mas também do tipo de radiação incidente e de como está distribuída a energia absorvida. Levando-se em conta estes fatores, define-se, então, dose equivalente como:

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

onde **D** representa a dose adsorvida, **Q** é o fator de qualidade e **N** é o fator de modificação. Q e N são fatores adimensionais. O fator de qualidade **Q** leva em conta que a radiação que produz mais ionização no tecido, por unidade de comprimento, causa maior dano biológico do que aquela que produz menos ionização por unidade de comprimento. No primeiro caso estão, por exemplo, partículas alfa,

Fatores de qualidade para diferentes tipos de radiação

tipo de radiação	fator de qualidade Q
raios X, raios γ	1
elétrons (E > 0,03 MeV)	1
elétrons (E < 0,03 MeV)	1
nêutrons térmicos	2,3
nêutrons rápidos	10
prótons	10
raios α	20
íons pesados	20

fragmentos de fissão, e no segundo, raios X, raios γ e elétrons. O fator de qualidade **N** é o produto de todos os outros fatores de modificação, leva em conta o tempo de exposição, e o órgão atingido.

A unidade para a grandeza dose equivalente, recomendada, a partir do ano de 1975, é o sievert (Sv). A unidade para dose absorvida, utilizada antes de 1975, era o rem (roentgen equivalent man). Da forma como foram definidas a unidade atual e a usada anteriormente, podemos relacioná-las da seguinte forma:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Para fótons, $Q = N = 1$, e portanto $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad}$ ou $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$. Para a radiação incidente (X ou γ) em tecido mole, a dose absorvida é praticamente igual à exposição.

Exemplo:

Calcule a dose equivalente (H) em rem e em Sv, para uma pessoa que ingeriu uma pequena quantidade de trítio (que emite radiação β), de 18 keV. A dose média absorvida pelo trato gastrointestinal é de 500 mrad.

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

$Q = 1$, de acordo com a tabela anterior; então $H = D = 500 \text{ mrem} = 5 \text{ mSv}$.

11. LIMITES MÁXIMOS PERMISSÍVEIS (LMP)

É conveniente classificar os efeitos causados pela radiação ionizante, na matéria orgânica, em dois tipos:

- ▶ **efeitos imediatos**, cujas características aparecem em poucas semanas, ou menos.
- ▶ **efeitos retardados ou a longo prazo**, que são aqueles cujos efeitos levam alguns anos ou décadas para manifestar-se. Estes efeitos podem ser decorrentes ou de doses muito altas em um curto intervalo de tempo ou de pequenas doses em longos intervalos de tempo. Os efeitos dividem-se em *genéticos* e *somáticos*.
 - Os **efeitos genéticos** consistem em mutações nas células reprodutoras que afetam gerações futuras e podem aparecer quando os órgãos reprodutores foram expostos à radiação, de forma que aparentemente não afetaram o indivíduo, mas apenas seus descendentes. Quando a radiação atinge as células reprodutoras ou seus precursores, pode ocorrer uma alteração da informação genética codificada, provocando uma mutação genética. Se o espermatozóide ou óvulo que sofreu mutação, for usado na concepção, a alteração será incorporado ao óvulo fertilizado. A informação genética codificada poderá passar ao recém nascido e aos seus descendentes. Algumas dessas mutações chegam a serem letais, outras produzem defeitos físicos ou mentais. há indicações que esse efeito é cumulativo, de modo que quanto maior a dose acumulada, maior o número de mutações ocorridas.

- Os **efeitos somáticos** são os que afetam diretamente o indivíduo exposto à radiação e não são transmitidos às gerações futuras. Esses efeitos dependem do tipo de radiação, da profundidade atingida, da área ou volume do corpo exposto, da dose total recebida e do tempo de irradiação. Entre os efeitos somáticos no homem, encontram-se:
 - *aumento de incidência de câncer* — leucemia, câncer de pele, da tireóide, dos ossos e do seio.
 - *anormalidade no desenvolvimento do embrião*. Em ratos, os fetos que receberam 1 Sv, de raios X apresentaram anomalias físicas e outros nasceram mortos; anomalias foram observadas para doses maiores que 0,25 Sv.
 - *indução de catarata* — quando a vista humana é atingida por radiação, as células que morrem não são substituídas ou expelidas, como acontece com outros órgãos do corpo. As células mortas permanecem e se forem em grande número, produzem a opacidade do cristalino. O período latente para o aparecimento da catarata pode ser de meses ou anos.
 - *redução da vida média* — alguns estudos estatísticos em animais irradiados mostraram encurtamento da vida dos animais irradiados.

A importância relativa destes efeitos, ou lesões, depende do nível de dose de radiação. Para

- ▶ **doses muito altas**, predominam os efeitos imediatos, e as lesões serão severas ou, até mesmo letais.
- ▶ **doses intermediárias**, predominam os efeitos imediatos com grau de severidade menor e não necessariamente permanentes. Haverá sim, uma probabilidade de lesões severas a longo prazo.
- ▶ **doses baixas**, não haverá efeitos imediatos, mas haverá a possibilidade de lesões a longo prazo.

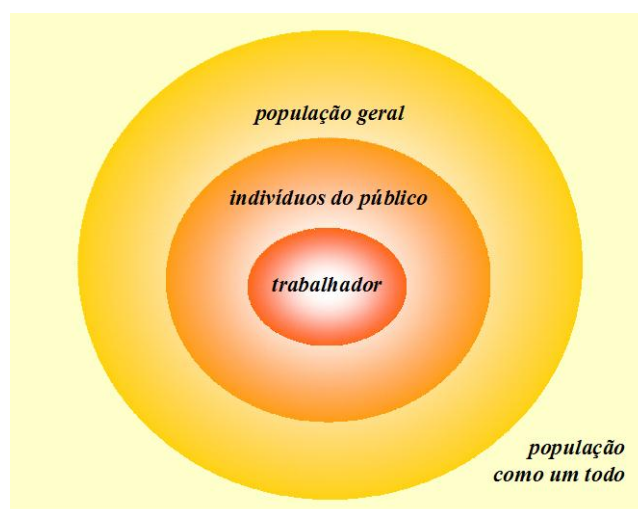
Os efeitos retardados, principalmente o câncer, complicam bastante a implantação de critérios de segurança no trabalho com radiações ionizantes.

Não é possível, por enquanto, usar critérios clínicos porque quando aparecem os sintomas clínicos o grau de dano causado já pode ser severo, irreparável, e até mesmo letal. Em princípio, é possível ter um *critério biológico*, e que algum dia seja possível identificar uma mudança biológica, no ser humano, que corresponde a uma mudança abaixo do grau de lesão que possa ser usado como critério para controlar a exposição à radiação. Por enquanto, na ausência de critérios biológicos ou médicos satisfatórios, é necessário fazer uso de idéias mais indiretas usando um *critério físico*. A quantidade escolhida, para ser usada como critério físico de segurança, é a dose máxima permissível.

Os *limites máximos permissíveis* são estabelecidos de forma a restringirem os efeitos somáticos nos indivíduos expostos, na sua descendência direta e na população com um todo.

As normas básicas de proteção radiológica da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), diferenciam os indivíduos em grupos:

- ▶ **trabalhador**: qualquer indivíduo adulto que poderá ser irradiado, de maneira regular ou ocasional, durante e em consequência de seu trabalho. LMP = 50 mSv.
- ▶ **indivíduos do público**: pessoas que vivem nas imediações de instalações nucleares. LMP = 5 mSv
- ▶ **população geral**: população na sua maior parte comum, excluindo trabalhadores e indivíduos do público.
- ▶ **população como um todo**: população inteira, compreendendo trabalhadores, indivíduos do público e a população geral.



Exemplo:

Calcular a dose equivalente máxima permissível para um trabalhador e para um indivíduo do público.

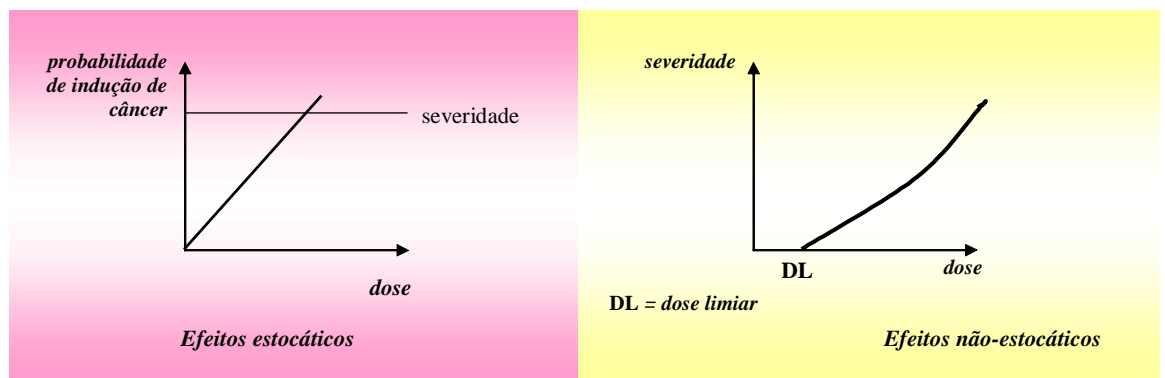
Para o cálculo de dose equivalente máxima permissível de um ano, para um trabalhador, corresponde a 50 semanas × 40 horas/semana.

trabalhador:
$$\text{LMP} = \frac{50 \text{ mSv}}{50 \text{ semanas} \times 40 \text{ horas/semana}} = 0,025 \text{ mSv/h}$$

indivíduo do público:
$$\text{LMP} = \frac{5 \text{ mSv}}{52 \text{ semanas} \times 168 \text{ horas/semana}} = 0,57 \text{ } \mu\text{Sv/h}$$

O sistema de limitação de doses, recomendado pelo ICRP, leva em conta o dano total à pessoa exposta, combinando todos os tipos de efeitos em todos os órgãos irradiados. Para estabelecer os limites de dose, tem que se levar em consideração dois tipos de efeitos:

- ▶ **efeitos estocásticos**, são aqueles para os quais a probabilidade de ocorrência, e não sua severidade, é considerada, como sendo função da dose, sem limiar. O dano devido aos efeitos estocásticos, é determinado pelo risco de mortalidade devido a câncer e efeitos genéticos.
- ▶ **efeitos não-estocásticos**, são aqueles para os quais a severidade do efeito aumenta com a dose, e para os quais pode-se estabelecer uma dose limiar para a ocorrência. Nestes casos encontram-se a catarata na lente do olho, danos não-malignos causados à pele, danos às células das gônadas, levando à perda de fertilidade, depleção de células na medula óssea, causando deficiências hematológicas.



É preciso ficar claro que uma pessoa que necessite um tratamento baseado no uso de radiações, estará submetida a um nível maior de radiação do que aquele permitido. Porém, nesse caso é necessário avaliar o custo × benefício. Sem o tratamento, a pessoa não melhora sua saúde, e com o tratamento, pode melhorar. Caso semelhante é o de exames como por exemplo o caso de uma radiografia, onde a pessoa pode ser submetida a níveis de radiação da ordem de 5 a 20 mrem. Esse valor é muito menor que a dose letal (da ordem de 500 rem).

O detrimento individual (dano) à saúde devido aos efeitos estocásticos (g_E) não-estocásticos (g_{NE}), é dado por: $g = g_E + g_{NE}$.

O detrimento total ao indivíduo devido aos efeitos estocásticos da radiação, que envolvem tanto efeitos genéticos quanto efeitos somáticos, como leucemia e câncer, é dado pelo risco total de tais efeitos aos órgãos ou tecidos irradiados.

Considerando-se a dose equivalente H , temos que o valor de H_{WB} para o corpo inteiro, é dado por:

$$H_{WB} = \sum_{i=1}^N w_i H_i$$

onde H_{WB} é a dose equivalente estocástica, considerando o corpo inteiro; H_i é a dose equivalente para o tecido i , w_i é o fator de peso para o risco relativo do tecido i , N é o número de tecidos relevantes no corpo. Os fatores de peso w_i foram determinados baseando-se na

radiosensibilidade dos tecidos com relação aos efeitos estocásticos da radiação, e foram normalizados para radiação uniforme de corpo inteiro, de maneira que:

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1$$

Na tabela que segue, são considerados os fatores de peso para tecidos diferentes e os coeficientes de risco f_T , que são um indicativo da probabilidade de risco de um dado tecido. Consideram-se aqui separadamente, gônadas, mama, medula óssea, pulmão, ossos, tireóide e num único grupo, destacado como outros cinco órgãos, tecidos tais como o estômago e o fígado, que recebem a dose equivalente mais alta. Para cada um destes tecidos, utiliza-se um fator de peso igual a 0,06.

Coeficientes de risco e fatores de peso para vários tecidos

tecido irradiado	coeficiente de risco f_T ($10^{-4}/Sv$)	fator de peso w_i
gônadas	40	0,25
peito (mama)	25	0,15
medula óssea vermelha	20	0,12
pulmão	20	0,12
superfície óssea	5	0,03
tireóide	5	0,03
outros órgãos	50	0,30
radiação uniforme de corpo inteiro	165	1,00

12. EFEITOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO SOBRE A MATÉRIA

Todas as radiações têm energia. Os processos pelos quais as radiações transferem sua energia ou parte dela para a matéria, dependem do tipo de radiação, da magnitude da energia e se a interação com os átomos se dá através dos elétrons orbitais ou de seu núcleo.

Os efeitos da radiação nem sempre são imediatamente identificados. Normalmente o que se pode observar são modificações nas propriedades e características de um material, após a irradiação. Dependendo da característica que sofreu alteração, classificam-se os efeitos como físicos, químicos ou biológicos. Algumas destas características são utilizadas para a construção de dosímetros e detectores. Os efeitos biológicos serão tratados como as manifestações que ocorrem nos seres vivos, principalmente no homem.

Efeitos físicos

São aqueles que provocam a mudança ou aparecimento de propriedades tais como condutibilidade, luminescência, radioluminescência, termoluminescência, temperatura.

- ▶ **condutibilidade** – liberação de cargas. A condução da corrente elétrica é possível sempre que se têm cargas livres em um material. A ionização provocada pela radiação ionizante pode provocar o aparecimento de corrente, se no material for aplicada uma diferença de potencial. A informação obtida pode ser quantitativa ou qualitativa, uma vez que a carga total inicialmente

liberada é proporcional à energia liberada pela radiação durante esta interação e, sendo assim, a corrente originada também trará esta informação. Em alguns casos só interessa a informação quanto ao aparecimento ou não da corrente. Esta propriedade física tem sido utilizada em equipamentos de medida de radiação como as câmaras de ionização, os contadores proporcionais, os detectores Geiger. As substâncias usadas para estes detectores são, em geral, gases como nitrogênio, argônio, ar, hidrogênio, dióxido de carbono. Também tem sido útil para os dosímetros de bolso tipo caneta.

- ▶ **luminescência** Certos materiais tem a propriedade de emitir luz quando absorvem radiação. A absorção de energia por uma substância e sua reemissão como radiação visível é conhecida como luminescência. Este tipo de efeito é aproveitado em detectores de cintilação, que quando atingidos pela radiação, liberam luz, com intensidade proporcional à energia desprendida, que é transmitida para o cátodo de uma fotomultiplicadora, que faz a conversão do sinal luminoso em sinal elétrico e também sua amplificação.
- ▶ **radioluminescência** A radioluminescência, é o fenômeno pelo qual novos centros estáveis fotoluminescentes são criados em certos materiais pela ação da radiação ionizante. Após a irradiação o material fluoresce sob luz de comprimento de onda adequado (normalmente, ultravioleta), enquanto o material não-irradiado não fluoresce, nas mesmas condições. A medida da fluorescência é feita com auxílio de uma fotomultiplicadora. Este tipo de efeito pode ser aproveitado para construir dosímetros.
- ▶ **termoluminescência** Em um processo análogo ao descrito anteriormente, existem substâncias que após terem sido irradiadas, tornam-se fluorescentes quando aquecidas acima de uma certa temperatura. A irradiação produz um estado metaestável de vida longa, o qual fica acumulado, por dias, ou até mesmo anos, e que é liberado após aquecimento. A luz que acompanha a luminescência é proporcional à dose acumulada. São usados como dosímetros termoluminescentes (TLD) cristais de fluoreto de cálcio (CaF), que é mais sensível e o de fluoreto de lítio (LiF), que tem menor dependência com a energia. Conseguem-se valores de doses acumuladas desde 5×10^{-3} rad até 10^5 rad. As vantagens deste tipo de dosímetros são a simplicidade, rapidez de leitura e reutilização. São utilizados para a fabricação de dosímetros pessoais.
- ▶ **temperatura** A absorção da energia de uma radiação por uma substância ocasiona um aumento de temperatura nesta substância. Um calorímetro, que mede a quantidade de calor, pode ser usado para relacionar a dose absorvida com o calor produzido no material.
- ▶ **centros paramagnéticos em ossos** Quando ossos e dentes são irradiados, são criados centros paramagnéticos, os quais podem ser relacionados com a dose de radiação recebida. Isso pode permitir medir a dose de radiação que uma pessoa da população geral, no caso de recebeu em caso de acidente, pois normalmente, somente um trabalhador é monitorado com dosímetros. (I. Caracelli, Dissertação de Mestrado, IFQSC-USP, 1982) A mesma técnica foi também usada para fazer datação de sítios como sambaquis, medindo-se o número de centros

paramagnéticos criados pela radiação e comparando com uma curva de calibração (dose \times número de centros) previamente estabelecida.

Efeitos químicos

Os efeitos químicos são o resultado da excitação e ionização produzida pela passagem da radiação em um dado meio. É possível utilizar estes efeitos em sistemas químicos como indicadores da quantidade de radiação recebida. Quando irradiado o meio, os íons produzidos pela radiação, se combinam quimicamente, formando novos compostos ou alterando as características químicas existentes durante o estado de pré-irradiação. É conveniente classificar os dosímetros químicos em dois grupos, com relação ao solvente usado: água ou outros. Normalmente o efeito observado em água se deve à formação de radicais livres.

- ▶ **dosímetros baseados nas reações químicas** Encontramos os dosímetros de sulfato ferroso aquoso, de sulfato cérico aquoso, de hidrocarbonetos clorinados, de óxido nitroso.
- ▶ **polímeros** A irradiação de um polímero em solução ou em forma pura pode induzir polimerização, *cross-linking*, ou degradação, dependendo da estrutura molecular do sistema. A reação é imediatamente percebida pela observação da variação da viscosidade a uma temperatura constante.
- ▶ **filmes fotográficos e emulsões nucleares** Trata-se de substâncias sensíveis à radiação, que quando exposta, guarda uma imagem latente na região em que houve a interação. As duas maiores categorias em que as emulsões para as medidas de radiação estão divididas são os filmes para raios X e γ e as emulsões sobre filmes ou pratos de vidro, que são usados no estudo de traços de partículas ionizantes.

Efeitos biológicos

Vamos aqui analisar os efeitos patológicos induzidos pela radiação.

- ▶ **efeitos nos sistemas de células** Relacionado com o processo de divisão celular:
 - *morte das células* – acontece em doses relativamente baixas (1 Gy), durante a mitose, devido a falhas na mecânica da divisão, provavelmente associadas com danos nos cromossomos. Isto significa que os sistemas de *células em divisão contínua* são os mais sensíveis, como por exemplo, os tecidos que produzem o sangue, a produção de espermatozoides, paredes do intestino e a pele.
 - *reparação dos danos* – pode acontecer de haver reparação nos danos causados pela radiação, nos sistemas em que a *divisão ocorre mais lentamente*, como por exemplo, osso em crescimento, pulmões, tecido glandular.
 - *doses altas* – para células que *não se dividem* podem continuar a funcionar adequadamente, mesmo após terem recebido doses altas, por exemplo, músculos, cérebro, espinha.

► **efeitos nos vasos, tecidos e órgãos**

- *vasos sangüíneos* – pode ocorrer contração dos vasos, reação inflamatória em tecidos adjacentes.
- *reparação dos danos* – após os danos causados nos capilares, o tecido é estimulado a tentar reparar o dano causado; como consequência, o tecido cicatrizante perde a elasticidade.
- *conseqüências* – o tecido cicatrizante, passa a envolver os vasos sangüíneos, tendendo a isolar os órgãos de suprimento de sangue, diminuindo assim, a eficiência dos órgãos e possivelmente, reduzindo a resistência a doenças. Isto forma parte do processo de envelhecimento causado pela radiação. Doses de 50 Gy causam a oclusão permanente dos vasos.

► **efeitos da radiação após irradiação de corpo inteiro**

Podemos dividir em:

- *efeitos retardados* – diferentes tipos de câncer (leucemia, de tireóide, sarcoma ósseo) ocorrem em um período latente de 3 a 30 anos ou mais; catarata na lente do olho; encurtamento da vida.
- *síndromes de efeitos agudos em várias doses* – são considerados os efeitos nos sistemas nervoso central, gastrintestinal e hematopéico.

Efeitos agudos relacionados a doses absorvidas para irradiação de corpo inteiro

	sistema nervoso central	sistema gastrintestinal	hematopéico
<i>órgão crítico</i>	cérebro	intestino delgado	medula óssea
<i>limiar do efeito (Gy)</i>	20	3	1
<i>limiar da morte (Gy)</i>	50	10	3
<i>período latente</i>	15 a 20 minutos	3 a 5 dias	2 a 3 semanas
<i>tempo para a morte</i>	2 dias	3 a 14 dias	3 a 8 semanas
<i>sintomas</i>	tremores convulsões ataxia	anorexia vômitos diarréia perda eletrolítica desidratação	febre dispnéia leucopenia trombopenia
<i>radiopatologia</i>	edema encefalite	depleção do epitélio intestinal infecção	atrofia da medula óssea pancitopenia infecção hemorragia anemia

eritema

O eritema inicial aparece entre poucas horas e alguns dias. A coloração vermelha é causada pela liberação de substâncias do tipo histamina, devido aos danos iniciais causados às células. O

eritema de segundo estágio leva de 3 a 4 semanas, associado com mudanças obstrutivas nas arteríolas, na derme e dilatação dos vasos sanguíneos. É usado para dosimetria. Entre os fatores que afetam o eritema encontramos o fracionamento da dose, a taxa de dose e a transferência de energia, conhecida pela sigla LET.

► **efeitos da radiação na pele após irradiação parcial do corpo**

Podem ser observados os efeitos descritos na tabela que segue.

<i>Efeitos da radiação na pele após irradiação parcial do corpo</i>			
	dose limiar	período	radiopatologia
<i>eritema</i>	5 Gy em dose única ou mais se fracionado	poucas horas poucos dias	danos às células germinais na epiderme, pelos de glândulas sebáceas, causam a liberação de substância tipo histamina que dilata os capilares.
<i>descamação úmida</i>	20 Gy em dose única, mas taxa de dose baixa	2 a 4 semanas	danos excessivos às células germinais na epiderme, e danos aos vasos sanguíneos.
<i>depilação</i>	temporária após 4 Gy permanente após 7 Gy	2 a 4 semanas	pára a multiplicação celular nos pelos e a raiz destaca-se da papila. O pelo que cresce no local pode ser diferente do original.
<i>descamação seca</i>	recuperação crônica		pele seca devido ao dano permanente às glândulas sebáceas, as glândulas de suor e aos cabelos.

A próxima tabela mostra os efeitos esperados em pessoas que sofreram exposição à radiação.

<i>Efeitos esperados em pessoas que sofreram exposição à radiação</i>	
exposição (R)	efeitos prováveis
0 - 50	nenhum efeito óbvio.
80 - 120	vômitos e náuseas por cerca de 1 dia em 5 a 10% do pessoal exposto.
130 - 170	vômitos e náuseas por cerca de 1 dia, seguidos de outros sintomas de males provocados por radiação em aproximadamente 25% do pessoal exposto.
180 - 220	vômitos e náuseas por cerca de 1 dia, seguidos de outros sintomas de males provocados por radiação em aproximadamente 50% do pessoal exposto.
230 - 330	vômitos e náuseas em quase todo o pessoal no primeiro dia, seguido de outros sintomas de males provocados por radiação. Cerca de 20% de mortes em 2-6 semanas depois da exposição; sobreviventes convalescendo por cerca de 3 meses.
400 - 500	mesmos sintomas que os anteriores. Cerca de 50% de mortes em 1 semana depois da exposição; sobreviventes convalescendo por cerca de 6 meses.
550 - 750	vômitos e náuseas em quase todo o pessoal dentro de 4 horas a partir da exposição, seguido de outros sintomas de males provocados por radiação. Quase 100% de mortes; poucos sobreviventes convalescendo por cerca de 6 meses.
1000	vômitos e náuseas em quase todo o pessoal dentro de 1 a 2 horas a partir da exposição. Quase 100% de mortes; provavelmente nenhum sobrevivente dos males provocados por radiação.
5000	incapacitação quase imediata. Todo o pessoal exposto deve morrer em uma semana.
5-30 mR	uma radiografia de raios X de tórax.

13. APLICAÇÕES GERAIS DAS RADIAÇÕES

Em 1895, Wilhelm Conrad Roentgen, descobriu os raios X. As lojas de calçados ofereciam, como cortesia, o uso de raios X para permitir verificar que os pés se encontravam confortáveis dentro dos sapatos, principalmente quando o cliente era uma criança acompanhada pelos pais, que tinham dúvidas se os sapatos eram adequados ou não.

Durante 15 anos após o descobrimento dos raios X, os físicos começaram a trabalhar com médicos, no desenvolvimento do uso dos raios X no exame do corpo humano, e usar radiografias passou a fazer parte das análises para diagnóstico médico. Por volta de 1920, foram iniciados estudos relativos à aplicação dos raios X na inspeção de materiais. Hoje em dia, os raios X são usados na indústria em ensaios não-destrutivos, na medicina e em pesquisas científicas.

A descoberta da radioatividade artificial e o desenvolvimento dos métodos de produção de radioisótopos em grande escala estimularam muitos pesquisadores ao estudo de sua aplicação em

diferentes ramos da ciência. Essas pesquisas trouxeram grandes progressos, principalmente na medicina, agricultura e indústria.

Os radioisótopos são isótopos instáveis dos elementos. Podem ser usados de duas maneiras: como **traçadores** na diagnose ou como **fontes de energia** na terapia.

São usados como *traçadores* ou *marcadores* devido a duas importantes propriedades:

possuem comportamento químico idêntico ao de isótopos estáveis do mesmo elemento;

apresentam emissão espontânea de radiação que pode ser detectada, indicando assim sua posição e quantidade.

Como **fontes de energia**, os radioisótopos encontram aplicações por serem detectáveis após absorção ou espalhamento pela matéria, ou por quebrarem moléculas e ionizarem átomos formando íons, iniciando assim reações químicas ou biológicas. São portanto, utilizados para destruir tecidos, especialmente os cancerosos, ou para suprimir alguma função orgânica.

As radiações podem também ser produzidas por máquinas; são os aceleradores de partículas. Alguns hospitais no Brasil possuem aceleradores lineares e são usados na terapia, principalmente de neoplasias.

14. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES EM MÉTODOS RADIOQUÍMICOS

Os métodos radioquímicos podem ser classificados, pela origem da radioatividade, em três tipos. Em **análise por ativação**, a atividade é induzida por irradiação em um ou mais elementos da amostra, com radiação ou partículas adequadas (mais comumente nêutrons térmicos obtidos em um reator nuclear); a radioatividade resultante é então medida. Na segunda categoria estão os métodos nos quais a radioatividade é introduzida fisicamente na amostra pela adição de uma quantidade medida de espécies radioativas chamadas de **traçadores radioativos**. A classe mais importante classe de métodos quantitativos, baseada na introdução de espécies radioativas, são os métodos de **diluição isotópica**, nos quais uma certa massa de um analito radioativo de atividade conhecida é adicionada a uma certa quantidade medida da amostra. Após a mistura ter sido homogeneizada, uma fração do componente de interesse é isolada e purificada; a análise baseia-se então na atividade desta fração isolada. Além disso, é comum que sejam utilizados reagentes que foram marcados com traçadores radioativos, para poder elucidar mecanismos de reação. A terceira classe de métodos, envolve a medida da radioatividade que ocorre naturalmente em uma amostra. Exemplos deste tipo de métodos são as medidas de radônio no ar ambiente e de urânio em olarias e materiais cerâmicos.

MÉTODOS DE ATIVAÇÃO POR NÊUTRONS

Os *métodos de ativação* estão baseados na medida da radioatividade que tenha sido induzida nas amostras pela irradiação por nêutrons ou partículas carregadas, tais como hidrogênio, deutério ou íons hélio.

Nêutrons e Fontes de Nêutrons

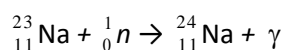
Três fontes de nêutrons são empregadas nos métodos de ativação por nêutrons: *reatores, radionuclídeos e aceleradores*. Todos os três produzem nêutrons altamente energéticos (no intervalo de MeV), que usualmente atravessam materiais moderadores de forma a minimizar suas energias a uns poucos centésimos de elétron-volt. As perdas de energia para o moderador ocorrem por *espalhamento elástico* no qual os nêutrons são arrancados dos núcleos, transferindo parte de sua energia cinética a cada núcleo com os quais se chocam no material moderador. Finalmente, os núcleos atingem a temperatura de equilíbrio com suas vizinhanças. Os nêutrons que tem esta energia (cerca de 0,04 eV) são chamados de *nêutrons térmicos*, e o processo de moderação de nêutrons de alta energia a condições térmicas é chamado de *termalização*. Os moderadores mais eficientes são as substâncias de baixo peso molecular, tais como água, óxido de deutério e parafina.

A maioria dos métodos de ativação utiliza nêutrons térmicos, que reagem eficientemente com a maioria dos elementos de interesse analítico. Para alguns dos elementos mais leves, entretanto, tais como nitrogênio, oxigênio, flúor e silício, os *nêutrons rápidos*, que possuem energias de cerca de 14 MeV, são mais eficientes para induzir a radioatividade. Tais nêutrons de alta energia são comumente produzidos em aceleradores.

Interações de nêutrons com a matéria

Os nêutrons livres não são estáveis e decaem com uma meia-vida de cerca de 10,3 minutos gerando prótons e elétrons. Entretanto, os nêutrons livres não subsistem tempo suficiente para desintegrar-se desta forma, pela sua forte tendência em reagir com os materiais do meio ambiente. A alta reatividade dos nêutrons se origina de sua carga nula, que permite sua aproximação a núcleos carregados, sem interferência de forças coulombianas.

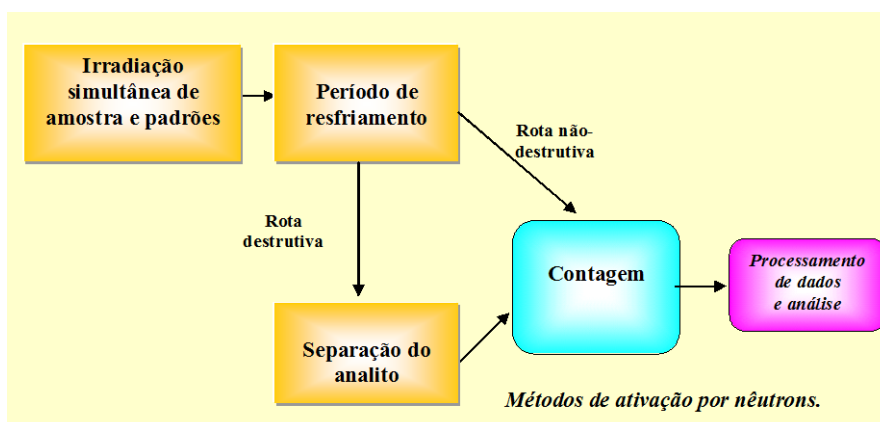
A *captura de nêutrons* é a reação mais importante para os métodos de ativação. Aqui, um nêutron é capturado pelo núcleo do analito para dar um isótopo com o mesmo número atômico, mas com um número de massa maior em uma unidade. O novo nuclídeo está em um estado altamente excitado porque adquiriu cerca de 8 MeV de energia por sua ligação com o nêutron. Este excesso de energia é liberado por *emissão induzida de raios gama* ou emissão de uma ou mais partículas nucleares, tais como nêutrons, prótons ou partículas alfa. Um exemplo de uma reação que produz raios gama induzidos é



Os raios gama formados por reações de captura são de interesse analítico em casos especiais, mas o radionuclídeo produzido (${}^{24}\text{Na}$) é geralmente de muita utilidade.

Considerações experimentais em métodos de ativação

A figura apresenta um diagrama de blocos mostrando o fluxo de amostras e padrões nos dois métodos de ativação mais comuns, *destrutivo* e *não-destrutivo*.



Em ambos os procedimentos, a amostra e um ou mais padrões, são irradiados simultaneamente por nêutrons (ou outros tipos de radiação). As amostras podem ser sólidas, líquidas ou gasosas, embora, sejam mais comuns as duas primeiras. Os padrões devem ser o mais parecido possível com as amostras, tanto física como quimicamente. Geralmente, as amostras e os padrões são colocados em pequenos frascos de polietileno; frascos de quartzo selados também são usados algumas vezes. Deve-se tomar cuidado para assegurar que as amostras e os padrões sejam expostos ao mesmo fluxo de nêutrons. O tempo de irradiação depende de uma variedade de fatores e freqüentemente é determinado empiricamente. Normalmente, é empregado um tempo de exposição de aproximadamente três a cinco vezes a meia-vida do analito produzido. Os tempos de irradiação geralmente variam de vários minutos a várias horas. No **método não-destrutivo**, a amostra e os padrões são contados diretamente após o resfriamento. Um **método destrutivo** requer que o analito esteja separado de outros componentes da amostra antes da contagem. Neste caso, uma quantidade conhecida de amostra irradiada é dissolvida e o analito separado por precipitação, extração, troca iônica ou cromatografia. O material isolado ou uma fração conhecida dele é então contado através de sua atividade gama—ou beta. Assim como no método não-destrutivo, os padrões devem ser irradiados simultaneamente e tratados de modo idêntico.

Depois que a irradiação termina, a amostra e os padrões são deixados para sofrer decaimento (ou “resfriamento”) por um período que novamente varia de uns poucos minutos a várias horas ou mais. Durante o resfriamento, ocorre o decaimento de interferentes de vida-curta de forma que não afetam o resultado da análise. Outra razão para a amostra irradiada resfriar é a de reduzir o perigo à saúde associado com a contagem do material.

Aplicações da Ativação por Nêutrons

Os métodos de ativação por nêutrons oferecem várias vantagens incluindo alta sensibilidade, uma preparação de pequena quantidade de amostra e a facilidade de calibração. Geralmente estes procedimentos são não-destrutivos e por esta razão são aplicados à análise de objetos de arte, moedas,

amostras forenses e espécimes arqueológicos. As principais desvantagens dos métodos de ativação são a necessidade de equipamentos grandes e caros e de facilidades especiais para manuseio e o descarte de materiais radioativos. Outra desvantagem é o longo tempo necessário para completar uma análise quando radionuclídeos de vida-longa são usados.

Campo de Aplicações

A ativação por nêutrons é potencialmente aplicável à determinação de 69 elementos. Além do mais, quatro dos gases inertes formam isótopos ativos por nêutrons térmicos e também podem ser determinados. Finalmente, três elementos adicionais—oxigênio, nitrogênio e ítrio— podem ser ativados por nêutrons rápidos de um acelerador. A lista de tipos de materiais aos quais o método tem sido aplicado é impressionante e inclui metais, ligas, objetos arqueológicos, semicondutores, espécimes biológicos, rochas, minerais e água. A aceitação pelas cortes de justiça de evidências proporcionadas por métodos de análise de ativação, tem ampliado seu uso em química forense. Aqui, a alta sensibilidade e os aspectos não-destrutivos do método são particularmente úteis. A maioria das aplicações envolve a determinação de traços de vários elementos.

MÉTODOS DE DILUIÇÃO ISOTÓPICA

Princípios dos Procedimentos de Diluição Isotópica

Os métodos de diluição isotópica requerem a preparação de uma quantidade do analito em uma forma radioativa. Uma massa conhecida destas espécies marcadas isotopicamente é misturada com a amostra a ser analisada. Após tratamento para assegurar a homogeneidade entre a espécie ativa e a não-ativa, uma parte do analito é isolado quimicamente na forma de composto purificado. Através da contagem de uma porção da massa deste produto, pode-se calcular a diluição do material ativo e relacionando com a quantidade de substância não-ativa na amostra original. Deve-se observar que não há necessidade de recuperação quantitativa de espécies. Então, em contraste com os métodos analíticos de separação típicos, podem ser tomadas medidas para assegurar um produto de alta pureza sobre o qual se baseia a análise. É esta independência da necessidade de separação quantitativa que leva à alta seletividade do método de diluição isotópica.

Aplicação do Método de Diluição Isotópica

A técnica de diluição isotópica tem sido empregada para a determinação de cerca de 30 elementos em uma variedade de materiais. Os procedimentos de diluição isotópica também tem sido empregados de modo amplo na determinação de compostos que são de interesse na química orgânica e bioquímica. Assim, métodos têm sido desenvolvidos para a determinação de substâncias tão diversas tais como vitamina D, vitamina B₁₂, sacarose, insulina, penicilina, vários aminoácidos, corticosterona, vários álcoois, e tiroxina. A análise por diluição isotópica tem tido menos aplicação após o advento dos métodos de ativação. Entretanto, ainda pode ser esperado o uso deste procedimento, pela simplicidade relativa do equipamento requerido. Além disso, o procedimento é geralmente aplicável onde o método de ativação falha.

15. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES EM DATAÇÃO

A datação de peças arqueológicas, de fósseis e de rochas pode ser feita quantitativamente. São descritos aqui dois métodos, ambos relacionados com a medida da radiação.

Datação pelo método do ^{14}C

Por esse método podem-se medir as idades de materiais orgânicos de centenas e até mesmo de dezenas de milhares de anos. Por outro lado, para determinar a idade das rochas que tem milhões ou bilhões de anos emprega-se o método de urânio-238.

No ar existe uma pequeníssima fração de ^{14}C , em forma de gás carbônico. Para cada 10^{12} átomos de ^{12}C , há um de ^{14}C . Esses átomos de ^{14}C são produzidos por colisões de raios cósmicos, incidentes nas camadas mais externas da atmosfera, com o nitrogênio do ar. O ^{14}C , radioativo, assim produzido se desintegra, e desapareceria por completo se sua produção não fosse contínua na atmosfera.

Os organismos vivos — plantas e animais — absorvem o carbono do ar diretamente, pela fotossíntese, ou indiretamente, pela ingestão de plantas ou animais. O carbono existente nos seres vivos como caules, folhas, tecidos humanos, ossos, etc., contém, portanto a mesma fração de ^{12}C para o ^{14}C existente no ar. Quando morre, o organismo cessa de absorver o carbono do ar. A quantidade de ^{12}C se mantém constante. O ^{14}C , por sua vez, vai se desintegrando sem ser substituído. Portanto a fração de ^{14}C no carbono total vai diminuindo. Medindo-se então a radioatividade existente no material, pode-se determinar a fração de ^{12}C para ^{14}C . A comparação desta fração com o que havia antes da morte do organismo fornecerá a informação para se calcular a idade do material.

Datação por termoluminescência

O método baseia-se no fato que muitos cristais podem armazenar energia proveniente da radiação. Quando o cristal é aquecido, essa energia é liberada em forma de luz. Medindo-se a intensidade dessa luz, pode ser determinada a quantidade de radiação acumulada.

No caso de rochas ou cerâmicas enterradas que contenham quartzo, o qual é termoluminescente, a radiação é acumulada desde a idade zero. No caso das rochas, essa idade é a da época de sua formação, e no caso das cerâmicas, o momento de sua fabricação, em que elas são queimadas a temperaturas superiores a 700°C (eliminando assim qualquer radiação acumulada no quartzo antes da fabricação da cerâmica).

A datação da peça é feita, portanto, determinando-se a quantidade total de radiação de fundo, ou natural, por ano, através da relação:

$$\text{idade} = \frac{\text{radiação natural acumulada}}{\text{radiação natural anual}}$$

16. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES EM BIOLOGIA

As radiações são importantes no estudo de vários processos que ocorrem nos seres vivos. A seguir são descritos alguns exemplos do seu uso em pesquisas biológicas.

Estudo no transporte e localização de carboidratos nas plantas

O dióxido de carbono é absorvido pelas folhas das plantas e participa do processo de fotossíntese, no qual são produzidos carboidratos. Um método simples para determinar o transporte e a localização desses carboidratos é o do *traçador radioativo*. A folha de uma planta é encaixada dentro de um recipiente onde se faz fluir o gás carbônico marcado com o isótopo radioativo ^{14}C . Após várias horas, um detector de radiação colocado em várias partes da planta indicará onde o átomo de carbono marcado se localizou.

A técnica mais comumente empregada é a da auto-radiografia. Após a planta como um todo ter sido exposta ao gás radioativo, as folhas e as porções da haste são removidas e colocadas entre filmes de raios X. As partículas β do ^{14}C vão sensibilizar a chapa fotográfica. Após a revelação da chapa, observam-se locais claros e escuros, correspondendo os últimos a locais com maior concentração de átomos radioativos. De forma geral, constatou-se uma maior concentração de carboidrato no sistema vascular da planta. Entre folhas jovens e adultas verificou-se uma maior concentração nas primeiras, visto que suas necessidades são maiores para ter seu próprio desenvolvimento.

Divisão de cromossomos

Os traçadores radioativos têm sido usados na obtenção de auto-radiografia no estudo de duplicação de cromossomos. Empregando-se timidina marcada com trítio na cultura de células, o ^3H é incorporado somente aos cromossomos. As auto-radiografias das células mostrarão os cromossomos ou porções deles. A divisão celular pode ser inibida com o alcalóide colchicina, sem afetar a divisão de cromossomos, podendo a divisão ocorrer em diferentes estágios das células. Dessa forma, após certo tempo, algumas células conterão dois conjuntos de cromossomos, outras quatro, assim por diante. Se um filme de raios X for colocado sobre o preparado, as imagens dos cromossomos serão obtidas, e a distribuição do trítio pode ser acompanhada após uma, duas ou três divisões. Pode-se então obter informação sobre a divisão e replicação de cromossomos.

Determinação do volume de um compartimento usando-se traçador radioativo

Técnicas que utilizam radioatividade podem ser empregadas para determinar o volume total ocupado por um fluido. Para medir, por exemplo, o volume de sangue no corpo, injeta-se intravenosamente 5 mL de albumina marcada com ^{125}I com uma atividade que forneça 10^5 desintegrações/segundo. Após cerca de 5 a 15 minutos, quando a albumina marcada já estiver completamente misturada, retira-se 5 mL de sangue do outro braço. Admitindo-se que o número de desintegrações/segundo da amostra retirada seja igual a 10^2 , o volume total de sangue do corpo pode ser calculado:

$$5 \text{ mL} \times \frac{10^5 \text{ desintegrações/s}}{10^2 \text{ desintegrações/s}} = 5000 \text{ mL}$$

ROTEIRO DE ESTUDOS

1. Que é radiação de fundo?
2. Quais as principais fontes de radiação natural?
3. Nível de radiação depende da altitude? Como é essa dependência?
4. Quais as principais características da radiação eletromagnética?
5. Como se calcula a energia de uma radiação eletromagnética?
6. Quais os principais processos de radiação corpuscular? Quais as principais partículas envolvidas nesse processo?
7. Que é núcleo-filho? O que é núcleo-pai?
8. Que é uma partícula α ?
9. Qual a principal característica do decaimento β ?
10. Quais as semelhanças e diferenças entre raios X e raios γ ?
11. Que é radiação ionizante?
12. Quais os principais mecanismos pelos quais a radiação eletromagnética perde energia?
13. O que representa a equação $I = I_0 e^{-\mu x}$ e cada termo da equação?
14. Por que um átomo é radioativo?
15. Quais os quatro tipos de forças?
16. Que forças atuam no núcleo?
17. Que são isótopos? O que são isótopos estáveis? O que são radioisótopos?
18. Que é tempo de meia-vida?
19. Como é a curva que representa o decaimento radioativo?
20. Que representa a equação $N = N_0 e^{-\lambda t}$? O que representa cada termo da equação?
21. Qual a relação entre constante de desintegração e meia-vida?
22. Que é atividade? Quais as unidades utilizadas?
23. Qual a relação entre constante de desintegração e atividade?
24. Quais as unidades de radiação?
25. Que é exposição? Quais as unidades usadas?
26. Que é dose absorvida? Quais as unidades usadas?
27. Que é dose equivalente? Quais as unidades usadas?
28. Como classificamos os efeitos causados pela radiação ionizante?
29. Como diferenciamos efeitos somáticos e efeitos genéticos?
30. Quais os principais efeitos somáticos apresentados no homem?
31. A importância relativa destes efeitos, ou lesões, depende do nível de dose de radiação. Explique.
32. As normas básicas de proteção radiológica da CNEN diferenciam os indivíduos em grupos. Quais são eles?
33. Que são efeitos estocásticos e não-estocásticos?

34. Se queremos considerar partes do corpo em relação à sua sensibilidade podemos considerar fatores de peso w_i . Como varia o fator de peso? Qual órgão deve ter mais sensibilidade à radiação?
35. Que são e quais os principais efeitos físicos da radiação sobre a matéria?
36. Que são e quais os principais efeitos químicos da radiação sobre a matéria?
37. Que são e quais os principais efeitos biológicos da radiação sobre a matéria?
38. Quando um corpo é submetido à radiação de corpo inteiro, quais os órgãos críticos? Qual o mais sensível? Qual o menos sensível à radiação?
39. Quais os principais efeitos da radiação na pele?
40. Há uma tabela que mostra os efeitos esperados em pessoas que sofreram exposição à radiação. Para que exposição começa a aparecer vômitos? E mortes?
41. Quais as principais aplicações das radiações na indústria? Dê exemplos.
42. Explique como a radiação pode ser usada para esterilizar materiais.
43. Quais as principais tipos de métodos radioquímicos?
44. Quais os principais métodos de datação que utilizam radiação? Fale sobre o método de datação do ^{14}C .
45. Fale sobre as aplicações das radiações em biologia