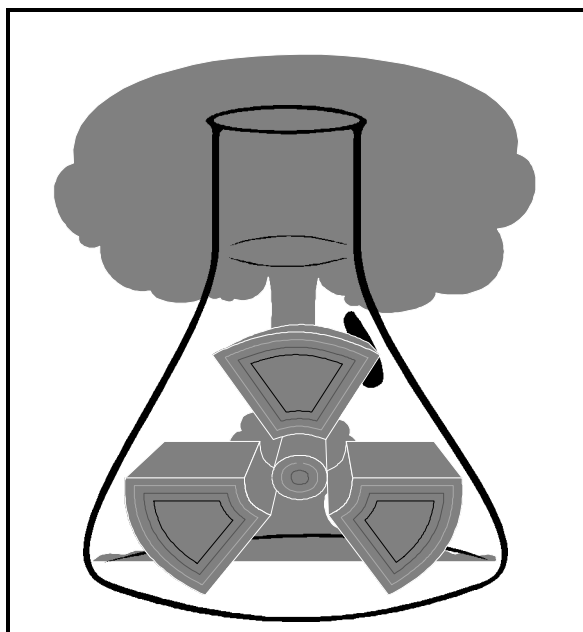




Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Química

Área de Educação Química



MÓDULOS PARA O ENSINO DE RADIOATIVIDADE

Marcelo L. Eichler

Marcos Henrique Hahn Calvete

Tânia D. Miskinis Salgado (Coordenação)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	2
MÓDULO 1 - Radioatividade - Conceitos Básicos	
Evolução dos modelos atômicos	4
Os isótopos e os tipos de emissão radioativa	10
Interação das radiações com a matéria	17
MÓDULO 2 - Radioatividade - Princípios Gerais	
A descoberta da radioatividade	26
Radioatividade natural	32
Meia-vida	37
MÓDULO 3 - Radiação - Algumas Aplicações	
Radiação de fundo	42
Reações nucleares	48
Aplicações de radioisótopos	55
MÓDULO 4 - Efeitos Biológicos das Radiações	
O acidente de Chernobyl	60
Tireóide	65
O uso das radiações na medicina	68
MÓDULO 5 - O Acidente de Goiânia	
O acidente	71
Características do céσιο-137	75
Efeitos da radiação sobre as células	78
BIBLIOGRAFIA	84

INTRODUÇÃO

Poucas são as fontes de material didático relacionado com radioatividade disponíveis em Português e, principalmente, acessíveis a professores e alunos do Ensino Médio. O assunto geralmente aparece apenas em livros de Física, onde normalmente são trabalhados com maior profundidade os aspectos relativos ao núcleo atômico e às reações nucleares. Assuntos como a interação das radiações com a matéria, seus efeitos químicos e biológicos raramente são discutidos com um enfoque químico. Verifica-se ainda que muitos boletins ou suplementos especiais, das mais diversas origens, que pretendem informar sobre o assunto, contêm imprecisões na linguagem, utilizam uma terminologia inadequada para o nível dos alunos secundaristas e muitas vezes têm caráter nitidamente sensacionalista.

Por outro lado, verifica-se um grande interesse por parte dos alunos em relação a este assunto, motivados que são pelas notícias frequentemente veiculadas nos meios de comunicação (principalmente a televisão), relacionadas com o uso da energia nuclear ou com o manuseio de radioisótopos e suas conseqüências. Há entretanto, alguma desinformação, por parte dos professores, no que se refere à radioatividade e conteúdos afins, geralmente determinada pela ausência deste conteúdo nos currículos de licenciatura e pela escassez de bibliografia acessível.

Buscando atuar de maneira efetiva nesta situação, criou-se um material de apoio aos professores que desejem trabalhar assuntos relacionados com radioatividade com seus alunos. O sistema é flexível, permitindo diversas abordagens. Trata-se de Módulos de Consulta sobre temas ligados à radioatividade, em diversos campos do conhecimento humano, que têm por finalidade suprir as deficiências da literatura específica em Língua Portuguesa.

Os assuntos estão divididos em módulos, suficientemente independentes entre si, de modo que não seja necessária a leitura de todos os módulos, caso se esteja interessado apenas em alguns assuntos mais específicos.

Estes módulos foram elaborados principalmente com a finalidade de subsidiar o professor de Ensino Médio, mas podem ser utilizados por alunos de cursos de graduação, como material complementar às disciplinas regulares do currículo, podendo ainda servir de recurso para o aprofundamento em caso de alunos do curso secundário com trabalhos de pesquisa extraclasse, como costuma ocorrer em diversas Escolas.

Este material foi criado como resposta a uma necessidade expressa pelo próprio público a que se destina. Mas não se pretende que seja um material estanque. Ao contrário, estimula-se o professor, no sentido de que ele próprio elabore materiais didáticos para trabalho com seus alunos, de acordo com os interesses manifestados pelos mesmos. Desta forma, a partir dos fatos relacionados com a radioatividade que estão presentes no cotidiano dos alunos, pode-se discutir as implicações da ciência no seu sentido mais amplo, a partir de suas dimensões ética, social, econômica e política.

Tânia Denise Miskinis Salgado

MÓDULO 1

RADIOATIVIDADE - CONCEITOS BÁSICOS

TEXTO A - Evolução dos modelos atômicos

Para explicar como é o átomo e do que ele se constitui, os cientistas propõem modelos, que são descrições próximas da realidade. Quando se fazem descobertas que não estão de acordo com um modelo ou que lhe acrescentam idéias, pode ser necessário elaborar um novo. O modelo atômico mais aceito atualmente é relativamente recente: foi o resultado de uma série de experiências, iniciadas por Sir Ernest Rutherford em 1910. Estas experiências culminaram em um modelo que utiliza os princípios da Mecânica Quântica, e que explica satisfatoriamente as propriedades hoje conhecidas dos átomos.

As primeiras idéias sobre o átomo vêm da antigüidade. Os filósofos gregos foram os primeiros a se preocupar com a natureza da matéria. Perguntavam-se o que aconteceria se a matéria fosse dividida em pedaços cada vez menores. Demócrito (546 - 460 a.C) propôs que estas sucessivas divisões acabariam em algo indivisível: o átomo (*do grego: que não pode ser dividido*).

No entanto, Demócrito não se preocupou em trazer argumentos baseados em experimentos que apoiassem sua teoria. Isto somente ocorreria no princípio do século XIX, com Dalton, que realizou uma série de práticas para confirmar a sua teoria atômica : “A matéria é formada por átomos indivisíveis”. A partir de sua teoria (elaborada entre 1803 e 1807) foi proposto um modelo para o átomo, o ÁTOMO DE DALTON (Figura 1.1).

Este primeiro modelo atômico foi satisfatório para os cientistas por alguns anos. Com a evolução das pesquisas científicas,

novos modelos foram propostos para explicar novos fatos. E foi exatamente assim que ocorreu com Thomson, que para explicar a existência de partículas de carga negativa no átomo (os elétrons), propôs um novo modelo (Figura 1.2).

A teoria de Thomson foi considerada válida até a divulgação das experiências realizadas por Rutherford. Estas experiências tinham por objetivo desvendar a natureza dos “raios” que emanavam de elementos como o urânio e o tório e que haviam sido descobertos por Becquerel, em 1846. A propriedade que estes elementos apresentam de emitir “raios” foi, mais tarde, chamada por Mme. Curie de **radioatividade**.

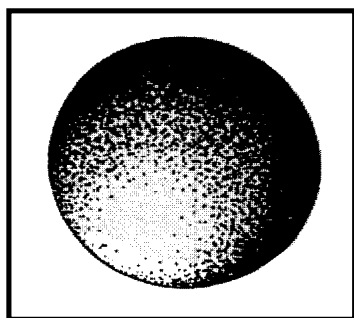


Figura 1.1: para Dalton, o átomo seria uma bolinha extremamente pequena, maciça e indivisível

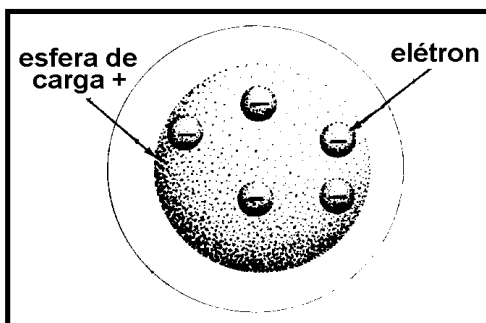


Figura 1.2: para Thomson, o átomo seria formado por uma pasta positiva, recheada pelos elétrons de carga negativa, mantendo assim a neutralidade do átomo. Este modelo ficou conhecido como “pudim de passas”.

RUTHERFORD

Em 1899, na Universidade de McGill, em Montreal (Canadá), Rutherford constatou que um tipo de radiação emitido pelo urânio era facilmente bloqueado por uma fina folha de metal. Deu-lhe o nome de raios alfa (α), pois ainda desconhecia sua natureza. Outra

forma de radiação, mais penetrante e cujo bloqueio somente se dava por materiais de espessura bem maior, foi chamada raios beta (β). Um ano depois, Paul Villard identificou um terceiro tipo de radiação, que recebeu o nome de radiação gama (γ).

Estas radiações comportam-se de diferentes formas quando submetidas à ação de campos magnéticos. Como podemos ver na Figura 1.3, um elemento radioativo natural, ao emitir os três tipos de radiação terá: partículas α pouco desviadas pelo campo; partículas β bastante desviadas pelo campo, com deflexão oposta à das partículas α ; e raios γ , que não sofreram desvio. Este comportamento foi observado pela primeira vez por Mme. Curie em sua Tese de Doutorado, publicada em 1904.

Por volta de 1910, Rutherford começou suas pesquisas que resultaram na concepção do núcleo atômico. Curioso por determinar a natureza e as propriedades das partículas alfa, utilizou em sua experiência um equipamento cujo desenho simplificado encontra-se na Figura 1.4.

Um feixe de partículas α emitido pelo polônio atravessa uma fina lâmina de ouro e entra em contato com os detectores (recobertos por sulfeto de zinco - ZnS), emitindo luz visível ao serem atingidos pelas partículas α .

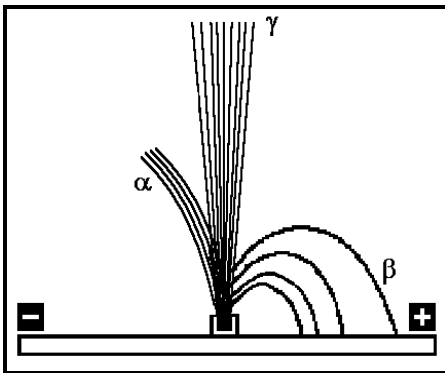


Figura 1.3: o campo magnético provoca diferentes desvios, em função da carga e da massa das partículas.

As partículas, ao incidirem sobre a lâmina de ouro, seguem diferentes caminhos: algumas voltam em direção à fonte, outras se desviam da trajetória inicial, e a maior parte atravessa o ouro sem mudar de direção. Veja a Figura 1.5.

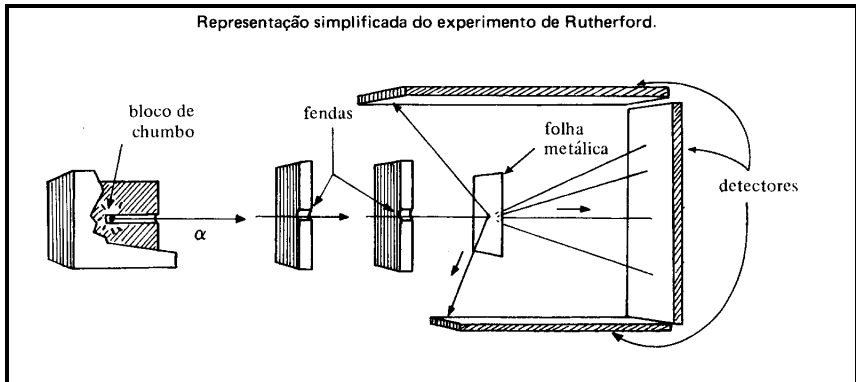


Figura 1.4.: esquema do equipamento utilizado por Rutherford em seus experimentos com radiação.

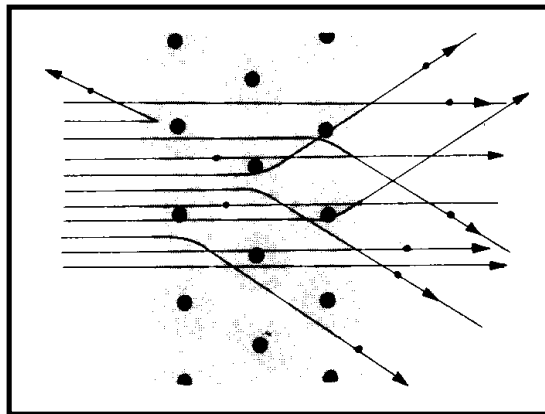


Figura 1.5.: experimento de Rutherford em que partículas γ atravessam uma lâmina de ouro

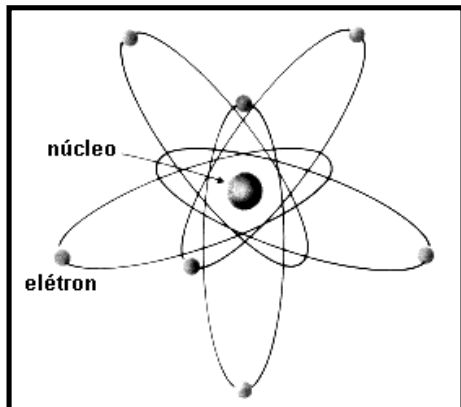


Figura 1.6: modelo atômico de Rutherford; núcleo pequeno, denso e eletricamente positivo, envolto por elétrons em suas órbitas.

Tentando explicar as mudanças de direção das partículas α , Rutherford propôs que estes desvios ocorriam por influências eletrostáticas. As partículas α , sabidamente positivas, seriam repelidas pelas cargas positivas dos átomos. Mas este fato contrariava o modelo de Thomson, que previa um átomo neutro e em que, conseqüentemente, não poderia haver repulsão eletrostática. Então, Rutherford propôs um modelo de átomo (Figura 1.6) constituído por um núcleo muito pequeno carregado positivamente, em torno do qual girariam os elétrons, de carga negativa, em órbitas determinadas. Fazendo medidas quantitativas, verificou ainda que o diâmetro total do átomo seria cerca de 100.000 vezes maior que seu núcleo. Ou seja, Rutherford propôs que a matéria é um *imenso vazio!*

O NÚCLEO

As teorias sobre a estrutura do átomo evoluíram bastante, até chegar ao modelo mais aceito atualmente, que envolve conceitos da mecânica quântica, com níveis e subníveis de energia para os elétrons orbitais, formando uma nuvem eletrônica difusa em volta do núcleo (Figura 1.7).

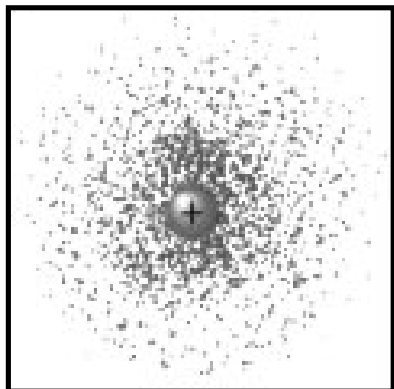
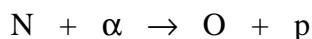


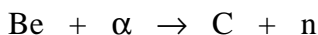
Figura 1.7: Modelo atômico atual, uma nuvem difusa de elétrons em volta do núcleo.

Restava um questionamento: do que é feito o núcleo? Rutherford descobriu o próton em suas pesquisas. Um átomo de nitrogênio, ao ser bombardeado com partículas alfa, resulta em um átomo de oxigênio e uma partícula positivamente carregada, o próton. Esta é a equação da reação nuclear:



Mas o núcleo não poderia ser formado apenas por prótons - isso levaria a um núcleo com excessiva carga elétrica. Por exemplo, um núcleo de sódio ($Z = 11$ e número de massa 23) necessitaria ter 23 prótons para esta massa, e então a sua carga seria 23 unidades de carga e não 11. Para explicar esta diferença, alguns cientistas chegaram a propor a existência de elétrons no núcleo.

Somente em 1932 esta dificuldade foi solucionada, com a descoberta de uma nova partícula por James Chadwick, que era produzida em consequência do bombardeamento de berílio com partículas alfa. Tal partícula teria uma massa quase igual à do próton e ausência de carga elétrica, sendo por isso chamada *nêutron*. A equação que representa a reação é:



Chegou-se, finalmente, ao conceito de núcleo formado por prótons e nêutrons.

MÓDULO 1

RADIOATIVIDADE - CONCEITOS BÁSICOS

TEXTO B - Os isótopos e os tipos de emissão radioativa

A proposição de que o núcleo do átomo seria formado por prótons e nêutrons contribuiu para que se esclarecessem muitas dúvidas que os próprios cientistas tinham na época. Até aquele momento, eles se debatiam com problemas que pareciam ser insolúveis. Por exemplo: alguns átomos possuíam o mesmo número atômico (Z), embora possuísem números de massa (A) diferentes, o que levava os cientistas a crer que se tratava de elementos químicos diferentes. Por isso tentavam isolá-los (sem sucesso, evidentemente).

OS ISÓTOPOS

Os cientistas puderam concluir, através de análises experimentais, que existiam átomos idênticos do ponto de vista químico, com diferentes níveis de radioatividade. A essa característica dos átomos radioativos, Soddy, em 1913, deu o nome *isotopismo*, que significa “mesmo lugar” na tabela periódica. No entanto, o conceito de isótopos logo se estendeu para átomos estáveis.

Com a descoberta do nêutron, por Chadwick, em 1932, ampliou-se o conceito de isotopismo. Um mesmo elemento químico pode ser formado por átomos de diferentes números de massa, o que significa que seus núcleos contêm o mesmo número de prótons (igual ao de elétrons na eletrosfera), mas números de nêutrons variáveis.

Estes átomos são ISÓTOPOS do elemento considerado. Como se trata do mesmo elemento químico, os isótopos possuem mesmo 'Z'.

A maioria dos elementos químicos são misturas de isótopos, os quais distribuem-se na natureza sempre na mesma proporção (Tabela 1.1).

Assim, o hidrogênio ($Z=1$) é formado por átomos de $A= 1, 2$ e 3 em uma proporção constante. O ferro contém em maior quantidade átomos cujo núcleo possui 26 prótons e 30 nêutrons. Mas também há átomos cujo núcleo possui 26 prótons e mais 28, 31 ou 32 nêutrons. São isótopos de ferro. E estáveis, ou seja, sem tendência a se transformar em outros elementos de forma espontânea.

Tabela 1.1: Composição isotópica natural de alguns elementos

<i>ELEMENTO</i>	<i>MASSA ATÔMICA</i>	<i>% NA NATUREZA</i>
<i>Hidrogênio</i>	<i>1</i>	<i>99,9</i>
	<i>2</i>	<i>0,01</i>
	<i>3</i>	<i>traços</i>
<i>Carbono</i>	<i>12</i>	<i>98,8</i>
	<i>13</i>	<i>1,1</i>
	<i>14</i>	<i>traços</i>
<i>Oxigênio</i>	<i>16</i>	<i>99,7</i>
	<i>17</i>	<i>traços</i>
	<i>18</i>	<i>0,2</i>
<i>Magnésio</i>	<i>24</i>	<i>78,9</i>
	<i>25</i>	<i>10,0</i>
	<i>26</i>	<i>11,1</i>

Em compensação, se o núcleo de um átomo de ferro, além dos 26 prótons habituais, contiver 33 nêutrons, ele perderá sua estabilidade. Esta e outras constatações experimentais permitem concluir que a estabilidade de um núcleo depende, entre outros fatores, do seu número de nêutrons.

Até hoje já foram identificados mais de dois mil isótopos dos 109 elementos conhecidos atualmente. Destes, entretanto, somente 253 são estáveis. Os restantes incluem isótopos naturais e artificiais. O bismuto, de número atômico 83, é o último elemento que possui isótopos estáveis. Todos os isótopos de elementos com Z maior que 83 são radioativos.

Na Tabela 1.2 podemos ver alguns elementos químicos e seus isótopos, radioativos ou não:

Tabela 1.2: Alguns elementos e seu número de isótopos

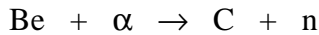
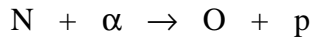
ISÓTOPOS DE	RADIOATIVOS	ESTÁVEIS	TOTAL
Alumínio	8	1	9
Cálcio	11	6	17
Carbono	6	2	8
Zinco	16	5	21

Caso um elemento apresente isótopos radioativos, a forma de desintegração (tipo de radiação emitida) depende do arranjo das partículas no núcleo.

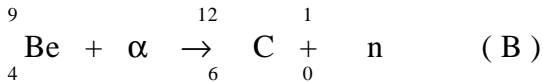
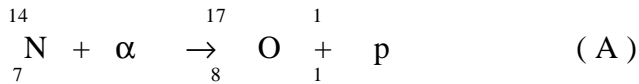
PARTÍCULAS ALFA

A desintegração radioativa por partículas alfa é típica de núcleos pesados, principalmente naqueles elementos de número atômico maior que 83.

No texto anterior foram mostradas duas reações nucleares. Estas reações levaram à descoberta do próton e do nêutron. As equações são as seguintes :



onde “p” e “n” são os símbolos para próton e nêutron, respectivamente. À esquerda da seta estão o “núcleo-alvo” e a partícula incidente. À direita da seta representam-se o núcleo e a partícula, resultantes da reação nuclear. Se acrescentarmos ao próton e nêutron os índices, Z e A, usados para os elementos, ficaremos com as seguintes equações :



Agora, fazendo o balanço de massas e números atômicos, podemos descobrir a carga e a massa das partículas alfa:

1^o) Para a reação A:

some o número de prótons do lado direito: _____

some o número de prótons do lado esquerdo: _____

some os números de massa do lado direito: _____

some os números de massa do lado esquerdo: _____
 as diferenças entre os lados direito e esquerdo são:
 para o n° de prótons: _____
 para o n° de massa: _____

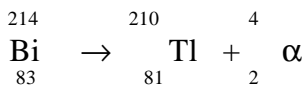
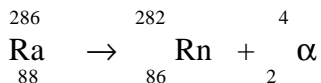
2ª) Para a reação **B**:

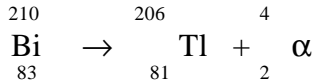
some o número de prótons do lado direito: _____
 some o número de prótons do lado esquerdo: _____
 some os números de massa do lado direito: _____
 some os números de massa do lado esquerdo: _____
 as diferenças entre os lados direito e esquerdo são:
 para os números de prótons: _____
 para os números de massa: _____

Estas diferenças entre os números de massa e de prótons, de ambas as equações, corresponde à carga e à massa da partícula α .

Podemos concluir, portanto, que uma partícula alfa possui n° atômico (Z) igual a 2, e n° de massa (A) igual a 4, ou seja, é formada por 2 prótons e 2 nêutrons. A partícula alfa, por este motivo, muitas vezes é representada como He^{2+} , pois é igual, em carga e massa, ao núcleo do gás nobre hélio .

Desintegrações típicas por emissão de partículas alfa são represen-tadas pelas equações abaixo :

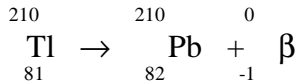
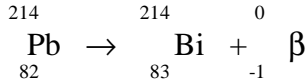




PARTÍCULAS BETA

As partículas beta (β) também são de origem nuclear. Possuem massa e carga iguais às do elétron. Por isto, como já foi visto no texto A, muitos cientistas chegaram a acreditar que existiam elétrons dentro do núcleo.

As equações a seguir mostram decaimentos beta típicos :



Como sua carga é negativa, muitas vezes a partícula beta é representada por β^- .

Comprimento de onda (em m)	Denominação	Frequência (em Hz)
10^{-12}	Raios γ	10^{21}
10^{-11}		10^{20}
10^{-10}	Raios X	10^{19}
10^{-9}		10^{18}
10^{-8}		10^{17}

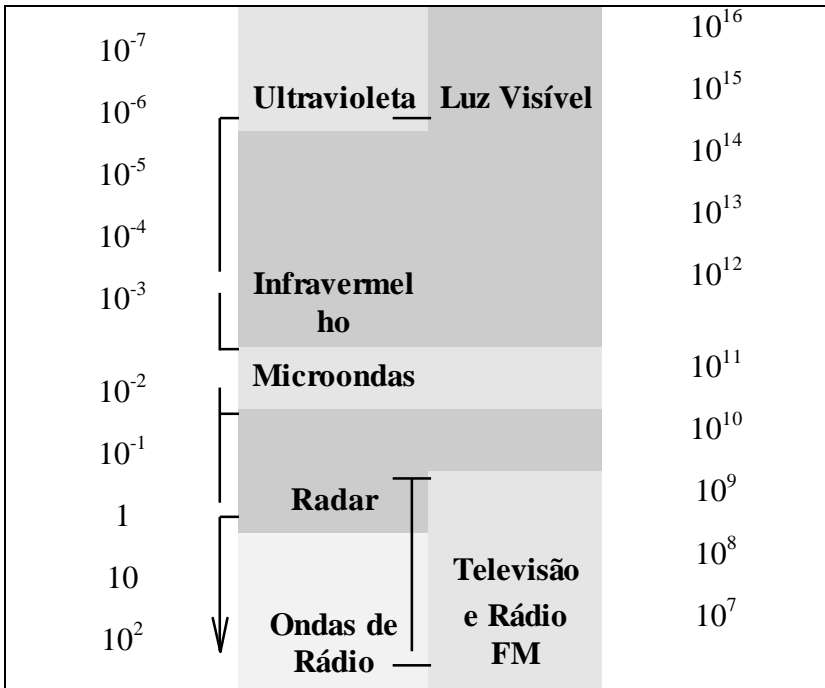


Figura 1.8: esquema de frequências e comprimentos de onda de diferentes radiações eletromagnéticas.

RAIOS GAMA

Os raios gama são ondas de radiação eletromagnética; não possuem massa nem carga elétrica. São semelhantes aos raios X, diferenciando-se somente na origem: enquanto os raios X provêm da eletrosfera do átomo, os raios gama tem origem nuclear.

Por se tratar de uma onda eletromagnética, os raios gama propagam-se com velocidade igual à da luz. No entanto, sua energia é maior e, portanto, seu comprimento de onda é menor.

MÓDULO 1

RADIOATIVIDADE - CONCEITOS BÁSICOS

TEXTO C - Como as radiações interagem com a matéria

O átomo é neutro: o número de prótons (positivos) no núcleo é igual ao número de elétrons (negativos) na eletrosfera. A ionização é o rompimento desta neutralidade. Por exemplo, se um átomo perdeu um elétron, fica com um próton não neutralizado (uma carga positiva), resultando um íon positivo. Inversamente, se um átomo ganhar um elétron, este não terá um correspondente próton no núcleo e ficará, assim, com uma carga negativa (ou seja, será um íon negativo).

Ao atravessarem a matéria, as radiações transmitem sua energia aos elétrons. Quando esta energia é suficiente para superar a energia que mantém os elétrons atraídos pelo núcleo, ocorre a ionização e o elétron é arrancado do átomo com certa velocidade.

As partículas carregadas (α e β) provocam ionização de forma direta, por colisão com os átomos e elétrons do meio. Já as ondas eletromagnéticas (raios γ e X) e partículas não carregadas (nêutrons) provocam ionização de forma indireta transferindo sua energia para outras partículas, que por sua vez provocam ionizações.

Ao se estudar a interação das radiações com a matéria, é importante conhecer duas coisas: o número de ionizações provocadas e o alcance das radiações (o quanto elas conseguem penetrar na matéria).

CONTADOR GEYGER

O contador Geyger-Müller é um aparelho que serve para medir a radiação emitida por uma fonte radioativa, para isso utiliza a ionização que as radiações provocam. Um esquema deste aparelho pode ser visto na Figura 1.9.

Um tubo cilíndrico com paredes metálicas, contendo um gás em seu interior, é conectado a uma fonte de alta tensão. Quando a radiação penetra no cilindro, ioniza o gás. Os elétrons entram em movimento, devido à ação de um forte campo elétrico, e são atraídos por um filamento carregado positivamente disposto ao longo do cilindro. Ao atingirem o filamento, os elétrons geram um rápido pulso (variação) de tensão. Este pulso provoca o deslocamento de um ponteiro na escala do aparelho, ou um sinal sonoro, o que indicará a quantidade, ou presença, de radiação.

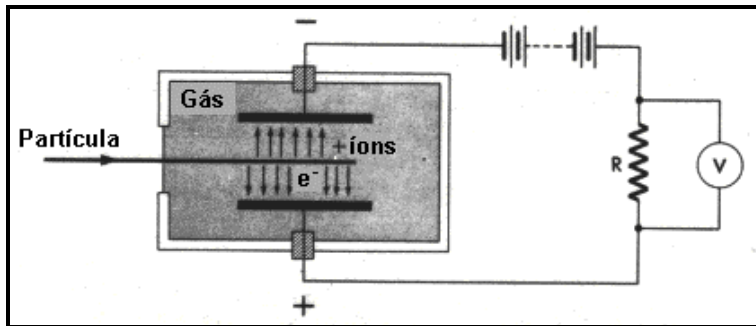


Figura 1.9: Contador Geyger-Müller

PARTÍCULAS ALFA

As partículas alfa são idênticas ao núcleo do gás hélio, são partículas pesadas em relação às β , e possuem uma grande energia cinética ao serem ejetadas do núcleo. Devido a estas características,

possuem uma trajetória quase retilínea, num dado meio, como pode ser visto na Figura 1.10.

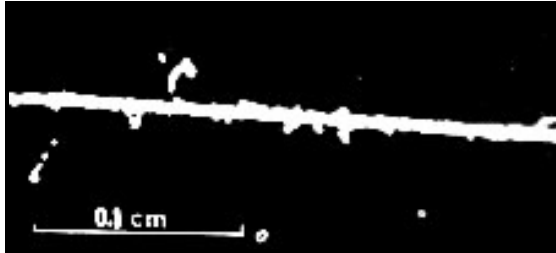


Figura 1.10: trajetória de uma partícula alfa

Em virtude de sua massa e de sua alta energia cinética, as partículas alfa colidem com um grande número de átomos, ionizando-os. Como a cada ionização a partícula perde uma parte de sua energia, a radiação alfa é de curto alcance, ou seja, não penetra muito na matéria.

As partículas alfa podem ser bloqueadas com camadas muito finas de matéria. Uma folha finíssima de alumínio, uma folha de papel ou mesmo alguns centímetros de ar podem barrar estas partículas. O alcance, em diversos materiais, de partículas alfa com diferentes energias pode ser visto na Tabela 1.3.

Tabela 1.3: Alcance das partículas alfa e beta em alguns materiais

ENERGIA (MeV)	ALCANCE (cm)		
	AR	TECIDO HUMANO	ALUMÍNIO O
1,0	0,55	$0,33 \cdot 10^{-2}$	0,0032
2,0	1,04	$0,63 \cdot 10^{-2}$	0,0061
3,0	1,67	$1,00 \cdot 10^{-2}$	0,0098

4,0	2,58	$1,55 \cdot 10^{-2}$	0,0105
5,0	3,50	$2,10 \cdot 10^{-2}$	0,0206
PARTÍCULAS BETA	AR	TECIDO HUMANO	ALUMÍNIO
0,1	12	$1,51 \cdot 10^{-3}$	0,0043
0,5	150	0,18	0,059
1,0	420	0,50	0,15
2,0	840	1,00	0,34
3,0	1260	1,50	0,56

Observação: 1 MeV = 1 milhão de elétrons -Volt = $1,602 \cdot 10^{-13}$ Joules

P

Observando a Tabela 1.3, o que se pode dizer sobre o alcance das radiações em relação à densidade da matéria?

PARTÍCULAS BETA

As partículas beta possuem massa muito pequena e 1(uma) unidade de carga negativa. Seu alcance é bem maior que o das partículas alfa, em função de sua grande velocidade e pequena massa. A trajetória destas partículas em um dado meio é tortuosa (Figura 1.11).

A ionização produzida por uma partícula β , em uma dada distância, é muito menor que aquela produzida por uma partícula α . Normalmente, durante o seu percurso na matéria, as partículas β ionizam somente 1% dos átomos ou moléculas que constituem o material, embora sofra colisão com cerca de 8400 átomos a cada centímetro que percorre.

Para blindar as partículas β são necessárias maiores espessuras de matéria do que as utilizadas na blindagem de uma partícula α , como se pode ver na Tabela 1.3.



Figura 1.11: trajetória de uma partícula beta

RAIOS GAMA

Raios gama, assim como os raios X, são radiações eletromagnéticas, que não possuem carga, nem massa. Estas radiações, exatamente como a luz visível, propagam-se na forma de “pacotes” de energia, denominados **fótons**. Cada fóton corresponde a um valor fundamental de energia, o quantum. São bastante penetrantes e provocam ionização de forma indireta. Três efeitos, decorrentes destes tipos de radiações, podem ocorrer na interação com a matéria: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. A energia de cada fóton e o número atômico do material onde está penetrando é que determinam o tipo de interação predominante.

No efeito fotoelétrico (Figura 1.12a), o fóton é totalmente absorvido pelo átomo. Sua energia se transfere a um elétron orbital

das camadas mais externas de um átomo, e esse elétron é ejetado. O resultado final é a liberação de um elétron, a formação de um íon positivo e o completo desaparecimento do fóton. Este efeito ocorre com fótons de pouca energia, assim a probabilidade do efeito fotoelétrico ocorrer diminui com o aumento da energia dos raios γ . Com energias médias, predomina o espalhamento Compton (Figura 1.12 b), processo que se assemelha ao efeito fotoelétrico, com a diferença que o fóton é desviado por um elétron, transferindo-lhe somente parte de sua energia. Nesse processo, ocorre a liberação de um elétron, a formação de um íon positivo e, como o fóton não é completamente absorvido, um novo fóton de energia mais baixa continua interagindo com outros elétrons.

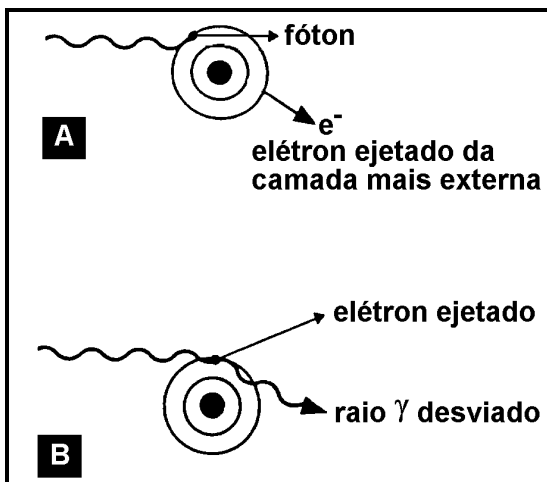


Figura 1.12: interação de raios X e γ com a matéria (a) efeito fotoelétrico; (b) efeito Compton.

A produção de pares acontece quando a energia do fóton é superior à 1,02 MeV. Nas vizinhanças do núcleo atômico o fóton desaparece e um elétron e um pósitron são criados. (Figura 1.13)

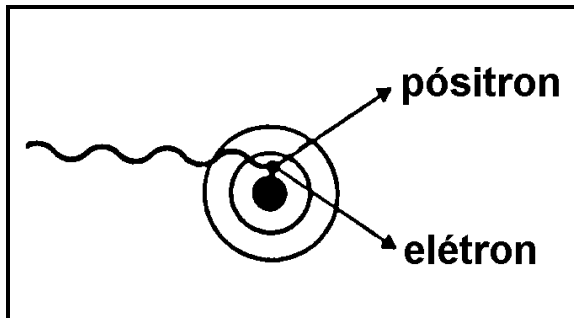


Figura 1.13: produção de pares para fótons de grande energia.

O pósitron é a anti-partícula do elétron: possui a mesma massa do elétron, mas tem carga contrária. A representação desta partícula é S^+ .

Todos três processos de absorção de fótons liberam elétrons, ionizando a matéria. Estes elétrons, antes de perder completamente sua energia, podem produzir outras excitações ou ionizações no meio. Desta maneira, os raios γ produzem mudanças ou alterações químicas e biológicas de forma semelhante ao produzido pelas partículas carregadas (α e β).

Um fóton de radiação gama pode perder toda ou quase toda sua energia em uma única interação. É imprevisível a distância que ele percorre antes de interagir; pode-se, no entanto, prever uma distância, chamada camada semi-redutora, na qual há 50 % de chance de que o fóton γ seja absorvido pelo material. A Tabela 1.4 apresenta as camadas semi-redutoras para raios X e γ de diferentes energias.

Tabela 1.4: Camadas semi-redutoras no tecido humano e no chumbo

ENERGIA (MeV)	CAMADA SEMI-REDUTORA (cm)	
	Tecido Humano	Chumbo
0,01	0,13	0,00045
0,05	3,24	0,008
0,50	7,23	0,38
1,00	9,91	0,86
5,00	23,10	1,44

NÊUTRONS

Os nêutrons interagem predominantemente com núcleos atômicos e não produzem, eles próprios, ionização. Antes da interação, os nêutrons percorrem grandes distâncias através da matéria. São, portanto, muito penetrantes.

A intensidade de um fluxo de nêutrons pode ser reduzida, principalmente, por colisões elásticas dos nêutrons com núcleos atômicos ou, ainda, pela sua eventual captura por alguns tipos de núcleos. Ao sofrerem colisões elásticas com prótons, os nêutrons perdem rapidamente sua energia, e ela é reduzida na proporção de uma vez e meia a cada colisão. Menos de trinta colisões com prótons são necessárias para obter nêutrons com baixas velocidades.

Materiais que possuam núcleos bastante pequenos, como o do hidrogênio, com apenas um próton, são muito eficientes para blindar um fluxo de nêutrons. A energia cinética pode ser reduzida a próximo de zero em um único choque. Isto deve-se à quase igualdade de tamanho e massa entre o próton e o elétron, o que permite em um choque frontal uma colisão completamente elástica, onde o nêutron transfere toda a energia de seu movimento para o núcleo do hidrogênio. Como ocorre em uma perfeita tacada de bilhar,

em que a bola branca transfere seu movimento para a outra bola em que colidiu frontalmente, a bola branca pára, a outra vai para a caçapa. Assim, utiliza-se água e parafina, ricos em hidrogênio, para barrar os nêutrons.

RADIAÇÕES SECUNDÁRIAS

A radiação originada após a interação inicial das partículas radioativas e ondas eletromagnéticas com a matéria é chamada radiação secundária.

Radiação eletromagnética ou mesmo elétrons podem ser

originados após a interação das partículas alfa com a matéria.

Quando as ondas eletromagnéticas interagem com a matéria, provocando a retirada de um elétron da camada K, ou quando ocorre uma captura de elétron por parte do núcleo, raios X são emitidos. O "buraco" deixado

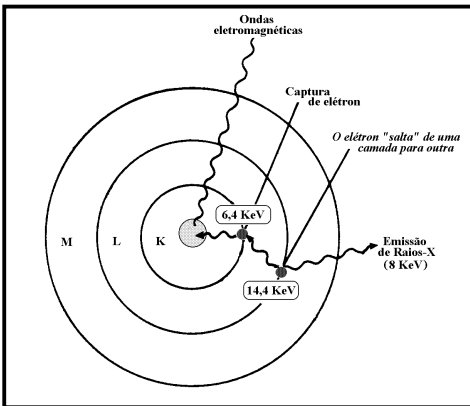


Figura 1.14: efeito cascata acompanhado de emissão de raios X.

pele elétron da camada K provoca um efeito cascata (Figura 1.14). Um elétron da camada L salta para camada

K, um da camada M salta para camada L, e assim sucessivamente. A cada "salto" ocorre emissão de raios X, com energia igual à diferença entre os respectivos níveis eletrônicos.

MÓDULO 2

RADIOATIVIDADE - PRINCÍPIOS GERAIS

TEXTO A - A descoberta da radioatividade

Wiener Presse

Wurzburg

Roentgen Mostra seus Novos Raios ao Kaiser

O eminente cientista alemão Wilhelm Conrad Roentgen mostrará ao Kaiser os no-vos raios que recentemente descobriu. Estes raios, que receberam o nome de raios X, despertaram imensa curiosidade na comunidade científica européia.

Por sua valorosa descoberta, Roentgen receberá do Kaiser a condecoração Kronen-Ordem 2. Klasse. Após o jantar oferecido em sua homenagem, Roentgen tentará repetir para o Kaiser o experimento que o levou à descoberta dos “novos raios”.



Wilhelm Conrad Roentgen

13/01/1896

OS RAIOS X

Na noite de 8 de novembro do ano de 1895, enquanto estudava os fenômenos de descarga dos gases, Roentgen observou uma estranha luz. Ao

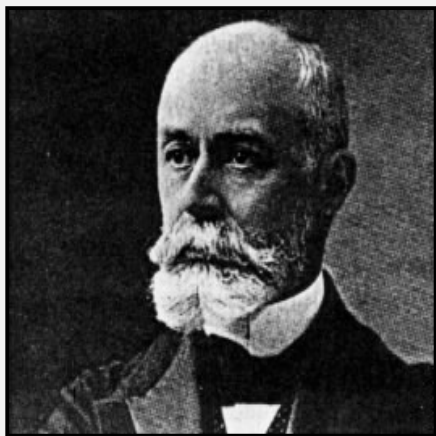
colocar sais de bário próximos do tubo de raios catódicos que utiliza em seus estudos com gases, notou que estes sais fluoreciam, emitindo luz. O que causou estranheza a Roentgen foi o fato da fluorescência ter se dado em uma sala completamente escura. Roentgen sabia que a fluorescência é uma emissão secundária da luz retirada do ambiente pelas substâncias que tem propriedades fluorescentes.

Apesar de Roentgen ter recoberto o tubo com uma espessa cartolina preta os sais de bário continuavam a emitir luz. “Algum tipo de raio deveria estar atingindo os sais de bário”, concluiu Roentgen. Por não conhecer a natureza destes raios ele os chamou de raios X.

Continuando suas pesquisas com estes raios, Roentgen descobriu algumas de suas propriedades:

- ◆ chapas fotográficas são sensíveis aos raios X;
- ◆ não há reflexos ou refração dos raios, nem podem ser desviados por campos magnéticos;
- ◆ os objetos tornam-se transparentes diante dos raios X, em diferentes graus.

Radiação Emitida pelo Urânio Ioniza Gases



Henri Becquerel

Henri Becquerel, cientista da Academia de Ciências de Paris, constatou que os raios emitidos pelo urânio, que haviam sido descobertos por ele mesmo, tinham a capacidade de ionizar gases. Assim foi possível medir a intensidade dos raios emitidos por uma amostra.

Para se ter uma melhor idéia do que são estes raios, transcrevemos parte dos relatórios de Becquerel que foram publicados pela *Comptes-rendus* da Academia Francesa de Ciência:

“Cobri uma... chapa fotográfica... com duas folhas de papel negro grosso, tão grosso que a chapa não ficou manchada ao ser exposta ao sol durante um dia inteiro. Coloquei sobre o papel uma camada de substância fosforescente (um sal de urânio) e expus tudo ao sol por várias horas. Quando revelei a chapa fotográfica, percebi a silhueta da substância fosforescente em negro sobre o negativo... A mesma experiência pode ser feita com uma lâmina de vidro fina, colocada entre a substância fosforescente e o papel, o que exclui a possibilidade de ação química resultante de vapores que poderiam emanar da substância quando aquecida pelos raios solares. Portanto podemos concluir destas experiências que a substância fosforescente em questão emite radiações que penetram no papel que é opaco à luz...” [Comptes-rendus de l'Academie des Sciences, Paris, 122, 420, (24/ 02/ 1896)].

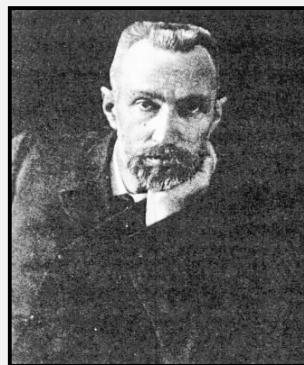
“Como o sol não voltou a aparecer durante vários dias, revelei as chapas fotográficas, que estavam no escuro de minha gaveta, a primeiro de março, na expectativa de encontrar imagens muito deficientes. Ocorreu o oposto: as silhuetas apareceram com grande nitidez. Pensei imediatamente que a ação poderia ocorrer no escuro”.[Comptes-rendus, 126, 1086,(03/03/1896)].

Becquerel pôde concluir que os raios emitidos pelo urânio não possuem nenhuma relação com a fosforescência apresentada por este metal, contrariando sua expectativa inicial.

Na Entrega do Prêmio Nobel, Pierre Curie Discursa pela Paz

Pierre Curie, cientista francês, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física juntamente com sua esposa, Marie Sklodowska-Curie, e Henri Becquerel. A escolha destes cientistas foi devida à descoberta da radioatividade, palavra inventada por Mme. Curie.

Pierre encerrou seu discurso de agradecimento com palavras de otimismo: *“Pode-se ainda conceber que, em mãos criminosas, o rádio (elemento químico por nós descoberto) venha a tornar-se bastante perigoso, e aqui podemos indagar-nos se é*



Pierre Curie

vantajoso para a humanidade conhecer os segredos da natureza, se está madura para usufruir desses segredos ou se esse conhecimento lhe será nocivo... No entanto, estou entre aqueles que pensam, como Nobel, que a humanidade extrairá mais bem do que mal das novas descobertas”.

OS CURIE

Pierre Curie era pesquisador e lecionava na Universidade de Genebra, Suíça. Sua esposa, Marie Curie, nasceu na Polônia e também era cientista. Eles se conheceram quando Marie ainda era estudante da Universidade de Sorbonne, em Paris. Casaram-se em julho de 1895, dois anos antes de Marie iniciar sua tese de doutorado.



Marie Curie

bastante ajudada por seu marido, Pierre. Examinando amostras de calcolita, doadas pelo *Musée d'Histoire Naturelle*, puderam concluir que este mineral de urânio era bastante radioativo quando extraído do solo. Reproduziram a calcolita a partir de substâncias puras em laboratório e descobriram que a calcolita artificial não apresentava a mesma atividade do minério natural.

O assunto escolhido por Marie, uma sugestão de Pierre, foi o "novo fenômeno" descoberto por Becquerel. Marie, assim como Becquerel, utilizava o urânio em seus estudos e logo conseguiu verificar que a intensidade da radiação do urânio era proporcional ao total de urânio existente no composto e independente de sua forma química. Então concluiu que a emissão dos "raios Becquerel" era uma propriedade do átomo de urânio.

Obstinada em suas experiências, Marie decidiu examinar todos os elementos então conhecidos. Descobriu que somente o tório emitia raios semelhantes ao urânio.

O novo direcionamento nas pesquisas de Mme. Curie era medir a intensidade das radiações emitidas pelos minérios naturais de urânio. Neste seu novo intento, Marie foi

IMPUREZA RADIOATIVA

A única explicação encontrada por Mme. Curie para a diferença de radioatividade entre a calcolita artificial e a natural era a existência de uma impureza altamente radioativa.

Trabalhando no tratamento de um minério de urânio, a pechblenda, ainda mais radioativo, logo conseguiram isolar uma pequena parte de um produto altamente radioativo. Este produto estava longe de ser um elemento puro e, de fato, era apenas uma impureza saída de uma das amostras, mas sua alta radioatividade indicava a existência de um novo elemento. Mme. Curie propôs, então, que se este novo elemento viesse a ser isolado e caracterizado, receberia o nome de Polônio, em homenagem à sua terra natal. Veja na Figura 2.1 um esquema do trabalho realizado por Mme. Curie.

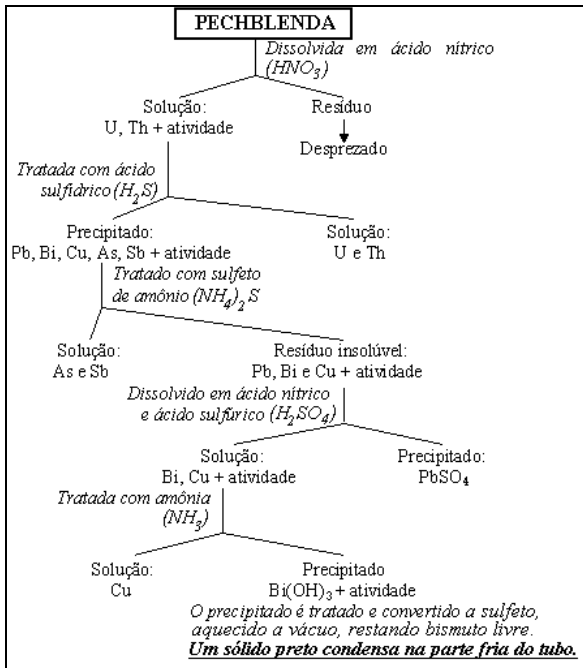


Figura 2.1: trabalho realizado pela Mme. Curie que possibilitou a descoberta do Polônio.

Continuando as análises químicas dos vários minérios de urânio, descobriram um novo elemento químico, *o rádio*, este elemento do grupo do bário e de alta radioatividade foi isolado mediante cristalização fracionada.

Foi nesta época que Mme. Curie deu o nome de *radioatividade* à propriedade que o rádio e outros elementos instáveis apresentam de emitir radiações espontaneamente ao se desintegrarem.

Vamos reproduzir agora uma breve cronologia da descoberta da radioatividade.

1895 - (Dezembro) W. Roentgen descobre os raios X.

1896 - (Fevereiro) H. Becquerel descobre radiações penetrantes originadas de sais de urânio fluorescente. Em março relata que não é necessário expor os sais ao sol para que se produzam os raios do urânio. Em maio afirma que os raios são indiferentes à forma química do elemento.

1897 - (Dezembro) M. Curie começa a trabalhar com os “raios de Becquerel”.

1898 - (Fevereiro) G. Schmidt descobre a radioatividade do tório.

(Abril) Marie Curie, de forma independente, também descobre a radioatividade do tório.

(Julho) Marie e Pierre Curie descobrem o Polônio.

(Dezembro) G. Bémont, M. e P. Curie anunciam a descoberta do rádio.

1899 - A. Debiere descobre o Actínio.

1900 - H. Becquerel afirma que os raios beta são elétrons e, juntamente com Villard, que a radiação gama é de natureza eletromagnética.

1902 - (Março) M. Curie isola 120 mg de cloreto de rádio, espectroscopicamente livre de bário.

(Julho) M. Curie relata o peso atômico do rádio.

(Julho) E. Rutherford e F. Soddy propõem a hipótese de que a radioatividade envolve transformações espontâneas de átomos de um elemento em átomos de outro.

P. Curie, A. Debiere e H. Becquerel descobrem que as radiações afetam substâncias químicas e causam danos biológicos.

1903 - E. Rutherford mostra que partículas α são átomos de hélio ionizados.

(Junho) M. Curie doutora-se em ciências.

(Dezembro) H. Becquerel, M. e P. Curie ganham a terceira edição anual do Prêmio Nobel de Física por seus trabalhos com a radioatividade.

MÓDULO 2

RADIOATIVIDADE - PRINCÍPIOS GERAIS

TEXTO B - Radioatividade natural

Quando um isótopo radioativo se transforma em outro não estável, depois em outro, e assim sucessivamente, até chegar a um estável, temos uma família ou série radioativa.

Embora existam atualmente muitas séries radioativas obtidas artificialmente, na natureza existem apenas três séries importantes. Estas séries têm início com os isótopos ^{235}U , ^{238}U e com o ^{232}Th , por isso estes nuclídeos, muitas vezes são chamados núcleos pai. Os últimos nuclídeos destas séries são, respectivamente, ^{207}Pb , ^{206}Pb e ^{208}Pb , isótopos do elemento de número atômico 82, o chumbo (Pb).

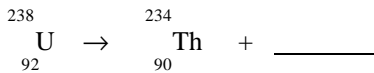
Na Figura 2.2 podemos ver a série de decaimentos radioativos que se origina do ^{238}U .

O núcleo, ao se desintegrar, pode emitir diferentes radiações, que podem ser ondas eletromagnéticas ou partículas radioativas. Estas podem causar mudanças no número atômico, no número de massa, ou mesmo em ambos. Ao emitir partículas α , o núcleo perde dois prótons e dois nêutrons. Já com a emissão de partículas β^- ocorre o acréscimo de uma unidade no número atômico. Um nêutron se transforma em um próton, que fica no núcleo, e em um elétron, a própria partícula β^- , que é emitido pelo núcleo.



Atividades

Na Figura 2.2, as linhas claras e escuras representam diferentes tipos de desintegração. Levando-se em conta o que já foi aprendido, complete as equações de transformação nuclear:



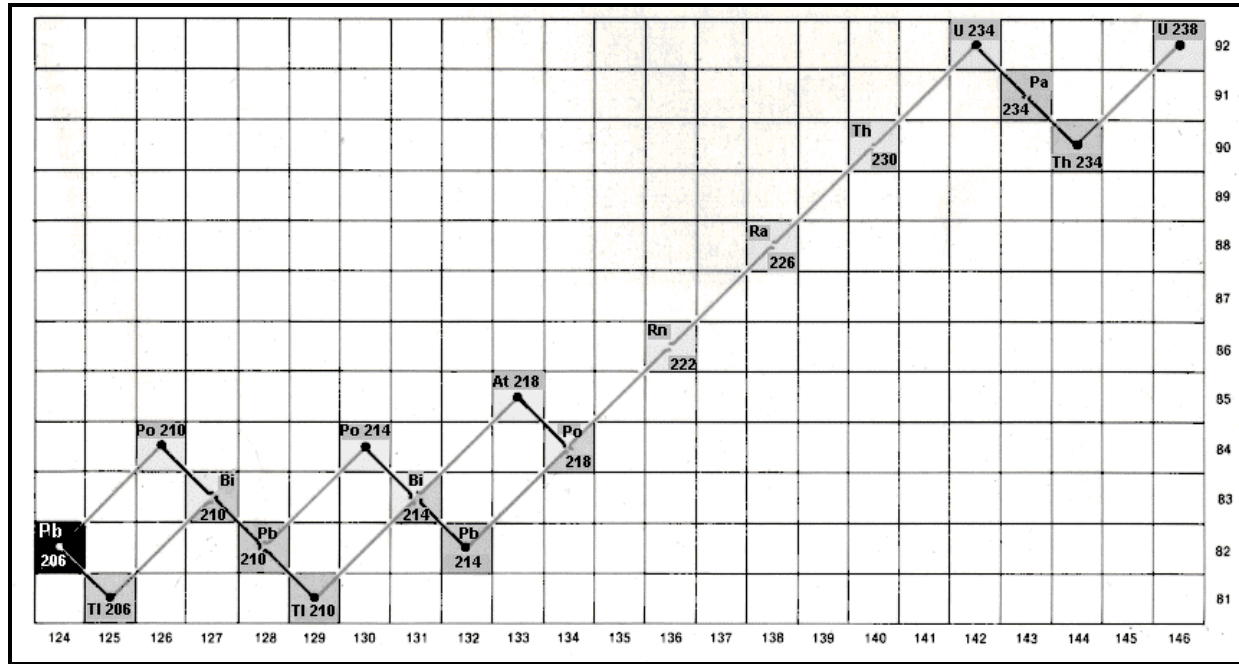
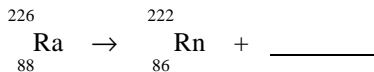
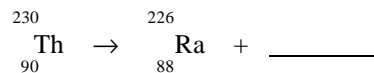
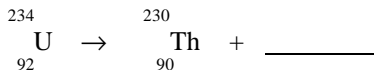
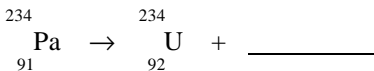
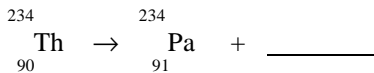


Figura 2.2: "Família" radioativa do ^{238}U . São apresentadas na vertical o número de prótons, e na horizontal, o número de nêutrons.



Complete as lacunas seguintes:

Pode-se dizer, desta forma, que as linhas claras representam a emissão de partículas _____ e que as linhas escuras representam a emissão de partículas _____.

Como podemos ver na série de desintegrações, o ${}^{238}\text{U}$ origina um isótopo do rádio. Isto explica o fato de Mme. Curie ter descoberto o rádio a partir de amostras de pechblenda, um minério de urânio.

O urânio metálico é muito reativo e, quando aquecido, combina-se diretamente com oxigênio e muitas outras substâncias, assim aparecendo na natureza. Vários materiais contêm urânio, mas os principais são: pechblenda (também conhecida como uranita, um óxido de urânio preto e opaco), autunita (complexo de fosfato de cálcio e urânio) e torianita (óxido de urânio e tório). Os maiores depósitos destes minerais estão no Canadá, Estados Unidos, França, África do Sul, Sri Lanka e na ex-União Soviética. O urânio é um material dúctil (pode ser reduzido a fios) e também muito maleável (pode ser facilmente laminado). Sua aparên-cia é a de um lustroso

metal prateado, de ponto de fusão 1850^o C e ponto de ebulição 3500^o C.

P

Como é possível ainda existir urânio (^{238}U) na natureza, se ele sofre espontâneas e contínuas desintegrações radioativas ?

UNIDADES DE MEDIDA DE RADIAÇÃO

Com a descoberta da radioatividade e dos efeitos biológicos que este fenômeno acarreta, se fez necessária a criação de unidades que pudessem traçar algum parâmetro comparativo entre unidades, efeitos biológicos e energias de diferentes radiações.

Diferentes núclídeos radioativos possuem diferentes velocidades de desintegração. Esta velocidade chama-se *atividade*, que representa o número de desintegrações nucleares sofridas por um núclídeo na unidade de tempo. Quando o núclídeo apresenta uma desintegração por segundo, diz-se que sua atividade é de 1 Becquerel (Bq).

Outra unidade importante é a da energia absorvida por um certo material quando a radiação ionizante o atinge. Quando a energia de 1 Joule (J) é absorvida por um quilograma (Kg) de material, diz-se que a dose absorvida é de um Gray (Gy). A energia, porém, não é suficiente para caracterizar os danos provocados pela radiação em organismos vivos. A distribuição destes danos depende da energia, da massa e da carga da radiação.

Para expressar estes danos existe uma outra unidade chamada Sievert (Sv). Por exemplo: uma dose de 1 Gy para radiação gama faz menos danos nos tecidos vivos que a mesma dose absorvida de radiação alfa. Este fator que qualifica o efeito de cada tipo de radiação é chamado fator de qualidade e deve ser multiplicado pela dose absorvida (Gy) para se obter a dose equivalente em Sv. Normalmente, no caso das radiações gama, X e beta, este fator é igual a 1; já no caso das radiações alfa, é igual a 20. A Figura 2.3 mostra as diversas unidades radiológicas existentes.

No entanto, o uso destas unidades do Sistema Internacional (SI) é relativamente recente. Há outras unidades para expressar os mesmos efeitos, que ainda são muito usadas. Abaixo fazemos um comparativo entre unidades.

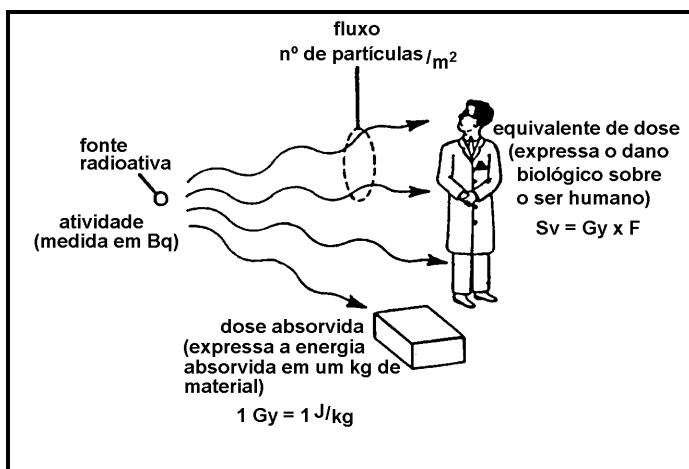


Figura 2.3: relações entre as unidades de medida de radiação

O Curie (Ci) é uma unidade para a atividade, um Ci é igual a $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (1 Ci foi originalmente definido como a atividade de 1g de rádio e o nome é uma homenagem a Mme Curie);

O Roentgen (R) expressa a quantidade de ionizações produzidas no ar (na CNTP) por raios X e gama, e equivale a $1,6 \cdot 10^{15}$ pares de íons / Kg;

O “rad”, assim como o Gray, é usado para expressar a dose absorvida, a relação entre essas unidades é $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$;

O “rem”, assim como o Sievert, expressa o dano biológico causado pela radiação. O “rem” é a quantidade de qualquer radiação que, absorvida pelo homem, produz efeito semelhante ao da absorção de um Roentgen de raios X ou gama. $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

MÓDULO 2

RADIOATIVIDADE - PRINCÍPIOS GERAIS

TEXTO C - Meia-Vida

Voltando à pergunta feita no texto anterior: “Como é possível ainda existir urânio (^{238}U) na natureza, se ele sofre espontâneas e contínuas desintegrações radioativas ?”

A resposta é simples, não há desintegração de todos os átomos de uma amostra ao mesmo tempo, ou seja, somente uma parte do ^{238}U sofre decaimento em um certo intervalo de tempo.

MEIA VIDA

É difícil precisar quando ocorrerá decaimento de um certo radionuclídeo. Isso pode acontecer logo ou somente daqui a centenas de anos. No entanto, cada tipo de nuclídeo possui uma atividade típica, que é o número de desintegrações por unidade de tempo, ou seja, a velocidade do decaimento. Assim, uma dada fração de átomos radioativos sempre decairá em um determinado tempo. O tempo correspondente ao decaimento da metade dos átomos de uma amostra radioativa é chamado tempo de meia-vida, ou simplesmente, meia-vida.

Na Tabela 2.1 podemos ver a meia-vida de alguns nuclídeos da série radioativa do ^{238}U .

Tabela 2.1: Meia-vida e atividade de alguns nuclídeos

Nuclídeo	Meia-vida	Atividade (em Bq)*
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ anos	$1,24 \times 10^4$
^{234}Th	24,5 dias	$8,45 \times 10^{16}$
^{234}Pa	6,7 horas	$7,41 \times 10^{18}$
^{234}U	$2,7 \cdot 10^5$ anos	$2,10 \times 10^{10}$
^{218}Po	3 minutos	$1,07 \times 10^{21}$
^{210}Bi	5 dias	$4,60 \times 10^{17}$
^{210}Pb	19,4 anos	$3,25 \times 10^{14}$
^{206}Tl	4,3 minutos	$7,84 \times 10^{20}$

* Atividade em 100 g de amostra

P

Observe a Tabela 2.1. Qual a relação que pode ser feita entre a atividade e a meia-vida de um determinado radionuclídeo?

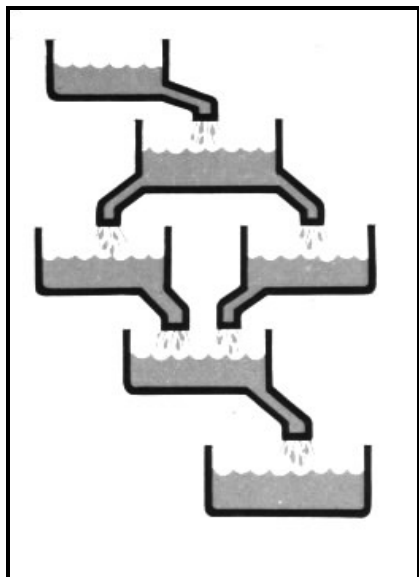


Figura 2.4: os reservatórios representam a série de decaimentos radioativos

A IDADE DA TERRA

Um dos processos utilizados para estimar a idade da Terra baseia-se na comparação das quantidades de urânio e chumbo presentes em minérios de urânio, que acredita-se existirem desde a formação do planeta. O chumbo presente nesses minérios provém do decaimento do isótopo ^{238}U , que se processa através de uma série de emissões radioativas, terminando na formação do isótopo ^{206}Pb , estável.

Nesta série cada átomo de chumbo 206 provém de um átomo de urânio 238. Assim, o número de átomos de ^{206}Pb presentes em um minério de urânio

Da mesma forma que para o Urânio, só uma fração do ^{234}Th formado a partir dele é que vai se transformar em ^{234}Pa , e assim por diante.

A Figura 2.4, ao lado, é uma analogia do que ocorre com uma série de desintegrações radioativas. Um primeiro reservatório (núcleo-pai), que está cheio, alimenta outros, em cadeia, até chegar ao reservatório fechado (o elemento estável).

No princípio só o primeiro reservatório (^{238}U) está cheio. Depois de algum tempo, cada reservatório intermediário passa a ter nível constante, pois perde tanto quanto ganha. Somente depois de muito tempo é que o último reservatório (elemento estável) fica cheio. Partindo do ^{238}U , pode ser determinada a proporção de cada elemento da série.

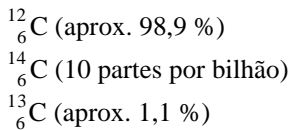
(pechblenda, por exemplo) indica o número de átomos de ^{238}U que sofreu decaimento.

Dados referentes à análise de minérios de urânio conduzem a aproximadamente $2,8 \cdot 10^9$ anos para a idade da Terra. Outros tipos de cálculo levam a valores diferentes, mas todos de mesma ordem de grandeza.

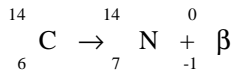
DETERMINAÇÃO DA IDADE DE FÓSSEIS

Do mesmo modo que a meia vida do urânio permite a estimativa da idade da terra é possível verificar a idade de fósseis a partir da determinação da quantidade de isótopo 14 do carbono que o fóssil ainda possui.

No gás carbônico atmosférico encontram-se três isótopos do elemento carbono, nas seguintes proporções:



Desses isótopos, apenas o ^{14}C é radioativo, transformando-se continuamente em nitrogênio 14 através de emissão beta:



Apesar desse decaimento, o teor de ^{14}C na atmosfera é praticamente constante, o que se deve principalmente à reação resultante do choque de átomos de nitrogênio atmosférico com nêutrons provenientes dos raios cósmicos, formando ^{14}C .

As plantas, ao realizarem fotossíntese, incorporam os isótopos do carbono na mesma proporção em que são encontrados no CO_2 atmosférico. A fotossíntese é um conjunto de reações químicas, e como estas envolvem apenas alterações na eletrosfera, não há distinção ou preferência por isótopos radioativos ou não radioativos. Os animais, através das mais diferentes cadeias alimentares, incorporam átomos de carbono na mesma proporção em que estão nas plantas e na atmosfera (Figura 2.6).

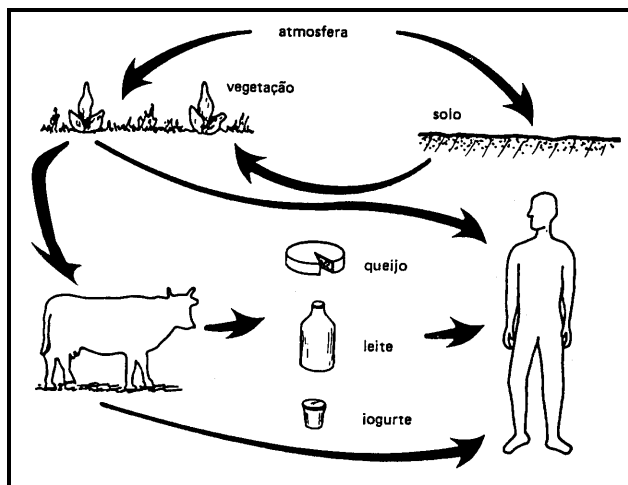


Figura 2.6: transferência de átomos de carbono

A partir do momento em que uma planta ou animal morre, deixa de incorporar átomos de carbono: o teor de ^{14}C começa a diminuir, caindo à metade a cada 5600 anos (Figura 2.7).

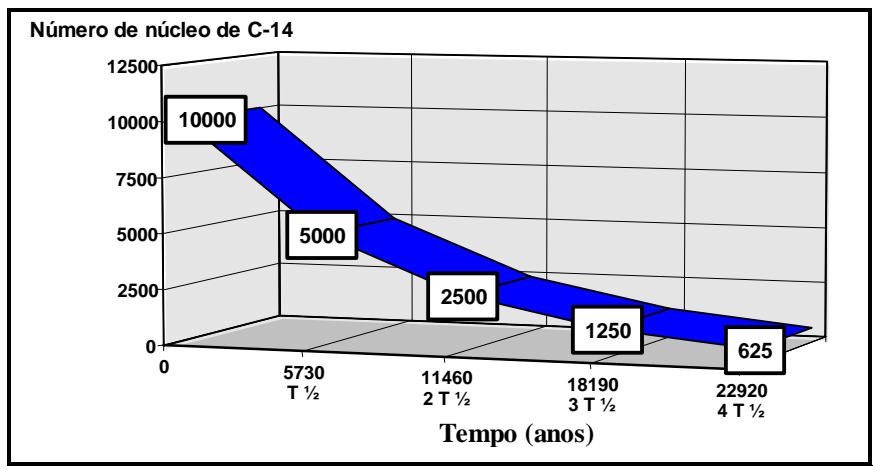


Figura 2.7: curva de decaimento do isótopo de massa 14 do carbono

Para determinar a idade de um fóssil busca-se, portanto, o teor de ^{14}C . Com este valor encontra-se, a partir da curva de decaimento, quanto tempo já se passou desde que o ser vivo morreu. Para este método de datação deve-se observar a necessidade da meia-vida do radionuclídeo escolhido ser da mesma ordem de grandeza da idade presumível do que se pretende datar. A meia-vida do ^{14}C é da ordem de 5.500 anos e já foi utilizado na datação de fósseis com 9000 e 11000 anos, por exemplo.

MÓDULO 3

RADIAÇÃO - ALGUMAS APLICAÇÕES

TEXTO A - Radiação de fundo

O urânio, o tório, o rádio, o polônio e outros elementos, são radioativos e se encontram combinados aos mais diversos elementos, podendo ser encontrados, em diferentes quantidades, em rochas, nas praias, nas águas do mar e fluviais. O isótopo 40 do potássio (^{40}K), radioativo, pode inclusive ser encontrado no corpo humano.

Na atmosfera terrestre existem gases radioativos originados das séries radioativas. Os gases de maior importância, devido à sua maior meia-vida, são os isótopos do gás nobre radônio, $^{222}_{86}\text{Rn}$ e $^{220}_{86}\text{Rn}$ (que antigamente se chamava torônio, pois é originado na série radioativa do tório). Estes gases possuem meia-vida de $3,5 \cdot 10^5$ e 55 segundos, respectivamente, e se originam a partir do decaimento dos isótopos 226 e 224 do rádio.

Portanto, estes elementos, e os gases originados a partir deles, são fontes naturais de radiação. A soma das intensidades das radiações (atividades) provenientes destas diversas fontes é chamada radiação de fundo.

TÓRIO E URÂNIO NA NATUREZA

O tório e o urânio não existem livres na natureza, ocorrendo somente combinados a outros metais. O urânio é 40 vezes mais abundante que a prata e 800 vezes mais que ouro, no entanto, possui jazidas muito dispersas, o que não acontece com o tório.

Os principais produtores mundiais destes metais são os Estados Unidos, a África do Sul, a Austrália, o Canadá e a França. No Brasil encontra-se urânio economicamente explorável em Minas Gerais. O tório pode ser encontrado nas areias monazíticas, que existem na orla marítima do Rio de Janeiro, da Bahia, do Rio Grande do Norte, do Maranhão e, principalmente, no Espírito Santo.

A monazita é o mais importante mineral das terras raras; é essencialmente um fosfato de terras céricas (elementos similares ao cério) com alguma quantidade de tório e

contendo, normalmente, óxidos de cério, tório, zircônio e ítrio. O tório não é um elemento das chamadas terras raras, mas na natureza se encontra associado a estes elementos. A monazita dentrítica, originada pelos intemperismos e erosões, pode ser encontrada junto a orla marítima, misturada às areias, ou em depósitos fluviais.

As áreas do Brasil que possuem maior intensidade de radiações, ou seja, apresentam uma alta radiação de fundo, são justamente as áreas nas quais se encontram depósitos de urânio e tório (veja Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Radiação de fundo em localidades brasileiras

CIDADE (ESTADO)	K	U	Th	SOMA
Guarapari (ES)	NI	0,09-0,93 (0,45)	1,26-16,81 (5,22)	(5,67)
Meaípe (ES)	NI	0,29-5,53 (1,83)	2,96-44,37 (17,28)	(19,11)
Poços de Caldas (MG)	0,07-0,72 (0,30)	0,28-8,39 (2,95)	0,68-3,14 (2,25)	(5,50)
Angra dos Reis (RJ)	0,10-0,23 (0,16)	0,07-0,61 (0,34)	0,10-1,73 (0,76)	(1,26)
Rio de Janeiro (RJ)	(0,32)	(0,08)	(0,60)	(1,00)

Notas:

1) Os valores da tabela estão em mSv/ano;

2) NI significa: "não identificado";

3) Os números entre parênteses são as médias das várias medições feitas em diferentes locais;

4) Na coluna "SOMA" está o somatório das radiações dos diferentes núclídeos;

5) Foram feitas medições na cidade do Rio de Janeiro apenas para efeito comparativo.

Os gases radioativos se misturam à atmosfera terrestre, assim o vento, a chuva e a poluição influem na sua dispersão pelo planeta. No entanto, maiores atividades serão encontradas em regiões que, por motivos geológicos ou geoquímicos, possuam maiores concentrações destes gases, ou dos elementos radioativos que os originam.

P

Explique porque a radiação de fundo é maior no continente do que nos oceanos. E, como é a atividade de cavernas e grutas em relação ao ar atmosférico? Maior ou menor? Por quê?

OS RAIOS CÔSMICOS

O ar atmosférico é continuamente ionizado devido a sua capacidade de descarregar eletricamente corpos carregados. A presença de substâncias radioativas na terra, e algumas vezes também na atmosfera, sugere a idéia da ionização do ar como uma consequência da radiação emitida por estas substâncias.

Embora a proporção dos gases radioativos na atmosfera diminua com o aumento da distância do chão, a ionização do ar atmosférico não diminui com o aumentar da distância do chão. Pelo contrário, aumenta!

Uma experiência feita com balões mostrou, através de instrumentos para medida de ionização específica, que a ionização aumenta nos altos níveis da atmosfera. Uma explicação que pode ser dada é que a radiação presente na atmosfera não é de origem terrestre. As verdadeiras origens dessas radiações ainda não foram descobertas. Sabe-se somente que vêm do espaço cósmico; do Sol e, em maior parte, de fora do sistema solar.

Com observações efetuadas por intermédio de foguetes e satélites, foi possível concluir que os raios cósmicos são núcleos de elementos químicos. Núcleos de hidrogênio e hélio foram observados com maior frequência. Os núcleos de hidrogênio constituem 79% de todos os raios cósmicos; os núcleos de hélio (partículas alfa), 20%; os núcleos de carbono, nitrogênio e oxigênio, 0,7% e os 0,3% restantes são devidos a núcleos de número atômico (Z) maior que dez.

Os raios cósmicos são átomos que, depois de perderem seus elétrons, propagam-se pelo espaço com velocidades muito grandes, próximas à da luz. Quando estes raios penetram na atmosfera se chocam violentamente com os gases que a compõe, originando nuclídeos radioativos, entre os quais podemos destacar o trítio (^3H), o ^{14}C e o ^7Be . De importância secundária são o ^{22}Na , ^{32}P , ^{35}S e ^{39}Cl , por exemplo.

A concentração de trítio na água dos rios é de um átomo para cada 2×10^7 átomos de hidrogênio. O ^{14}C existe na atmosfera sob a forma de CO_2 e interage com os organismos vivos incorporando-se às moléculas que formam a matéria viva. A atividade referente a este nuclídeo é de 0,287 Bq/g de carbono na matéria viva.

RADIOATIVIDADE EM DIFERENTES MATERIAIS

A radioatividade dos alimentos (sólidos e líquidos) varia devido ao local de procedência e ao processo de elaboração, pois tanto o solo como a água e os aditivos utilizados contêm elementos radioativos que são passados para os alimentos de acordo com suas concentrações. Desta forma, o próprio organismo humano pode incorporar estes elementos radioativos.

O potássio, o carbono e o hidrogênio são indispensáveis à vida. Todos estes elementos possuem isótopos radioativos na sua composição isotópica natural. A ingestão de alimentos ou água, que contêm estes elementos, leva a um acúmulo de substâncias radioativas dentro do corpo humano. Na Tabela 3.2 podemos ver a dose recebida, em Sievert por ano, devido a estes nuclídeos e outros mais pesados, como o ^{210}Pb e ^{226}Ra . O chumbo deposita-se em vegetais, entrando no corpo humano pela ingestão alimentar. O rádio (Ra), devido à sua semelhança com o cálcio, fixa-se nos ossos.

Tabela 3.2: Radioatividade no interior do organismo

NUCLÍDEO RADIOATIVO	DOSE (mSv / ano)
^{40}K	0,150
^{226}Ra	0,010
^{210}Pb	0,003
^{14}C	0,010

Os mais diversos tipos de materiais utilizados pelo homem apresentam uma atividade própria, já que são feitos a partir de substâncias existentes na crosta terrestre, assim serão radioativos em maior ou menor grau, dependendo de sua procedência. Na Figura 3.1 é dado um exemplo de como a radiação se encontra em tudo que nos cerca.

PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

O principal objetivo da proteção radiológica é evitar a ação dos efeitos danosos da radiação sobre os indivíduos, seus descendentes e a humanidade.

Devido ao alto poder de penetração das radiações e ao seu efeito ionizante, foram delineados limites máximos para a dose recebida (Sv) por trabalhadores e população em geral.

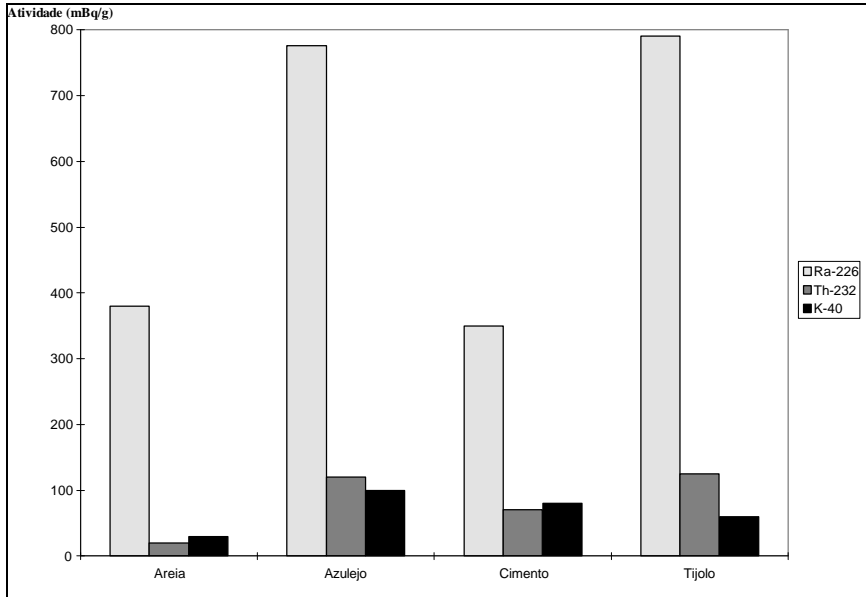


Figura 3.1: atividade de alguns materiais de construção civil.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica recomenda os seguintes níveis máximos de dose de radiação que uma pessoa pode estar sujeita a receber:

- ◆ para trabalhadores que lidam com radiação a dose equivalente anual deve ser inferior a 50 mSv, para irradiação uniforme do corpo todo;
- ◆ em exames radiológicos, nenhum tecido deve receber mais que 500 mSv ao ano. A dose máxima para o tecido cristalino, responsável pela visão é de 150 mSv ao ano;
- ◆ o nível máximo permitido de radiação para indivíduos que residam próximos às áreas com alta radiação de fundo é de 5 mSv ao ano;
- ◆ a população como um todo não pode estar sujeita a doses maiores que 50 mSv em um período de 30 anos.

Deve-se ter em vista que estes valores são preventivos, já que se sabe que a dose tolerável é de 0,3 mSv/h, enquanto que devido a radiação natural de fundo se tem uma dose equivalente de cerca de 2,4 mSv/ano. Uma dose de 1 Sv pode causar náusea e vômitos, não sendo fatal.

Nos diagnósticos médicos são utilizadas diferentes radiações, entre elas os Raios X. A Tabela 3.3 trás as doses equivalentes absorvidas durante estes diagnósticos.

Tabela 3.3: Doses equivalentes absorvidas em cada chapa de Raio X em diagnóstico médico-odontológicos.

DIAGNÓSTICO	DOSE EQUIVALENTE ABSORVIDA
Tuberculose	0,4 a 1,2 mSv
Câncer no estômago	10 mSv
Odontológico	20 a 150 mSv

P

Compare os valores constantes na Tabela 3.1 com os dados referentes a proteção radiológica. O que pode ser dito a respeito da radiação de fundo no Brasil ?

MÓDULO 3

RADIAÇÃO - ALGUMAS APLICAÇÕES

TEXTO B - Reações Nucleares

A interação dos raios cósmicos com a atmosfera provoca, em alguns casos, transmutações nucleares. Destas transmutações se originam o ^{14}C e o trítio (^3H), entre outros elementos de importância secundária. O estudo destas e de outras transmutações nucleares e das reações pelas quais elas se processam levou o homem ao desenvolvimento dos métodos de fabricação de radioisótopos artificiais. Assim, os cientistas acabaram por realizar o velho sonho dos alquimistas: transformar um elemento em outro.

Em muitas reações nucleares, um núcleo alvo é exposto a um feixe de partículas, que podem ser prótons, nêutrons, deutérios e partículas alfa, ou a um feixe de raios gama. Um novo núcleo é formado, normalmente junto a outras partículas leves. Algumas das reações que podem ocorrer com o ^{238}U são mostradas abaixo:

<u>Reação</u>	<u>Notação Simbólica</u>	
$^{238}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{239}\text{U} + \gamma$	$^{238}\text{U} (\text{n}, \gamma) ^{239}\text{U}$	(1)
$^{238}\text{U} + \text{p} \rightarrow ^{238}\text{Np} + \text{n}$	$^{238}\text{U} (\text{p}, \text{n}) ^{238}\text{Np}$	(2)
$^{238}\text{U} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{239}\text{U} + \text{p}$	$^{238}\text{U} (\text{d}, \text{p}) ^{239}\text{U}$	(3)
$^{238}\text{U} + \gamma \rightarrow \text{produtos de fissão}$	$^{238}\text{U} (\gamma, \text{pf})$	(4)
$^{238}\text{U} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{248}\text{Cf} + 2 \text{n}$	$^{238}\text{U} (^{12}\text{C}, 2\text{n}) ^{248}\text{Cf}$	(5)

A seguir é apresentado um estudo mais detalhado de cada tipo de reação nuclear.

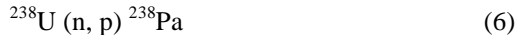
REAÇÕES COM NÊUTRONS

As reações nucleares provocadas pelo bombardeamento de nêutrons são, atualmente, muito importantes para a produção artificial de radioisótopos, principalmente por duas razões:

- Ø os nêutrons não sofrem influência da barreira coulômbica (eletrostática) criada pela carga positiva do núcleo. Como não possuem carga, não são repelidos pelo núcleo; assim, conseguem entrar no núcleo com grande facilidade.
- Ø as próprias reações nucleares são fontes abundantes de nêutrons.

Quando um nêutron reage com um núcleo de ^{238}U (equação 1), formando o isótopo 239 do urânio, ocorre um aumento da energia que existe dentro do núcleo. Este crescimento de energia é chamado *excitação*. O excesso de energia nuclear é eliminado por um processo de desexcitação nuclear, com a emissão de raios gama (γ).

No entanto, a reação entre o núcleo de ^{238}U e um nêutron pode gerar outros elementos ou isótopos:

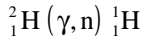


Todas estas reações podem ocorrer, algumas com maior chance que outras. Na reação 10, não chega a acontecer uma transmutação nuclear. O nêutron que é projetado colide com o núcleo e “reflete”: ocorre um espalhamento deste nêutron. Em alguns casos este nêutron pode chegar a excitar o núcleo, transferindo parte de sua energia, quando do choque.

O tipo de reação mais importante provocada por nêutrons é a fissão nuclear induzida (representada pela equação 8). Um nêutron de energia térmica baixa (da ordem de 0,03 eV) provoca no núcleo uma excitação bastante grande, capaz de levar à fissão nuclear. O núcleo original, então, racha-se em dois ou mais núcleos pequenos, junto a outras partículas leves, inclusive nêutrons. Os produtos da fissão podem ser radioativos, decaindo pela emissão de partículas β^- ou de radiação γ . A Figura 3.2 representa uma reação de fissão nuclear.

REAÇÕES FOTONUCLEARES

Reações nucleares provocadas por raios X ou gama (como a da equação 4) de alta energia (maiores que 1 MeV) são chamadas de reações fotonucleares. Nêutrons são obtidos através da incidência de raios gama sobre o núcleo do dêuteron:



Partículas alfa também podem ser obtidas através deste tipo de reação nuclear:

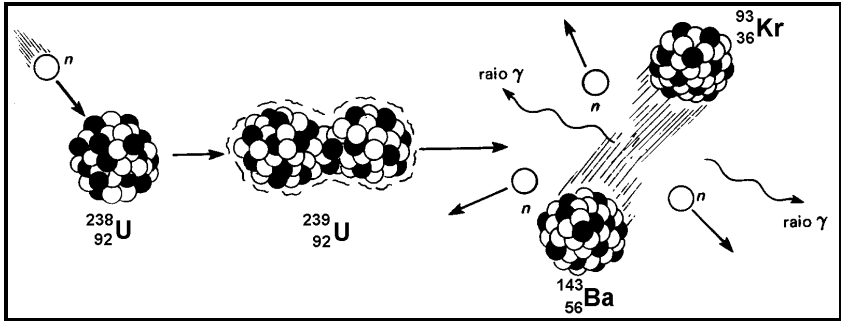
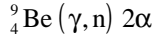


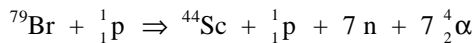
Figura 3.2: fissão do núcleo de urânio

REAÇÕES COM PARTÍCULAS CARREGADAS

Partículas como prótons, dêuterons e núcleos de outros elementos são carregadas positivamente, portanto sofrem repulsão eletrostática quando se aproximam do núcleo, também carregado positivamente. Para superar esta repulsão é necessário que estas partículas possuam grande energia.

Para que as reações 2 e 3 possam acontecer, as partículas (neste caso próton e dêuteron, respectivamente) devem ser aceleradas até acumularem energia cinética capaz de superar a repulsão eletrostática.

Quando a energia destas partículas for muito grande, poderá ocorrer um rompimento do núcleo bombardeado, originando um outro núcleo bem menos pesado e muitos outros núcleos bastante leves. Por exemplo, a reação do ${}^{79}\text{Br}$ com o próton origina ${}^{44}\text{Sc}$, outro próton, nêutrons e partículas alfa:



ACELERADOR DE PARTÍCULAS

Para que as partículas carregadas consigam adquirir a energia cinética necessária à produção de reações nucleares, utilizam-se máquinas chamadas

aceleradores de partículas. Entre os vários tipos de aceleradores podemos destacar o acelerador linear e o cíclotron.

O cíclotron foi a primeira máquina utilizada na aceleração de partículas, seu princípio de funcionamento foi descoberto em 1929 por Ernest O. Lawrence. Um esquema do cíclotron pode ser visto na Figura 3.3.

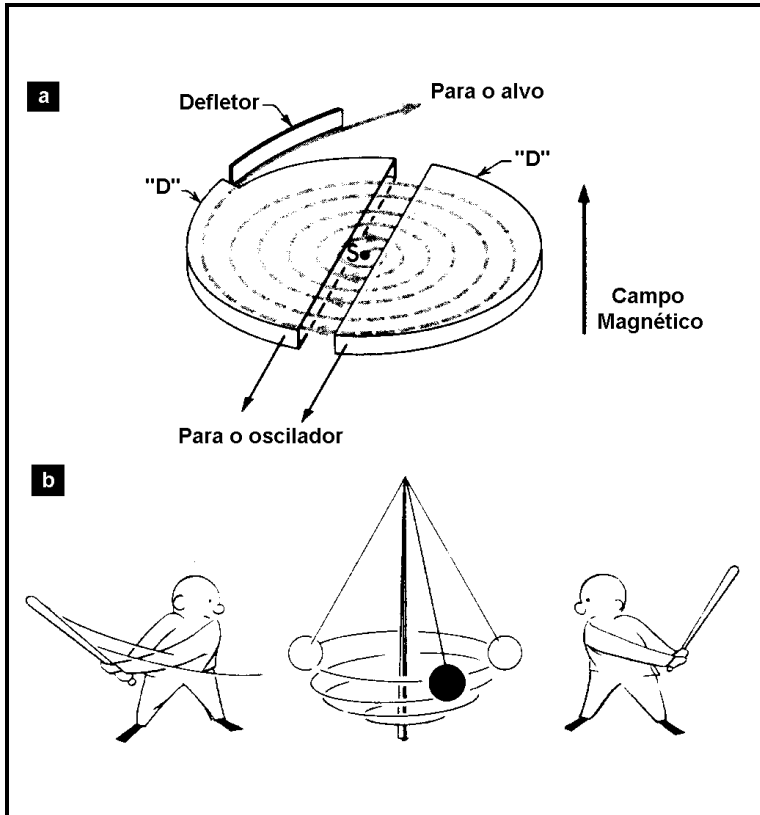


Figura 3.3: (a) esquema dos "D's" do cíclotron. A fonte de íons está indicada por S. (b) analogia para mostrar como as partículas são aceleradas. A bola representa as partículas, a corda e a estaca representam o campo magnético, que faz com que as partículas se mantenham em uma trajetória espiral; os dois homens representam os "D's" e a rádio-freqüência, a qual provoca a aceleração.

Os eletrodos são constituídos por duas caixas ocas (denominadas D's em razão de sua forma). Esses eletrodos estão ligados a um oscilador de rádio-freqüência de tal forma que o potencial de um "D" é tornado alternadamente positivo e negativo um em relação ao outro. Os "D's" estão colocados entre os polos de um grande eletro-ímã e desta maneira a direção do campo magnético é perpendicular ao plano dos dois "D's".

Uma partícula carregada desloca-se com velocidade uniforme em um campo magnético, sofrendo a ação de uma força que faz com que a partícula se mova em uma órbita circular. Cada vez que a partícula atravessa o espaço entre os "D's" a sua energia aumenta em cerca de 50 KeV. Em cíclotrons muito grandes (que chegam a ter quilômetros de raio), a velocidade final das partículas aproxima-se da velocidade da luz.

No acelerador linear não se usa campo magnético, dessa maneira as partículas deslocam-se em trajetórias lineares. Em vez de se usar um único eletrodo acelerador, usa-se um grande número de eletrodos. Um exemplo é o acelerador da Universidade de Stanford, que tem cerca de 3 Km de extensão, permitindo a aceleração de elétrons até 45 GeV. A Figura 3.4 faz uma analogia a este tipo de acelerador de partículas.

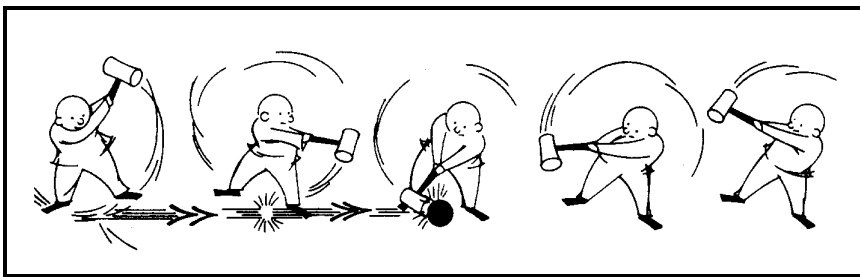
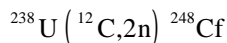


Figura 3.4: princípio da aceleração por impulsos repetidos, como no caso do acelerador linear

ELEMENTOS TRANSURÂNICOS

Na equação 5 tínhamos a seguinte reação nuclear:



onde o isótopo 238 do urânio é bombardeado com o núcleo do ${}^{12}\text{C}$, acelerado por um acelerador de partículas, resultando na transmutação para um novo elemento,

de número atômico 98, chamado califórnio. Este elemento é sintético, não existe na natureza, foi “criado” artificialmente pelo ser humano.

Utilizando-se reações nucleares é possível sintetizar outros elementos diferentes daqueles encontrados e conhecidos na natureza. Estes elementos podem ser sintetizados por diferentes modos: em reatores nucleares, nas explosões de bombas atômicas e nos aceleradores de partículas. Foi o domínio das técnicas de bombardeamento de núcleos atômicos que permitiu a descoberta de elementos químicos novos, chamados de elementos transu-rânicos, pois todos têm números atômicos (Z) maiores que o do urânio (Z=92), o último elemento da tabela periódica que se encontra na natureza.. Na Tabela 3.4 estão alguns destes elementos.

Tabela 3.4: Os elementos transurânicos

Número Atômico	Nome e Símbolo do Elemento	Processo da Primeira Preparação	Meia-vida*
93	Netúnio (Np)	Irradiação de urânio com nêutrons	$2,2 \times 10^6$ anos (^{237}Np)
94	Plutônio (Pu)	Bombardeamento de urânio com dêuterons	$2,4 \times 10^4$ anos (^{239}Pu)
95	Americío (Am)	Irradiação de plutônio com nêutrons	7400 anos (^{243}Am)
96	Cúrio (Cm)	Bombardeamento de plutônio com íons de hélio	$1,56 \times 10^7$ anos (^{247}Cm)
97	Berquélio (Bk)	Bombardeamento de amerício com íons de hélio	1380 anos (^{247}Bk)
98	Califórnio (Cf)	Bombardeamento de amerício com íons de hélio	350,6 anos (^{249}Cf)
99	Einstênio (Es)	Irradiação de urânio com nêutrons na primeira explosão termonuclear	401 dias (^{252}Es)
100	Férmio (Fm)	Na primeira explosão termonuclear	100,5 dias (^{257}Fm)
101	Mendelévio (Md)	Bombardeamento do einstênio com íons de hélio	55 dias (^{258}Md)
102	Nobélio (No)	Bombardeamento de cúrio com íons de carbono	58 minutos (^{259}No)

103	Laurêncio (Lr)	Bombardamento de califórnio com íons de boro	3 minutos (²⁶⁰ Lr)
-----	----------------	--	-----------------------------------

* Meia-vida do isótopo mais estável.

Glenn Seaborg, ganhador do Prêmio Nobel de Química em 1951 por seus trabalhos com os novos elementos químicos, lamentou a vinculação entre o Projeto Manhattan, que teve por objetivo construir a bomba atômica, e o descobrimento dos elementos transurânicos. De acordo com Seaborg: *“A pesquisa de elementos transurânicos (...) estava destinada a ser o início de uma série de eventos que, dentro de uma década, iriam abalar o mundo e explodir na consciência de cada ser humano. Estes acontecimentos foram as descobertas que conduziram à exploração da energia nuclear; particularmente como engenhos de destruição em massa. Outras descobertas científicas fundamentais sem dúvida tiveram igual ou maior efeito no modo de vida do homem, mas nenhuma lhe foi lançada à face como esta. O anúncio ao mundo da existência do plutônio ocorreu sob a forma da bomba nuclear jogada em Nagasaki e Hiroshima em agosto de 1945.”*

O plutônio foi o primeiro elemento sintetizado, pelo homem, em quantidades visíveis. Em virtude da sua propriedade de ser físsil e, portanto, ser útil como fonte de energia, é o elemento transurânico de maior importância. Assim como o ²³⁵U, o isótopo 239 do plutônio pode ser utilizado para a produção de energia elétrica ou de artefatos bélicos.

A possibilidade de identificação de substâncias com quantidades cada vez menores de matéria propiciou a descoberta de outros elementos transurânicos. Em 1952, nas cinzas da explosão de uma bomba termonuclear foi descoberto o elemento fêrmio com apenas 200 átomos ($8,5 \times 10^{-20}$ gramas).

As perspectivas para a produção indefinida de elementos transurânicos não são muito grandes, pois, com o crescimento do número atômico as meias-vidas tendem a ser cada vez menores, como pode ser observado na Tabela 3.4. Esta limitação decorre de uma instabilidade nuclear. O núcleo pesado, instável, fissiona-se espontaneamente, ou decai através da emissão de partículas alfa, limitando, assim, a produção de elementos transurânicos cada vez mais pesados.

No entanto alguns cientistas acreditam que possam encontrar uma relativa estabilidade em átomos com números atômicos maiores que 137, assim o trabalho com bombardamento de elementos transurânicos ainda prossegue.

MÓDULO 3

RADIAÇÃO - ALGUMAS APLICAÇÕES

TEXTO C - Aplicações de radioisótopos

Isótopos são átomos ou íons que possuem o mesmo número atômico (Z), mas diferentes números de massa (A). Quando radioativos são chamados de radioisótopos. Um radioisótopo de um elemento tem todas as propriedades químicas deste elemento. No entanto, em misturas isotópicas pode ser detectado em quantidade mínimas através de sua radioatividade.

Os radioisótopos são bastante importantes pois quando são incorporados a moléculas elas ficam “marcadas”, ou seja, podem ser identificadas por sua radioatividade, mas mantêm o mesmo comportamento químico da molécula não radioativa.

A molécula que possui um isótopo radioativo em sua estrutura pode ser usada como traçador para se conhecer, por exemplo, o caminho de uma reação química. O radioisótopo é acrescentado a um dos reagentes. Após a reação, verifica-se em qual dos produtos apareceu a radioatividade. Assim é possível descobrir o mecanismo pelo qual ocorreu a reação.

Tanto na medicina como na veterinária os radioisótopos são de grande utilidade. O fato de certos radioisótopos se concentrarem preferencialmente em determinados tecidos permite o diagnóstico e o tratamento de um ser vivo a partir da utilização de radioisótopos. O ^{45}Ca (radioativo), por exemplo, quando incorporado pelo organismo, permite esclarecer o processo de crescimento dos ossos e a forma através da qual o leite é produzido.

Parte da utilidade dos radioisótopos baseia-se em sua capacidade de provocar mutações genéticas. A isso se deve seu uso no combate a insetos, por exemplo.

Na Tabela 3.5 pode-se observar as diversas utilidades de alguns radioisótopos, que tanto podem ser empregados como traçadores ou como fontes de radiação.

Tabela 3.5: Radioisótopos na indústria e na pesquisa

RADIOISÓTOPO	USOS
Antimônio (^{124}Sb)	Como traçador na indústria petroquímica
Carbono (^{14}C)	Estudo da decomposição dos organismos
Césio (^{137}Cs)	No controle das emendas dos oleodutos Radiografia de componentes de máquinas Pesquisa da conservação de alimentos
Cobalto (^{60}Co)	No controle do desgaste de alto-fornos Combate aos insetos Destruição de parasitas Esterilização de instrumentos cirúrgicos Inibição da germinação de vegetais Pausterização de alimentos Hibridização de sementes
Enxofre (^{35}S)	Medida da espessura de folhas metálicas Estudo da corrosão de geradores termoeletrônicos a gás
Estrôncio (^{90}Sr)	No exame dos hábitos migratórios dos insetos
Ferro (^{59}Fe)	Na determinação do desgaste de molas Em pesquisas com a hemoglobina do sangue No estudo do crescimento das plantas
Fósforo (^{32}P)	No teste de resistência de borrachas Na pesquisa médica e biológica Estudo dos fertilizantes agrícolas
Hidrogênio (^3H)	Em sinais luminosos de estradas
Potássio (^{40}K)	Pesquisa biológica e médica
Sódio (^{24}Na)	Em investigações bioquímicas e

	pesquisas fisiológicas
Tálio (^{80}Tl)	Controle de emendas de oleodutos

AGRICULTURA

Na agricultura os radioisótopos podem ser usados desde o plantio até a conservação dos alimentos após a colheita, incluindo pesquisas no desenvolvimento de novas sementes e uso de fertilizantes.

O presente entendimento da fotossíntese, obtido através da técnica dos traçadores, somado a informações micrometeorológicas (velocidade dos ventos, impurezas do ar, temperaturas, etc) tem sido de grande valia. De posse destes dados, agrônomos podem selecionar locais para o melhor desenvolvimento das plantas, com boas quantidades de luz e dióxido de carbono (CO_2) e propícios efeitos de troca meteorológica.

Como já vimos, sementes híbridas podem ser produzidas por irradiação. Isso se deve ao fato das radiações provocarem mutações nos gens das plantas. Por estas mutações podem se formar novas espécies mais resistentes, como podemos ver na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Algumas sementes híbridas obtidas por irradiação

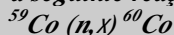
HÍBRIDO	VANTAGENS	AGENTE MUTAGÊNICO
Feijão Sanilac	Tipo de crescimento ereto Maior resistência às doenças	Raios X
Aveia Florad	Maior resistência às doenças	Nêutrons térmicos
Amendoim NC4X	Endurecimento da casca	Raios X
Cevada Pennrad	Resistência ao inverno	Nêutrons térmicos
Cravo Yukon 1	Menos pétalas Cabo mais longo	Raios γ

Durante o período de germinação e crescimento das plantas os fertilizantes são de grande importância. Utilizando-se fertilizantes com ^{32}P pode-se traçar o movimento do adubo, desde a absorção até sua distribuição, do solo

para o organismo da planta. Assim, é possível indicar qual o melhor adubo para determinada planta, onde deve ser aplicado e em que quantidade e época.

As pragas e insetos podem destruir totalmente uma lavoura. Para impedir que isso aconteça normalmente são utilizados defensivos agrícolas que, em muitos casos, são tóxicos também para os seres humanos. Uma técnica alternativa e não poluente consiste em esterilizar machos dos insetos e em seguida soltá-los para cruzarem com as fêmeas. Após algumas gerações, a praga já estará controlada (em algumas espécies isso leva poucos meses). Para a esterilização dos machos são utilizadas fontes de cobalto (^{60}Co).

O cobalto 60 se origina através da captura de nêutrons, segundo a seguinte reação:



O cobalto 60 é radioativo e decai por emissão de partículas β^- (0,31 MeV) e raios gama (1,3 MeV) para ^{60}Ni .

Após a colheita os alimentos são armazenados. Para evitar perdas de estoque por decomposição ou brotamento dos alimentos, podem ser utilizadas fontes de raios γ ou de partículas β^- .

A irradiação dos alimentos inibe a germinação de produtos vegetais (tal como acontece na batata e cebola) e destrói parasitas e microorganismos que possam existir nestes alimentos. As radiações podem ainda ser utilizadas na pasteurização de alimentos e na esterilização de produtos já embalados.

Na Figura 3.5 pode-se ver um esquema do equipamento utilizado para irradiação de alimentos como: cebola, batata, mamão, pimenta, manga, laranja e varios tipos de cereais.

SÍNTESE DE PRODUTOS QUÍMICOS

Além de suas várias utilidades na agricultura e medicina, os radioisótopos podem ser úteis como fonte de energia, acelerando reações químicas.

Algumas reações que necessitam altas energias, ou mesmo aquelas que são bastante lentas, podem utilizar as radiações. Entre elas, podemos destacar: a síntese do brometo de etila e da vitamina D, a degradação da celulose, a polimerização de alguns óleos vegetais, na fabricação de fitas adesivas e de novos derivados de petróleo e na oxidação de hidrocarbonetos.

Nestes casos, as radiações podem atuar de duas formas:

- Ø pela simples excitação das moléculas, dando-lhes energia suficiente para vencer a barreira da energia de ativação;
- Ø interferindo diretamente no mecanismo da reação, pela formação de íons e radicais livres que de outra forma dificilmente se formariam.

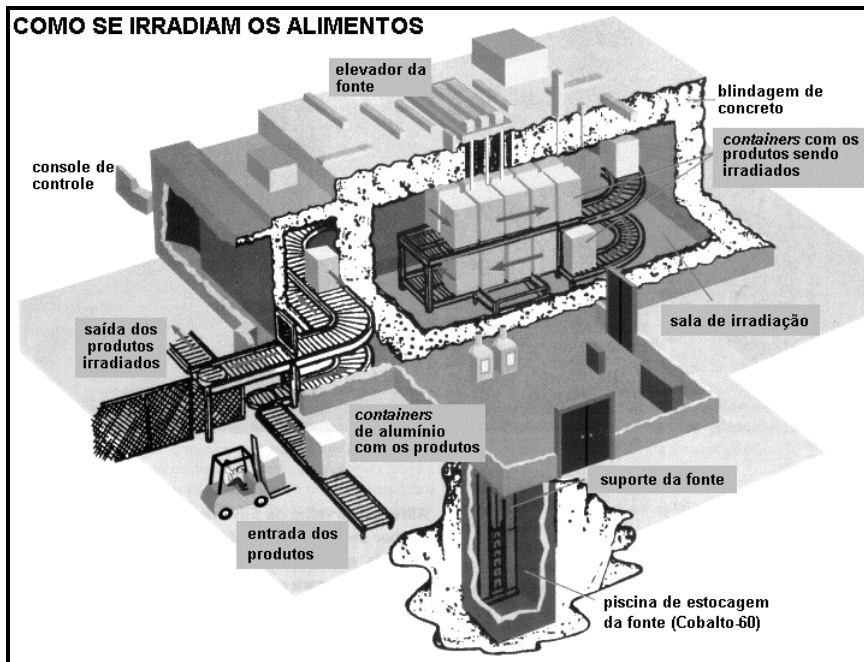


Figura 3.5: irradiação de alimentos, economia em fungicidas e pesticidas

MÓDULO 4

EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

TEXTO A - O acidente de Chernobyl

No final de abril de 1986, cientistas suecos verificaram um aumento na radiação de fundo detectada pelos mostradores de seus equipamentos. O que se poderia imaginar neste momento, é que houvesse ocorrido liberação de partículas radioativas na atmosfera, talvez devido a um acidente ocorrido em alguma usina nuclear próxima da região. Prontamente comunicaram o fato às autoridades suecas.

Como não houve nenhum acidente com usinas suecas, o fato foi investigado junto aos outros países da região. Descobriu-se, enfim, a origem da liberação das partículas radioativas na atmosfera: na madrugada de 26 de abril, o reator número 4 da central nuclear de Chernobyl (República da Ucrânia, na antiga União Soviética) havia sofrido um acidente.

A população local foi bastante atingida. Os países vizinhos também foram afetados pelo acidente, já que a nuvem de partículas radioativas, formada a partir das explosões ocorridas no reator, se alastrou rapidamente.

Uma experiência mal elaborada, uma manutenção descuidada e uma sucessão de outros erros (que bem poderiam ter saído de um filme de ficção) culminaram no acidente, que não foi evitado nem mesmo pelo soar do alarme dos sistemas de segurança do reator, considerando-se que ao invés de desativar o reator, o operador optou por desligar o alarme!

A LIBERAÇÃO DE PARTÍCULAS RADIOATIVAS

Ocorreram duas explosões no reator, espalhando no ar centelhas e material incandescente. Peças do reator foram lançadas até o telhado. Iniciaram-se vários incêndios. A tampa de concreto do reator, de 700 toneladas, foi violentamente levantada e arremessada a uma longa distância. Assim foi liberada para o ar uma grande quantidade de radioisótopos e partículas radioativas.

Os radioisótopos liberados foram aqueles que, durante o funcionamento normal de um reator, formam-se nas barras de urânio (combustível do reator). É

a fissão dos átomos de urânio que origina estes isótopos radioativos, numa quantidade bastante elevada. Entre eles, podemos citar como principais radioisótopos lançados à atmosfera os gases nobres, iodo, estrôncio e céσιο.

O ALASTRAMENTO

O Corpo de Bombeiros utilizava água para apagar o incêndio provocado pelas explosões do reator, aumentando ainda mais a nuvem de partículas radioativas, que chegou a atingir 1200 metros de altura.

P

Na época da explosão do reator chovia muito na Europa. Você acha que este fato teve alguma influência no alastramento da contaminação provocada pelos radioisótopos ?

A nuvem contendo isótopos radioativos (^{137}Cs , ^{133}Xe , ^{131}I entre outros) foi rapidamente transportada pelo vento. Atravessou as fronteiras da União Soviética atingindo, principalmente, a Polônia, a Romênia, a Bulgária e os países escandinavos (na Figura 4.1 é possível ter uma idéia do alastramento da nuvem radioativa).

Para impedir uma maior dispersão do material radioativo na atmosfera, foram tomadas medidas no sentido de cobrir o reator. Utilizou-se material que absorvesse o calor e filtrasse o aerosol de partículas liberado. Com o uso de helicópteros foi jogada sobre o reator uma mistura de areia, dolomita (mineral calcáreo) e boro, em quantidades tais que, após uma semana, já ultrapassavam 5.000 toneladas.

P

Por que o reator foi coberto com estas substâncias e não com outros materiais ?

O CONTATO COM A CADEIA ALIMENTAR

O impacto do acidente na agropecuária européia foi considerável. A contaminação foi causada principalmente pelo ^{131}I e pelo ^{137}Cs , atingindo plantações e pastagens. A meia-vida do ^{131}I é de aproximadamente 8 dias, já a do ^{137}Cs é de 30 anos. Deste modo, embora o primeiro possua maior atividade, o

segundo é o que causará maiores problemas, pois os efeitos de sua contaminação ainda serão sentidos ao longo de várias décadas.

Quando os animais ou o homem ingerem alimentos contaminados, incorporam radioisótopos ao seu organismo, ficando também contaminados. Caso uma pessoa se alimente de um animal contaminado, será então contaminada de forma indireta. O mesmo ocorre se forem consumidos produtos derivados, tais como o leite, queijo, manteiga, ovos, etc.

No início dos anos 60 ficou provada a facilidade do transporte de isótopos radioativos de iodo para o homem através do leite.

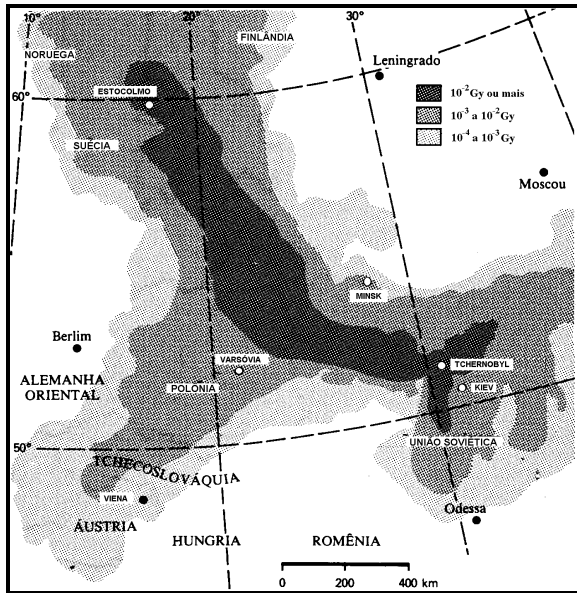


Figura 4.1: o desenho mostra o alcance que a nuvem radioativa havia atingido no dia 29 de abril de 1986.

A CONTAMINAÇÃO

O efeito das radiações sobre os seres vivos é consequência da energia que é transferida pelas radiações às células que atravessam. Esta energia é medida em “grays”(Gy).

1 Gray (1 Gy) corresponde à absorção de 1 Joule de energia por quilograma de material. Mas o efeito das radiações sobre os tecidos vivos é medido em Sieverts (Sv). A dose equivalente, em Sieverts, é dada pela dose absorvida (em Grays) multiplicada por um fator que quantifica os efeitos biológicos, característicos de cada tipo de radiação.

A contaminação radioativa se dá através da ingestão de radioisótopos que podem estar em alimentos ou diluídos em outras substâncias. Isto é muito perigoso, pois a pessoa estará sendo continuamente irradiada, sendo necessário, nestes casos, descontaminá-la.

É preciso tomar cuidado também com a exposição à radiação. Exposições muito intensas, durante um período de tempo prolongado podem causar danos irreparáveis à saúde. Certas células dos seres vivos não se regeneram e uma vez destruídas não há como repô-las. A radiação que incide sobre estas células provocará uma destruição com efeitos cumulativos.

Na Tabela 4.1 podemos ver os efeitos da radiação, em diferentes doses de exposição (esta tabela não leva em conta o tempo que a pessoa esteve sujeita à radiação).

Tabela 4.1: Dose e efeito das radiações

Medida de intensidade da radiação (Sv)	Prazo para o surgimento dos sintomas (semanas)	Efeitos sobre o corpo
0 a 1	–	náusea e vômitos; não é fatal.
1 a 2	–	pequena queda no número de leucócitos, risco de câncer a longo prazo
2 a 6	quatro a seis	semelhantes aos provocados pela intensidade anterior probabilidade de morte: 50%

6 a 10	quatro a seis	queda acentuada do número de leucócitos no sangue, manchas na pele, derrame intestinal probabilidade de morte: 80 a 100%
10 a 50	uma a duas	diarréia, febre, desequilíbrio na composição do sangue probabilidade de morte: 100%

Dose tolerável: 0,3 Sv/h

Radiação natural: 2,4 mSv/ano

Dose equivalente absorvida em um raio-X odontológico: de 20 a 150 mSv.

MÓDULO 4

EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

TEXTO B - Tireóide

A tireóide é uma das mais importantes glândulas endócrinas do corpo humano. Glândulas endócrinas são aquelas cujos produtos são lançados diretamente na circulação sanguínea. A tireóide é responsável pela síntese, armazenamento e secreção dos hormônios tireoidianos. Estes, por sua vez, são indispensáveis ao crescimento e ao desenvolvimento e manutenção do metabolismo humano.

A glândula tireóide sempre chamou a atenção pelas graves manifestações decorrentes de seu mau funcionamento. Em crianças este mau funcionamento pode causar deficiências no crescimento. A tireóide de um adulto aumenta de tamanho quando há problemas de insuficiência de funcionamento. Isto causa o conhecido “papo”- o bócio tireoidiano.

Já o hipertireoidismo, ou aumento da concentração de hormônios tireoidianos no sangue, causa uma elevação do metabolismo basal, que se traduz por hiperatividade, perda de peso e excitabilidade exageradas.

IODO, MATÉRIA PRIMA

Os hormônios tireoidianos contêm iodo em sua composição química. Portanto, se a dieta do indivíduo não contiver este elemento, tais hormônios não serão produzidos. Há regiões onde o solo e a água são pobres em iodo, como por exemplo em algumas zonas do interior de Minas Gerais e em vales isolados dos Alpes e Perineus. Verifica-se nos habitantes destes lugares tireóides aumentadas em seu tamanho, resultando no aparecimento do bócio, que é endêmico nestas regiões.

Toda pessoa normal possui um certo conteúdo de iodo em seu corpo, que é resultado da diferença entre o iodo ingerido, armazenado e metabolizado e o iodo eliminado. As células da tireóide captam o iodo da corrente sanguínea e o depositam nos folículos tireoidianos. Nestes folículos, o iodo se junta à tireoglobulina formando os hormônios tireoidianos.

P

O I-131 resultante do acidente de Chernobyl se alojará, preferencialmente, em que parte do organismo humano? Que alterações causará no funcionamento do organismo humano ?

O iodo (símbolo químico: I) não se encontra livre na natureza, senão em pequeníssimas quantidades. Combinado, acompanha os nitratos do Chile e do Peru (salitres), formando iodetos e iodatos - NaI e NaIO₃. Também existe em quantidades apreciáveis nas águas dos mares e oceanos e em certos seres que neles vivem, como as algas, esponjas e o bacalhau. Tem ponto de fusão a 113,5°C, ponto de ebulição a 184,35°C. Em condições ambientes é um sólido que cristaliza em escamas brilhantes de cor cinzenta-metálica. Aquecido nas condições normais, sublima, quer dizer, passa diretamente do estado sólido ao vapor. Seus vapores são de cor violeta e corrosivos. É de odor irritante. Sua molécula é diatômica: I₂. É pouco solúvel em água, a não ser que esta contenha iodeto de potássio em solução, porém é muito solúvel no álcool e no éter, aos quais tinge de vermelho, e no clorofórmio e sulfeto de carbono, aos quais passa uma cor violácea. A dissolução do iodo em álcool chama-se tintura de iodo, e é usada como medicamento.

FUNÇÕES QUE SE REFLETEM NO METABOLISMO

O hipertireoidismo difuso, ou doença de Graves, tem sintomas característicos. A tireóide aumenta de tamanho, assim como aumenta o número de células, resultando no aparecimento do bócio. O hipertireoidismo difuso é mais comum em mulheres do que em homens na proporção de oito para um. Possui como sintomas típicos: olhos esbugalhados, pulso rápido, sudorese intensa, nervosismo, insônia, intolerância ao calor, além do bócio. No entanto, aparecem outras alterações, sobretudo cardiovasculares. Palpitações e falta de fôlego são sintomas bastante comuns.

O aumento da quantidade de energia gasta pelo organismo leva à perda de peso, apesar do bom apetite do paciente. Manifesta-se acentuada fraqueza muscular. Em alguns casos podem ocorrer ainda alterações menstruais e diarreia.

Para evitar o aparecimento do hipertireoidismo endêmico, muitos governos (inclusive o do Brasil) criaram leis que obrigam o sal de cozinha (NaCl) a ser iodado. O próprio tratamento desta doença é feito com a administração de

iodo. Ele bloqueia a ação do hormônio tireotrófico, inibindo-se desta forma a produção de hormônios tireoidianos, que depois de algum tempo acarretará na diminuição da tireóide até níveis normais e desaparecimento do bócio.

P

Logo após o acidente de Chernobyl, aumentou consideravelmente a procura de iodo em tabletes na Europa. Qual era o objetivo da população com esta procura?

RADIOIODO

O iodo apresenta trinta e três isótopos, dos quais somente um é estável, o de massa nuclear igual a 127. Portanto os restantes trinta e dois isótopos são radioativos e são chamados de radioiodos. Os radioiodos decaem por emissão de partículas beta (positivas e negativas). Os isótopos mais importantes, por apresentarem uma meia-vida maior, são os de massa nuclear igual a 125 (60 dias), 126 (13 dias), 129 (aproximadamente 15 milhões de anos) e 131 (8 dias). O ^{131}I decai por emissão beta, originando o ^{131}Xe , que emite radiações gama de diferentes energias. Parte do próprio ^{131}I emite também radiações gama com várias energias.

O ^{131}I é utilizado em medicina nuclear para determinação do nível de funcionamento da tireóide. O ^{131}I aloja-se na tireóide e a forma como se distribui indica para os médicos como a glândula está funcionando. A distribuição do ^{131}I na tireóide é obtida por meio de um detector de radiação gama, o cintilador. Por isso este exame é chamado “cintilografia”.

MÓDULO 4

EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

TEXTO C - O uso das radiações na medicina

O CÂNCER

Quando algumas células do corpo são alteradas em sua natureza e estrutura, e tais alterações são transmitidas a todos os descendentes celulares, instala-se no organismo um estado patológico que é conhecido como câncer. As células cancerosas diferem das células normais - a partir das quais se desenvolvem - pelo fato de destinarem a maior parte de sua energia à função de multiplicação. Em seu aspecto e na rapidez com que se proliferam, assemelham-se mais às células embrionárias do que às células diferenciadas dos adultos. No entanto, deixam de responder às influências que iriam convertê-las em “cidadãs celulares úteis”. Em consequência, as células cancerosas invadem diferentes pontos do organismo, comprometem a nutrição e a utilidade dos tecidos ali existentes, e acabam por destruí-los.

Essas células cancerosas, também, têm a capacidade de desviar para si, de maneira desproporcionada, grande quantidade de alimentos. Esta característica parasitária causa uma rápida e progressiva perda das funções dos órgãos que estão cancerosos, fato que pode levar o paciente, inclusive, à caquexia e à morte. O tumor cresce às custas de seu hospedeiro, o organismo.

As alterações moleculares capazes de transformar células normais em cancerosas são ainda pouco conhecidas.

Alterações cromossômicas são freqüentes nas células cancerosas, o que leva a supor que a origem do câncer reside em mudanças qualitativas e quantitativas do DNA (ácido desoxirribonucléico, que forma os cromossomos).

Não se tem certeza a respeito das influências capazes de causar câncer. Provavelmente, certas substâncias químicas tenham ação carcinogênica, o que se deduz pela indiscutível correlação entre fumo e câncer de pulmão. As radiações são igualmente apontadas como causadoras de câncer: os radiologistas, os pioneiros da pesquisa com radiações nucleares (como Mme. Curie), os operários e os mineiros que lidam com substâncias radioativas, os sobreviventes da catástrofe atômica de Hiroshima e de Nagasaki são exemplos desta correlação.

P

Como ocorre a cancerização das células através das radiações?

O fenômeno está relacionado com as ligações químicas.

Vamos ter dois conceitos em mente. O primeiro, de que toda a radiação é uma forma de energia. O segundo, de que toda a ligação química possui uma energia característica, que depende da natureza desta (se é simples, dupla ou tripla) e dos átomos ou grupamentos ligantes. Consideremos a radiação que incide sobre uma molécula (por exemplo, o DNA de uma célula). Se a radiação possuir energia maior que a energia das ligações desta molécula e incidir sobre uma das ligações, esta será rompida. No entanto, se a energia da radiação for igual à energia de ligação molecular, ocorrerá um efeito ressonante nesta molécula. Em qualquer um dos casos, esta energia, proveniente da radiação, provocará uma disfunção nesta molécula.

A RADIOTERAPIA

Quando a radiação passa através do corpo humano, quatro tipos de eventos podem ocorrer:

- | a radiação passa próximo ou através da célula sem produzir dano;
- § a radiação danifica a célula, mas ela é reparada adequadamente;
- ¨ a radiação mata a célula ou a torna incapaz de se reproduzir;
- © o núcleo da célula é lesado - é no núcleo que se encontra o DNA - sem, no entanto, provocar a morte da célula. A célula sobrevive e se reproduz (muitas vezes desordenadamente) na sua forma modificada, sendo possível observar, anos mais tarde, células cancerosas neste local.

Mas se por um lado a radiação que incide sobre células normais pode causar câncer, a radiação sobre a célula cancerosa pode causar sua destruição, e este é o princípio da radioterapia.

O emprego da radioterapia fundamenta-se no poder destrutivo das radiações sobre as células vivas, com ação predominante sobre as que se apresentam em intensa atividade biológica, como é o caso dos tecidos cancerosos. As radiações são indicadas com base na sensibilidade do tumor, na possibilidade de preservação dos tecidos normais e na viabilidade do local a ser irradiado.

A TIREÓIDE E A RADIAÇÃO

Já se sabe que a tireóide tem uma grande afinidade com o iodo. Sabe-se, também, que sérios problemas podem decorrer da falta de iodo na tireóide e que o iodo possui isótopos radioativos, sendo um deles o ^{131}I .

Ciente destes fatos, a medicina vem utilizando o iodeto de sódio (NaI-131) radioativo, em doses bastante baixas, da ordem de 80 mSv(miliSievert), para mapear a tireóide do ser humano.

Com a administração de iodeto de sódio radioativo e a utilização de aparelhos especiais (Figura 4.2), a tireóide é desenhada em papel. Fazendo este mapeamento, percebe-se com facilidade a absorção do iodo pela tireóide, podendo ser avaliado se há algum princípio de hipertireoidismo ou algum processo inflamatório de origem cancerosa.

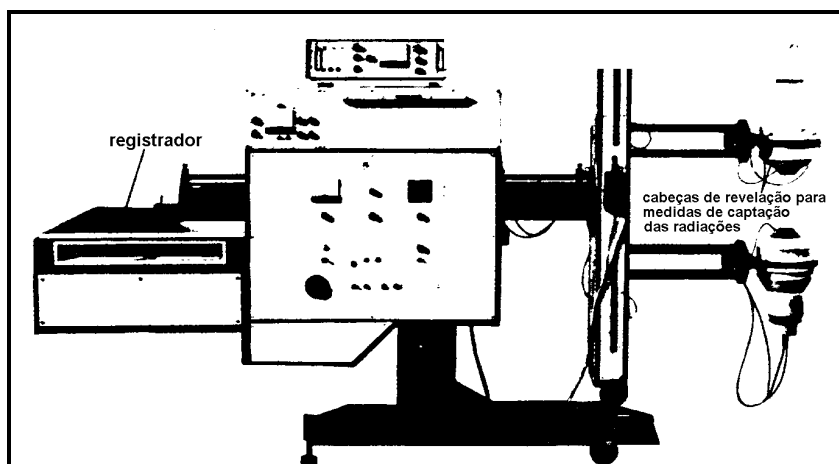


Figura 4.2: instrumento para o mapeamento da tireóide.

Nos casos em que o exame confirma a presença da doença, o próprio tratamento pode ser feito através do iodo. O iodeto de sódio radioativo é ingerido, no entanto, a dose será maior, da ordem de 7 a 70 Sv. A dose a ser utilizada dependerá do tumor canceroso, pois quanto mais profundo o tumor, tanto maior deverá ser a dose utilizada.

MÓDULO 5

O ACIDENTE DE GOIÂNIA

TEXTO A - O Acidente

Em setembro de 1987 a cidade de Goiânia foi vítima do maior acidente nuclear envolvendo o isótopo 137 do Césio (Cs) de que se tem notícia. Este acidente foi o segundo mais numeroso em mortes na área nuclear, o primeiro foi o de Chernobyl.

O acidente, que causou a morte de quatro pessoas e amputação do antebraço de outra, foi originado pela violação de uma cápsula de césio, que era utilizada no tratamento do câncer. Esta cápsula continha o ^{137}Cs na forma de cloreto de césio (CsCl) e estava irregularmente abandonada nos escombros do antigo prédio do Instituto Goiano de Radioterapia (IGR). O prédio do Instituto foi desativado dois anos antes do acidente, devido a uma ação de despejo. A Vigilância Sanitária de Goiás e o IGR deveriam ter dado um melhor destino à cápsula de césio do que seu simples abandono. Os responsáveis por estes órgãos foram mais tarde responsabilizados judicialmente pelo acidente.

Dois sucateiros retiraram a cápsula dos escombros e a levaram para sua casa. A cápsula era constituída por um cilindro de aço inoxidável com um revestimento duplo de chumbo. O material radioativo estava no interior deste cilindro. Para fins terapêuticos, a cápsula tinha uma janela, pela qual passava a radiação gama utilizada no tratamento do câncer. Esta janela permitia, também, que se pudesse observar alguma luminescência, fazendo com que a cápsula brilhasse no escuro. Foi a curiosidade despertada por este brilho fosforescente que levou à abertura da cápsula, liberando assim o ^{137}Cs em pó.

P

O brilho fosforescente do ^{137}Cs é uma característica da radiação como um todo ou do elemento químico?

A fosforescência também pode ser chamada de luminescência ou de fluorescência. É um fenômeno que ocorre na coroa eletrônica do átomo. Está relacionado com a absorção de energia pelos

elétrons e depende da estrutura da molécula, átomo ou íon para que possa ocorrer. Portanto, a fosforescência não é uma característica das radiações, embora estas possam causar este fenômeno. É, no entanto, característica de alguns átomos, íons ou moléculas.

A CONTAMINAÇÃO

A cápsula foi arrombada no quintal da casa de um dos sucateiros e estava colocada sobre um tapete, à sombra de uma mangueira. O pó de ^{137}Cs foi colocado dentro de um vidro e levado para dentro de casa, onde foi guardado em um armário. Entretanto, uma parte do pó não foi recolhida, ficou no chão. As chuvas que caíam no local, na época do acidente, ajudaram o solo na absorção do pó radioativo, ocasionando sua contaminação. A mangueira, sob a qual a cápsula foi violada, também foi contaminada.

P

Qual a diferença entre contaminação radioativa e exposição à radiação ? Qual é a mais preocupante e porquê ?

O pó de céσιο, radioativo e fosforescente, não era frio nem quente, não tinha cheiro, não criava gases, enfim, era aparentemente inofensivo. As pessoas se admiravam com o pó brilhante, pegavam-no com as mãos e uma criança, achando-o parecido com purpurina, o passou em seu corpo. O pó inclusive foi ingerido por esta criança, que além da contaminação externa era constantemente irradiada, devido à contaminação interna.

Por onde as pessoas contaminadas andavam, espalhavam mais a contaminação ou, pelo menos, irradiavam as pessoas nesses locais. Assim o pó de ^{137}Cs se alastrou rapidamente. Na Figura 5.1 se pode ter uma idéia de como se processou o alastramento da contaminação radioativa, tanto através das pessoas, como através dos animais e alimentos.

A DESCONTAMINAÇÃO

O acidente chegou ao conhecimento público somente quando um médico suspeitou que as queimaduras de alguns de seus pacientes poderiam ter sido causadas por radiações, o que foi prontamente confirmado por um físico ao medir os níveis de radiação dos pacientes. A imprensa divulgou o caso, as autoridades se mobilizaram e foram chamados para Goiânia médicos, físicos e especialistas em radiações do Brasil e alguns do exterior.

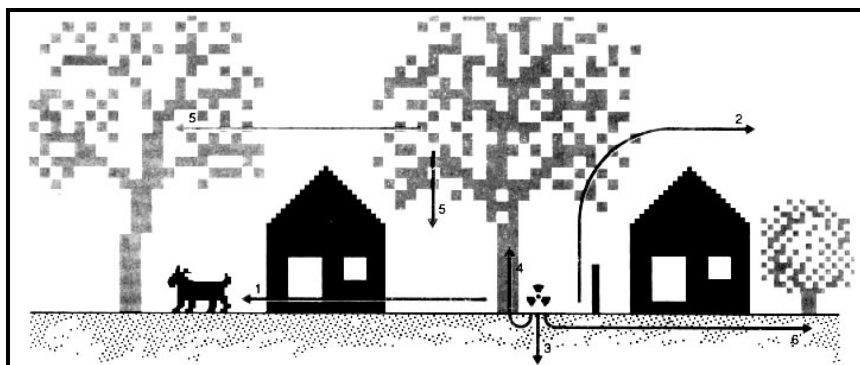


Figura 5.1: esquema dos diversos meios de propagação do ^{137}Cs : (1)trans-porte por pessoas e animais; (2)poeira levantada do solo; (3)penetração vertical no solo; (4)absorção pelo sistema radicular da mangueira; (5)transporte através das folhas e frutos; (6)movimento horizontal no solo.

A descontaminação da pele consistia em banhos com água e sabão e, em casos mais graves, eram utilizadas pomadas à base de lanolina e óxido titânico. Estas pomadas funcionam como uma cola que, ao ser removida, limpa a pele, descamando-a. Ainda foram utilizados cremes à base de azul da prússia, que é uma mistura de ferro (Fe) com ferrocianeto férrico - $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ - na proporção de quatro para três. Estas aplicações eram indicadas em função do estágio avançado em que se encontravam as dermatites.

O azul da prússia também foi utilizado na descontaminação interna do organismo. O céσιο normalmente expelido junto à urina era, também, expelido junto às fezes com o auxílio do azul da prússia. O acompanhamento da intensidade das radiações emitidas pelas fezes e urina indicava os níveis de sucesso do método, que foram bons.

Os locais que eventualmente pudessem ter sido contaminados pelo pó radioativo foram monitorados e, caso necessário, submetidos à descontaminação. Materiais cimentados e concreto foram descontaminados através de lixamento com uma mistura de alúmen e azul da prússia. Pisos encerados foram lavados com soda cáustica e detergente ou com soluções não aquosas de ácido clorídrico.

Os terrenos sobre os quais estavam construídas as casas com maior taxa de contaminação foram escavados para retirada do solo superficial e cobertos com

concreto. Atualmente encontram-se interditados para moradia ou outras utilizações fixas, tendo sido construídas praças nestes locais.

OLIXO RADIOATIVO

Foram removidos do local onde a cápsula foi violada a terra, as construções e a mangueira contaminadas. Animais domésticos foram sacrificados, objetos pessoais foram jogados fora. O lixo proveniente do acidente também é radioativo. Por isso também não pôde ser juntado ao lixo normal.

Foi providenciado, emergencialmente, um local com alguma infraestrutura para o armazenamento do lixo radioativo. Ao todo mais de 13 toneladas de lixo foram postas em 1.219 caixas, 2.922 tambores e 14 “containers” e deixadas, provisoriamente, na cidade de Abadia, a 20 Km da capital goiana. Já foi projetado (mas ainda não construído) o depósito definitivo para o lixo radioativo de Goiânia, que deverá ficar armazenado por pelo menos 300 anos, tempo necessário para que o césio-137 decaia 10 meias-vidas e sua atividade radioativa atinja um valor semelhante ao da radiação de fundo.

MÓDULO 5

O ACIDENTE DE GOIÂNIA

TEXTO B - Características do céσιο - 137

As mortes, doenças e danos materiais ocorridos no acidente de Goiânia foram causados por um isótopo radioativo, o céσιο-137. Por este motivo o céσιο (Cs), seus isótopos, seu decaimento e suas emissões radioativas serão analisados neste texto.

CÉSIO (Cs) - é um metal alcalino, altamente eletropositivo, que não existe livre na natureza, devido à sua grande atividade química, superior à do rubídio e do potássio, pertencentes ao mesmo grupo da tabela periódica. É encontrado na polucita, um silicato de céσιο e alumínio. Tem ponto de fusão a 26° C e ponto de ebulição a 670° C. É o mais eletropositivo dos metais; tem cor branca prateada, é dúctil, oxida-se rapidamente no ar; com umidade inflama-se espontaneamente, produzindo chama não-luminosa de cor violeta-avermelhada; é solúvel no hidróxido de amônio e deve ser guardado em óleo mineral. Seu número atômico 55 e tem 35 isótopos, dos quais somente um é estável, o de massa nuclear igual a 133 u.m.a.. Dos seus muitos isótopos, vários apresentam meias-vidas muito pequenas, de frações de segundos a poucos segundos.

Meia-vida é o tempo que uma certa massa de isótopo radioativo leva para cair à metade da massa original. Quando as meias-vidas são muito pequenas, significa que há uma grande quantidade de partículas emitidas por unidade de tempo. Diz-se então que os isótopos de meia-vida pequena possuem uma grande atividade radioativa. No entanto, esta grande atividade de muitos isótopos do céσιο não chega a ser problemática, visto que, por apresentarem meias-vidas muito curtas, estes isótopos não existem naturalmente na Terra, já se desintegraram. Sua ocorrência é puramente artificial.

A Figura 5.2 permite verificar como ocorre o decaimento do isótopo de massa 137 do céσιο.

O céσιο decai por emissão de partículas beta. Isótopos com massas menores que a do isótopo estável, céσιο-133, decaem por emissão de partículas beta positivas (β^+), pósitrons. Para massas nucleares maiores que a do isótopo estável, como é o caso do céσιο-137, o decaimento se dá através de partículas beta negativas (β^-). A meia-vida do céσιο-137 é de 30 anos.

Do decaimento do céσιο se origina o bário (Ba) com mesma massa nuclear (a partícula β^- mantém a massa nuclear, A, constante e acrescenta uma unidade ao número atômico, Z):

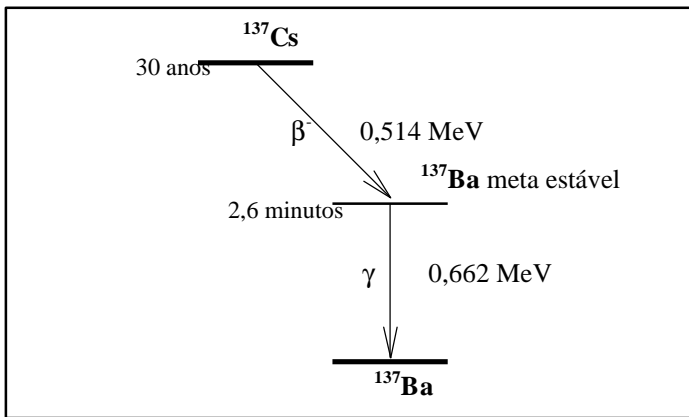
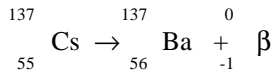


Figura 5.2: esquema de decaimento do ${}^{137}\text{Cs}$

BÁRIO - 137

O bário possui 31 isótopos, dos quais 7 são estáveis. O de maior abundância na natureza é o isótopo de massa nuclear igual a 138 u.m.a.. O bário-137, originado pela emissão de partículas β^- do céσιο-137 participa com 11,32% na composição ponderal isotópica do bário natural, no entanto este isótopo do bário é metaestável.

Estável é o átomo ou isótopo que não decai por emissão de partículas radioativas ou energia eletromagnética. Para manter este estado de estabilidade,

cada átomo ou isótopo possui uma quantidade própria de energia armazenada. Quando é aumentada esta quantidade de energia, ocorre um fenômeno chamado excitação. O estado metaestável é aquele no qual o átomo ou isótopo encontra-se no estado excitado. Para retornar à estabilidade, é necessário que ocorra uma desexcitação do átomo ou isótopo, que se dá com a liberação de energia eletromagnética na forma de fótons.

A excitação pode ocorrer tanto na eletrosfera como no núcleo. Quando a excitação se processa na eletrosfera, a desexcitação é feita pela emissão de raios X. Já a desexcitação no núcleo é feita através da emissão de um fóton gama (radiação γ).

O céσιο-137 pode decair para o bário-137 em seu nível fundamental de energia, ou pode decair para uma estado excitado, metaestável. Neste último caso o bário-137 é radioativo, com meia-vida de 2,6 minutos e decai com emissão de raios γ para o próprio bário-137, somente que agora no estado estável.

Assim, numa amostra contendo céσιο-137, observa-se a emissão de dois tipos de radiação: partículas β^- emitidas pelo ^{137}Cs e fótons γ emitidos pelo ^{137}Ba .

MÓDULO 5

O ACIDENTE DE GOIÂNIA

TEXTO C - Efeitos da radiação sobre as células

A verdadeira extensão dos danos biológicos provocados pela radiação depende de vários fatores. Entre estes, podemos destacar: o tipo e energia da radiação, as características da pessoa irradiada (idade, estado de saúde, etc.) e os órgãos do corpo atingidos pela radiação. Diferentes órgãos do organismo apresentam diferentes sensibilidades às radiações.

Alterações no DNA de uma célula podem levar a mutações genéticas. O DNA é uma molécula cujas ligações químicas podem ser rompidas pelas radiações através da transferência de energia. Quanto maior a energia das radiações, tanto maior será a possibilidade de ocorrerem mutações celulares.

As radiações provocam efeitos significativos sobre as células de intensa atividade biológica envolvidas na divisão (reprodução) celular. Isto explica porque as pessoas em fase de crescimento são mais sensíveis às radiações. Células muito diferenciadas praticamente não se dividem, logo são mais resistentes aos efeitos das radiações.

Células formam tecidos, e estes formam órgãos, deste modo, podemos dizer que os órgãos responsáveis pela reprodução e metabolismo são mais sensíveis às radiações do que os músculos e nervos, onde a divisão celular é muito menos frequente. No entanto, estas células que são mais resistentes às radiações, ao serem destruídas por transferência de energia radioativa não se regeneram. Neste caso, a perda das células resultará em um comprometimento irreversível das funções às quais elas se destinavam.

INTERAÇÃO COM A MATÉRIA

As radiações podem se apresentar nas formas de partículas, carregadas ou não, ou como ondas eletromagnéticas de energia. A natureza das radiações é que determinará como cada qual irá interagir com a matéria.

De um modo geral, as partículas carregadas (α e β) ao atravessarem a matéria provocam ionização de forma direta. As partículas α , que são como o núcleo do gás nobre hélio, são pesadas e apresentam uma trajetória quase

retilínea na matéria (Figura 5.3). Estas partículas têm uma grande eficiência em arrancar os elétrons da matéria que estão atravessando, ionizando-a, tornando seu alcance pequeno. Ou seja, estas partículas não penetram profundamente nos materiais.

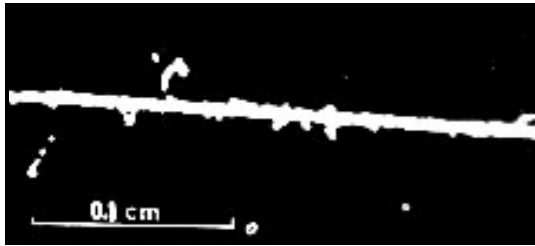


Figura 5.3: trajetória de uma partícula alfa

Já as partículas β podem ser tanto positivas (pósitrons) como negativas (elétrons). Estas partículas são mais penetrantes, embora sejam desviadas mais facilmente pelas repulsões elétricas, pois são muito leves (Figura 5.4).

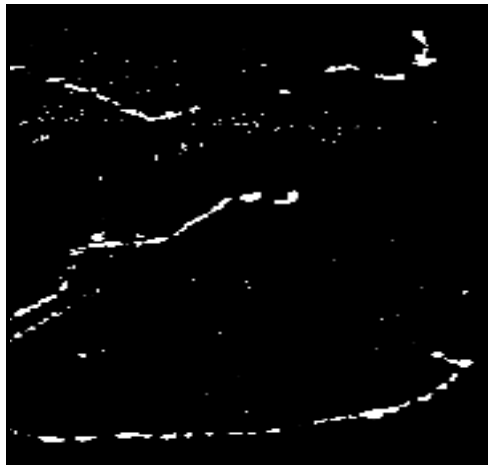


Figura 5.4: trajetória de uma partícula beta

Já os nêutrons são partículas não carregadas e por isto provocam ionização de forma indireta. Seu percurso no material é marcado por colisões inelásticas, pois não sofre os efeitos de atração e repulsão, incidindo diretamente sobre o núcleo.

molécula de água produzindo o radical livre OH e o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), que por sua vez danificam a molécula de DNA.
EFEITOS DAS RADIAÇÕES SOBRE AS CÉLULAS

A série de reações causadas pelas radiações ionizantes pode ser descrita como acontecendo em estágios.

O primeiro fenômeno distingüido na interação da radiação com a célula é físico e dura aproximadamente 10⁻¹³ segundos. Neste primeiro estágio ocorre a absorção de energia por ionização e excitação das moléculas orgânicas que fazem parte da célula. Na ionização um elétron é ejetado do átomo e na excitação um elétron ganha energia passando a uma órbita mais energética. A ionização pode também ocorrer de forma indireta. Por exemplo, em uma molécula vizinha de água ocorre a ruptura das ligações químicas, com a formação de radicais livres (de hidrogênio e hidróxido) e outras espécies reativas que migram para a molécula orgânica.

No segundo estágio, ocorrem fenômenos químicos de duração de aproximadamente 10⁻⁶ s. Os radicais livres podem oxidar ou reduzir moléculas celulares. Estas reações (oxidação e redução) envolvendo biomoléculas importantes, como proteínas, enzimas ou mesmo DNA, causam uma disfunção tanto em suas propriedades como em suas atividades.

No entanto existem certos mecanismos que inibem a formação dos radicais, ou simplesmente “varrem” os radicais já formados. Descobriu-se que as vitaminas C e E inativam os radicais livres por transferência de elétrons. Existem produtos químicos que “varrem” os radicais formados. No entanto, são tóxicos nas doses necessárias à sua maior eficácia.

No último estágio da interação da radiação com a células ocorrem efeitos bioquímicos e fisiológicos, produzindo alterações morfológicas. Sua duração é variável, desde horas até anos.

Os efeitos biológicos da radiação são comumente classificados em somáticos e hereditários. Os efeitos somáticos afetam apenas a pessoa irradiada, enquanto os efeitos hereditários, afetam também seus descendentes. É importante ressaltar que os efeitos somáticos dependem da dose de radiação a que o indivíduo esteve exposto, pois, quanto maior a dose, tanto menor será o intervalo de tempo entre a exposição e o aparecimento do efeito. A leucopenia (diminuição de glóbulos brancos no sangue), o câncer e algumas lesões degenerativas (como a catarata) são exemplos de alguns efeitos somáticos.

Os efeitos hereditários podem ocorrer quando forem irradiadas as células do ovário ou dos testículos, danificando óvulos e espermatozóides,

respectivamente. Se um óvulo ou um espermatozóide danificado for usado na concepção, todas as células do novo organismo terão o defeito reproduzido. Assim, os efeitos resultantes da mutação original podem passar para as gerações futuras. Algumas mutações chegam a ser letais, causando a morte do feto antes mesmo do nascimento. Outras podem produzir defeitos físicos ou mentais ou, ainda, diminuir a resistência do organismo a certas doenças.

Há indicações de que este efeito é cumulativo, de modo que quanto maior a dose acumulada maior será o número de mutações.

Na Tabela 5.1 consta um resumo dos efeitos prováveis da irradiação de um indivíduo.

Tabela 5.1: Efeitos biológicos das radiações

<i>Dose rápida</i>	0 a 0,25 Sv	Nenhum efeito clínico foi detectado Provavelmente não haverá efeito hereditário
	0,50 Sv	Rápidas mudanças na pressão sanguínea Nenhum outro efeito clínico detectável Pouco provável que os efeitos sejam sentidos por indivíduos comuns
<i>Dose moderada</i>	1 Sv	Náuseas e fadiga com possíveis vômitos Provável diminuição da expectativa de vida
	2 Sv	Náuseas e vômitos nas primeiras 24 horas Após uma semana, queda de cabelo, perda de apetite, debilidade generalizada, irritação de garganta e diarreia Possível morte entre 2 e 6 semanas em um pequena fração dos indivíduos irradiados Restabelecimento provável de indivíduos de boa saúde
<i>Dose semimortal</i>	4 Sv	Náuseas e vômitos depois de 1 ou 2 horas Após uma semana, queda de cabelo, perda de apetite, debilidade generalizada com febre Inflamação grave na boca e na garganta na terceira semana Na quarta semana, sintomas como palidez, diarreia e rápidas faltas de ar Após a 6ª semana, mortalidade provável de 50% dos indivíduos irradiados

<i>Dose mortal</i>	6 Sv	Náuseas e vômitos depois de 1 ou 2 horas Diarréia, vômitos, inflamação da boca e garganta no final da primeira semana Febre, falta de ar e, inclusive, morte podem ocorrer na segunda semana Morte provável de todos os indivíduos irradiados em um período de 2 a 6 semanas
--------------------	------	--

BIBLIOGRAFIA

- _____, *Autos de Goiânia: in Ciência Hoje*, Volume 7, número 40, 1988.
- _____, *Conhecer*. São Paulo: Abril Cultural, 1966, 3088 p.
- _____, *Medicina e Saúde*. São Paulo: Abril, 1970, 2628 p.
- BRÜCKMANN, M.E. & FRIES, S.G. *Radioatividade. Textos de Apoio ao Professor de Física, N° 2*. Porto Alegre: Grupo de Ensino, Instituto de Física/UFRGS, 1991, 40 p.
- BULBULIAN, S. *La Radiactividad*. Cidade de México: Fondo de Cultura Económica, 1987, 121 p.
- CAMPBELL, J.R. & ROSS, R.C. *Las Radiaciones II. El Manejo de las Radiaciones Nucleares*. Cidade de México: Fondo de Cultura Económica, 1990, 103 p.
- CAMPBELL, J.R. *Las Radiaciones: Reto y Realidades*. Cidade de México: Fondo de Cultura Económica, 1986, 176 p.
- CHOPPIN, G.R. & RYDBERG, J. *Nuclear Chemistry - Theory and Applications*. Oxford: Pergamon Press, 1980, 667 p.
- GOLDEMBERG, J. *Energia Nuclear. Sim ou Não?*. Rio de Janeiro: José Olympio, 1987, 119 p.
- HARVEY, B.G. *Química Nuclear*. São Paulo: Edgard Blücher, 1969, 163 p.
- HEVESY, G. & PANETH, F.A. *A Manual of Radioactivity*. Londres: Humphrey Milford, 1938, 306 p.
- NOVAIS, V.L.D. *Estrutura da Matéria*. São Paulo: Atual, 1981, 256 p.
- OKUNO, E. et alli. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1982, 490 p.
- OKUNO, E. *Radiação: Efeitos, Riscos e Benefícios*. São Paulo: Harbra, 1988, 81 p.
- SAFFIOTI, W. *Fundamentos de Energia Nuclear*. Petrópolis: Vozes, 1982, 177 p.
- SEABORG, G.T. *Os Elementos Transurânicos Sintetizados pelo Homem*. São Paulo: Edgard Blücher, 1969, 162 p.
- SEGRÉ, E. *Dos Raios X aos Quarks*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987, 345 p.
- WALTON, H.F. The Curie-Becquerel Story. *Journal of Chemical Education*, Janeiro 1992, Volume 69, Número 1, p. 10-15.