

Coleção Química no Cotidiano  
Volume 8

Kátia Aparecida da Silva Aquino  
Fabiana da Silva Aquino

# Radioatividade e Meio Ambiente

## Os Átomos Instáveis da Natureza

Coleção Química no Cotidiano

Volume 8

# Radioatividade e Meio Ambiente: os Átomos Instáveis da Natureza

Kátia Aparecida da Silva Aquino

Fabiana da Silva Aquino



International Year of  
**CHEMISTRY**  
**2011**

QUÍMICA PARA UM MUNDO MELHOR

São Paulo | Sociedade Brasileira de Química | 2012

## Projeto Comemorativo da Sociedade Brasileira de Química Ano Internacional da Química-2011 (AIQ-2011)

### Coordenadores do projeto

Claudia Moraes de Rezende e Rodrigo Octavio Mendonça Alves de Souza

### Editora-chefe

Claudia Moraes de Rezende

### Revisores

Claudia Moraes de Rezende, José Norberto Callegari Lopes e Joana Moraes de Rezende

### Arte gráfica e editoração

Cabeça de Papel Projetos e Design LTDA ([www.cabecadepapel.com](http://www.cabecadepapel.com))

Ficha Catalográfica

Wanda Coelho e Silva (CRB/7 46) e Sandra Beatriz Goulart da Silveira (CRB/7 4168)  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

---

- A53q Aquino, Kátia Aparecida da Silva.  
**Radioatividade e meio ambiente: os átomos instáveis da natureza.** / Kátia Aparecida da Silva Aquino, Fabiana da Silva Aquino – São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2012.  
144p. - (Coleção Química no Cotidiano, v. 8)  
ISBN 978-85-64099-10-4  
1. Química - Radiatividade. 2. Meio ambiente. I. Aquino, Kátia Aparecida da S. II. Aquino, Fabiana da Silva. III. Título. IV. Série.

CDD 547.7

CDU 547.9

---

Todos os direitos reservados – É proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por outro meio.  
A violação dos direitos de autor (Lei nº 5.988/73) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

# Agradecimentos

Aos nossos pais, Antônio Aquino Filho e Iete Aquino, que lutaram a vida toda, não só na formação das pessoas que nos tornamos, mas para que nossa educação básica fosse o grande pilar para as nossas conquistas de hoje.

Aos nossos filhos Luan, Ítalo e Carlos por entenderem que, nossa ausência por conta dos compromissos profissionais, jamais atrapalhou o imenso amor que sentimos por eles.

Aos nossos companheiros e familiares que, com muita paciência, nos ajudaram a atravessar até as maiores barreiras que encontramos.

Ao professores e pesquisadores, em especial Elmo Silvano e Romilton Amaral, do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, que possibilitaram o entendimento necessário para que desvendássemos o mundo fascinante que envolve aos fenômenos nucleares.

A todos aqueles, amigos de verdade, que nunca deixaram de acreditar em nós.



# Apresentação

Vulcões, raios, radioatividade e outros fenômenos naturais têm sido demonizados, com justa razão, pelos danos que podem causar à vida. Porém, sem eles a vida não existiria, ou pelo menos seria bem diferente. Esta oposição os torna ainda mais atraentes, transformando-se em temas propícios a serem explorados nas escolas e nos programas de divulgação científica. Este livro vem contribuir para avançar nesse trabalho educacional, inclusive para que não se confunda o fenômeno com seus efeitos ou utilização pelo homem. A insanidade do uso da energia nuclear para a barbárie da guerra e os acidentes nucleares definitivamente estigmatizaram o tema da radioatividade. Entretanto, o livro procura destacar outros aspectos relativos às transformações no vasto mundo dos núcleos atômicos. A radioatividade esteve na raiz da construção do modelo atômico moderno, contribuiu para a consolidação da teoria da evolução ao permitir uma medida precisa da idade da Terra, o banho de radiação a que estamos submetidos diariamente, tanto do cosmos como as da Terra, é determinante nas mutações genéticas, os radiofármacos transformaram-se num instrumental estratégico para a medicina, a geração de energia elétrica pela fissão nuclear ganhou corpo pelo mundo, enfim, é um outro lado do tema que nos leva a reflexões e estímulos para aprofundamento nos conhecimentos do que

acontece nas dimensões hadrônicas. A radioatividade no meio ambiente, os radionuclídeos na química do nosso organismo, os núcleos criados pelo homem, são alguns dos temas aqui selecionados que certamente irão atrair a atenção do leitor. Os quarks e a nova fauna de partículas elementares, outro assunto atraente, mas ainda pouco presente, até ausente, das páginas dos livros didáticos, também é destaque. Portanto, na celebração do Ano Internacional da Química, especialmente pela lembrança que nos trará de Marie Curie, nada mais oportuno que este livro.

**Antonio Carlos Pavão**

Professor do Departamento de Química Fundamental da Universidade Federal de Pernambuco

Diretor do Museu Interativo Espaço Ciência-Olinda/PE

## Sobre as autoras



**Kátia Aparecida da Silva Aquino**

*Possui graduação em Licenciatura Plena em Química pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (1995), mestrado (2000) e doutorado (2005) em Tecnologias Energéticas Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente é professora de Química do Colégio de Aplicação/Centro de Educação e pesquisadora do Departamento de Energia Nuclear, ambas as atividades realizadas na Universidade Federal de Pernambuco. Tem experiência na área de química orgânica. Faz pesquisas na área de aplicações das radiações em sistemas poliméricos, aproveitamento de biomassa residual e sobre o ensino de ciências, atuando principalmente nos seguintes temas: efeitos da radiação gama em polímeros convencionais, estabilização radiolítica de polímeros, efeitos da radiação gama em blendas poliméricas e nanocompósitos poliméricos, síntese de nanopartículas, análise de biomassa residual para utilização em biotecnologia e estratégias para o ensino de ciências com ênfase no ensino da radioatividade.*

Rua Pavuna, 20 Bl. E apto. 301  
Curado Recife/PE  
CEP 50940370  
(081) 88846174 ou 32520748  
[aquino@ufpe.br](mailto:aquino@ufpe.br)



**Fabiana da Silva Aquino**

*Possui graduação em Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2000) e mestrado em Tecnologias Energéticas Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco (2006). Atualmente é bióloga do Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcante, no porto de SUAPE, no Cabo de Santo Agostinho/PE. Tem experiência na área de Ciências Biológicas, com ênfase em animais silvestres e monitoração de radionuclídeos naturais no meio ambiente. Desenvolve trabalhos em reflorestamento e monitoramento de áreas degradadas (erodidas) e pesquisa de poluentes produzidos pelo Complexo Industrial e Portuário do porto de SUAPE.*

## Prefácio

Você pode achar que a radiação só atinge as pessoas que vivem próximas ou trabalham em usinas nucleares. Porém, diariamente, estamos expostos a uma certa quantidade de radiação proveniente do ambiente e dos alimentos que ingerimos. Além disso, partículas como o neutrino, que se formam no universo, atravessam a atmosfera e nos bombardeiam o tempo todo. Mas nada disso é motivo para pânico pois de maneira geral, os níveis de radiação são extremamente baixos e as partículas que nos bombardeiam são inofensivas à saúde humana.

Preparamos este livro no intuito de esclarecer os interessados a respeito de um assunto tão presente, mas ao mesmo tempo tão cheio de preconceitos, que leva o homem a associar a radioatividade apenas com a destruição e a morte. Só para exemplificar, todos nós recebemos doses de radiação em decorrência da ingestão de urânio pela água, que emite partículas alfa de baixa energia. Como consequência, o organismo fica exposto aos elementos radioativos provenientes do decaimento do urânio, tais como: o rádio, o radônio, além do polônio e do chumbo. Todo o ambiente terrestre é exposto à radiação natural e os níveis de radiação variam, sendo maiores em umas regiões e menores em outras. Contudo, são raras as informações deste tipo de radiação em livros didáticos, forçando os futuros cidadãos a associarem os fenômenos nucleares apenas aos acidentes e às guerras. O pior de tudo é que o aluno não encontra significado nenhum

no conteúdo de radioatividade trabalhado, principalmente pela falta de contextualização. Neste livro serão encontradas informações que desvendarão um mundo diferente e muito mais radioativo do que imaginamos.

Neste livro também procuramos esclarecer alguns pontos relacionados ao mundo atômico, através de uma breve discussão sobre as partículas elementares que constituem um átomo, o que leva o leitor para um mundo subatômico além de prótons, elétrons e nêutrons. Estas informações são importantes para o entendimento de como ocorrem os fenômenos nucleares e também mostrar como, todos os dias, os radioisótopos de elementos tão conhecidos da nossa Tabela Periódica estão tão presentes no nosso cotidiano.

Esperamos que este material venha auxiliar você, químico ou interessado, a desvendar um pouquinho da radioatividade que está perto de cada um de nós e descobrir o mundo silencioso dos fenômenos radioativos que acontecem o tempo todo, não só no nosso cotidiano, mas literalmente dentro de cada um de nós.

*As autoras*

# Índice

Agradecimentos.....	3
Apresentação .....	4
Sobre as autoras.....	7
Prefácio .....	9
Índice.....	11
Capítulo 1: Radioatividade: Um pouco desta história.....	15
1.1 Uma mulher e sua grande contribuição para a radioatividade .....	15
1.2 Marie Curie no Brasil .....	25
1.3 A descoberta da radioatividade: qual foi a ligação entre as descobertas de Becquerel e Marie Curie? .....	31
Capítulo 2 .....	39
2.1 O modelo padrão da matéria: muito além de prótons, elétrons e nêutrons.....	39
2.2 Da família dos elétrons: os léptons.....	40
2.3 Os quarks e o núcleo atômico.....	42
2.4 Os bósons e suas interações .....	47
2.5 O núcleo e o fenômeno da radioatividade .....	51

2.5.1 A partícula alfa ( ${}_{+2}\alpha^4$ ) .....	55
2.5.2 As partículas beta ( $\beta^0$ ) e pósitron ( ${}_{+1}\beta^0$ ).....	57
2.5.3 Radiação Gama ( $\gamma$ ): as ondas que saem do núcleo.....	63
2.5.3.1 O efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton.....	64
2.6 Interação da radiação com a matéria: o que acontece? .....	68
2.6.1 Consequências da interação da radiação com a matéria: uma química diferente.....	69
2.7 Cinética das desintegrações nucleares.....	70
2.8 Biocinética de radionuclídeos.....	73
Capítulo 3.....	77
3.1 A radioatividade que vem do céu.....	77
3.2 A radioatividade do meio ambiente .....	82
3.3 Como os átomos radioativos chegaram até o nosso planeta? .....	84
3.4 Propriedades dos radionuclídeos: uma tabela periódica mais radioativa .....	86
3.4.1 Grupo dos ametais.....	87
3.4.2 Grupo dos metais alcalinos.....	88
3.4.3 Grupo dos metais alcalinos terrosos.....	90
3.4.4 Grupo dos gases nobres .....	93
3.4.5 Grupo dos metais pesados.....	94
3.4.6 Grupo dos actinídeos .....	97

Capítulo 4 .....	103
4.1 A nossa radioatividade de cada dia .....	103
4.2 A radioatividade na água: tomando uma dose de radionuclídeos diariamente .....	105
4.2.1. <i>O urânio que bebemos</i> .....	106
4.2.2 <i>O rádio “que não ouvimos”</i> .....	108
4.2.3 <i>O radônio que respiramos</i> .....	109
4.2.4 <i>Chumbo e polônio que não pesam tanto no nosso organismo</i> .....	110
4.4 Interação da radiação com a água .....	111
4.5 A radioatividade que vem do solo .....	112
4.6 A radioatividade que está no nosso cardápio.....	117
4.7 Os radionuclídeos ingeridos: a química do nosso organismo.....	123
4.7.1 <i>A absorção de radionuclídeos via ingestão</i> .....	124
4.7.2 <i>A absorção de radionuclídeos via inalação</i> .....	127
4.8 A exposição das células do nosso organismo .....	130
 Capítulo 5 .....	 135
5.1 Radioatividade artificial: os radionuclídeos criados pelo homem..	135
5.2 A contribuição do homem para o aumento da radioatividade no ambiente .....	136
5.3 O <sup>137</sup> Cs: a criação do homem que está no meio ambiente .....	141



# Capítulo 1

## Radioatividade: Um pouco desta história

### 1.1 Uma mulher e sua grande contribuição para a radioatividade



Figura 1.1 Marie Curie (1867-1934)<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> fonte: <http://www.explicatorium.com/Marie-Curie.php>

No dia 31 de outubro de 2010 foi anunciado pelo Tribunal Eleitoral que o Brasil tinha um novo governante. Não um homem, mas uma mulher. Dilma Rousseff é a primeira mulher a presidir o Brasil, um marco para a história brasileira. A notoriedade de mulheres, porém, não é algo que pode ser vista só no século XXI. Mulheres fizeram e fazem parte da história com grande contribuição para a sociedade. Nos estudos sobre radioatividade também temos uma importante força feminina: seu nome é Maria Salomea Sklodowska, conhecida simplesmente como Marie Curie (Figura 1.1).

Ela nasceu em Varsóvia, na Polônia, no ano de 1867. Sua mãe Bronislawa foi diretora de uma escola particular e seu pai, Wladyslaw Sklodowski, era professor. Juntos, tiveram cinco filhos: Zofia, Josef, Bronislawa (Bronia), Helena e Maria. Ainda na infância, Maria sofreu duas grandes perdas: sua irmã Zofia, que contraiu tifo, e sua mãe, que morreu tuberculosa.

Após a morte da mãe, Maria matriculou-se em um ginásio para meninas, onde era proibido falar o idioma polonês. Formou-se em 1883, sendo a laureada da sua turma. Na época, Maria queria frequentar a Universidade de Varsóvia, mas a instituição não admitia mulheres. Foi então morar com parentes e, depois de prolongadas férias, voltou a morar com o pai, dividindo seu tempo entre dar aulas e estudar por conta própria. Nessa época, ela frequentava a Universidade Volante, uma academia clandestina com diversos cursos, cujas aulas eram ministradas nas salas de estar das próprias casas dos estudantes.

Mesmo sendo uma mulher que já demonstrava aptidão para as ciências, seu primeiro trabalho foi como governanta, uma estratégia para conseguir recursos a fim de estudar numa universidade fora da Polônia. Neste plano, quem muito a ajudou foi sua irmã Bronia. Com dezoito anos, Maria partiu de Varsóvia para ser governanta num lugar a cerca de cem quilômetros da sua cidade, sem nunca abandonar os estudos que fazia sozinha.

Bronia então se casou e convidou Maria para morar com o casal em Paris. Maria recusou o primeiro convite, mas seguiu um ano após o planejado. Antes de seguir para Paris, morou um ano em Varsóvia com seu pai e teve enfim a oportunidade, oferecida por um primo, ex-aluno de Mendeleev (1834-1907), de usar um laboratório para estudos.

No final do ano de 1891, Maria, com vinte e três anos, seguiu para Paris. Depois de seis meses na Sorbonne<sup>2</sup>, mudou-se do apartamento de sua irmã para outro, próximo à Universidade. Quando entrou na Sorbonne, onde existiam 210 mulheres para uma população de quase 9 mil estudantes, passou a assinar como Marie. Foi grande o seu sucesso acadêmico, ficou entre os primeiros lugares no exame para a *Licence ès sciences* e em segundo lugar para a *Licence ès mathematiques*. Pouco antes de completar seus estudos e voltar para Varsóvia, Marie conheceu Pierre Curie. Pierre teve uma educação não-convencional, estudava em casa e ensinava em uma

---

<sup>2</sup> **Sorbonne** é um sítio histórico situado no quarteirão latino de Paris. O nome Sorbonne designa, em linguagem corrente, a antiga Universidade de Paris (antes de 1793), bem como as faculdades que ali se estabeleceram no século XIX e a nova Universidade de Paris, correspondente ao período de 1896 a 1971.

escola orientada para a indústria. Pierre e Marie tinham muitos pontos em comum, ambos vinham de famílias com mais educação do que recursos financeiros e eram obcecados por trabalho, considerado por eles a principal fonte de felicidade na vida.

Pierre, um ano após o primeiro encontro com Marie, defendeu sua tese de doutorado sobre propriedades magnéticas; foi então que resolveram casar-se. A partir daí, Marie adotou o nome de Marie Curie, pelo qual é mais conhecida atualmente. O casal, apresentado na Figura 1.2, trabalhava muito, frequentava rotineiramente os jantares da Sociedade de Física, ia algumas vezes ao teatro e era amante do ciclismo. Pierre e Marie partilhavam suas anotações sobre artigos científicos e interessavam-se ativamente pelo trabalho um do outro. No outono de 1897, mesmo ano que J. Thomson (1856-1940) propôs a existência do elétron, nasceu a primeira filha do casal, Irene, que mais tarde também seria uma mulher com grande contribuição para a ciência, além de uma companheira de trabalho da mãe.



Figura 1.2 Casal Curie<sup>3</sup>

Após se tornar mãe, Marie começou a realizar pesquisas originais com o objetivo de obter um título de doutorado. Deu continuidade à pesquisa de Henri Becquerel (1852-1908) sobre raios emitidos dos compostos de urânio, levando em conta a ideia de Lord Kelvin (1824-1907) sobre a eletrização do ar pelo urânio e seus compostos. Iniciou seu trabalho em um espaço de armazenagem na escola onde Pierre lecionava e testou vários compostos.

Em 12 de abril de 1898, membros da Academia de Ciências ouviram um relatório escrito por Marie Curie sobre “Raios emitidos pelos compostos de urânio e tório”, no qual foi sugerido que esta propriedade era atômica. Em

---

<sup>3</sup> fonte: <http://egqsociesc.blogspot.com/2010/11/marie-curie.html>

18 de julho do mesmo ano, outro relatório, lido por Henri Becquerel, relatou sobre o novo elemento químico, o polônio, em homenagem ao país de Marie. O relatório trouxe também, pela primeira vez, a expressão “substância radioativa”, que seria adotada por cientistas em toda parte a partir de então.

Em 26 de dezembro de 1898, outro relatório lido na academia apontava para a descoberta de um novo elemento, batizado por Pierre de rádio. Marie se encarregou da enorme tarefa de isolar o rádio para fazer os químicos admitirem sua existência. Em 1900, em um congresso internacional de Física, em Paris, os Curie apresentaram todas as suas pesquisas sobre a radioatividade. Em 1902, Marie Curie anunciava que o peso atômico do rádio era 225 enquanto Ernest Rutherford (1871-1937) e Frederick Soddy (1877-1956) apresentavam um relatório intitulado “A causa e a natureza da radioatividade”, sugerindo que o fenômeno se relacionava com mudanças subatômicas. Em setembro de 1903, Marie Curie recebeu o título de doutora em ciências físicas com menção honrosa.

Em novembro de 1903, Marie Curie recebeu o Prêmio Nobel de Física junto com Pierre e Henri Becquerel pelas suas descobertas no campo da radioatividade, fenômeno muito pouco conhecido naquela época. A Figura 1.3 mostra o diploma do Nobel de física recebido por Marie. Neste ano, William Ramsay (1852-1916) e Frederick Soddy confirmaram a teoria de

desintegração nuclear, proposta por Rutherford. Ainda no ano de 1903, Marie também recebeu a Medalha Davy<sup>4</sup> e em 1904 a Medalha Matteucci<sup>5</sup>.

Em dezembro de 1905 nasceu a segunda filha do casal Curie, Eve Denise Curie. A Figura 1.4 mostra Marie e as duas filhas Eve e Irene. Em 1906, Pierre veio a falecer atropelado por uma carroça. No ano de 1909, Marie foi agraciada com a Medalha Elliott Cresson<sup>6</sup>. Em 1911, Marie recebeu o seu segundo prêmio Nobel, sendo este de Química, pela descoberta dos elementos químicos rádio e polônio. Até o momento, Marie Curie foi a única cientista que recebeu dois Prêmios Nobel em áreas científicas distintas.

---

4 A **Medalha Davy** é uma medalha de bronze entregue anualmente pela Real Sociedade de Londres, desde 1877, para premiar “descobertas recentes em qualquer ramo da química”.

5 A **Medalha Matteucci** foi estabelecida em 1870 para premiar físicos por contribuições fundamentais à área.

6 A **Medalha Elliott Cresson Medal**, também conhecida como **Medalha de Ouro Elliott Cresson**, foi estabelecida em 1875 e é a maior condecoração concedida pelo Instituto Franklin.



Figura 1.3 Diploma do Nobel de Física recebido por Marie Curie em 1903<sup>7</sup>



Figura 1.4 Marie Curie suas duas filhas Eve (mais nova) e Irene<sup>8</sup>

7 Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Diplom\\_Sklodowska-Curie.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Diplom_Sklodowska-Curie.jpg)

8 Fonte: <http://www.guardian.co.uk/education/mortarboard/2008/sep/10/marie.curie>

No final de 1911, Marie começou a apresentar sérios problemas de saúde. Neste período de 1911 a 1913, houve grandes avanços no estudo da radioatividade: Rutherford propôs um novo modelo atômico, o famoso modelo planetário que conhecemos, e Niels Bohr (1885-1962) aperfeiçoou este modelo. As dificuldades pessoais de Marie afetaram sua produtividade, mas seu trabalho no laboratório continuava - era geralmente a primeira a chegar ao laboratório e a última a ir embora. Seu círculo social também aumentava: Hendrik Lorentz (1853-1928), Albert Einstein (1879-1955) e outros passaram a fazer parte de seu convívio. No início da primeira guerra, Marie permaneceu em Paris para tomar conta do seu novo laboratório e do suprimento de rádio que acabou sendo transportado para Bordeaux (também na França), por questões de segurança. Durante a guerra, Marie fez diversos donativos, até o seu prêmio Nobel. No mesmo período, descobriu um meio de tornar o raio X disponível para os soldados em combate. Montou carros radiológicos, que levavam um gerador e o equipamento básico para produção de raios X, e também treinou e educou outras pessoas para manusearem o equipamento. Irene, sua filha, trabalhou intensamente com ela durante a guerra e também obteve certificados na Sorbonne.

Após a guerra, Marie participou da Comissão para a Cooperação Intelectual da Liga das Nações e travou relacionamento com os Estados Unidos. Marie Curie era otimista quanto às aplicações de rádio no tratamento do câncer e ao serviço de radioterapia. Em 1921 visitou os Estados Unidos,

onde foi recebida triunfalmente. O motivo da viagem era arrecadar fundos para a pesquisa.

Nos seus últimos anos foi assediada por muitos físicos e produtores de cosméticos, que usavam material radioativo sem precauções. Na ocasião da viagem aos Estados Unidos, Marie Curie declarou que sua saúde fora arruinada pela exposição à radioatividade.

Marie Curie foi ainda a fundadora do Instituto do Rádio, em Paris, onde se formaram cientistas de importância reconhecida. Em 1922, tornou-se membro associado livre da Academia de Medicina. O seu livro *Radioactivité*, escrito ao longo de vários anos e publicado a título póstumo, é considerado um dos documentos fundadores dos estudos relacionados com a radioatividade clássica.

Em vida, Marie Curie adquiriu propriedades no campo que deixou em nome de suas filhas. Em janeiro de 1934, Marie compartilhou com sua filha Irene e seu genro Frederic-Joliot a imensa alegria pela produção do primeiro elemento radioativo artificial.

Em 7 de julho de 1934, Marie faleceu tuberculosa e quase cega, em um sanatório nos Alpes franceses, em consequência das fortes doses de radiação a que ficou submetida durante os vários anos de trabalho.

Eve, sua segunda filha, além de cuidar da mãe até o fim de sua vida, publicou a sua primeira bibliografia, que foi amplamente traduzida para vários idiomas. Em Portugal, é editada pela Livros do Brasil editora. Esta obra deu

origem ao argumento de um filme de 1943: "Madame Curie", realizado por Mervyn LeRoy, com Greer Garson no papel de Marie.

Foram também produzidos dois telefilmes sobre a sua vida: "Marie Curie: More Than Meets the Eye" (1997) e "Marie Curie - Une certaine jeune fille" (1965), além de uma minissérie francesa, "Marie Curie, une femme honorable" (1991). Outra homenagem à notável cientista foi o elemento 96 da tabela periódica, o Cúrio, com o símbolo **Cm**, batizado em honra do casal Curie.

Em 1995, seus restos mortais foram trasladados para o Panteão de Paris, tornando-se a primeira mulher a ser sepultada neste local.

O Parlamento polonês aprovou uma resolução declarando 2011 o Ano de Marie Curie. Esta foi a forma encontrada pelo país onde Marie Curie nasceu de homenagear os cem anos do Nobel de Química a ela concedido, não só a primeira mulher a receber um Nobel, mas uma das maiores cientistas que o mundo já conheceu.

## 1.2 Marie Curie no Brasil

Em 1922 foi construído no Brasil o Instituto Radium em Belo Horizonte, primeiro centro destinado à luta contra o câncer no Brasil. Na década de 20, houve um grande aumento da mortalidade por câncer no Brasil e a construção do Instituto Radium foi uma conquista de médicos e professores preocupados com o problema. Um momento marcante da

história do Instituto foi a visita de Marie Curie e sua filha Irene, em agosto de 1926. Sim, Madame Curie, como era carinhosamente conhecida, já esteve no Brasil. No dia 17 de agosto, após longa viagem de trem, vindo do Rio de Janeiro, mãe e filha foram conhecer o Instituto. O registro da ilustre visita está nas assinaturas de Marie e Irene no livro de assinaturas, como pode ser visto na Figura 1.5.

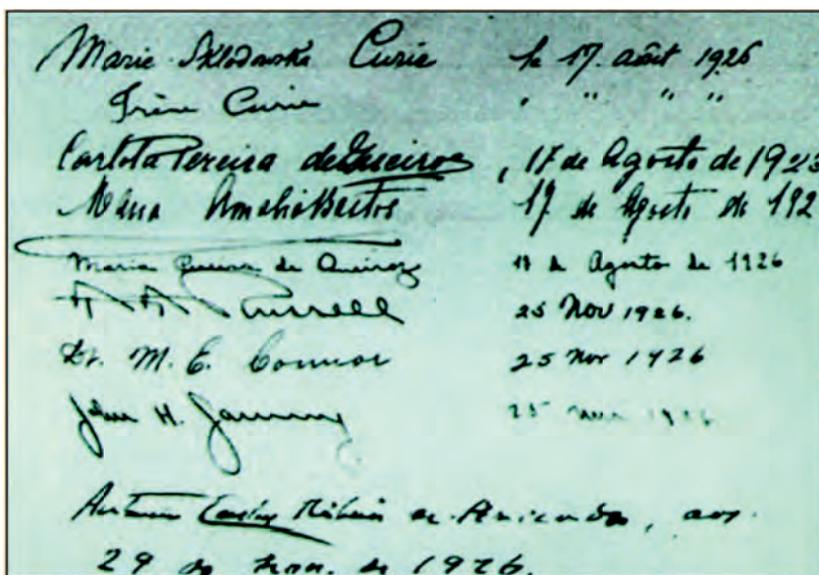


Figura 1.5 Livro de assinaturas da visita de Marie Curie e sua filha Irene ao Instituto Radium, no Brasil (topo do lado esquerdo)<sup>9</sup>

9 Fonte: [http://www.akisrx.com/htmtre/curie\\_brasil.htm](http://www.akisrx.com/htmtre/curie_brasil.htm)

No dia 18, Marie Curie proferiu uma conferência na Faculdade de Medicina sobre a radioatividade e suas aplicações na medicina. A Figura 1.6 mostra a fotografia da Marie Curie, Irene e personalidades médicas como Borges da Costa, diretor do Centro (na foto, o homem de bigode e gravata borboleta à esquerda das Curie).

Em homenagem ao fundador e primeiro diretor do Instituto Radium, o local passou a se chamar Instituto Borges da Costa, em 1950. Em 1967, o Instituto foi incorporado ao patrimônio da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Dez anos mais tarde, em função da situação precária da construção, o prédio foi desativado e permaneceu de portas fechadas até 1980, quando passou a servir de moradia para estudantes da UFMG até 1998. Atualmente, o edifício está desocupado e existe um projeto para a reforma e restauração deste Instituto, outrora tão importante para várias vítimas de câncer e hoje, sem dúvida, parte da memória da medicina brasileira.



Figura 1.6 Marie e Irene Curie ao centro da foto com grandes personalidades médicas dos anos 20.<sup>10</sup>

A visita de Marie Curie ao Brasil não se limitou apenas ao Instituto Radium em Belo Horizonte. Atendendo ao convite do médico italiano Francisco Antônio Tozzi (1870-1937), considerado o fundador da cidade de Águas de Lindóia, Marie Curie foi a São Paulo para analisar o poder curativo das águas termais de Lindóia, que eram conhecidas como “águas quentes”. Francisco Tozzi dedicou sua vida à pesquisa das fontes minerais das "águas quentes", enquanto os casos de curas multiplicavam-se. Thermas de Lindóia tornou-se o balneário preferido por artistas, políticos e personalidades

---

<sup>10</sup> Arquivo do Centro de Memória da Medicina de Minas Gerais

ilustres e Marie Curie ficou impressionada com os níveis de radioatividade das águas, reconhecendo que esta radioatividade era o agente curador dos males. A radioatividade natural da água é extremamente benéfica para o organismo.

Um dos índices que medem a qualidade radioativa da água é o Bequerel por litro (Bq/L), também conhecida por “mache”. Um Bq equivale a uma desintegração por segundo e, quanto maior esse índice, mais radioativa é a fonte. Anos mais tarde, descobriu-se que a água mineral de Águas de Lindóia atinge a impressionante atividade de 40.697.558 Bq/L na escala radioativa. A título de comparação, as famosas fontes de águas com maiores atividades radioativas são Jachimou, na República Tcheca, e Bad Gastein, na Áustria. Jachimou atinge a atividade de 2.368.370 Bq/L, enquanto Bad Gastein apresenta 1.984.310 Bq/L. Assim, Águas de Lindóia possui, comprovadamente, a água mineral de maior radioatividade de todo nosso planeta.

Uma curiosidade é que a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), após pesquisar em diversas fontes de águas minerais no mundo, optou pela água de Águas de Lindóia para suprimento dos astronautas na missão Apollo 11, por ser detentora das maiores propriedades diuréticas e possuir elevado nível de radioatividade. A nota fiscal nº 20.218 de 02/04/1969 da extinta Cervejaria Amazonas Ltda, distribuidora no Rio de Janeiro (Figura 1.7), consta a aquisição pela NASA de 100 dúzias de recipiente de meio litro da água mineral Lindóia Carrieri. Na nota aparece o

envio, pelo Aeroporto Santos Dumont, ao Centro Espacial Kennedy. A nota original encontra-se exposta na Prefeitura Municipal de Águas de Lindóia. A missão Apollo 11 levou o primeiro homem à lua em 1969.

Ministério da Fazenda  
Imposto Único Sobre Minerais  
Nota Fiscal de Operações não Tributáveis

121897-00  
De Fisco De Contribuinte  
Número de Inscrição

**CERVEJARIA AMAZONAS LTDA.**  
Distribuidora de Águas Minerais  
Rua da Lapa, 15 Tels. 22-8350 e 32-7459  
RIO DE JANEIRO - EST. DA GUANABARA  
Ins. 251926 121892-00 - Ins. 66811 33.022.749

**NOTA FISCAL**  
Em 3 vias - Série 83 2  
2ª VIA

Nº 20218

Capital Registrado NCr\$ 22.200,00 Atividade Exercida: VIA

Remetem à Missão M. Americana E.U.A. local. Cabo  
Estabelecido à Aeroporto Santos Dumont Kennedy  
Bairro \_\_\_\_\_ Cidade \_\_\_\_\_ Estado \_\_\_\_\_

Os seguintes produtos minerais: COCMP

Quant.	Código de Produto	Unid.	Recipiente	MERCADORIAS	Preço Unitário	Valor Total de Operação
100		De.	1/2 L	Água Lindóia <b>CARRIERI</b>		NCr\$ 226,00
			1/2 L	Prata		
			1/2 L	Magnésico		
			1/2 L	São Lourenço		
			1/2 L	Combuqueiro		
			1/2 L	Corumbá		
			1/2 L	Sulatório e Lombard		
			1/2 L	Petrópolis		
			L	Petrópolis <b>NCr</b>		
				Correto		

SOMA 226,00

Observações CAIXAS Com Tampa para Viagem  
Rio de Janeiro - GB 2 de Abril de 1969

Obs. Os produtos seguem em \_\_\_\_\_ de n.º \_\_\_\_\_  
com a marca \_\_\_\_\_ pesando ou medindo \_\_\_\_\_ Bruto \_\_\_\_\_ Líquido \_\_\_\_\_  
Pela \_\_\_\_\_

Data da Saída dos Produtos 2 de 4 de 1969

Facili. as mercadorias constantes da NOTA FISCAL - Série 8-1  
Em 2 de 4 de 1969 Nº 20218

Figura 1.7 Nota fiscal emitida na compra de água mineral proveniente de Águas de Lindóia/SP pela NASA<sup>11</sup>

11 Fonte: [http://blogdowiller.blogspot.com/2010\\_05\\_01\\_archive.html](http://blogdowiller.blogspot.com/2010_05_01_archive.html)

### 1.3 A descoberta da radioatividade: qual foi a ligação entre as descobertas de Becquerel e Marie Curie?

Antoine Henri Becquerel (Figura 1.8) iniciou seus estudos científicos, os quais levaram a grandes contribuições na área da radioatividade, motivado pela descoberta, em 1895, do raio X, por Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923). Além dos trabalhos de Becquerel, outros cientistas também iniciaram suas pesquisas baseados nos raios descobertos por Röntgen. Nesse sentido destaca-se, em particular, a hipótese levantada por Henri Poincaré (1854-1912) de que havia uma relação entre a emissão dos raios X e a fluorescência do vidro de que era feito o tubo de raios X.



Figura 1.8 Antoine Henri Becquerel (1852-1908)<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Henri\\_Becquerel.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Henri_Becquerel.jpg)

Becquerel desenvolveu e realizou suas primeiras pesquisas no laboratório do seu pai, Alexandre Becquerel. Entre outros assuntos, Becquerel estudou a fosforescência invisível (no infravermelho) de várias substâncias. Estudou, em particular, os espectros de fluorescência de sais de urânio, utilizando amostras que seu pai havia acumulado ao longo dos anos. Na realidade, os trabalhos de Becquerel não estabeleceram nem a natureza das radiações emitidas pelo urânio nem a natureza subatômica do processo. Seu trabalho, originado pela hipótese de Poincaré, era apenas um dos muitos da época que apresentavam resultados de difícil interpretação e que não tiveram o impacto da descoberta dos raios X. No ano de 1895, Becquerel descobriu acidentalmente uma nova propriedade da matéria que, posteriormente, foi denominada de radioatividade por Marie Curie. Ao colocar sais de urânio sobre uma placa fotográfica em local escuro, verificou que a placa escurecia, ficando preta. Os sais de urânio emitiam uma radiação capaz de atravessar papéis negros e outras substâncias opacas à luz. Estes raios foram denominados, a princípio, de *Raios de Becquerel*, em sua homenagem, ou *Raios de urânio*.

Poucos pesquisadores se dedicaram ao estudo dos *Raios de Becquerel* até o início de 1898. Por um lado, os próprios compostos luminescentes do urânio (ou o urânio metálico) eram de difícil obtenção e Becquerel parecia ter esgotado o assunto. Além disso, muitos outros fenômenos anunciados na mesma época desviavam a atenção e apontavam igualmente para aspectos delicados desse tipo de estudos. O único resultado

novo, durante esse tempo, foi o de que a radiação do urânio permanecia forte ao longo de meses, apesar de não haver recebido luz.

No início de 1898, dois pesquisadores, Gerhard Carl Schmidt (1865-1949), na Alemanha, e Marie Curie, na França, iniciaram suas pesquisas, de forma independente, na tentativa de descobrir outros materiais que emitissem radiações do mesmo tipo além do urânio. Em abril de 1898, ambos publicaram a descoberta de que o tório emitia radiações, como o urânio. O método de estudo não foi fotográfico, mas com o uso de uma câmara de ionização, observando-se a corrente elétrica produzida no ar, entre duas placas eletrizadas, quando se colocava um material que emitia radiações entre as placas. Esse método de estudos era mais seguro do que o uso de chapas fotográficas, já que as chapas podem ser afetadas por muitos tipos de influências diferentes. A radiação emitida pelo tório era observada em todos os seus compostos examinados, como ocorria com o urânio. Ela produzia efeitos fotográficos e era um pouco mais penetrante do que a do urânio.

Marie Curie estudou vários minerais, além de substâncias químicas puras. Notou, como era de se esperar, que todos os minerais de urânio e de tório emitiam radiações. A descoberta do efeito produzido pelo tório deu novo impulso à pesquisa dos *Raios de Becquerel*. A essa altura, percebia-se que esse não era um fenômeno isolado, como se só ocorresse no urânio. A notável cientista estava ciente de que se tratava de um fenômeno muito mais geral.

Poucos meses depois da descoberta do efeito produzido pelo tório, Marie e Pierre Curie apresentaram um trabalho de ainda maior importância<sup>13</sup>. No trabalho anterior, Marie Curie havia sugerido que a pechblenda talvez contivesse outro material radioativo desconhecido e ela se empenhou no trabalho de tentar isolar essa substância. Através de processos analíticos, o casal Curie obteve um material que era 400 vezes mais ativo do que o urânio puro. Na última reunião de 1898 da Academia de Ciências, o casal Curie apresentou seu novo trabalho<sup>14</sup>. Nele, apresentam evidências de um novo elemento radioativo, quimicamente semelhante ao bário, extraído também da pechblenda. Também nesse caso não foi possível separar o novo elemento do metal conhecido, mas foi possível obter um material 900 vezes mais ativo do que o urânio. Os autores do artigo dão a esse novo elemento o nome de "rádio", por parecer mais radioativo do que qualquer outro elemento.

Mesmo com a descoberta dos novos elementos radioativos, o fenômeno em si ainda precisava ser compreendido. Algumas perguntas foram lançadas: o que eram as radiações emitidas, iguais aos raios X ou não? De onde saía a energia desprendida desses materiais? Por que alguns elementos são radioativos e outros não? Não havia nem a suspeita de que a radioatividade acarretava transformações de um elemento químico em outro,

---

13 CURIE, P., CURIE, M.S. Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblend. *Comptes Rendus*, **127**, 175-178 (1898).

14 CURIE, P., CURIE, M.S., BÉMONT, G. Sur une nouvelle substance fortement radioactive, contenue dans la pechblende. *Comptes Rendus*, **127**, 1215-1217 (1898).

o que é muito bem estabelecido nos tempos modernos. O nome "radioatividade" existia, mas não se conhecia ainda o complexo fenômeno ao qual damos hoje esse nome.

A natureza e diversidade das radiações emitidas por materiais radioativos foram estabelecidas gradualmente. No início de 1899, Rutherford descobriu a existência de dois tipos de radiação provenientes do urânio: uma mais penetrante (que chamou de alfa) e outra facilmente absorvida (que chamou de beta). No entanto, Rutherford imaginou que ambas as radiações eram diferentes tipos de raios X. O casal Curie também testou tais radiações e verificou que alguns raios eram defletidos pelo ímã e outros quase não o eram. Os que eram defletidos correspondiam à radiação beta de Rutherford. O sentido da deflexão<sup>15</sup> mostrou que as partículas beta eram semelhantes aos raios catódicos, ou seja, dotados de carga elétrica negativa.

Posteriormente, o casal Curie observou, por medidas elétricas, que essa radiação transportava de fato uma carga negativa. A radiação pouco defletida foi identificada como radiação alfa. Hoje sabemos que a pouca deflexão da partícula alfa se dá devido à grande razão entre sua massa/carga.

No ano de 1900, Paul Ulrich Villard (1860-1934) descobriu raios muito penetrantes, que foram denominados "raios gama", enquanto estudava o urânio e o rádio no Departamento de Química da escola normal da rua d'Ulm, em Paris. Apenas em 1903, Rutherford observou que a radiação alfa

---

15 Desvio da trajetória inicial de uma partícula pela ação de um campo externo.

podia ser defletida elétrica e magneticamente, verificando então que se tratava de partículas com carga positiva. Só então ficou mais clara a noção a respeito da natureza dessas três radiações.

A transformação de um elemento químico em outro quando da ocorrência da liberação de radiação do núcleo também foi outro aspecto que emergiu aos poucos. Em 1899, Rutherford observou a existência de uma emanção radioativa do tório. Depois de vários meses, verificou que se tratava de um novo elemento químico gasoso, o radônio. Descobriu-se também que a emanção em depósitos perdia rapidamente o potencial de emitir radiação, o que mostrou tratar-se de uma mudança atômica gradual.

Após esses e outros estudos, Rutherford e Frederick Soddy apresentaram a teoria das transformações radioativas conhecidas hoje como a 1º lei de Soddy para o decaimento alfa e a 2º lei de Soddy relacionada com o decaimento beta. Com esses trabalhos, as linhas gerais da nova visão sobre a radioatividade haviam sido estabelecidas e muitos aspectos foram esclarecidos paulatinamente nos anos seguintes.

Pelo que foi descrito até aqui, pode-se notar que não há nenhuma relação entre os trabalhos de Marie Curie e Becquerel, e não se tem nenhum conhecimento de trabalhos conjuntos entre os dois cientistas. Contudo, um livro editado na Alemanha<sup>16</sup> afirma que Marie Curie foi assistente de Becquerel, o que é surpreendente para a comunidade científica. O texto que

---

16 SIMONYI, K. *Kulturgeschichte de Physik*, Frankfurt: Verlag Harri Deutsch Thun, p. 481.

segue foi retirado do referido livro e foi traduzido pelo prof. José Irineu Kunrath (1931-2002) do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e expressa diretamente a ligação direta entre Becquerel e a Madame Curie. Veja o trecho:

*“Nas pesquisas cuidadosamente elaboradas por Becquerel, o erro e a coincidência não mais apareceram. Os resultados destes estudos o autorizavam a concluir que os fenômenos observados nada tinham a ver com fluorescência, mas com certas propriedades desconhecidas dos sais de urânio. Becquerel observou então que a ação dos sais de urânio não dependia de seu estado físico ou químico, e que a radiação, durante algum tempo conhecida como "radiação Becquerel", ionizava o ar exatamente da mesma maneira que a radiação de Röntgen. Entretanto, no ano seguinte acabou o interesse de Becquerel por esta radiação. Ele preferiu concentrar seus esforços no efeito Zeeman<sup>17</sup> do qual ele esperava mais. O prosseguimento de seus estudos sobre as radiações ele confiou a sua assistente Marie Curie-Sklodowska.”*

---

17 O **efeito Zeeman** é o desdobramento das raias espectrais de um espectro em resposta à aplicação de um campo magnético **B** à amostra.

Se Marie Curie foi ou não assistente de Becquerel, este é um fato de importância histórica. Isso não muda em nada a brilhante trajetória construída por esta cientista, mãe e mulher, hoje não somente nossa inspiração, mas um marco indubitável no conhecimento da radioatividade.

## Referências bibliográficas

BADASH, L. Radioactivity before the Curies. *American Journal of Physics*, **33**, 128-135 (1965).

JAUNCEY, G.E.M. The early years of radioactivity. *American Journal of Physics*, **14**, 226-241 (1946).

MARTINS, R.A. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. **7**, 27-45 (1990).

QUINN, S. **Marie Curie: uma vida**; tradução Sonia Coutinho. São Paulo: Scipione, 1997, 526 p.

SANDRO, F; ALMEIDA, S. S. A histórica visita de Marie Curie ao Instituto do Câncer de Belo Horizonte. *Radiologia Brasileira*, **34**, VII-VIII (2001).

Viva a alegria de Águas de Lindóia em: <http://www.aguasdelindoia.com.br/curiosidades.asp>.  
Acessado em 17 de janeiro de 2011.

# Capítulo 2

## 2.1 O modelo padrão da matéria: muito além de prótons, elétrons e nêutrons

Quando estudados o átomo e toda a evolução do modelo atômico, podemos fazer perguntas do tipo: “a massa de um átomo é o somatório das massas de prótons e nêutrons presentes no núcleo?”. Outras questões, no entanto, são ainda mais intrigantes: “como prótons e nêutrons se mantêm unidos no núcleo?” ou “tudo que faz parte das nossas vidas é composto basicamente de prótons, elétrons e nêutrons?”

No começo dos anos 30 do século XX, a estrutura do átomo estava bem estabelecida e a estrutura do núcleo estava sendo investigada. Acreditava-se que os componentes básicos da matéria seriam prótons, elétrons e nêutrons. Hoje, após a evolução da ciência que estuda as partículas elementares, sabe-se que as partículas fundamentais que constituem a matéria são subdivididas em três grandes classes: os léptons, os quarks e as partículas de interação, os bósons. Não podemos tratar de fenômenos nucleares sem antes conhecer um pouco da constituição do núcleo e a ação destas partículas elementares.

## 2.2 Da família dos elétrons: os léptons

Os léptons, cujo nome significa “leves”, são partículas que não sofrem influência da força que mantém prótons e nêutrons unidos no núcleo (força nuclear forte), pois estão sempre fora dessa estrutura, e podem viajar por conta própria. O lépton mais conhecido é o elétron ( $e^-$ ), que possui carga negativa, como todos já conhecem. Outros léptons menos conhecidos, mas que fazem parte do universo, são o tau ( $\tau^-$ ) e o múon ( $\mu^-$ ), sendo que ambos possuem carga negativa (-1), tal qual o elétron. Os outros léptons são o neutrino do elétron ( $\nu_e$ ), o neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ) e o neutrino do múon ( $\nu_\mu$ ). Esses léptons, por sua vez, não possuem carga.

Os neutrinos do elétron são as partículas que mais nos bombardeiam diariamente. Eles atravessam a atmosfera, vindos do sol, e cerca de 50 trilhões de neutrinos atravessam o nosso corpo a cada segundo.

Para cada lépton citado existe a sua antipartícula, que possui as mesmas características da partícula correspondente, possuindo, contudo, uma carga oposta. Para o tau, por exemplo, existe o antitau, com carga +1, cujo símbolo é  $\tau^+$ . Assim, as partículas que não possuem carga, como os neutrinos, são iguais às suas respectivas antipartículas, ou seja, um neutrino é igual a um antineutrino. Uma antipartícula de uma partícula sem carga é representada com um traço sobre seu símbolo, como por exemplo, próton (p) e antipróton ( $\bar{p}$ ).

O antielétron, chamado pósitron ( $e^+$ ), descoberto em 1932, havia sido previsto teoricamente por Dirac nos anos 1930 e 1931. A hipótese da existência de um antielétron, ou seja, o conceito de antipartícula, foi de importância fundamental no desenvolvimento da física de partículas. A ideia de que para cada partícula existe uma correspondente antipartícula permite a previsão de um grande número de novos fenômenos e a própria modificação do conceito de vácuo. A descoberta do neutrino foi postulada por Wolfgang Pauli em 1931, a partir do estudo teórico do decaimento beta (proveniente da transformação de um nêutron em um próton no núcleo atômico) para "salvar" as leis de conservação de energia e de momento angular. No entanto, os neutrinos foram detectados apenas em 1956.

Usando técnicas de raios cósmicos, foram descobertas as partículas múon ( $\mu$ ), lépton (que já citamos), e méson  $\pi$  (píon), que vamos estudar posteriormente, por se tratar de um conjunto de quarks. Daí em diante, foi descoberta uma grande quantidade de partículas que não tinham propriamente a característica de "tijolos fundamentais", pois viviam somente por tempos brevíssimos.

## 2.3 Os quarks e o núcleo atômico

Os quarks são partículas fundamentais que possuem carga elétrica fracionária, mas que nunca foram detectadas livres, estando sempre agrupadas. Ao agrupamento de quarks dá-se o nome de hádrons, que significa “confinados”, cada um podendo ser composto de quarks e/ou antiquarks. São conhecidos seis tipos de quarks: quark *up* (*u*), quark *down* (*d*), quark *strange* (*s*), quark *charm* (*c*), quark *bottom* (*b*) e quark *top* (*t*). Suas cargas são frações da carga do elétron:  $+2/3e$ ,  $-1/3e$ ,  $-1/3e$ ,  $+2/3e$ ,  $-1/3e$  e  $+2/3e$ , respectivamente (lembre-se que a carga do elétron é de  $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ ). A soma das cargas dos quarks no agrupamento fornece a carga do hádron, que será sempre um múltiplo inteiro da carga elétrica do elétron. Os pares de quarks e antiquarks são chamados de mésons, e a junção de três quarks ou de antiquarks é chamada de bárion.

Os bárions mais conhecidos são os prótons e os nêutrons. Pois bem, os prótons e os nêutrons não são partículas elementares, como se acreditava até o início dos anos trinta. Um próton é constituído por três quarks “*uud*” (*up*, *up*, *down*); já um nêutron é formado por três quarks “*udd*” (*up*, *down*, *down*). A soma das cargas dos quarks que formam o próton ( $+2/3+2/3-1/3$ ) dá a ele a carga que já conhecemos, ou seja, carga  $+1$ . Cálculo similar pode ser feito para o nêutron ( $+2/3-1/3-1/3$ ) para obtermos a carga igual a zero, também muito conhecida. Você imaginava que a carga do próton e a ausência

de carga do nêutron tinham sido facilmente calculadas? Não foram! Muitas pesquisas na área da física de partículas foram realizadas para que tais informações pudessem se tornar aparentemente tão simples.

Vimos que uma junção de três quarks ou antiquarks forma os bárions, dos quais os mais conhecidos são os prótons e nêutrons. A Tabela 2.1 mostra outros bárions, que não são tão “famosos” como os prótons e nêutrons, mas que já foram identificados experimentalmente.

Tabela 2.1 Alguns bárions e a sua estrutura de quarks

<b>Nome do bárion</b>	<b>Representação</b>	<b>Estrutura de quarks</b>
Próton	p	uud
Nêutron	n	udd
Ômega menos	$\Omega^-$	sss
Sigma mais	$\Sigma^+$	uus

Mas é possível uma composição diferente de quarks, ou seja, uma junção de outras quantidades de quarks? Sabe-se que a junção de um par de quark-antiquark forma o que são chamados de mésons. Existe um méson específico que é de fundamental importância para os núcleos atômicos. Descubra o porquê a seguir.

Em 1935, Hideki Yukawa propôs a existência de uma nova partícula que seria a mediadora da interação que manteria nêutrons e prótons coesos no núcleo. Até então, a especulação era grande sobre o que realmente

mantinha o núcleo coeso, já que os prótons, com cargas positivas, deveriam se repelir fortemente devido à repulsão eletromagnética (corpos de cargas iguais se repelem). Essa repulsão provocaria o colapso da matéria. Os estudos de Yukawa, entretanto, pareciam indicar a direção da resposta para o enigma, e levaram à descoberta de que a interação entre prótons e nêutrons deveria ser mediada por alguma partícula. Esta partícula foi denominada méson  $\pi$ , ou pión. Um pión poderia ser emitido por um nêutron e absorvido por um próton, ou vice-versa, fazendo com que o nêutron e o próton exercessem uma força um sobre o outro. A essa força foi dado o nome de “força nuclear” e a correspondente interação de “interação forte”.

Finalmente foi provada a existência do méson  $\pi$  em 1947, com a massa prevista por Yukawa, em um laboratório da Universidade de Bristol. Usando emulsões fotográficas sobre as quais incidiam partículas cósmicas, o mistério da coesão do núcleo havia sido finalmente desvendado. Em 1948, mésons  $\pi^+$  e  $\pi^-$  foram produzidos em aceleradores de partículas na Universidade de Berkeley; em 1950, foi produzido o méson  $\pi^0$  na mesma Universidade.

A força nuclear é a força de maior intensidade do universo que o homem conhece. Para você ter uma ideia: se sua massa fosse empurrada para baixo pela força da interação forte e não pela força da gravidade, você pesaria em torno de 1 trilhão de vezes mais do que pesa agora. Mas por que não sentimos esta força no nosso dia a dia? A força nuclear, ou força forte,

só tem poder para pequenas distâncias, como o que acontece com os bárions dentro dos núcleos atômicos.

As evidências experimentais da existência de quarks ocorreram na década de 70, considerada a década de ouro da física de partículas. Dois brasileiros foram destaques neste ramo da física. Um deles chama-se Alberto Santoro, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), um dos maiores físicos brasileiros contemporâneos, autor de três centenas de artigos científicos, livros e importantes contribuições em seu campo. Ele fez parte da equipe que descobriu em 1995 o quark *top*, no Fermilab, em Chicago. Hoje ele é parte da equipe do *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), onde lidera o grupo de físicos da UERJ no experimento do CMS-*Compact Muon Solenoid* do LHC (*Large Hadron Collider*). Nesta parte do LHC, blocos fundamentais de matéria rastrearão a produção de partículas elementares ainda não observadas experimentalmente.

O LHC foi construído pelo CERN, sendo o maior acelerador de partículas do mundo, com 27 km de extensão. Localizado entre a França e a Suíça, ele entrou em funcionamento no ano de 2010, com muita exposição desse evento nos principais meios de comunicação. Os cientistas esperam ansiosamente pelos resultados obtidos das colisões de partículas. Nesse acelerador serão levados à colisão prótons (os hádrons) acelerados que terão como objetivo provar a existência do bóson de Higgs (discutiremos a seguir o que são bósons), além de outras dimensões do universo e o estudo do quinto estado da matéria: o plasma de quarks-glúons.

Outro brasileiro, César Lattes (1924-2005), teve um papel de destaque na descoberta do méson  $\pi$  em 1947 e na produção dos mésons no acelerador da Universidade de Berkeley no ano seguinte, junto com o norte-americano Eugene Gardner. Lattes foi o brasileiro que esteve mais próximo de ganhar um prêmio Nobel de Física, que no ano de 1949 foi dado a Yukawa. A foto de Yukawa e Cesar Lattes encontra-se na Figura 2.1. Para homenagear Cesar Lattes, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) criou a plataforma Lattes, onde estão os currículos de todos os pesquisadores do Brasil com toda a sua vida acadêmica e artigos científicos, mostrando os resultados das pesquisas que são desenvolvidas no nosso país. Você encontra a Plataforma Lattes na página eletrônica do CNPq.



Figura 2.1 Yukawa e Cesar Lattes<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> Fonte: <http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/meson.htm>

## 2.4 Os bósons e suas interações

Além dos léptons e dos quarks e suas respectivas antipartículas, existem as partículas de força conhecidas como bósons. Os bósons, ou partículas mediadoras, mantêm unidas as partículas elementares para formar outras partículas. Uma força fundamental é um mecanismo pelo qual as partículas interagem mutuamente, e que não pode ser explicado por nenhuma força mais fundamental. Cada fenômeno físico observado, desde uma colisão de galáxias até quarks agitando-se dentro de um próton, pode ser explicado por estas interações. Em outras palavras podemos dizer que objetos, corpos, coisas, etc exercem influência uns sobre os outros, produzindo campos de força em torno de si. O campo de um corpo exerce uma força sobre outro corpo e vice-versa. Devido a sua importância fundamental, a compreensão destas interações ocupou a atenção dos cientistas por muito tempo e continua até hoje. As partículas de força são quatro:

Fóton (talvez a mais famosa) é o mediador da força eletromagnética que liga os elétrons ao núcleo e os átomos nas moléculas. Além disso, é a partícula responsável por todo o espectro eletromagnético, desde os raios gama às ondas hertzianas de rádio, passando pela luz, raios X, radiação ultravioleta e infravermelha.

$W$  (pode ser  $W^+$ ,  $W^-$ ) e  $Z^0$  são partículas de força fraca. Essas partículas medeiam as transformações nucleares nos fenômenos de radioatividade. A massa do bóson  $W$  é de  $14 \times 10^{-24}$  g e a massa do bóson  $Z$  de  $16 \times 10^{-24}$  g.

Glúons são partículas de interação forte que medeiam a força que mantém os quarks ligados e confinados nos hádrons. No núcleo de átomos os glúons mantêm os quarks unidos para formarem os prótons e nêutrons. Os glúons são considerados a cola da matéria. Há oito tipos de glúons e nunca se sabe quais dos oito possíveis glúons participam de uma dada interação.

A partícula mediadora da interação gravitacional ainda não foi detectada, apesar de o seu nome já existir: gráviton. Muitos físicos teóricos tentam descrever uma teoria quântica para a gravidade.

A Figura 2.2 mostra uma representação de como os quarks estão unidos formando os hádrons do tipo bárions (prótons e nêutrons) e as interações destes quarks com o glúon. Além disso, é possível observar a ação do méson  $\pi$ , a força nuclear forte, ao ligar prótons e nêutrons, mantendo o núcleo coeso. A representação da referida figura é de um átomo de deutério ( ${}_1^2\text{H}$ ).

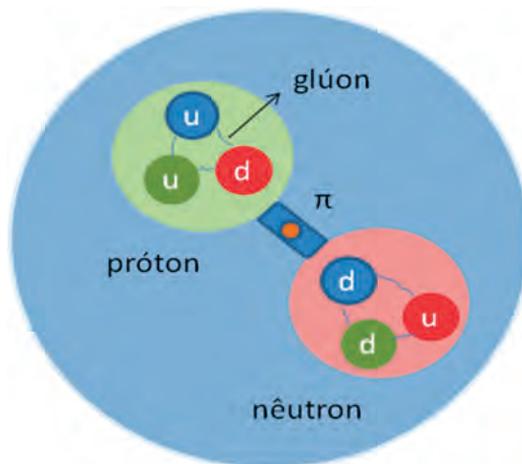


Figura 2.2 Representação de um átomo de deutério, a ação de glúons e da força forte (méson  $\pi$ )

O conjunto formado por léptons, quarks e partículas de força forma o conhecido modelo padrão da matéria e está esquematizado na Tabela 2.2.

Além do gráviton, que ainda não foi detectado, o modelo padrão apresenta ainda outro problema: a falta de explicação para as massas das partículas. Uma partícula possivelmente responsável pela interação de massa das partículas seria o bóson de Higgs, conhecido como a “partícula de Deus”, que ainda está para ser detectado no LHC.

Com o modelo padrão da matéria e todo o seu mundo subatômico será mais fácil entender como o núcleo de um átomo pode ser instável ou estável e como fenômenos nucleares contribuem para estabilidade do núcleo. Falamos de uma física que auxilia a química na parte atomística, um caso em

que na realidade não há química ou física, mas sim a ciência aplicada, ajudando a desvendar os mistérios dos fenômenos que nos cercam.

Tabela 2.2 Visão esquemática do modelo padrão da matéria

<b><u>Matéria</u></b>			
<b>Léptons</b> <i>Não são influenciados pela força nuclear forte e podem viajar por conta própria</i>		<b>Quarks</b> <i>São influenciados pela força nuclear forte e estão sempre confinados em partículas maiores, os hádrons</i>	
<b>Lépton</b>	<b>Antilépton</b>	<b>Quarks</b>	<b>Antiquarks</b>
Elétrons	Pósitron	<i>up</i>	<i>anti up</i>
Neutrino do elétron	Antineutrino do elétron	<i>down</i>	<i>anti down</i>
Múon	Antimúon	<i>charm</i>	<i>anti charm</i>
Neutrino do múon	Antineutrino do múon	<i>strange</i>	<i>anti strange</i>
		<i>botton</i>	<i>anti botton</i>
		<i>top</i>	<i>anti top</i>
		<b>Hádrons</b>	
		<b>Mésons</b>	<b>Bárions</b>
		Par de quark-antiquark	Três quarks ou três antiquarks
<b><u>Bósons</u></b> <i>Transmitem as quatro forças da natureza</i>			
Fótons	$W^+$ , $W^-$ e Z	Glúons	Gráviton (não detectada ainda)

## 2.5 O núcleo e o fenômeno da radioatividade

Dependendo da quantidade de energia que está agregada ao núcleo, ele pode ser classificado em núcleo estável ou núcleo instável. Os núcleos instáveis contribuem para toda exposição a fenômenos nucleares do homem na Terra. Núcleos instáveis são também chamados de núcleos radioativos.

A massa é uma das mais importantes propriedades do núcleo em seu estado fundamental, por isso a importância da descoberta do bóson de Higgs. Ela traduz a energia total do núcleo devido à equivalência entre massa e energia (Einstein propôs esta equivalência muito bem na sua famosa equação  $E=mc^2$ ) e também o consumo necessário à sua estruturação e dinâmica. A equação de Einstein permite converter unidade de massa atômica (u.m.a) em energia segundo a equivalência  $1 \text{ u.m.a.} = 931,44 \text{ MeV}$ <sup>19</sup>.

Quanto mais compacto e estável for o núcleo, maior será a energia despendida na ligação dos seus componentes. Assim, um núcleo contendo N nêutrons e Z prótons terá uma massa atômica  $A=N+Z$ , que valerá a soma das massas dos nêutrons e dos prótons, menos uma parcela utilizada na ligação do sistema. Quanto maior for a energia de ligação, que é medida em

---

<sup>19</sup> O elétron-volt (eV) é uma unidade de energia, assim como o joule. É uma quantidade suficientemente pequena, conveniente na medida de partículas elementares. É a quantidade de energia dada a um elétron quando este é acelerado por uma diferença de potencial de 1 volt. Da equação  $W = q.U$  temos  $W = 1 \text{ eV}$ , quando  $q =$  carga elementar  $= 1,60 \times 10^{-19}$  coulomb e  $U = 1$  volt. Assim,  $1 \text{ eV} = (1,60 \times 10^{-19}) \times (1)$  (coulomb x volt). Logo, **1 eV = 1,60 x 10<sup>-19</sup> joule.**

MeV ( $10^6$  eV), mais estável é o núcleo. Isso se deve particularmente ao fato de a energia de ligação ser exatamente aquela que os átomos necessitam absorver para se dividir nas partículas constituintes. É possível determinar a energia de ligação de todos os elementos químicos.

Outra quantidade relacionada à energia de ligação é a energia de separação, definida como a energia necessária para remover a última partícula ligada ao núcleo. É calculada para nêutrons.

A estabilidade de um núcleo é identificada pela razão entre o número de nêutrons e de prótons que ele possui ( $N/Z$ ). Tanto para o hidrogênio com  $M=2$  e  $Z=1$ , conhecido como deutério, como para o núcleo de hélio de massa 4 e  $Z=2$ , a razão é de  $N/Z=1$ . Para o núcleo de ferro de massa 56 ( $Z=26$ ), cujo número de nêutrons é 30,  $N/Z = 30/26 = 1,16$ ; para o núcleo de bismuto de massa 209 com número de nêutrons de 126 e  $Z = 83$ , a razão  $N/Z = 126/83 = 1,25$ . Todos estes núcleos citados são estáveis.

Com o aumento do número atômico dos núcleos estáveis, aumenta-se o valor da razão  $N/Z$ , pois se aumenta também o número de nêutrons no núcleo, levando a um conseqüente aumento da massa. A curva que marca a tendência dos pontos associados aos núcleos estáveis é chamada curva de estabilidade, como a mostrada na Figura 2.3. A inclinação dessa curva representa a razão  $N/Z$ . Com o aumento do número de nêutrons no átomo, a razão  $N/Z$  vai aumentando e se distanciando de 1. O núcleo passa a se tornar instável e a se afastar da linha de estabilidade, onde  $N=Z$ .

De modo geral, os núcleos radioativos tendem a emitir partículas produzindo núcleos estáveis, isto é, núcleos associados a pontos fora da curva de estabilidade tendem a se transformar em núcleos associados a pontos na curva de estabilidade.

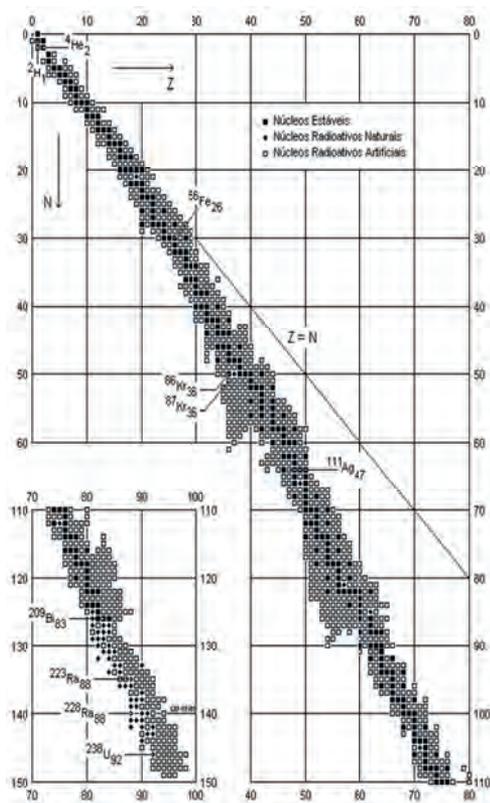


Figura 2.3 Curva de estabilidade nuclear<sup>20</sup>

Núcleos radioativos associados a pontos localizados abaixo e à esquerda da curva de estabilidade têm razões N/Z muito grandes para serem

---

<sup>20</sup> Fonte: [www.ufsm.br/gef/Nuclear09.html](http://www.ufsm.br/gef/Nuclear09.html)

estáveis. Esses núcleos, como o núcleo de prata 111 ( $Z=47$ ), por exemplo, têm excesso de nêutrons.

Quando um núcleo é instável, ele possui energia excedente. Seguindo a lógica de qualquer fenômeno físico ou químico, o núcleo procura então liberar esse excedente, para alcançar um estado de menor energia. O processo de liberação de energia ocorre pela emissão de partículas ou ondas eletromagnéticas, que são neste caso específico, chamadas de radiação. O fenômeno de emissão de partículas ou ondas eletromagnéticas de um núcleo instável é denominado desintegração nuclear.

As partículas que os núcleos instáveis podem emitir são chamadas de alfa, beta ou pósitron<sup>21</sup>. A onda eletromagnética emitida do núcleo é a radiação gama. Na emissão de radiação a partir de um núcleo instável, há liberação de energia e formação de outro núcleo, pois em todo fenômeno nuclear existe alteração do número atômico do elemento radioativo. Vale salientar ainda que o núcleo formado em uma desintegração nuclear, além de carregar menos energia que o primeiro, pode tanto ser radioativo quanto não o ser, dependendo de sua natureza (ou seja, do seu número de prótons e nêutrons).

---

21 Como já discutido, o pósitron é a antipartícula do elétron. A existência do pósitron foi postulada pela primeira vez em 1928 por Paul Dirac. Em 1932, o pósitron foi observado por Carl David Anderson e ganhou o prêmio Nobel de Física de 1936 pela descoberta.

### 2.5.1 A partícula alfa ( ${}_{+2}\alpha^4$ )

Um dos processos de estabilização de um núcleo com excesso de energia é a emissão de um grupo de partículas positivas, constituídas por dois prótons e dois nêutrons e da energia a elas associada: é a chamada partícula alfa. Partículas alfa saem do núcleo com uma velocidade em torno de 20000 km/s e são facilmente absorvidas pelo meio. As partículas alfa emitidas em desintegrações nucleares podem geralmente ser absorvidas por uma folha de papel, por uma folha de alumínio de 0,004 cm de espessura ou por vários centímetros de ar. A distância que uma partícula percorre partindo de sua fonte é chamada de alcance e está relacionada com a energia inicial da partícula.

Partículas alfa perdem uma grande fração de sua energia em ionizações ao longo de suas trajetórias. A quantidade da ionização causada por uma partícula alfa depende do número de moléculas que ela atinge ao longo de seu caminho e da maneira pela qual ela as atinge. Algumas partículas atingem mais e outras atingem menos moléculas quando passam através de um centímetro de ar. Cada partícula perde cerca de 35 eV de energia, em média, para cada par de íons formado.

Algo que é interessante nas desintegrações nucleares é o fato de que um dado núcleo radioativo frequentemente emite partículas alfa com diferentes energias. Medidas com um espectrógrafo magnético<sup>22</sup> mostraram que, por

---

<sup>22</sup> Instrumento utilizado para medir com precisão as energias dos níveis nucleares.

exemplo, o  $^{210}\text{Po}$  (polônio, de massa 210), cujo grupo principal de partículas alfa tem uma energia de 7,6 MeV, emite 12 grupos de partículas de longo alcance que vão de 8,2 a 10,5 MeV. O  $^{235}\text{Th}$  (tório, de massa 235) emite dois grupos de partículas alfa com energia de 3,994 MeV (76%) e 3,936 (24%). Por causa do alto valor da energia de ligação da partícula alfa no núcleo, que é de 28,3 MeV, a emissão espontânea de uma partícula alfa é possível para o estado fundamental dos núcleos com massa atômica maior que 150.

No decaimento alfa é formado um átomo com massa diminuída de 4 unidades e com um número atômico diminuído em 2 unidades (conhecido como 1º lei de Soddy<sup>23</sup>). A equação 2.1 mostra, como exemplo, o decaimento alfa do átomo de urânio para a formação de um átomo de tório também radioativo. Esse decaimento acontece na natureza, estamos expostos a ele e iremos discutir este fenômeno no capítulo 3.



---

23 Frederick Soddy (1877-1956) foi um químico inglês que recebeu o Nobel de Química de 1921, por suas notáveis contribuições para o conhecimento das substâncias radioativas.

### 2.5.2 As partículas beta ( $\beta^-$ ) e pósitron ( $\beta^+$ )

Outra forma de estabilização, quando existe no núcleo um excesso de nêutrons em relação a prótons, se dá através da emissão de uma partícula negativa, chamada de partícula beta, resultante da conversão de um nêutron em um próton (equação 2.2). No caso de existir excesso de prótons, é emitida uma partícula beta positiva resultante da conversão de um próton em nêutron (equação 2.3). A partícula beta também é chamada de elétron e, como a beta positiva é sua antipartícula, foi chamada então de pósitron. No decaimento beta, o núcleo formado possui o mesmo número de massa do átomo inicial e tem seu número atômico aumentado em uma unidade (conhecido como 2ª lei de Soddy). Por outro lado, no decaimento por pósitron, a massa do átomo que se forma também é igual à massa do átomo inicial; contudo, o seu número atômico é diminuído em uma unidade.

Em geral, as energias da partícula beta e do pósitron são menores que as energias das partículas alfa emitidas pelos núcleos radioativos. A maior parte das partículas beta tem energias menores que 4 MeV, enquanto quase todas as partículas alfa têm energia superior a 4 MeV. Com a mesma energia cinética, a partícula beta, por causa de sua massa muito menor, se desloca muito mais rapidamente que a partícula alfa. Uma partícula alfa com uma energia de 4 MeV tem uma velocidade de cerca 1/20 da velocidade da luz, mas uma partícula beta com a mesma energia pode ter a sua velocidade próxima a 0,995 da velocidade da luz. Devido a sua alta velocidade, as

partículas beta devem ter um tratamento relativístico para o cálculo da sua energia cinética.



As partículas beta são muito mais penetrantes que as partículas alfa. Uma partícula beta pode perder uma grande fração de sua energia numa única colisão com um elétron atômico. O resultado de dispersão é muito mais marcante no caso de colisão com elétrons do que quando colide com partículas mais pesadas.

Partículas beta de alta energia apresentam um mecanismo adicional para a perda de energia. Quando um elétron passa através do campo elétrico (coulombiano) de um núcleo, ele perde energia e forma radiação eletromagnética. Essa energia aparece como um espectro contínuo de raios X chamado de “*bremsstrahlung*” ou “radiação de frenamento”. As partículas beta, por serem mais leves, também são desviadas muito mais facilmente por núcleos do que as partículas alfa, de modo que suas trajetórias geralmente não são retas.

Havia ainda grande dificuldade em explicar o espectro contínuo de energia derivado da emissão de partículas beta, como mostra a Figura 2.4, onde sua energia cinética varia de zero a uma energia máxima.

Para discutir esse problema, avalia-se a transição alfa. A partir dela se verificou que o núcleo era constituído por estados de energia (similar ao que conhecemos para os elétrons na eletrosfera atômica) e que somente perdia ou recebia energia discretamente, isto é, com valores de energia bem definidos e que é intrínseco a cada radionuclídeo, quando então passava de um nível mais energético para outro menos energético. A desintegração alfa poderia então ser tratada como um problema de dois corpos ( $Y$ , que é o núcleo recuado e vai para um lado, e a partícula alfa, que vai para o outro lado, conservando assim o momento):  $X \rightarrow Y + \alpha$ . Como consequência, obtém-se um espectro discreto da partícula alfa.

Entretanto, é impossível conciliar o espectro contínuo de beta com essa característica discreta (níveis de energia) do núcleo. Como explicar então a energia variável de uma desintegração beta apresentando um espectro contínuo até um valor máximo? Eurico Fermi (1901-1954), procurando a resposta para essa questão, postulou a hipótese do neutrino (um lépton, como já discutimos). Essa hipótese foi sugerida primeiramente por Wolfgang Pauli (1900-1958) em 1930, e apoiava-se no fato de que uma partícula adicional, chamada de neutrino ( $\nu$ ), era produzida no decaimento beta. Assim, o espectro contínuo era explicado, uma vez que a energia da

transição se distribuiria aleatoriamente entre a partícula beta e o neutrino. Hoje já se sabe que o neutrino realmente aparece em decaimentos beta.

A hipótese do neutrino de Fermi se aplica também ao processo de captura de elétron orbital. Esse fenômeno é conhecido como captura K ou captura eletrônica e está representado na equação 2.4. Nesse processo, o número atômico do átomo envolvido diminui em uma unidade e sua massa permanece a mesma, assim como ocorre no decaimento de pósitron. De modo geral, um elétron da camada K que esteja próximo do núcleo (geralmente com mais prótons do que nêutrons) pode ser absorvido por este núcleo. Quase toda a energia liberada no processo é carregada por um neutrino que é ejetado do núcleo, já que não é observada a emissão de nenhuma partícula carregada ou onda.

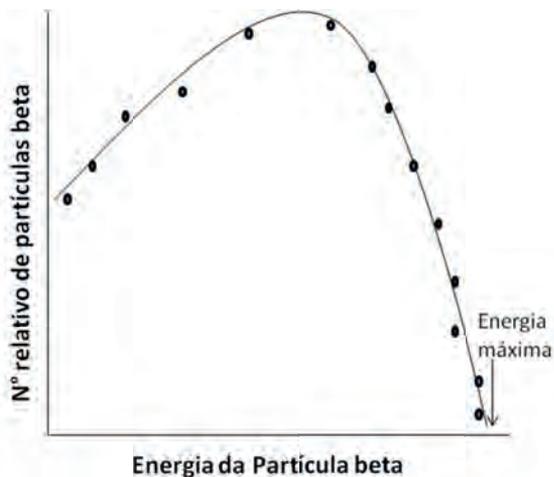


Figura 2.4 Espectro contínuo de partículas beta

Como consequência do fenômeno da captura K, os elétrons mais externos da eletrosfera do átomo rearranjam-se. Nesse processo são emitidos raios X devido aos saltos dos elétrons das camadas mais externas para as camadas mais internas, com o objetivo de cobrir o vazio deixado pelo elétron capturado na camada K.



É importante salientar que na natureza existe uma competição entre a desintegração por pósitron e captura K para os núcleos radioativos, como ocorre, por exemplo, com o  ${}^{94}\text{Tc}$  (tecnécio de massa 94), que pode se desintegrar tanto emitindo pósitron como capturando um elétron da camada K. O núcleo formado nos dois casos será o mesmo, ou seja, o  ${}^{94}\text{Mo}$  (molibdênio de massa 94).

Mas como um próton transforma-se em nêutron no núcleo? E ainda, como pode sair uma partícula negativa do núcleo (a beta) se lá não existem partículas negativas? Essas perguntas não são fáceis de responder, mas uma explicação aceita atualmente está na atuação do bóson  $W^-$ .

Como já discutimos, um nêutron é formado pelos quarks udd e um próton, pelos quarks uud. A diferença entre esses dois bárions está em um tipo de quark. Se um dos quarks d do nêutron se transformar em um quark u, este bárion passará a ser um próton e vice-versa. Os bósons  $W^-$ , de força

fraca, medeiam essa transformação, como mostra a Figura 2.5. Na Figura, o estágio 1 representa um nêutron, o estágio 2 representa a transformação de um quark d em quark u com a ação do bóson e o estágio 3 ilustra a formação do próton. Após a transformação de quark d em quark u, há a formação de um partícula beta e de um antineutrino, a partir do bóson, que são expulsos do núcleo como mostra os estágios 4 e 5 da Figura 2.5.

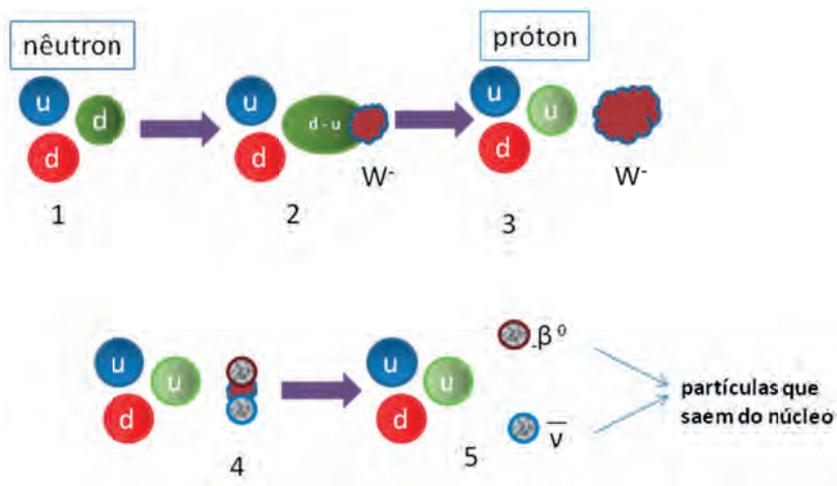


Figura 2.5. Mediação do bóson  $W^-$  na transformação de um nêutron instável em um próton.

Similar raciocínio poderia ser atribuído ao decaimento por pósitron através da atuação do bóson  $W^+$ . Contudo, essa explicação ainda está em discussão na comunidade científica.

### 2.5.3 Radiação Gama ( $\gamma$ ): as ondas que saem do núcleo

A desexcitação nuclear resulta na emissão de uma onda eletromagnética chamada de radiação gama, da mesma maneira que a desexcitação eletrônica resulta na emissão de fótons de comprimento de onda desde o violeta até o infravermelho (os famosos saltos quânticos). A diferença entre a radiação gama e os fótons eletrônicos está na energia (ou comprimento de onda) associada a eles, decorrente de a separação dos níveis nucleares estar na ordem de grandeza energética de MeV, enquanto no caso dos níveis eletrônicos a diferença entre eles é da ordem de grandeza de eV.

O decaimento por raios gama geralmente acontece após uma emissão alfa, beta ou pósitron, em que o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura se estabilizar. Por outro lado, núcleos metaestáveis apresentam muita energia e se estabilizam emitindo somente radiação gama, sem a necessidade de emitirem qualquer partícula antes. Um exemplo muito comum é o  $^{99m}\text{Tc}$  (tecnécio metaestável de massa 99), muito utilizado na medicina nuclear. Um paciente que é submetido a um exame usando o  $^{99m}\text{Tc}$  ingere esse elemento radioativo e, dentro do organismo, o  $^{99m}\text{Tc}$  emite um raio gama de 140,5 keV e se transforma em  $^{99}\text{Tc}$  (tecnécio de massa 99). A radiação gama emitida é utilizada na produção de imagens de dentro do organismo. O  $^{99}\text{Tc}$  formado no processo fica no corpo pouco tempo e logo é excretado sem danos para a saúde do paciente.

Você pode questionar: se a radiação gama não tem massa nem tem carga, como ela perde energia no ambiente? A interação dos raios gama com a matéria é marcadamente diferente daquela de partículas tais como alfa e beta, devido ao seu poder de penetração muito maior e alcance indefinido. Vale salientar que, nos processos de interação da radiação gama com a matéria, devemos considerar que a mesma é constituída por quanta de energia, ou fótons. Como foi discutido no capítulo 1, fótons são partículas, e os fenômenos que iremos descrever a seguir levam em consideração choques entre partículas, ou seja, fóton-elétron. Dois processos são os principais responsáveis pela absorção de raios gama no ambiente: o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton. Existe ainda o processo de produção de pares, que não iremos discutir neste livro, por se tratar de um fenômeno muito particular.

### *2.5.3.1 O efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton*

No efeito fotoelétrico, um fóton do feixe de raio gama remove um elétron orbital de um determinado átomo do meio e transfere para esse elétron toda a sua energia (exceto a energia que já foi usada para vencer a ligação elétrons-átomo). Nesse fenômeno o fóton deixa de existir. O elétron então pode ser ejetado do átomo se o meio não for sólido. Do contrário, e se o meio for muito fino, é mais provável que o elétron seja reabsorvido quase

imediatamente, pois o alcance do elétron ejetado é muito pequeno num meio sólido. A Figura 2.6 mostra uma representação do efeito fotoelétrico. Geralmente o efeito fotoelétrico acontece para fótons de baixas energias em meios cujo número atômico seja grande, como, por exemplo, o chumbo ( $Z=82$ ).

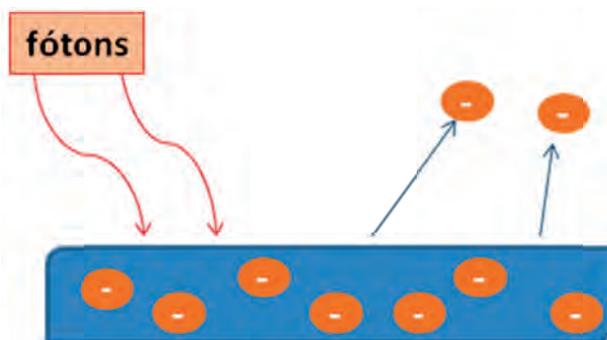


Figura 2.6 Representação do efeito fotoelétrico

À medida que a energia da radiação aumenta, o espalhamento Compton<sup>24</sup> substitui o efeito fotoelétrico. A energia do fóton é superior àquela necessária para ejetar um elétron e o excesso vai se distribuindo por outros elétrons que se liberam das suas respectivas órbitas. Nesse efeito, o fóton

---

24 Arthur Holly Compton (1892 –1962), físico americano, observou no ano de 1923 o Efeito Compton, pelo qual recebeu o Prêmio Nobel de Física, no ano de 1927. Em seus experimentos, Compton fez raios x incidirem sobre um alvo de grafite.

incidente é espalhado por um elétron livre ou fracamente ligado ao átomo. Este elétron livre ou fracamente ligado, recebe parte da energia do fóton incidente. A outra parte da energia se transforma em um fóton espalhado que também pode ser chamado de fóton secundário. O fóton espalhado, com energia menor do que o incidente (pois possui comprimento de onda maior), sai com um certo ângulo em relação ao fóton inicial (veja a Figura 2.7). O efeito Compton ocorre em materiais com número atômico pequeno, como por exemplo, o carbono ( $Z=6$ ).

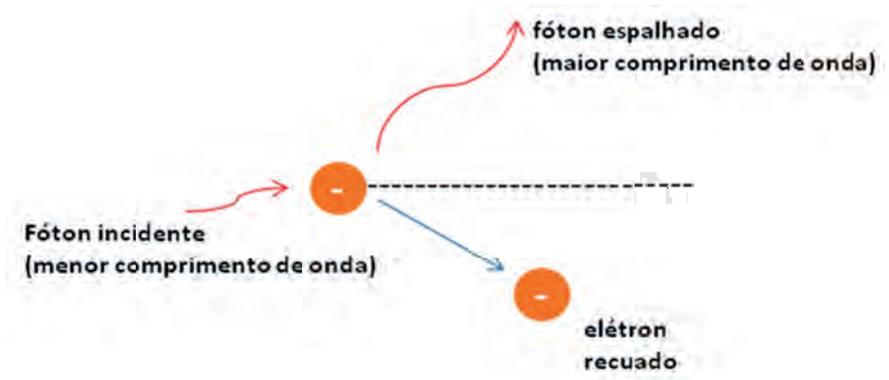


Figura 2.7 Representação do efeito Compton

Esses dois efeitos, tanto o fotoelétrico quanto o Compton, também são muito relacionados aos raios X. Comparando-os com a radiação gama, notamos duas claras diferenças: os raios X não se originam no núcleo do átomo e possuem muito menos energia que as ondas gama. No entanto, o

comportamento de ambas as radiações no meio são exatamente iguais, já que se tratam de ondas eletromagnéticas. Durante o exame radiográfico, os raios X interagem com os tecidos por meio dos efeitos fotoelétrico e Compton (assim como aconteceria se fosse a radiação gama). Na prática, esses dois efeitos contribuem para a produção da radiografia. A porcentagem relativa ao total de interações que ocorrem por um processo ou outro depende da energia do fóton. Assim, o contraste do objeto radiografado depende da composição da massa efetiva e do número atômico desse objeto. A predominância de interações Compton ou fotoelétricas causará menor ou maior contraste do objeto, respectivamente, considerando que o objeto seja composto de vários materiais de diferentes números atômicos. Para um dado objeto, o contraste será maior para feixes de baixa energia (predominância do efeito fotoelétrico) e menor para energias mais altas (predominância do efeito Compton).

Você deve então estar se perguntando: se os raios X não são de origem nuclear, têm menos energia que a radiação gama e interagem com os tecidos ou objetos perdendo sua energia, então por que o operador de raios X fica “escondido” atrás de um biombo de chumbo? Basicamente, por dois motivos: as normas de segurança estabelecem que seja assim e o efeito fotoelétrico decresce rapidamente quando a energia dos fótons é muito pequena, como quando consideramos energias tão baixas quanto à da luz visível. Por esses motivos, deve ser usada uma blindagem de chumbo para absorção de raios X de baixas energias, que não são usados para produzir a

radiografia e que podem então atingir o operador, principalmente porque muitas radiografias são realizadas em um único dia.

## **2.6 Interação da radiação com a matéria: o que acontece?**

A radiação emitida por um núcleo, seja ela alfa, beta ou gama, é chamada de radiação ionizante por conta do processo chamado ionização, ou seja, interações dessas radiações com a matéria na formação de íons (positivos e negativos). A radiação ionizante geralmente possui energia superior à energia de ligação dos elétrons a um átomo. As partículas alfa e beta são diretamente ionizantes, enquanto a radiação gama é indiretamente ionizante, pois a partícula que irá ionizar o meio (o elétron) é produzida somente pelos efeitos de espalhamento Compton e fotoelétrico.

A interação das radiações ionizantes com a matéria é um processo que se passa no nível eletrônico. Ao atravessarem um material, essas radiações transferem energia para as partículas que forem encontradas em sua trajetória. Caso a energia transferida seja superior à energia de ligação do elétron com o restante da estrutura atômica, ele é ejetado de sua órbita. O átomo se transforma então, momentaneamente, em um íon positivo, o cátion. O elétron arrancado passa a se deslocar no meio, impulsionado pela energia cinética adquirida neste processo, a qual vai sendo dissipada através de interações desse elétron com elétrons de outros átomos, eventualmente

encontrados em sua trajetória. Novos íons podem, assim, ser introduzidos na matéria. O processo é interrompido quando a energia desses elétrons é finalmente dissipada em interações (choques), e eles acabam capturados por moléculas do meio.

Se a energia da radiação for inferior à energia de ligação do elétron ocorre apenas a excitação da molécula. Dependendo de que forma essa energia se dissipa (geralmente por perda de calor), pode haver ou não danos à matéria.

### *2.6.1 Consequências da interação da radiação com a matéria: uma química diferente*

Ao arrancarem aleatoriamente elétrons das camadas eletrônicas de átomos, as radiações ionizantes contribuem para romper, mesmo que por um momento apenas, o equilíbrio entre as cargas positivas e negativas do átomo. À introdução de cargas elétricas livres em um meio irradiado, segue-se um rearranjo eletrônico que pode envolver elétrons de outros átomos e moléculas, com a finalidade de se restabelecer o equilíbrio perdido.

Com exceção dos gases nobres, os átomos dos elementos existentes na natureza apresentam a última camada eletrônica incompleta, fazendo com que a estrutura atômica seja instável. Esta instabilidade é contornada através da formação de ligações entre diferentes átomos, de modo que cada átomo envolvido no processo tenha a configuração eletrônica de um gás nobre

(teoria do octeto). Vale salientar que outras configurações eletrônicas também fornecem estabilidade ao átomo, como é o caso de moléculas que não obedecem à teoria do octeto, mas ainda assim são estáveis. Quando um átomo perde elétrons, toda a estrutura molecular – estabilizada devido às ligações químicas – pode ficar comprometida pelo rearranjo instantâneo de elétrons, novamente na busca de uma configuração mais estável. Isso pode resultar numa perda de identidade química para a molécula envolvida e na geração, no sistema irradiado, de moléculas estranhas a ele.

## **2.7 Cinética das desintegrações nucleares**

Os núcleos instáveis de uma mesma espécie (mesmo elemento químico) e de massas diferentes, denominados radioisótopos ou radionuclídeos, não realizam todas as desintegrações ao mesmo tempo. As emissões de radiação são feitas de modo imprevisível, sem que se possa adivinhar o momento em que um determinado núcleo irá emitir radiação. Entretanto, para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra, é razoável se esperar uma razão apropriada de emissões de partículas/onda ou transformações por segundo. Essa taxa é denominada atividade da amostra, que representa a velocidade com a qual um núcleo emite radiação.

Ao se considerar um certo átomo, a probabilidade de ele decair num intervalo de tempo constitui uma característica de cada elemento radioativo,

de modo que todos possuem uma determinada constante física, a constante de decaimento radioativo ( $\lambda$ ). Em um sistema com N átomos iniciais, a atividade será proporcional ao número de átomos radioativos presentes no sistema e à constante de decaimento radioativo, como mostra a equação fundamental do decaimento radioativo (equação 2.5).

$$A = \lambda N \quad (2.5)$$

*A unidade de atividade no Sistema Internacional é o Becquerel (Bq)*

$$1\text{Bq} = 1 \text{ desintegração/segundo}$$

Devido ao grande número de átomos envolvidos no processo de decaimento radioativo, o mesmo segue uma lei estatística exponencial, como mostra a Figura 2.8, com a equação da curva representada abaixo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

onde N é o número de átomos radioativos existentes em uma dada amostra, após certo tempo, t, ter-se passado;  $N_0$  é o número de átomos radioativos iniciais,  $\lambda$  é a constante radioativa multiplicada pelo tempo na base de Euler.

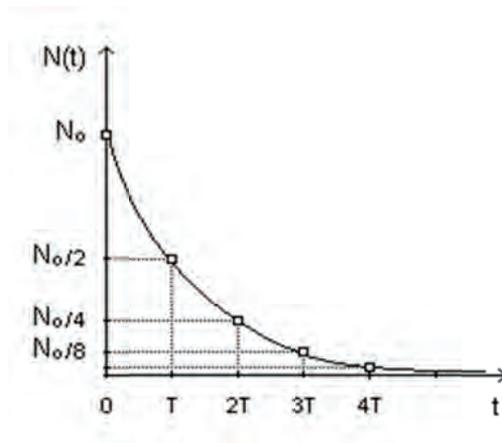


Figura 2.8 Curva representativa de um decaimento radioativo

### 2.7.1 Tempo de meia-vida ( $T_{1/2}$ ) de átomos radioativos

O tempo de meia-vida ( $T_{1/2}$ ), também conhecido como tempo de meia-vida física, é o tempo necessário para que o número de átomos radioativos decaia para a metade de seu valor inicial. A partir da equação 2.6 podemos obter a seguinte expressão:

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda \quad (2.7)$$

Isso significa que, para cada período equivalente à meia-vida que se passa, a atividade é reduzida à metade da anterior, até atingir um valor insignificante, que não permite mais distinguir as radiações emitidas pelo

átomo das radiações do meio ambiente (este tipo de radiação será discutida no capítulo 3). Isto acontece porque, após  $n$  meias-vidas, ou seja,  $t = nT$ , a fração de atividade remanescente é  $(1/2)^n$ . Tal fração nunca chegará a zero, mas se tornará muito pequena; após sete meias-vidas, por exemplo, a atividade da amostra será de  $(1/2)^7$ , ou seja, 1/128 ou menos de 1% da atividade inicial. Usando o mesmo raciocínio, após 10 meias-vidas, a atividade cai para 1/1024, cerca de 0,1% da atividade inicial, o que é desprezível.

Na Tabela 2.3 são encontradas as principais características de alguns elementos radioativos. Perceba que as características são intrínsecas de cada núcleo.

Tabela 2.3 Informações de alguns elementos radioativos

Elemento	Representação	Tipo de desintegração	Tempo de meia-vida	Constante radioativa ( $s^{-1}$ )	Energia da partícula (Mev)
Urânio-238	${}_{92}\text{U}^{234}$	alfa	$2,50 \times 10^5$ anos	$8,80 \times 10^{-24}$	4,77
Bismuto-210	${}_{83}\text{Bi}^{210}$	beta	5,0 dias	$1,60 \times 10^{-8}$	1,15
Tálio-206	${}_{81}\text{Tl}^{206}$	beta	4,2 min	$2,75 \times 10^{-3}$	1,51

## 2.8 Biocinética de radionuclídeos

O fato de o ser humano estar exposto à radiação ambiental leva-nos à ingestão cotidiana de radionuclídeos, como será discutido no capítulo 4. Em

muitos casos, a quantidade de radionuclídeos presente no organismo de uma pessoa pode ser descrita a partir de uma queda exponencial da quantidade de radionuclídeo com o tempo. Isso se dá por conta de dois processos: o próprio decaimento a que o radionuclídeo se encontra sujeito é um fenômeno regido por uma lei exponencial (conforme pode ser visualizado na Figura 2.8) e a quantidade de uma dada substância no organismo diminui ao longo de sua excreção. Nesses casos, o parâmetro meia-vida efetiva ( $T_{1/2\text{eff}}$ ) quantifica, tal como a meia-vida física ( $T_{1/2}$ ) de um isótopo radioativo, o intervalo de tempo no qual a concentração de um dado material radioativo decai pela metade no corpo humano. O tempo de meia-vida efetiva é uma composição entre a meia-vida física de um dado isótopo e o tempo de meia-vida biológica ( $T_{1/2\text{biol}}$ ). O  $T_{1/2\text{biol}}$  é o tempo de permanência dos átomos de um determinado elemento químico no organismo de uma pessoa. A meia-vida efetiva é dada pela relação:

$$1/T_{1/2\text{eff}} = 1/T_{1/2} + 1/T_{1/2\text{biol}} \quad (2.8)$$

A Tabela 2.4 mostra alguns valores de tempo de meia-vida efetiva para os radionuclídeos naturais mais importantes para os seres vivos.

Tabela 2.4 Dados biocinéticos de alguns radionuclídeos naturais

Radionuclídeo	Meia-vida física (anos)	Meia-vida efetiva (dias)	Fonte
<sup>40</sup> K	1,28x10 <sup>9</sup>	30	ICRP, 1978
<sup>137</sup> Cs	30	110	ICRP, 1978
<sup>238</sup> U	4,47x10 <sup>9</sup>	Ossos: 20 Rins: 6 Corpo inteiro: 6 Obs: 53% é excretado imediatamente	ICRP, 1978
<sup>226</sup> Ra	1,60x10 <sup>3</sup>	Sangue: 5 Ossos: 1600 Obs: 54% é excretado imediatamente	ICRP, 1989
<sup>232</sup> Th	1,40x10 <sup>10</sup>	Ossos: 8000 Fígado: 700 Outros órgãos: 700d Obs: 10% é excretado imediatamente	ICRP, 1994

## Referências Bibliográficas

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**, NN 3.01, Rio de Janeiro: CNEN, 2005.

GARCIA, E. A. C. **Biofísica**. São Paulo: Sarvier, 1998.

HENEINE, I. F. **Biofísica básica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 1996.

OKUNO, E.; IBERÊ, L. C.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K.S. **Física 4**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: Part 1.** ICRP Publication 30. Oxford: Pergamon Press, 1978.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: Part 2.** ICRP Publication 30. Oxford: Pergamon Press, 1978.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **Age-dependent dose to members of the public from intake of radionuclides: Part 1.** ICRP Publication 56. Oxford: Pergamon Press, 1989.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides-Ingestion Dose Coefficients: Part 3.** ICRP Publication 69. Oxford: Pergamon Press, 1994.

KAPLAN, I. **Nuclear Physics.** New York: Addison-Wesley Publishing Comp., Inc., 1963.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement.** New York: John Wiley and Sons, 1979.

# Capítulo 3

## 3.1 A radioatividade que vem do céu

Um número considerável de radionuclídeos é produzido a partir de interações de raios cósmicos com os átomos que compõem as moléculas do ar. Os raios cósmicos são produzidos através de processos que ocorrem no Sol e em outras estrelas, ou por eventos como explosões de supernovas, pulsares ou núcleos de galáxias ativas. Juntamente com essas partículas também se encontram fótons de alta energia de origem extraterrestre que incidem sobre a Terra. A composição da radiação cósmica depende da faixa de energia observada, sendo de modo geral formada por 79% de prótons, 15% de núcleos de hélio e o restante de íons dos demais elementos químicos, além de partículas elementares. Em uma proporção menor, fótons e elétrons de alta energia também fazem parte da radiação cósmica incidente.

A espessura da atmosfera terrestre funciona como uma blindagem que impede a exposição direta dessas partículas sobre a superfície do planeta, atenuando e absorvendo as radiações. Muitas são freadas pela atmosfera terrestre ou desviadas pelo cinturão magnético de Van Allen<sup>25</sup>. No entanto, o resultado das interações dessas partículas de alta energia na atmosfera terrestre é um fenômeno chamado “chuveiro atmosférico”, que nos dá um verdadeiro “banho” todos os dias. O chuveiro atmosférico acontece porque as partículas secundárias, geradas a partir da interação inicial dos raios cósmicos na atmosfera, normalmente têm energia suficiente para outra série de interações. O processo de multiplicação do número de partículas continua à medida que a atmosfera se torna mais densa, até que a energia média das partículas seja baixa o suficiente para que comece a ser dominante o processo de perda de energia. Desse modo, após um máximo número de partículas, que tipicamente ocorre entre 12 e 15 km de altura, as partículas de um chuveiro atmosférico começam a diminuir em número e em energia média até sua completa exaustão.

Geralmente os raios cósmicos não têm energia suficiente para chegar até a superfície. No entanto, o processo de produção dos “chuveiros

---

25 O **Cinturão de Van Allen**, descoberto por James Van Allen em 1958, é uma região onde ocorrem vários fenômenos atmosféricos devido à concentração de partículas no campo terrestre. Durante os períodos de intensa atividade solar, grande parte das partículas eletricamente carregadas vindas do Sol consegue romper a barreira formada pelos cinturões de radiação de Van Allen, que, ao atingir a alta atmosfera, produzem os fenômenos de auroras polares durante as tempestades magnéticas.

atmosféricos” leva ao surgimento de múons, que basicamente só interagem com a matéria por meio de colisões, levando à perda de energia. Dessa forma, ao nível do mar, cerca de 75% da radiação cósmica é constituída de múons resultantes do decaimento dos mésons  $\pi$ . O restante é constituído essencialmente por elétrons e fótons. Os raios cósmicos são responsáveis por pouco menos da metade da exposição do homem à radiação natural. Ainda que ninguém escape deste bombardeio invisível, algumas partes do globo terrestre são mais afetadas do que outras. As zonas polares recebem um fluxo maior de partículas de origem cósmica do que as zonas equatoriais, uma vez que na região Equatorial a radiação é desviada pelo campo magnético terrestre.

Um dos resultados do bombardeio constante da atmosfera superior pelos raios cósmicos, principalmente nêutrons, é a produção de átomos radioativos ou radionuclídeos cosmogênicos:  $^3\text{H}$  (trítio, o hidrogênio de massa 3),  $^7\text{Be}$  (berílio de massa 7),  $^{14}\text{C}$  (carbono de massa 14),  $^{22}\text{Na}$  (sódio de massa 22) e  $^{85}\text{Kr}$  (criptônio de massa 85). Os radionuclídeos cosmogênicos são tipicamente elementos químicos de número atômico baixo com meia-vida variando de dias até 2,5 milhões de anos. Sua produção tem-se mantido constante pelos últimos 1000 anos, mas varia consideravelmente com a latitude e é significativamente maior em elevadas altitudes.

Os radionuclídeos cosmogênicos são formados através das reações de espalação<sup>26</sup>, um processo no qual ocorre interações de alta energias na ordem de 50 MeV, embora para algumas reações o limiar seja em torno de centenas de MeV. Além disso, dois importantes radionuclídeos cosmogênicos são formados por reações de captura de nêutrons térmicos: o  $^{14}\text{C}$ , cujo nêutron é capturado por um átomo de  $^{14}\text{N}$  (nitrogênio de massa 14), seguida da liberação de um próton, e o  $^{81}\text{Kr}$ , que é produzido pela captura de um nêutron pelo  $^{80}\text{Kr}$  com subsequente liberação de radiação gama.

Ao lado das reações de raios cósmicos com os átomos de atmosfera, existe a possibilidade da produção de vários radionuclídeos diferentes pelas reações de raios cósmicos com os átomos das moléculas que compõem a Terra. Existe ainda uma pequena quantidade de radionuclídeos cosmogênicos que é adicionada ao ambiente terrestre por poeira do espaço e meteoritos.

Dois radionuclídeos cosmogênicos são de particular importância do ponto de vista biológico: o  $^3\text{H}$ , um isótopo radioativo do hidrogênio, e o  $^{14}\text{C}$ .

O  $^3\text{H}$  (trítio), que tem um tempo de meia-vida de 12,3 anos, é produzido em grande quantidade pelos processos cosmogênicos, sendo rapidamente oxidado ou trocado com o hidrogênio na atmosfera para formar água tritiada (HTO), que cai na terra pela precipitação. Por ser um isótopo do hidrogênio, encontra-se em todos os organismos vivos.

---

26 A reação de espalação nuclear é um processo no qual um núcleo emite uma grande quantidade de partículas quando é atingido por uma partícula de alta energia (raios cósmicos), reduzido assim a sua massa.

O  $^{14}\text{C}$ , que é um radioisótopo do carbono, tem meia-vida de 5760 anos e foi identificado na natureza na década de 1940 por Willard Libby. O inventário global do  $^{14}\text{C}$  é estimado em  $1,15 \times 10^{19}$  Bq, correspondendo a 68.000 kg, dos quais 94% estão nos oceanos, 4% nos solos e 2% na atmosfera. Após a sua produção, o  $^{14}\text{C}$  é oxidado e forma primeiramente o monóxido de carbono-14 ( $^{14}\text{CO}$ ) para então transformar-se em dióxido de carbono-14 ( $^{14}\text{CO}_2$ ) num intervalo que leva dias ou até semanas. A taxa de produção de  $^{14}\text{CO}_2$  é razoavelmente variável, e está ligada à taxa de fluxo de raios cósmicos.

A Figura 3.1 mostra o processo de oxidação do  $^{14}\text{C}$  e a subsequente absorção do  $^{14}\text{CO}_2$  pelas plantas por meio da fotossíntese. Através da morte de animais herbívoros (que se alimentaram dessas plantas) e pela excreção tanto das plantas quanto dos animais, o  $^{14}\text{C}$  atinge os ambientes aquáticos e terrestres, onde permanece como reservatório ativo para vários processos físicos e químicos. Tais processos podem converter o  $^{14}\text{C}$  em carbonatos ( $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ ) ou depósitos carbonáceos, como carvão ou petróleo. O carbono volta à atmosfera não somente pela evaporação, mas por combustão de fósseis, por atividades vulcânicas e intemperismo. Como quase todos os organismos vivos têm grandes quantidades de carbono e hidrogênio, um pequeno percentual de fenômenos radioativos acontece no nosso organismo diariamente.

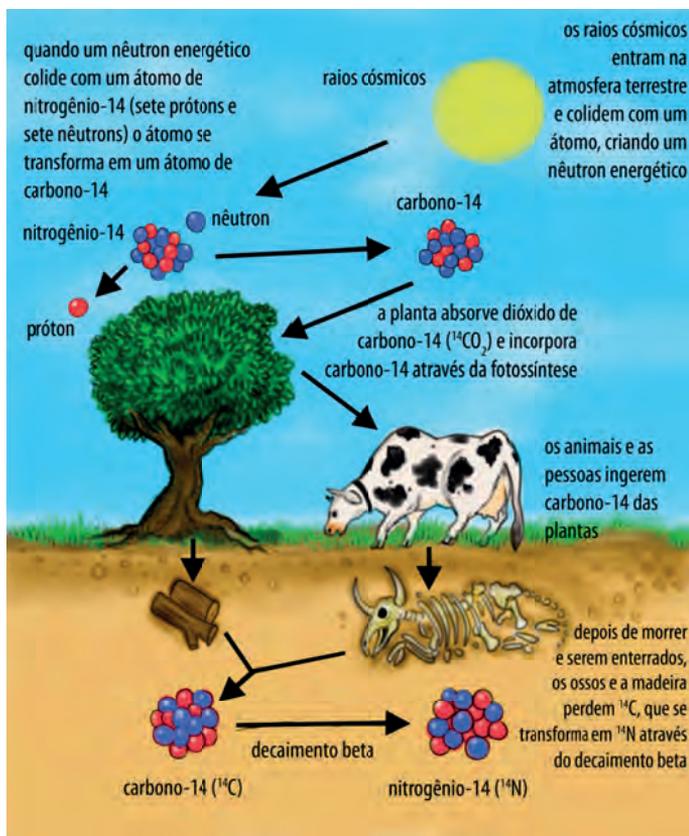


Figura 3.1. Mecanismo de absorção do radioisótopo  $^{14}\text{C}$  por seres vivos.

### 3.2 A radioatividade do meio ambiente

Todos os dias somos expostos à radiação natural que se deve quase exclusivamente à presença de átomos radioativos no meio ambiente. A maior parte da radiação recebida pelo ser humano provém das fontes naturais, por exposição externa ou interna.

A exposição externa deve-se aos radionuclídeos cosmogênicos e elementos radioativos naturais existentes no ambiente, principalmente no solo e em certas rochas, como o granito. Estudos realizados mostraram que aproximadamente 95% da população mundial vive em áreas onde a dose média de exposição oscila entre 0,3 e 0,6 mSv<sup>27</sup>/ano. Em média 3% da população recebe doses da ordem de 1 mSv/ano e 1,5% da população recebe doses acima de 1,4 mSv/ano, existindo lugares em que os níveis de radiação terrestre são muito mais elevados. Vale salientar que a dose máxima permitida é de 1 mSv/ano.

Quanto à exposição interna, aproximadamente 2/3 da dose equivalente efetiva<sup>28</sup> recebida pelo homem decorre das fontes naturais radioativas encontradas no ar, nos alimentos e na água. Uma pequena fração desta dose é proveniente de radionuclídeos cosmogênicos tais como <sup>14</sup>C (como pôde ser visualizado na Figura 3.1) e <sup>3</sup>H. O restante é decorrente das fontes naturais terrestres. Por exemplo, o homem recebe em média 180 µSv/ano de <sup>40</sup>K incorporado juntamente com o potássio não radioativo, um elemento essencial para nosso organismo. Isso quer dizer que, ao comer

---

27 O Sievert (Sv), ou seu submúltiplo, o millisievert (mSv), é a unidade do Sistema Internacional de Unidades da dose equivalente ou dose de radiação. A dose equivalente Sievert, ou simplesmente “dose” nos laudos de dose mensais, leva em conta o efeito biológico produzido em tecidos vivos pela radiação absorvida.

28 Como os efeitos da radiação podem variar com a qualidade (tipo e energia) da radiação, para uma mesma dose absorvida foi necessário criar uma medida com a qual fosse possível comparar os efeitos de diferentes radiações em cada tecido e órgão do corpo: a dose equivalente. A dose equivalente efetiva é a soma ponderada de todas as doses equivalentes de órgãos e tecidos do corpo.

uma simples banana, incorporamos, além dos nutrientes conhecidos, o potássio radioativo.

### **3.3 Como os átomos radioativos chegaram até o nosso planeta?**

As teorias sobre a origem dos elementos químicos no Universo e na Terra indicam as estrelas como os locais onde se desenvolvem os processos de síntese destes radionuclídeos. As estrelas, compostas inicialmente por hidrogênio, conseguem formar muitos elementos químicos por meio de reações nucleares de fusão, induzidas por temperaturas na faixa de  $-166$  a  $737^{\circ}\text{C}$ , provocadas por contrações gravitacionais de suas massas e pela energia liberada nas reações. O conteúdo e a massa da estrela estabelecem o caminho de sua evolução. A produção em larga escala de elementos químicos ocorre na fase de “explosão de supernova”, estágio atingido por algumas estrelas, se suas massas forem 4 a 8 vezes maiores que a massa do Sol. Neste evento catastrófico, de duração média de 2 segundos, são sintetizados a maioria dos núcleos conhecidos. Devido ao processo de captura rápida de nêutrons durante o processo de explosão da supernova, a maioria dos núcleos dos elementos químicos sintetizados é instável. Num pequeno intervalo de tempo muitos deles se tornam estáveis ao emitir radiações, por terem a meia-vida muito pequena. Os radionuclídeos de meia-vida longa podem compor, juntamente com os estáveis, os objetos cósmicos e a crosta terrestre, por mecanismo de acumulação gradual.

Elementos químicos, principalmente os metais, são de forma geral distribuídos naturalmente no meio ambiente através dos ciclos geológicos e biológicos. As águas da chuva dissolvem as rochas e minérios, transportando os elementos químicos para rios, cursos d'água e oceanos. Os ciclos biológicos dos metais incluem bioconcentração por plantas e animais e incorporação na cadeia alimentar. Quando descarregados na forma gasosa ou em finíssimas partículas, os metais também podem ser transportados a longas distâncias, possibilitando assim as interações destes metais com a natureza e a saúde humana. Alguns destes metais são radioativos e outros são radioisótopos que estão na natureza agregados ao isótopo estável.

As mais importantes fontes terrestres de metais radioativos são o  $^{40}\text{K}$  (potássio de massa 40), o  $^{87}\text{Rb}$  (rubídio de massa 87) e as duas séries de elementos radioativos naturais provenientes do decaimento do  $^{238}\text{U}$  (urânio de massa 238) e do  $^{232}\text{Th}$  (tório de massa 232). Estes metais radioativos, juntamente com os radionuclídeos cosmogênicos, contribuem para a radioatividade natural da crosta terrestre.

Podemos então imaginar que esta exposição a tantos elementos radioativos seja prejudicial a nossa saúde. Na realidade, os radionuclídeos presentes na atmosfera sofrem decaimento em trânsito ou são depositados na superfície da Terra por meio de deposição seca ou úmida. Os radionuclídeos são inicialmente depositados na camada superficial do solo, mas rapidamente se espalham no primeiro centímetro do solo, principalmente se forem depositados pelas chuvas. A erosão, a aragem, a

sedimentação e também o fato de a superfície do solo não ser plana reduzem as taxas de exposição dos seres vivos à radiação ambiental.

### **3.4 Propriedades dos radionuclídeos: uma tabela periódica mais radioativa**

O movimento e concentração dos radionuclídeos nos vários compartimentos do ecossistema são governados por uma série de fatores que dependem em grande parte das propriedades físicas e químicas do próprio nuclídeo. Cada elemento da mesma coluna na tabela periódica apresenta propriedades químicas semelhantes, enquanto que radioisótopos de um mesmo elemento, geralmente apresentam tempos de meia-vida e esquemas de decaimentos diferentes. Essas diferenças implicam um comportamento ambiental diferente para cada radioisótopo ao longo do tempo.

O comportamento dos radionuclídeos no ecossistema costuma ser específico, pois depende basicamente de suas características físico-químicas. Entretanto, alguns grupos de radionuclídeos podem apresentar um comportamento ecológico similar devido a suas propriedades químicas. A seguir, vamos tratar de alguns radionuclídeos específicos de algumas famílias da Tabela periódica.

### 3.4.1 Grupo dos ametais

O grupo dos ametais é o que apresenta maior diversidade em termos de comportamento químico e ambiental. O  $^3\text{H}$  e o  $^{14}\text{C}$ , como já mencionado, são produzidos pelos raios cósmicos e também em reatores e explosões nucleares. Estes radionuclídeos se distribuem uniformemente pela biosfera.

Outro exemplo é o caso do fósforo, um componente essencial dos sistemas biológicos. O radioisótopo mais importante em termos radioecológicos é o  $^{32}\text{P}$  (fósforo de massa 32). O  $^{32}\text{P}$  é produzido principalmente a partir do fósforo estável, tem tempo de meia-vida de 14,3 dias e é um emissor beta. Devido a suas características nucleares, é um radionuclídeo muito usado como traçador<sup>29</sup> em estudos de ciclos vitais de plantas e animais, onde haja a participação de compostos contendo fósforo. Por ser um elemento essencial aos tecidos biológicos e pouco abundante na natureza, os organismos vivos tendem a acumular este elemento em concentrações maiores do que as encontradas no meio ambiente. Os mamíferos acumulam 75% do  $^{32}\text{P}$  ingerido, sendo que aproximadamente 90% da carga corporal se localiza nos ossos. A eliminação é lenta, especialmente do radionuclídeo depositado no osso.

---

29 Pequena quantidade de um isótopo radioativo incorporado a um sistema, com a finalidade de definir seu percurso ou localização. Tem diversas aplicações na medicina, indústria, agricultura e na proteção ao meio ambiente, acompanhando o trajeto de poluentes no ar, no mar, nos rios, no solo, ou em organismos.

O iodo também apresenta grande interesse do ponto de vista radioecológico por ser um elemento essencial, além de as descargas ambientais provocarem o seu espalhamento em todos os compartimentos do ecossistema. O  $^{131}\text{I}$  é considerado o mais relevante em termos radiológicos, com meia-vida de 8 dias, capaz de emitir radiação beta e gama. O iodo entra facilmente no sistema biológico e se acumula na glândula da tireoide. Essa glândula tem essa capacidade de acumulá-lo, já que é um elemento importante na produção de hormônios (triiidotironina, por exemplo); a tireoide pode ser, portanto, utilizada como indicador da variação do  $^{131}\text{I}$  no meio ambiente. Organismos de água doce e marinho, como peixes e algas, são os maiores absorvedores do  $^{131}\text{I}$  ambiental.

### *3.4.2 Grupo dos metais alcalinos*

Esse grupo inclui os elementos conhecidos como metais alcalinos, que estão na família 1A da tabela periódica. O comportamento fisiológico desses elementos é bastante similar.

Dos três isótopos naturais do potássio, somente o  $^{40}\text{K}$  é radioativo, possuindo meia-vida de  $1,28 \times 10^9$  anos e abundância isotópica de 0,0118%, o equivalente à atividade específica de 31,4 Bq/g de potássio natural. A adição de potássio estável aos solos através dos fertilizantes pode aumentar as concentrações de  $^{40}\text{K}$  nas plantas. O  $^{40}\text{K}$  decai para o  $^{40}\text{Ca}$  em 89% das vezes,

emitindo uma partícula beta de 1,314 MeV durante o processo. Com exceção de uma pequena fração dos decaimentos (1-3%) por captura de K, os 11% restantes de  $^{40}\text{K}$  decaem por emissão de pósitrons, emitindo um fóton característico de energia 1460 keV, muito útil para identificação e quantificação de  $^{40}\text{K}$  por espectrometria gama<sup>30</sup>. Devido a sua distribuição homogênea, abundância e emissão de raios gama penetrantes, o  $^{40}\text{K}$  é responsável por 14% da exposição dos seres vivos à radiação natural.

Outro radionuclídeo isolado que existe naturalmente com significância biológica e ambiental é  $^{87}\text{Rb}$  (rubídio de massa 87), com abundância de 27,8%. Este radionuclídeo tem uma meia-vida de 48 anos e decai emitindo partículas beta, cuja energia de desintegração é de 274 keV formando assim o  $^{87}\text{Sr}$  (estrôncio de massa 87), que é estável. Por ser um metal alcalino, o  $^{87}\text{Rb}$  pode substituir quimicamente o potássio dentro do corpo. Em humanos, a concentração média de  $^{87}\text{Rb}$  é em torno de 10 mg/kg. A concentração no fígado é em torno de quatro vezes maior do que em outros tecidos. Como homólogo do potássio, o rubídio estável é encontrado em quantias traço em solos e rochas, com concentrações típicas de  $^{87}\text{Rb}$  da ordem de 10 ppm (10 mg/Kg) até 200 ppm, sendo o granito a rocha que apresenta a mais alta concentração deste radioisótopo.

---

30 Técnica utilizada para determinar a distribuição de energia de raios gamas emitidos pelos núcleos.

Dos metais alcalinos, o  $^{137}\text{Cs}$  (césio de massa 137) é o radionuclídeo mais estudado. Com uma meia-vida de 30 anos, o  $^{137}\text{Cs}$  se encontra espalhado uniformemente pela biosfera devido às explosões nucleares, além de ser um dos produtos de fissão mais críticos em termos de proteção radiológica. Seus raios gamas, altamente penetrantes, fazem com que ele seja um contribuinte significativo na dose de radiação recebida pelo homem e outras espécies. O  $^{137}\text{Cs}$  se acumula nas plantas por adsorção foliar ou deposição atmosférica. Nos animais, a irradiação ocorre por ingestão, inalação e adsorção superficial. Como o  $^{137}\text{Cs}$  tem características eletrônicas semelhantes ao potássio, este radionuclídeo também é absorvido por vegetais sob a forma de íon, havendo competição entre os íons de potássio e de césio presentes no solo.

### *3.4.3 Grupo dos metais alcalinos terrosos*

Esse grupo contém elementos que são altamente reativos. O  $^7\text{Be}$  (berílio de massa 7) é um radionuclídeo natural de origem cosmogênica formado pelo processo de espalação de núcleos leves da atmosfera, tais como: carbono, nitrogênio e oxigênio. Dois terços do  $^7\text{Be}$  são formados na estratosfera e somente um terço na troposfera. O tempo de residência deste radionuclídeo na estratosfera é da ordem de alguns poucos anos; já na troposfera, de uns poucos dias a semanas. Como a meia-vida do  $^7\text{Be}$  é curta

quando comparada ao seu tempo de residência na estratosfera e grande quando comparada ao tempo de residência na troposfera, a maior parte do  $^7\text{Be}$  depositado é proveniente da troposfera. Uma vez formado, o  $^7\text{Be}$  é rapidamente associado às partículas de aerossóis<sup>31</sup> na forma química de óxido de berílio ( $\text{BeO}$ ) ou hidróxido de berílio ( $\text{Be}(\text{OH})_2$ ). Estes aerossóis entram nos ambientes marinhos, terrestres e vegetais através da deposição úmida ou seca. Após a deposição, o  $^7\text{Be}$  na forma de íon ( $^7\text{Be}^{+2}$ ) tende a associar-se rápida e fortemente aos materiais particulados, solos superficiais e vegetação do ambiente em questão. Após ser adsorvido, o  $^7\text{Be}$  sofre migração preferencialmente pelos processos físicos aos processos químicos. O  $^7\text{Be}$  é um núcleo radioativo leve que decai pela captura eletrônica, com meia-vida de 53,3 dias, podendo ser detectado por espectrometria gama por meio da emissão de um raio gama de 477,8 keV.

O  $^7\text{Be}$  é um radionuclídeo que tem sido reconhecido como uma ferramenta útil no estudo e descrição de vários processos ambientais, tais como trânsito e tempo de residência de aerossóis na troposfera, velocidade de deposição dos aerossóis, aprisionamento dos aerossóis pela vegetação acima do solo, trânsito e tempo de residência de sedimentos em rios e avaliação de processos erosivos superficiais. Nestes últimos dois casos, a meia-vida curta do  $^7\text{Be}$  oferece um meio de identificar sedimentos recém-depositados.

---

<sup>31</sup>Partículas sólidas ou líquidas de tamanho microscópico dispersas em meio gasoso.

O cálcio (Ca) é o elemento mais abundante na biosfera, além de um elemento nutriente essencial. Os comportamentos ecológicos e fisiológicos do estrôncio (Sr), bário (Ba) e do rádio (Ra) são muito similares aos do cálcio. Seu radioisótopo mais importante é o  $^{40}\text{Ca}$  (cálcio de massa 40); entretanto, sua produção é muito pequena e não chega a constituir um risco radiológico.

O  $^{90}\text{Sr}$  (estrôncio de massa 90) é um emissor beta, com uma meia-vida de 28 anos formado durante a fissão nuclear. Seus compostos são bastante solúveis no meio ambiente e se depositam em tecidos ricos em cálcio, como os ossos e conchas, onde se fixam por anos. A partícula beta do  $^{90}\text{Sr}$  e do produto do seu decaimento, o  $^{90}\text{Y}$  (Írídio de massa 90) são potencialmente radiotóxicos, pois irradiam a medula óssea. Devido a sua grande mobilidade, o  $^{90}\text{Sr}$ , bem como seus isótopos presentes no meio ambiente, entram facilmente na cadeia alimentar.

Dos isótopos de bário, o  $^{140}\text{Ba}$  (bário de massa 140) é o mais importante, sendo um produto de fissão nuclear com meia-vida de 12,8 dias e também um emissor beta e gama. Devido a sua meia-vida curta, entra na cadeia alimentar por meio da deposição foliar e da inalação, mas não chega a preocupar em termos radiotoxicológicos, apesar de sua mobilidade biológica.

Os isótopos de rádio são os mais importantes deste grupo. O  $^{226}\text{Ra}$  (rádio de massa 226), produto de decaimento do  $^{238}\text{U}$  (urânio de massa 238), é emissor alfa e gama com uma meia-vida de 1620 anos e o  $^{228}\text{Ra}$  (rádio de

massa 228), produto do decaimento do  $^{232}\text{Th}$  (Tório de massa 232) é emissor beta e gama com meia-vida de 5,7 anos. Ambos são bastante encontrados no meio ambiente e, graças a sua similaridade química com o cálcio, tendem a se concentrar nos ossos.

#### *3.4.4 Grupo dos gases nobres*

Todos os gases nobres ocorrem naturalmente na atmosfera como isótopos estáveis, com exceção do Rn (radônio), que é instável e radioativo. O isótopo de Rn de meia-vida mais longa é o  $^{222}\text{Rn}$  (radônio de massa 222), com meia-vida de 3,8 dias, formado pelo decaimento direto do  $^{226}\text{Ra}$ , presente nas rochas e solos. O Rn pode ser incorporado por ingestão nos tecidos gordurosos, formando-se dentro do organismo pelo decaimento do  $^{226}\text{Ra}$ . O  $^{220}\text{Rn}$  e o  $^{222}\text{Rn}$  são importantes quando inalados, pois seus produtos de decaimento de meia-vida longa irradiam os tecidos dos pulmões.

O Rn flui da terra em todas as partes; entretanto, seus níveis no ambiente variam muito de um lugar para outro. O nível de exposição ao radônio aumenta em ambientes fechados. Em regiões temperadas, a concentração de radônio no interior de edifícios é em torno de oito vezes superior à existente no exterior. Porém, acredita-se que em regiões como o Nordeste do Brasil as concentrações de radônio no interior e no exterior dos

ambientes não sejam muito diferentes, pois clima é mais quente e as residências permanecem a maior parte do tempo abertas.

### 3.4.5 Grupo dos metais pesados

O grupo dos metais pesados apresenta uma química complexa e variada; portanto, seu comportamento não pode ser generalizado. Os radionuclídeos importantes de cada elemento serão discutidos separadamente.

A começar pelo cromo, seu único isótopo de interesse radiológico é o  $^{51}\text{Cr}$  (cromo de massa 51), produto de ativação com nêutrons<sup>32</sup> do  $^{50}\text{Cr}$ . O Cromo não é considerado um elemento essencial na fisiologia dos organismos vivos. Na sua forma mais solúvel, de cromato e dicromato, é considerado um metal tóxico. Com uma meia-vida de 27,7 dias, o  $^{51}\text{Cr}$  é muito usado como traçador em pesquisas científicas.

O radioisótopo mais importante do manganês é o  $^{54}\text{Mn}$  (manganês de massa 54), com meia-vida de 300 dias. O manganês é um elemento essencial

---

<sup>32</sup>Consiste no bombardeamento de um dado material seguido da medida da radioatividade induzida. Em geral, a irradiação é feita com nêutrons térmicos e a radioatividade resultante é medida usando-se a espectrometria dos raios gama emitidos por cada radioisótopo. Uma vez que cada isótopo produzido no processo de ativação possui características de emissão próprias (meia-vida e energia das partículas ou radiação gama emitidas), é possível efetuar determinações quantitativas da concentração por comparação com padrões.

e necessário em muitos processos bioquímicos em plantas e animais. Por esta razão, esse elemento entra e passa por toda a cadeia alimentar. A entrada de  $^{54}\text{Mn}$  nos organismos depende da disponibilidade do Mn estável, sendo assimilado pelos mamíferos numa proporção de 10%, cujo órgão-alvo é o fígado.

Já a ativação com nêutrons do Ferro (Fe) forma dois radioisótopos:  $^{55}\text{Fe}$  (ferro de massa 55), com meia-vida de 2,6 anos, e o  $^{59}\text{Fe}$  (ferro de massa 59), com meia-vida de 44 dias. Se ingeridos, esses radioisótopos de Ferro se concentram nas células vermelhas do sangue e no baço.

O  $^{60}\text{Co}$  (cobalto de massa 60), com meia-vida de 5,2 anos, é considerado um elemento traço no meio ambiente, mas é também um microconstituente das plantas e animais, além de ser essencial em algumas reações químicas. Também é muito utilizado na medicina nuclear em clínicas de rádio e teleterapias, na esterilização de alimentos e materiais médico-hospitalares, também sendo a principal fonte de radiação gama para pesquisas científicas. Os órgãos críticos para o  $^{60}\text{Co}$  são o fígado e o rim.

O único radioisótopo de zinco relevante é o  $^{65}\text{Zn}$  (zinco de massa 65) com tempo de meia-vida de 245 dias, produzido por ativação com nêutrons. Embora presente em baixas concentrações na biosfera, o zinco é considerado um elemento essencial para o crescimento. O  $^{65}\text{Zn}$  é muito usado como traçador do Zn estável em estudos ecológicos e biológicos. Quando ingerido

pelo homem, o  $^{65}\text{Zn}$  apresenta uma assimilação intermediária e uma retenção longa, sendo o fígado e a próstata os órgãos críticos.

O  $^{210}\text{Pb}$ , com um tempo de meia-vida de 138,4 dias, é formado na atmosfera e litosfera pelo decaimento do  $^{222}\text{Rn}$  na série do urânio. A via de transferência principal deste radionuclídeo é a deposição aérea, podendo, portanto, ser também inalado. Os órgãos-alvo são ossos, rins e fígado. Pelo fato de o  $^{210}\text{Pb}$  ter meia-vida de 22,26 anos e seu tempo de residência na atmosfera ser da ordem de uma semana, este tem sido usado para validar simulações de modelos globais de transporte e de tempo de residência de aerossóis na atmosfera. Além disso, o  $^{210}\text{Pb}$  também tem sido aplicado na datação cronológica de sedimentos e na avaliação do processo erosivo em solos juntamente com o  $^{137}\text{Cs}$ .

Tanto o  $^{210}\text{Pb}$  como o  $^{210}\text{Po}$  concentram-se no tabaco e os fumantes apresentam uma carga corporal desses elementos muito maior do que os não-fumantes, especialmente no pulmão. O  $^{210}\text{Pb}$  e o  $^{210}\text{Po}$  também são introduzidos no organismo com os alimentos, principalmente com o consumo de peixes e mariscos.

### 3.4.6 Grupo dos actínídeos

O grupo dos actínídeos inclui os elementos naturais actínio (Ac), tório (Th), protactínio (Pa) e urânio (U), além dos elementos transurânicos, produzidos pelo bombardeamento do urânio com nêutrons. Todos os actínídeos são radioativos, e seus tempos de meia-vida variam bastante. Alguns isótopos do Ac, Th, Pa e U são produtos do decaimento do  $^{235}\text{U}$  (urânio de massa 235),  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . A maioria dos actínídeos normalmente se acumula nos solos e sedimentos e expõe os seres vivos à radiação natural por processos geológicos (como erosão) e algumas vezes por lixiviação<sup>33</sup>. Os actínídeos emitem partículas alfa, aumentando o risco de irradiação interna quando os mesmo são ingeridos.

O urânio (homenagem ao planeta Urano) é o elemento químico natural de maior número atômico ( $Z=92$ ). Acredita-se que seja o produto do decaimento de elementos de números atômicos ainda mais elevados, que existiram em alguma época no Universo. À temperatura ambiente, o urânio encontra-se no estado sólido. Sua utilização na forma natural data de 79 D.C., quando artesãos aplicavam esse metal na superfície de vidros e cerâmicas, como um corante para obtenção da cor amarela.

---

<sup>33</sup> **Lixiviação** é o processo de extração de uma substância presente em componentes sólidos através da sua dissolução num líquido.

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de urânio, possibilitando o suprimento das necessidades domésticas a longo prazo e a disponibilização do excedente para o mercado externo. A primeira unidade mineira e de beneficiamento de urânio do Brasil foi o município de Poços de Caldas (sul de Minas Gerais). Com a exaustão e desativação do urânio economicamente explorável dessa mina em 1996, passou-se a produzi-lo na região sudoeste da Bahia, nos municípios de Lagoa Real e Caetitê, que apresentavam reservas estimadas em 100.000 toneladas, sem outros minerais associados. Em junho de 2001, com cerca de 30% do território prospectado, o país já possuía a sexta maior reserva geológica de urânio do mundo, com cerca de 309.000 toneladas de octóxido de triurânio ( $U_3O_8$ ), nos estados da Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais, entre outras ocorrências. O Amazonas e a área de Carajás, no Estado do Pará, apresentam um potencial adicional estimado de 150.000 toneladas de seus minérios, dos quais os principais são a uraninita, uma mistura de dióxido de urânio ( $UO_2$ ) e  $U_3O_8$ , além de tório e a pechblenda, porção da uraninita rica em  $U_3O_8$  utilizada na produção do “bolo amarelo” ou *yellowcake*, fundamental para o processo de enriquecimento do urânio<sup>34</sup>. Os mais abundantes isótopos do urânio são

---

34 Processo cujo teor de  $^{235}U$  foi aumentado, através da separação de isótopos. O urânio encontrado na natureza, sob a forma de dióxido de urânio ( $UO_2$ ), contém 99,284% do isótopo  $^{238}U$  e apenas 0,711% do seu peso é representado pelo isótopo  $^{235}U$ . Porém, o  $^{235}U$  é o único isótopo existente na natureza que possui a propriedade de realizar uma fissão nuclear em proporções significativas. No enriquecimento do urânio o percentual de  $^{235}U$  deve estar entre 3 e 5%.

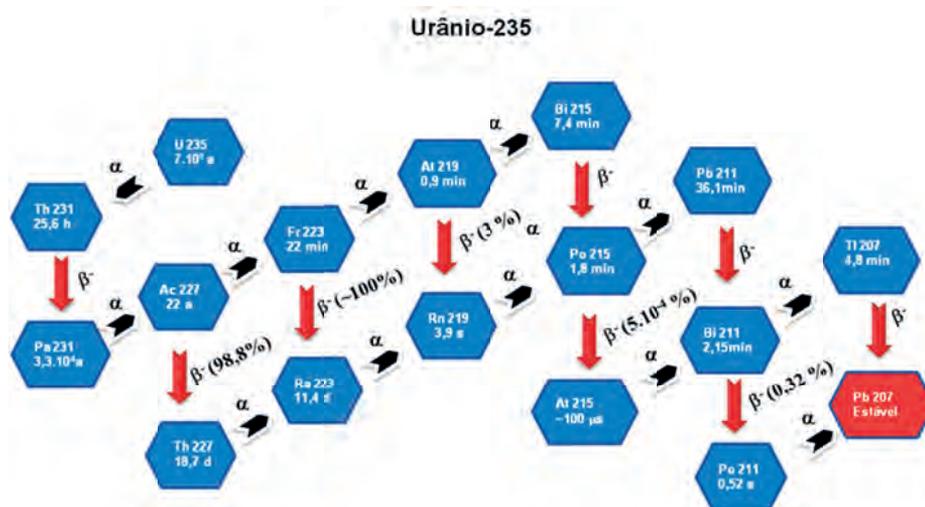
emissores alfa:  $U^{238}$  ( $t_{1/2}=4,5 \times 10^9$  anos),  $^{235}U$  ( $t_{1/2}= 7 \times 10^8$  anos) e  $^{234}U$  ( $t_{1/2}= 2,4 \times 10^5$  anos), com abundâncias isotópicas de 99,285%, 0,71% e 0,006%, respectivamente. Os principais estados de oxidação do urânio são +3, +4, +5 e +6.

O urânio é facilmente encontrado na crosta terrestre em concentrações que variam de 0,91 ppm a 2 ppm. É 500 vezes mais abundante que o ouro, tão comum quanto o estanho e está presente na maioria das rochas e solos, assim como em rios e oceanos. Algumas regiões do globo terrestre apresentam concentrações de urânio nos solos suficientemente elevadas, tornando sua extração para uso como combustível nuclear economicamente viável. Uma informação interessante é que, quando ingerido pela mãe, o urânio é transferido ao feto desde sua concepção por transmissão placentária, e sua transferência prossegue durante a fase de amamentação.

O  $^{238}U$  é o isótopo responsável pela maior parte da massa de urânio presente no planeta, pela toxicidade química e pela metade da radioatividade natural a que os seres vivos estão expostos. Ele decai por emissão de partícula alfa com energia inferior a 5 Mev, as quais perdem energia produzindo uma elevada quantidade de íon. O isótopo  $^{234}U$  também contribui para essa radioatividade, enquanto a concentração de  $^{235}U$  é pequena demais para considerarmos sua contribuição radioativa por emissão de partículas alfa.

Com os actinídeos formam-se três das séries que são encontradas na natureza e são consideradas de origem terrestre: a do  $^{238}\text{U}$ , a do  $^{235}\text{U}$  e a do  $^{232}\text{Th}$  (abundância natural: 100%). Cada uma dessas séries é iniciada a partir de um isótopo do urânio (Figura 3.3) ou do tório (Figura 3.4) e termina em um isótopo estável do chumbo.

Vale salientar que a série do Netúnio não pode mais ser observada na natureza, já que este elemento tem meia-vida menor que a idade da Terra, podendo ser verificada apenas artificialmente.



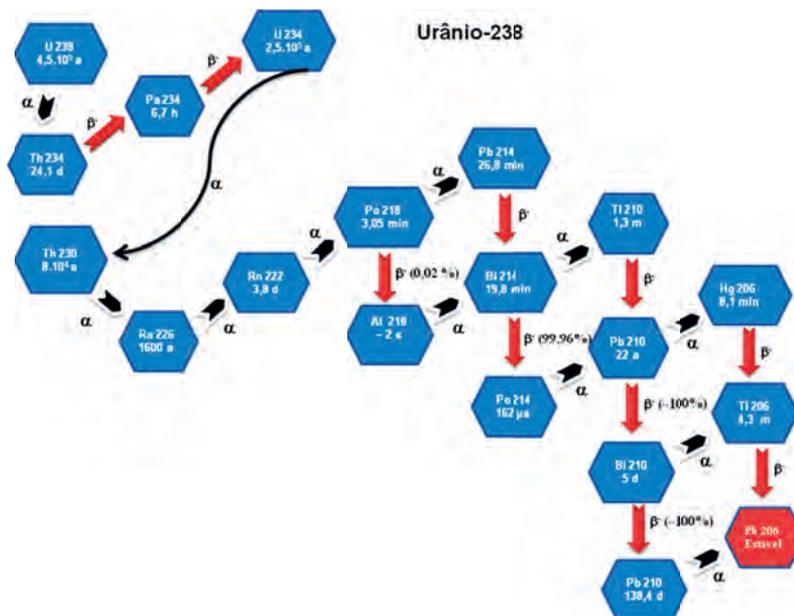


Figura 3.2 Séries naturais dos isótopos do urânio

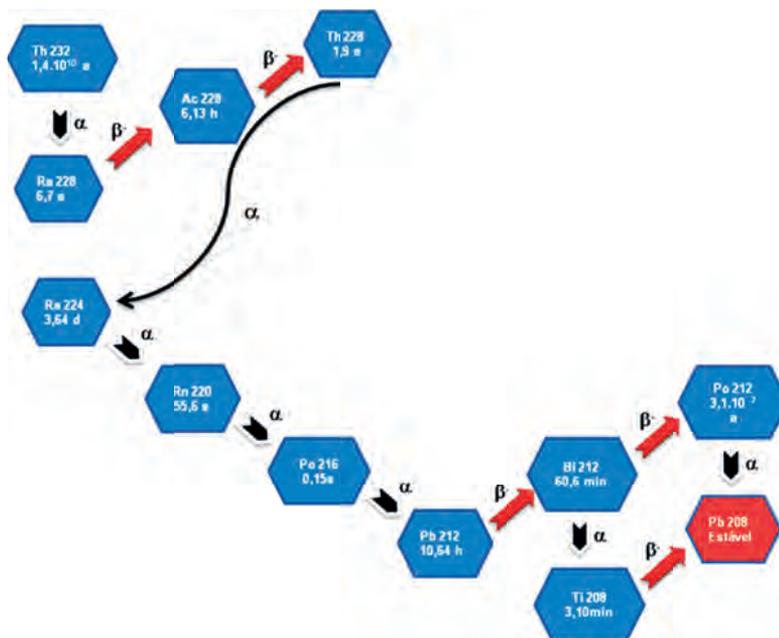


Figura 3.3 Série radioativa natural do Tório-232

## Referências Bibliográficas

ARNOLD, J. R. Radionuclides Produced by Cosmic Rays: the Early Years. *Planetary and Space Science*, 47, 293–297 (1999).

BIRAL, A. R. **Radiações ionizantes para médicos, físicos e leigos**. Florianópolis: Ed. Insular Ltda., 2002.

KATHREN, R. L. NORM sources and their origins. *Applied Radiation and Isotopes*. 49, 149-168 (1998).

SANTOS, E. E., LAURIA, D. C, AMARAL, E. C. S.; ROCHEDO, E. R. Daily ingestion of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in vegetables by inhabitants of Rio de Janeiro city. *Journal Environmental Radioactivity*. 62, 75-86 (2002).

SHAW, G.; BELL, J. N. Competitive Effects of Potassium and Ammonium on Caesium Uptake Kinetics in Wheat. *Journal of Environmental Radioactivity*, 13, 283-296 (1991).

SHULTZ, R. K. Soil Chemistry of Radionuclides. **Health Physics**, 11, 1317-132, (1965).

SEELMANN, E. W; PFENNIG, G.; MUNZEL, H. **Chart of the nuclides tableau des nucleides tabla de nuclidos**. Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe, 28 p, 1974.

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., PRINZIO, R. D.; PRINZIO, M. A. R. R. D. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2003.

# Capítulo 4

## 4.1 A nossa radioatividade de cada dia

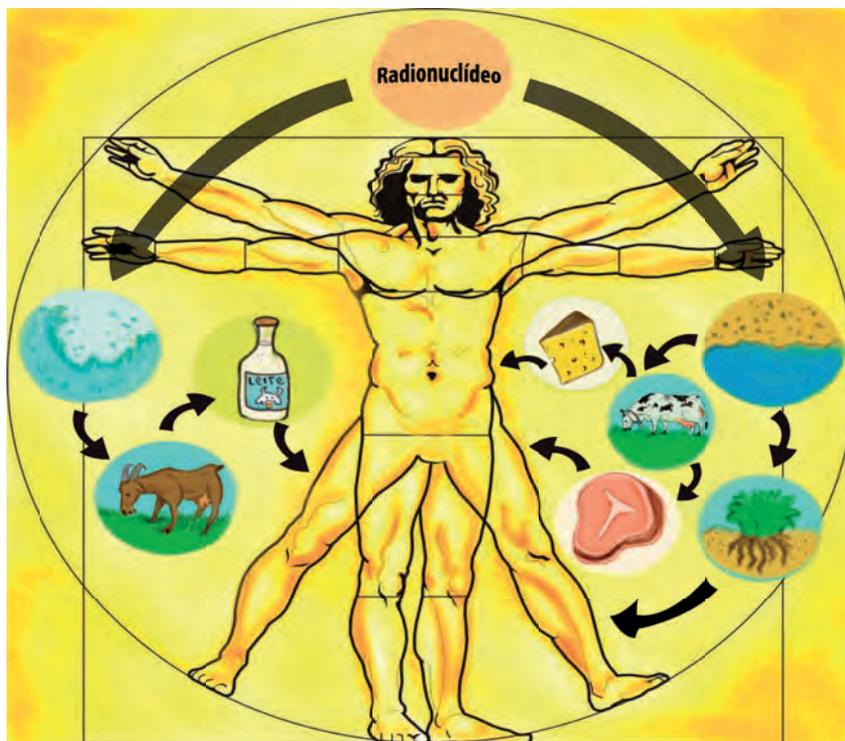


Figura 4.1 Ciclo de incorporação de radionuclídeos pelo ser humano

A exposição do homem a fontes naturais de radiação é uma consequência inevitável da distribuição de radionuclídeos na crosta terrestre e do alcance de radiações cósmicas. Os processos naturais que contribuem

para a exposição aos radionuclídeos das séries de isótopos do urânio e tório têm sido objeto de várias pesquisas, visando definir a grandeza e variabilidade das doses às quais as populações ficam expostas e, também, contribuir para um melhor entendimento da relação entre a exposição natural e seus efeitos biológicos.

A maior parte da radiação recebida pelo homem provém de fontes terrestres naturais. Através de vias de transferência, como as plantas, a água, os animais e seus derivados, os radionuclídeos presentes no meio ambiente incorporam-se ao homem. Assim, definem-se as rotas pelas quais os radionuclídeos atingem um indivíduo ou uma população através do meio ambiente. A Figura 4.1 ilustra as vias pelas quais um indivíduo pode estar exposto após uma liberação de material radioativo para a atmosfera ou para o meio hídrico.

As doses internas de radiação são significativas e contribuem com cerca de 80% para a dose total recebida pelo homem devido à radioatividade natural, sendo que esta contribui com 60 a 70% da exposição total à radiação ionizante. O principal radioisótopo responsável pela dose associada aos radionuclídeos internos é o  $^{40}\text{K}$ , contribuindo com 60 a 70% da dose total.

Em casos gerais, as doses por ingestão de radionuclídeos naturais em alimentos e água potável têm sido verificadas a partir da medição de concentrações de radionuclídeos em tecidos ou órgãos. Para o  $^{40}\text{K}$ , o balanço metabólico mantém níveis estáveis, independente da quantidade ingerida. Por

exemplo, o percentual de  $^{40}\text{K}$  é de aproximadamente 0,18% para adultos e 0,2% para crianças. No entanto, para os radionuclídeos das séries do urânio e do tório, isto não acontece, e as concentrações tanto nos seres vivos quanto nos alimentos e na água dependem das variações geográficas e, no caso dos seres vivos, também da dieta. O urânio no organismo acarreta, em média, uma dose equivalente efetiva anual de aproximadamente  $5\ \mu\text{Sv}$  à superfície óssea e  $3\ \mu\text{Sv}$  a outros tecidos. Por outro lado, a dose efetiva total a partir da ingestão e inalação de radionuclídeos terrestres é de  $310\ \mu\text{Sv}$ , dos quais  $170\ \mu\text{Sv}$  deve-se ao  $^{40}\text{K}$  e  $140\ \mu\text{Sv}$  aos radionuclídeos das séries do urânio e do tório. Dada a importância da água, dos alimentos e do solo na exposição do homem à radiação ambiental, iremos discutir a seguir cada uma dessas vias de exposição.

## **4.2 A radioatividade na água: tomando uma dose de radionuclídeos diariamente**

A Portaria nº 518/GM de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde do Brasil preconiza, na tabela 7 do documento, o padrão para radioatividade de água potável que consiste no valor máximo de  $0,1\ \text{Bq/L}$  para a emissão alfa e  $1,0\ \text{Bq/l}$  para a emissão beta. Isso significa que as leis federais levam em conta os radionuclídeos naturais aos quais o ser humano se expõe através da ingestão de água.

Os elementos pertencentes às séries naturais que foram mostradas no Capítulo 2 são as maiores fontes de exposição do homem à radiação ambiental pela ingestão de água. O urânio, o rádio, o radônio, o chumbo e o polônio são os radionuclídeos de maior interesse de estudo devido à similaridade química destes radionuclídeos com macronutrientes essenciais ao nosso ciclo biológico. A seguir iremos tratar da influência de cada um destes radionuclídeos na água.

#### *4.2.1. O urânio que bebemos*

O urânio é um elemento largamente distribuído nas crostas terrestres, com uma concentração de aproximadamente 2 ppm. A elevação das concentrações no meio ambiente é ocasionada pelas atividades do homem ou por ocorrências naturais. Nas atividades do homem incluem-se a mineração, o processamento do urânio, a produção de fertilizantes fosfatados e depósitos impróprios de rejeitos contendo urânio. A erupção vulcânica é a principal ocorrência natural para tal elevação na superfície terrestre, pois existe muito desse elemento nas partes mais profundas da Terra.

Numa escala global, as concentrações de urânio natural solúvel geralmente variam de 0,1 a 10 g/L em rios, lagos e águas subterrâneas. O limite máximo de concentração de urânio natural recomendado em águas potáveis é de 15 g/L, baseado exclusivamente no limiar de toxicidade.

Em nível nacional, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), do Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, na resolução de nº 20 de 18 de junho de 1986, estabelece os teores máximos de substâncias potencialmente prejudiciais. No caso do urânio natural, é estabelecido que, para mananciais destinados ao abastecimento de uso doméstico, o teor máximo seja de 20  $\mu\text{g/L}$ .

Atualmente, a água é considerada por alguns pesquisadores a fonte mais importante de ingestão de urânio. Estudos baseados em aproximadamente 22000 amostras de água mostraram que sua contribuição na ingestão de urânio é superior à dos alimentos. Estes mesmos pesquisadores concluíram que um cidadão dos Estados Unidos, bebendo dois litros de água por dia, ingeriria uma quantidade de urânio que apresentaria uma atividade de 54 Bequerel (Bq) por ano. Assim, a água contribui com 85% do total de urânio ingerido pelo homem.

Vale salientar que pessoas vivendo nas vizinhanças de ocorrências de jazidas de urânio podem consumir água com concentrações superiores a 54 Bq/ano e, por essa razão, necessitam de acompanhamento especial. No Brasil, dados disponíveis sobre a concentração de radionuclídeos na água foram obtidos na região uranífera no planalto de Poços de Caldas com uma concentração máxima de urânio de aproximadamente 178 mBq/L.

Já foram realizados trabalhos com a finalidade de verificar, por autópsia, a retenção de urânio no corpo humano. O osso aparece como o

local de maior deposição de urânio, seguido pelos rins. Essa variação é atribuída a fatores geográficos, dieta alimentar e incertezas analíticas. Estudos epidemiológicos realizados sobre a ingestão de urânio em água ou alimentos concluíram que, com a ingestão de urânio numa taxa média de 185 mBq/dia e admitindo-se a vida média de 70 anos, existe um risco de indução de sarcoma de osso na proporção de 1,5 por  $10^6$  pessoas, ou seja, um valor felizmente muito baixo.

#### *4.2.2 O rádio “que não ouvimos”*

O rádio apresenta propriedades químicas muito semelhantes aos outros elementos pertencentes ao grupo dos metais alcalinos terrosos, principalmente o bário e o cálcio. O rádio raramente aparece sozinho na natureza, sendo gerado pelo decaimento do urânio e/ou do tório. Assim, todos os minerais e rochas que contêm isótopos naturais de urânio e tório apresentam quantidades mensuráveis de rádio. Devido a sua similaridade química com o cálcio, esse elemento se dissolve nas rochas, tornando-se parte integrante da cadeia biológica, sendo facilmente absorvido pelo homem através da cadeia alimentar ou da água. Ao ser ingerido, cerca de 21% é absorvido para a corrente sanguínea, dos quais 85% é depositado nos ossos e o restante é uniformemente distribuído nos tecidos moles.

### 4.2.3 O radônio que respiramos

O radônio é o gás nobre de maior número atômico. Em sistemas fechados, a concentração deste gás no ar aumenta significativamente. Por ser quimicamente inerte, este nuclídeo tem sua ocorrência controlada pelas condições do meio, tais como temperatura, pressão atmosférica, umidade e precipitação pluviométrica. Além disso, o radônio é liberado de rochas e difunde-se pelas suas fraturas, podendo ser transportado pela água e pelo ar. Na água, é o radionuclídeo mais abundante; por esta razão, a legislação vigente no Brasil, pelo decreto de lei 7841 de 8/8/1945, para classificação de água mineral radioativa de uso comercial, faz referência unicamente às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$ .

Pode ocorrer a ingestão do radônio e subsequente exposição do sistema digestivo a radiação quando esse elemento é transportado pela água nos sistemas de abastecimento público, ou sua inalação quando a água é utilizada em atividades domésticas, causando assim exposição do sistema respiratório. No caso de ingestão, ele é absorvido pelo intestino, passa à corrente sanguínea e é transportado aos pulmões, para ser exalado com uma meia-vida biológica de 30 a 50 minutos. Alguns pesquisadores identificaram que a parede do estômago é a parte do corpo que recebe a maior dose de radiação quando o radônio é ingerido com a água, e que somente 1% deste

gás ingerido decai no corpo. Os descendentes do radônio de meia-vida curta não contribuem de maneira significativa para a exposição dos seres vivos.

#### *4.2.4 Chumbo e polônio que não pesam tanto no nosso organismo*

A presença de  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{210}\text{Po}$  em águas superficiais, como rios e lagos, decorre tanto da deposição atmosférica destes radionuclídeos, onde são produzidos pelo decaimento do  $^{222}\text{Rn}$ , quanto da sua lixiviação das rochas. O  $^{222}\text{Rn}$  também pode ser encontrado em sedimentos que contêm urânio, já que está presente nas suas séries radioativas naturais.

Em águas de poços rasos, o  $^{210}\text{Po}$  origina-se do arraste provocado pela água da chuva e da lixiviação das rochas circunvizinhas. Também pode ser originado pelo decaimento de  $^{236}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  dispersos na água.

#### 4.4 Interação da radiação com a água

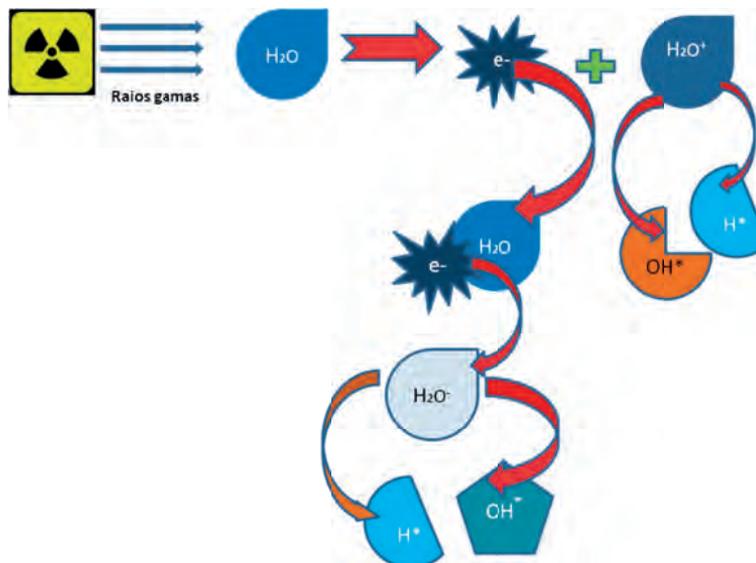


Figura 4.2 Esquema da radiólise da água

A molécula de água é a mais abundante em um organismo biológico. A água participa praticamente de todas as reações metabólicas em um organismo. Na espécie humana, são cerca de  $2 \times 10^{25}$  moléculas de água por quilograma de massa corpórea, o que reflete a composição química da célula e permite afirmar que, em caso de exposição às radiações, as moléculas atingidas em maior número serão moléculas de água. Quando irradiadas, elas sofrem radiólise, conforme mostra a Figura 4.2. As principais espécies formadas na radiólise da água são radicais hidroxila e hidrogênio, além dos íons da mesma espécie química, ou seja,  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$ .

Em seguida à ionização da água ocorre um rearranjo eletrônico, e os radicais livres formados na radiólise recombina-se formando outras espécies, como mostram os arranjos 1, 2 e 3 na Figura 4.3. Sendo formas altamente reativas, os radicais livres originados em decorrência da radiólise da água interagem quimicamente entre si ou com moléculas próximas a eles. Como consequência, novas moléculas podem ser formadas, passando a disputar elétrons com o meio.

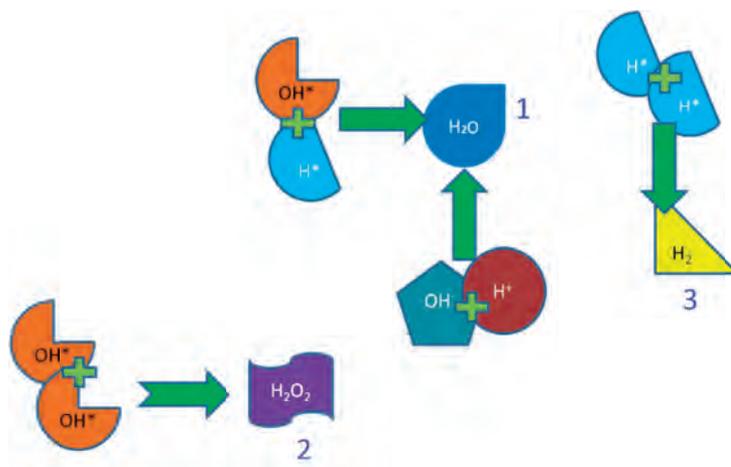


Figura 4.3 Rearranjo de radicais na radiólise da água: (1) formação de novas moléculas de água; (2) formação de peróxido de hidrogênio e (3) formação de gás hidrogênio

#### 4.5 A radioatividade que vem do solo

A maior característica química do solo é sua capacidade de adsorver e reter íons na forma relativamente móvel. Essa adsorção e retenção dependerão de seu teor de argila e matéria orgânica. Os radionuclídeos

podem apresentar alto, médio ou baixo grau de mobilidade e o seu movimento no solo é provocado pela influência de água e soluções salinas, podendo estar ou não disponíveis para as plantas. O urânio natural no solo encontra-se na forma de cátion bivalente uranila ( $\text{UO}_2^{+2}$ ) e nestas condições ele é móvel.

Em solos ricos em argila e matéria orgânica, os níveis de urânio natural são maiores, pois esses solos agem como armadilhas, adsorvendo o urânio no solo. Por outro lado, solos com altos teores de areia apresentam baixa quantidade de urânio, já que estes solos não apresentam malhas para capturar o urânio presente.

No solo, o urânio encontra-se em pequenas quantidades nas rochas fosfáticas. No Brasil, as rochas fosfáticas são muito ricas no minério fluorapatita [ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ], que por sua vez é fonte de fósforo, muito utilizado na produção de ração animal e fertilizantes. A contínua utilização desses fertilizantes resulta na adsorção de certas quantidades de urânio por plantas, levando, portanto, à presença do urânio na dieta humana. A utilização do fosfato na composição de suplementos de ração animal propicia o acúmulo do urânio à massa corpórea de animais que serão consumidos pelos humanos, tornando-se, portanto, outra rota de entrada do urânio na cadeia alimentar em concentrações de até 200 ppm. Vale salientar que outros minérios, também presentes no território brasileiro, apresentam urânio associado, como mostra a Tabela 4.1.

Um dos processos de aproveitamento do fosfato na produção de fertilizantes é o tratamento da rocha fosfatada com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Como a rocha fosfatada possui um percentual de anidrido fosfórico,  $P_2O_5$ , o produto obtido da reação da rocha fosfatada com o ácido sulfúrico é o ácido fosfórico, que por sua vez contém urânio dissolvido.

Tabela 4.1 Fontes de urânio no Brasil

<b>Minério associado</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Localidade</b>
Pirocloro	$(Ca,Na)_2(Nb, Ti, Ta)_2O_6(OH, F, O)$	Araxá
Apatita	$Ca_3(PO_4)_2$ (pode ser rica em OH, F, Cl)	
Fosforita	Rocha fosfática com mais de 18% de $P_2O_5$	Olinda/PE
Ouro	Au	Jacobina/BA
Caldasito	Composição principal: $ZrO_2$ e $ZrSiO_4$	Poços de Caldas/MG

No Brasil, a produção de ácido fosfórico em termos do  $P_2O_5$  foi estimada em 227000 toneladas por ano. Este dado significa um teor de urânio variando entre 80 a 200 ppm. Portanto, fazendo-se uma estimativa, verifica-se que seria possível recuperar cerca de 150 toneladas de urânio por

ano como subproduto da produção de ácido fosfórico. A Figura 4.4 mostra um esquema simplificado da recuperação de urânio no processo de fabricação de fertilizantes.

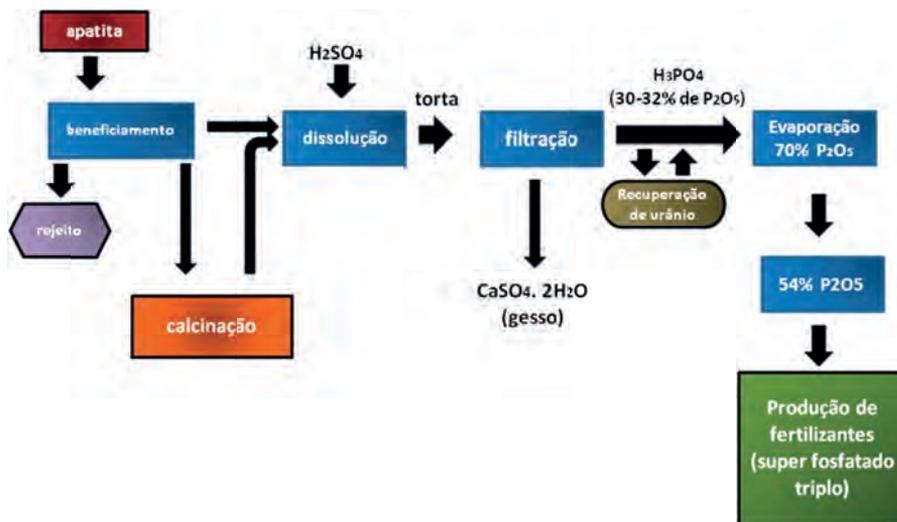


Figura 4.4 Esquema da recuperação de urânio durante a fabricação de fertilizantes

A transferência de qualquer elemento do solo para as plantas dependerá da presença e da disponibilidade deste elemento no solo e da necessidade das plantas em relação a ele, ou seja, no caso de ele ser um nutriente ou outro elemento de comportamento químico similar (a planta é incapaz de diferenciá-los nessa situação). A bivalência do íon uranila ( $\text{UO}_2^{+2}$ ), por exemplo, e suas similaridades com o cálcio permitem que ambos sejam absorvidos da mesma forma. O cálcio, entre outros, é considerado um

macronutriente da planta, sendo requerido pelas plantas em proporções relativamente altas. Ele é capaz de estimular o desenvolvimento das raízes e das folhas, como também melhorar as condições para o desenvolvimento das raízes, aumentando a absorção de outros nutrientes.

A distribuição de íons e moléculas no interior das plantas é denominada translocação. O fator de translocação pode ser definido pela razão entre deposição do radionuclídeo na superfície das folhas e o que é absorvido e transferido para toda a planta, principalmente para as partes comestíveis. O grau de translocação depende das propriedades químicas do radionuclídeo e da natureza da planta, ou seja, das suas características, do ambiente em que está se desenvolvendo e de seu estágio de desenvolvimento, sendo que plantas mais jovens necessitam de uma maior absorção de nutrientes e água. As principais características do solo que afetam a transferência dos radionuclídeos para as plantas através das raízes (que ocorre durante todo o seu crescimento) são: a quantidade de argila e conteúdo de matéria orgânica, o pH e a capacidade de troca de cátions. Essas características do solo interagem causando variações no processo em diferentes circunstâncias. Por exemplo, um alto conteúdo de argila no solo proporciona uma maior ligação do radionuclídeo com o solo e reduz a absorção pela raiz. Um alto conteúdo de matéria orgânica geralmente aumenta sua absorção pela raiz, mas também pode ter o efeito oposto.

Entre as plantas que apresentam as maiores atividades devido à presença de um radionuclídeo, em especial o rádio, está a castanha-do-pará. A árvore da castanheira é uma das espécies que de fato assimilam rádio do solo pelas suas raízes e a porcentagem do íon trocável em relação ao conteúdo total no solo situou-se na faixa de 2,3 a 34,5%, demonstrando disponibilidades diversas deste íon para absorção pelos vegetais. A combinação da existência de solos ricos em tório no Brasil, a incorporação de rádio pelas raízes da castanheira e a mais alta proporção relativa de potássio (que contém agregado o  $^{40}\text{K}$ ) que se conhece faz com que a castanha-do-pará seja considerada um dos alimentos mais radioativos do mundo. Verificou-se que a castanha-do-pará apresentou atividades máximas de 63,4 Bq/kg para o  $^{228}\text{Ra}$  e de 63,6 Bq/kg para o  $^{226}\text{Ra}$ . Considerando-se uma taxa de consumo de 100g semanais, que é um consumo recomendado por especialistas em saúde, tais atividades acarretariam numa dose efetiva de 1,0 mSv/a.

#### **4.6 A radioatividade que está no nosso cardápio**

Os alimentos absorvem radionuclídeos pela água e pelo solo. No Brasil, principalmente nas regiões dos centros vulcânicos de Minas Gerais, foram assinalados os alimentos nacionais mais ricos em radioatividade natural. Nas zonas vulcânicas, os principais radionuclídeos encontrados são os sais de tório, que, absorvidos por raízes vegetais, se depositam em vários segmentos, concentrando-se principalmente na raiz da planta. Por outro lado,

a contaminação de água procedente de camadas mais profundas do solo é feita através de sais solúveis de rádio radioativo que, em sua desintegração, produz o gás radônio. O radônio dissolvido em água, quando aflora à superfície, desprende-se por emanção.

Outras regiões que apresentam elevado índice de radioatividade natural no Brasil são as áreas monazíticas do litoral do Espírito Santo, Rio de Janeiro e sul da Bahia. Nas áreas monazíticas, entre os elementos radioativos, predomina o tório, com seus vários isótopos alfa e gama. Nesta região praticamente inexistem culturas de subsistência e os alimentos de origem animal, como leite, carne e ovos, são produzidos apenas para o consumo próprio. Os alimentos provenientes de animais contaminados apresentam menor conteúdo radioativo, pelo fato de o agente de radioatividade não se distribuir uniformemente no corpo do animal, depositando-se em maior concentração nos ossos, que não são consumidos pela maioria dos humanos. A presença de radioatividade natural em alimentos, pouco acima dos valores normais, não tem importância significativa, desde que não sejam ingeridos em quantidade excessiva e de forma constante.

Pelo fato de estar presente em todos os tipos de solos em concentrações diferentes, o urânio natural também pode ser encontrado em quase todos os alimentos, inclusive carne e leite. A média variação da concentração de urânio em alimentos é de 0,3 a 30 g de urânio natural por quilo de peso úmido em vegetais e de 0,0005 a 4 g de urânio por quilo de peso úmido em produtos de origem animal.

Em relação a outros radionuclídeos, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabeleceu, em 1988, os limites de radioatividade para alimentos da seguinte forma: 707-2234 Bq/kg para o  $^{40}\text{K}$  e 600 Bq/kg para a soma dos  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{137}\text{Cs}$ . Vale salientar que o limite de radioatividade para a soma de  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{137}\text{Cs}$  no leite é menor e as seguintes medidas devem ser tomadas se:

- a) o leite com níveis de radiação inferiores a 370 Bq/kg de pó, devido aos radioisótopos de  $^{137}\text{Cs}$ , podem ser imediatamente liberados para consumo.
- b) o leite que apresentar níveis de radiação entre 370 e 3700 Bq/kg de pó só pode ser liberado para o consumo após detalhada avaliação socioeconômica.
- c) o leite cujos níveis de radiação estejam superiores a 3700 Bq/kg de pó não deve ser consumido em hipótese alguma.

Na Tabela 4.2 encontram-se alguns valores de atividade para alimentos que foram pesquisados no Brasil. Conforme mostram os resultados na Tabela 4.2, todos os níveis de radiação nos alimentos estudados para potássio e césio estão normais e toda a população consome estes radioisótopos sem nenhum prejuízo para a saúde.

Vale salientar que os radionuclídeos  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{137}\text{Cs}$  são artificiais e serão discutidos no capítulo 5.

Tabela 4.2. Atividade do  $^{40}\text{K}$  e  $^{137}\text{Cs}$  em alimentos

<b>Alimento</b>	<b><math>^{40}\text{K}</math> (Bq/Kg)</b>	<b><math>^{137}\text{Cs}</math> (Bq/kg)</b>
Soja em grão	745	<1,1
Farelo de soja	1473	<1,3
Óleo de soja	<8,8	<1,0
Açúcar	<8,6	<1,0
Bala (confeito)	<8,8	<1,0
Chá-mate	965	<2,8
Feijão	434	<0,29
Trigo	96	<0,07
Arroz	14,7	<0,04

A ocorrência normal de urânio nos solos é de cerca de 1 a 4 mg/Kg (1 a 4 ppm). Em geral, os níveis de urânio nos solos aumentam com o acréscimo dos teores de argila e matéria orgânica. Isso é o resultado da alta afinidade que o urânio tem por essas substâncias, como já foi mencionado na seção anterior. A transferência de urânio do solo para as plantas também se deve à água do solo.

Traços de urânio são encontrados em quase todos os alimentos, uma vez que este radionuclídeo está presente em todos os tipos de solo. Estimativas da ingestão diária de urânio por meio de alimentos nos Estados Unidos alcançam de 1 a 2  $\mu\text{g}/\text{dia}$ . Este urânio provavelmente resulta da

absorção pelas culturas de plantio, especialmente aquelas que são desenvolvidas pelo uso de fertilizantes fosfatados. A concentração de urânio em cereais, frutas e vegetais é maior do que em carne e leite. Algumas pesquisas mostraram que a concentração de urânio nos alimentos cozidos é maior do que em alimentos crus. A provável explicação para este fato está na adição de sal de cozinha ao alimento, já que o sal possui concentração de 40 ppm de urânio. Portanto, 5g de sal acarretam ingestão diária de 0,2 µg de urânio. Um ser humano consome aproximadamente 100–125 µg de urânio com ingestão diária e uma excreção de aproximadamente 1 µg. Isto equivale a uma ingestão diária média anual (mundial) de aproximadamente 5 Bq para o  $^{238}\text{U}$ , principalmente a partir de alimentos.

É importante frisar que a toxicidade do urânio natural pode ser transferida para o corpo humano por via alimentar. A concentração máxima permitida de urânio natural, para que não haja prejuízo à saúde pública em relação a determinados alimentos do consumo humano, está especificada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Concentração máxima de urânio natural permitida em alguns alimentos

<b>Alimento</b>	<b>Concentração de urânio natural</b>
Água potável (adulto)	4 mg/L
Água potável (criança)	0,4 mg/L
Leite (0,7 L diário)	0,6 mg/L
Carne (200 g diário)	0,2 mg/g

Fonte: Lal *et al.* (1982)

Quando se trata do leite, pode-se afirmar que o percentual de urânio natural neste alimento está na média de 2%. O urânio natural é ingerido pelo gado bovino diariamente; contudo, 98% de sua ingestão diária é excretada direto na urina e nas fezes. A presença de radionuclídeos no leite também pode ocorrer devido à utilização de fertilizantes fosfatados (como já discutido) nos cultivos de herbáceas e gramíneas forrageiras. Por outro lado, os derivados lácteos não apresentam a mesma quantidade de urânio que o leite. A baixa concentração de urânio natural do queijo, por exemplo, se deve ao fato de este radionuclídeo ter sido lixiviado juntamente com o soro na sua preparação.

Outros radionuclídeos, como o  $^{232}\text{Th}$  e o  $^{210}\text{Pb}$ , também acabam sendo levados “à mesa” das pessoas, sendo possivelmente ingeridos através do consumo de alimentos ou através da ingestão de águas minerais com certa quantidade desses radioisótopos em sua composição. Um terço desses

alimentos equivale a mariscos, 20% a vegetais frescos e produtos panificados e pouco menos de 10% à água potável.

#### **4.7 Os radionuclídeos ingeridos: a química do nosso organismo**

Uma pergunta que pode estar passando por sua cabeça deve ser “e o que acontece com o nosso organismo com tanto radionuclídeo transitando livremente por nossos órgãos internos?” Bem, primeiramente não há nenhum motivo para pânico, pois o sistema biológico já está adaptado a esta exposição interna de radiação natural. Acontece que o corpo humano contém, em média, 90 µg de urânio como consequência da incorporação via ingestão de água, alimentos e inalação. O urânio incorporado é encontrado principalmente no esqueleto, fígado e rins.

A absorção de um radionuclídeo pelo homem pode ocorrer tanto pela ingestão como pela inalação das suas partículas em suspensão no ar atmosférico. A Figura 4.5 mostra os caminhos de absorção de um radionuclídeo no organismo humano.



Figura 4.5 Representação esquemática das duas vias de absorção de um radionuclídeo pelo homem.

#### 4.7.1 A absorção de radionuclídeos via ingestão

Para exemplificar o processo de ingestão de um radionuclídeo, vamos falar da absorção do urânio. Quando absorvido, seja pelo alimento ou pela água, o urânio comporta-se diferentemente dos lantanídeos e actinídeos na corrente sanguínea. Isto porque a oxigenação do sangue leva à formação do íon uranila,  $UO_2^{+2}$ . A carga +2 faz com que o íon uranila tenha um comportamento biológico similar ao dos alcalinos terrosos, tais como cálcio, estrôncio e rádio. Devido à baixa afinidade com os componentes do sangue

dado o seu alto peso molecular, o íon uranila é transferido rapidamente para o trato gastrointestinal (GI) para ser posteriormente excretado.

O modelo do sistema gastrointestinal adotado pela *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* em sua publicação 30 (ICRP 30) é o de que o sistema GI é dividido em quatro compartimentos: (1) estômago; (2) intestino delgado; (3) intestino grosso superior; e (4) intestino grosso inferior. Os tempos médios de residência do material em cada compartimento são de 1 hora no estômago, 4 horas no intestino delgado, 13 horas no intestino grosso superior e 24 horas no intestino grosso inferior. De acordo com esse modelo, o radionuclídeo pode ser depositado no estômago durante a ingestão ou através da remoção mucociliar das partículas depositadas no sistema respiratório, que são posteriormente transportadas para o sistema gastrointestinal. A ICRP 30 assume que a absorção para os fluidos do corpo ocorre apenas no intestino delgado.

A fração da atividade do radionuclídeo que atinge os fluidos do corpo é chamada  $f_1$ . Ela depende da solubilidade do composto. Se  $f_1$  for igual a 1, significa que a absorção para os fluidos é completa, assumindo-se, neste caso, que o radionuclídeo passa diretamente do intestino para o compartimento de transferência, chegando assim na corrente sanguínea. Quanto mais insolúvel, menores são os valores para  $f_1$  e conseqüentemente maior a excreção via fezes. Segundo o modelo, a absorção de compostos solúveis, ou seja, a transferência do intestino para o sangue, é de 2% ( $f_1 =$

0,02). Esse valor de  $f_1$  se aplica ao hexafluoreto de urânio ( $UF_6$ ), ao fluoreto de uranila ( $UO_2F_2$ ) e ao nitrato de uranila [ $UO_2(NO_3)_2$ ]. Para compostos considerados insolúveis, como  $UO_2$  e  $U_3O_8$ , a absorção é de apenas 0,2%, o que corresponde a um valor de  $f_1 = 0,002$ .

Por outro lado, os complexos formados entre o urânio e os íons de bicarbonato têm uma grande importância fisiológica. O complexo formado entre o  $U^{+6}$  e o bicarbonato é ultrafiltrável e pode atravessar membranas celulares. Tal complexo é, provavelmente, um dos maiores responsáveis pelo transporte do urânio para a corrente sanguínea e desta para outros órgãos e tecidos, como mostra a Figura 3.5. O complexo é estável em pH neutro, como no sangue, e não é muito reativo. O íon uranila em pH baixo, como o da urina, é mais reativo. Conseqüentemente, o rim torna-se um órgão afetado devido à toxicidade química do urânio. O íon uranila também se liga à transferrina, uma proteína plasmática responsável pelo transporte do ferro no sangue. Quando o urânio entra na corrente sanguínea, aproximadamente 40% dele liga-se a proteínas, e 60% a bicarbonatos. A formação de complexos fortes com os constituintes do sistema fisiológico de baixo peso molecular favorecerá a eliminação do  $U^{+6}$  da corrente sanguínea. Uma vez presente no plasma, esse íon é captado em parte pelos ossos ou filtrado pelo glomérulo renal para a urina, enquanto a outra parte retorna à circulação através do fluido extracelular.

Do urânio incorporado ao organismo através do consumo normal de água, alimento e ar inalado, aproximadamente 66% se encontra no esqueleto, 16% no fígado, 8% em rins e 10% em outros tecidos. Na excreção urinária ou nas fezes elimina-se mais de 95% do urânio que entra no corpo. Tipicamente, entre 0,2 e 2% do urânio contido nos alimentos e na água é absorvido pelo trato gastrointestinal. Do urânio que é absorvido no sangue, aproximadamente 67% é filtrado pelos rins e excretado pela urina, nas primeiras 24 horas.

#### *4.7.2 A absorção de radionuclídeos via inalação*

As funções do sistema respiratório envolvem suprir oxigênio para os tecidos e remover o gás carbônico do nosso organismo, entre tantas outras. O sistema respiratório também é a via mais comum de entrada de substâncias provenientes do meio ambiente. Os pulmões contêm milhões de pequenos sacos cheios de ar, os alvéolos, conectados pelos bronquíolos, brônquios, traqueia, laringe e faringe com o nariz e a boca. A cada inspiração, os alvéolos são expandidos, enquanto na expiração o ar é forçado para fora dos alvéolos até o exterior. Dessa forma, ocorre renovação contínua do ar nos alvéolos, processo que é chamado de ventilação pulmonar.

Segundo a ICRP, as taxas de deposição das partículas variam de acordo com vários fatores, dentre eles idade, condições de respiração,

volume respirado e se a respiração é oral ou nasal. Observa-se que a maior fração do material inalado é depositado próximo às bifurcações e entradas dos dutos alveolares. Assim, existem três mecanismos principais de deposição das partículas inaladas no trato respiratório: impactação, sedimentação e difusão. Os mecanismos de deposição de partículas por impactação e sedimentação predominam para partículas com diâmetros aerodinâmicos iguais ou maiores que  $0,1\mu\text{m}$ .

As partículas inaladas são depositadas no tecido pulmonar como resultado de processos físicos, anatômicos e fisiológicos, que podem ocorrer durante qualquer parte do ciclo respiratório. Entre os fatores que afetam a deposição, destacam-se o diâmetro aerodinâmico, a forma, a higroscopicidade e a carga elétrica da partícula. Os fatores físicos determinam a extensão da sedimentação, impactação, difusão e precipitação eletrostática das partículas depositadas. A anatomia e a geometria do trato respiratório são importantes fatores biológicos que determinam os principais sítios de deposição. A deposição ocorre durante a inspiração e também pode ocorrer durante a expiração.

Todos os dias inspiramos radionuclídeos, tanto os de origem cosmogênica (como o trítio ou o  $^{14}\text{CO}_2$ ) como partículas de urânio, tório e cério. Além destes, também respiramos o radônio.

Aproximadamente 10% do  $^{222}\text{Rn}$  formado no solo são liberados para a atmosfera, sendo que as camadas superficiais do solo constituem a principal fonte de liberação desse gás. Uma vez liberados na atmosfera, ambos  $^{220}\text{Rn}$  e

<sup>222</sup>Rn começam a decair para os filhos de sua série (como foi mostrado no capítulo 2), os quais possuem meia-vida curta. Por serem carregados eletricamente, prendem-se à matéria em segundos, usualmente em partículas de poeira presentes na atmosfera. A maioria da atividade dos filhos do radônio está associada a partículas de pequeno diâmetro (0,006 a 0,2  $\mu\text{m}$ ) que se encontram geralmente em aerossóis da atmosfera local.

O radônio não se acumula no aparelho respiratório de uma pessoa, pois, por ser um gás nobre, é inspirado e expelido continuamente. Dessa forma, apenas uma pequena fração se difunde através dos alvéolos pulmonares diretamente para o sangue, sendo responsável por uma pequena dose depositada internamente no corpo. Assim, o radônio que entra na corrente sanguínea é eliminado quase que completamente 1 hora após a sua difusão nos alvéolos pulmonares. A partir da absorção pelas paredes do estômago e do intestino delgado, a fração do gás que é transferida para o sangue é expelida pelo sistema respiratório através de trocas nos alvéolos pulmonares. Durante o tempo que permanece no corpo, porém, o tecido adiposo mostra-se como o mais propenso a seu acúmulo.

O tório apresenta uma baixa absorção no trato gastrointestinal (0,05% em adultos). Dessa forma, a principal via de absorção deste radionuclídeo pelo homem dá-se através da inalação de material particulado que contenha tório. Insolúvel em fluidos biológicos, sua meia-vida de permanência nos pulmões pode alcançar vários anos.

Outro radionuclídeo que podemos inalar é o céσιο. O céσιο apresenta comportamento químico semelhante ao do potássio, sendo prontamente absorvido pelo organismo, tanto pelo trato gastrointestinal como também por via respiratória. Assim como o potássio, dentro do corpo humano esse elemento deposita-se uniformemente, com maior frequência nos músculos.

#### **4.8 A exposição das células do nosso organismo**

Em um indivíduo adulto, a maioria dos tecidos é constituída por células diferenciadas, isto é, células que pouco se dividem ou que nunca o fazem. É o caso das células do tecido ósseo, das células do tecido muscular, de células do fígado, dos rins, dos pulmões, do coração<sup>35</sup>. Células que não se dividem podem acumular quebras de DNA e mutações celulares sem comprometimento das funções dos órgãos e tecidos que constituem. Assim, quanto maior o grau de diferenciação celular, menor a taxa de divisão e menores são as possibilidades de morte celular induzida pela radiação.

Por outro lado, células cuja taxa de divisão é alta tornam-se mais vulneráveis à ação das radiações, como, por exemplo, as células da pele, representadas na Figura 4.6. Quando uma lesão no DNA resultar em quebra

---

35 Nota do revisor: A convicção de que células nervosas são totalmente diferenciadas vem sendo desmentida pela descoberta de células-tronco neurais na região do bulbo olfatório. Essa perspectiva é um importante passo para novas tentativas de cura e tratamento de doenças neurais, em especial as neurodegenerativas. Sobre o assunto: [www.brainlife.org/reprint/2003/galli\\_r030404.pdf](http://www.brainlife.org/reprint/2003/galli_r030404.pdf)

da molécula, a célula passa a ter dificuldade em dividir o material genético entre as células-filhas, que podem morrer após uma ou duas divisões subsequentes. Quanto menor a diferenciação celular, maior a probabilidade de indução de morte por ação das radiações ionizantes.

Desta forma, um tecido pode apresentar maior ou menor resistência às radiações, em função do grau de diferenciação das células que o constituem. Em um indivíduo adulto apenas alguns tecidos são constituídos por células cuja função é repor, através de divisões sucessivas, populações celulares cujo tempo médio de vida é da ordem de uma a duas dezenas de dias (elementos figurados do sangue e células de recobrimento). As células responsáveis pela produção de óvulos (durante o período embrionário feminino) e espermatozoides (que, por sua vez, ocorre durante toda a vida do homem) também se enquadram entre células altamente vulneráveis à ação das radiações ionizantes por possuírem, como característica funcional, uma alta taxa de divisão celular.

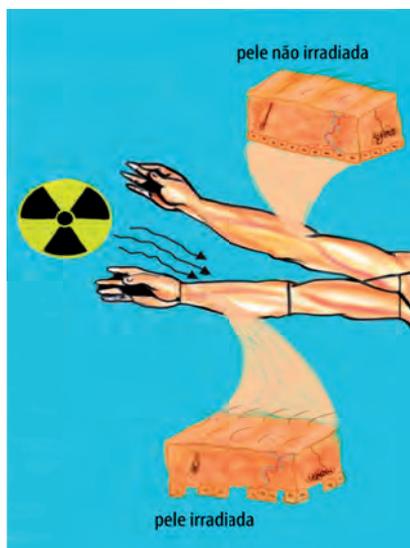


Figura 4.6 Representação celular de uma pele irradiada

## Referências Bibliográficas

ARRUDA NETO, J. D. T., TAVARES, M. V.; FILADELFO, M. Concentrations of uranium in animal feed supplements: measurements and dose estimates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 221, 97-104 (1997).

CNEN-Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Medidas de proteção e critérios de intervenção em situações de emergência**. Norma 3.01/006, Rio de Janeiro: CNEN, 2005.

COMANA-Conselho Nacional do Meio Ambiente, **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 20, de 18 de junho de 1986**. Estabelece classificação das águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Disponível em: <<http://mma.gov.br/port/conama/res/re86/res2086.html>> Acessado em 19 de agosto de 2010.

FISENNE, I. M.; PERRY, P. M.; DECKER, K. M.; KELLER H. W. The daily intake of <sup>234</sup>, <sup>235</sup>, <sup>238</sup>U, <sup>228</sup>, <sup>230</sup>Th and <sup>226</sup>, <sup>228</sup>Ra by New York city residents. *Health Physics*, 53, 357-363 (1987).

FOURATI, A.; FALUDI, G. Changes in radioactivity of phosphate rocks during the process of production. *Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 125, 287-293 (1998).

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: Part 2.** ICRP Publication 30. Oxford: Pergamon Press, 1978.

IAEA–International Atomic Energy Agency. **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources.** Safety series 115. Vienna, 1996.

IAEA-International Atomic Energy Agency. **Measurements of radionuclides in food and the environment.** Technical Reports Series 295. Vienna, 1989.

LAL, N.; SHARMA, I. P.; SHARMA, P. K.; TALWAR, I. M.; NAGPAUL, K. K.; CHAKARVART, S. K. Uranium Assay in Milk. *Health Physics*, 43, 425-428 (1982).

LAURIA, D. C.; MARTINS, N. S. F.; ZENARO, R. **Monitoração Ambiental.** Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2003.

MENZEL, R. G. Uranium, Radium and Thorium content in Phosphate Rocks and Their Possible Hazards. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 16, 231 (1968).

MALAVOLTA, E. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas.** São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1980.

NCRP-National Council on Radiation Protection and Measurement. **Exposure of the population of the United States and Canada from Natural Background Radiation.** NCRP Report no 94. Bethesda, 1987.

OSMOND, J.K.; COWART, J. B. The theory and uses of natural uranium isotopic variations in Hydrology. *Atomic Energy Review*, 14, 621-679 (1976).

ROCHEDO, E. R. R. **Avaliação de Impacto Radiológico ambiental.** Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2003.

ROTH, P., HÖLLRIEGL, V., WERNER, E. E. SCHRAMMEL, P. Assessment of Exposed to Depleted Uranium. *Radiation Protection Dosimetry*, 105, 157-161 (2003).

SCHULZ, R. K.; Soil Chemistry of Radionuclides. *Health physics*, 11, 1317-1324 (1965).

SUTELIFFE, J. F.; BAKER, D. A. **As plantas e sais minerais**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda, 1989.

UNSCEAR-United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources. **Effects and Risks of Ionizing Radiation**. UNSCEAR Publication E.88.IX.7. New York: United Nations, 1988.

UNSCEAR-United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. UNSCEAR Report Vol. I. New York: United Nations, 2000.

VENTURINI, L; SORDI, G. A. A. Radioactivity in and committed effective dose from some Brazilian foodstuffs. *Health Physics*, 76, 311-313 (1999).

WHO-World Health Organization. **Depleted uranium: Sources, Exposure and Health Effects**. Geneva: Department of Protection of the Human Environment, 2001.

WREEN, M. E.; DURBIN, P. W.; HOWARD, B.; LIPSZTEIN, J; RUNDO, J.; STILL, E. T.; WILLIS, D. L. Metabolism of ingested U and Ra. *Health Physics*, 48, 601-633 (1985).

# Capítulo 5

## 5.1 Radioatividade artificial: os radionuclídeos criados pelo homem

Entre os muitos desenvolvimentos marcantes da física nuclear durante a década de 1930, destaca-se a descoberta da radioatividade artificial, em 1934, pelo casal Jean Frederic Joliot (1900-1958) e Irene Curie Joliot (1897-1956), filha de Marie Curie. Através de um experimento que usava partículas alfa para bombardear folhas de alumínio e boro, criou-se o fósforo radioativo, não conhecido naturalmente na Terra, o qual decai com uma meia-vida de 3 minutos para formar um isótopo estável do silício. O resultado foi confirmado por identificação química. Estudos de Curie e Joliot mostraram ainda que os produtos de algumas transformações nucleares induzidas também são radioativos. Descobriu-se também que reações nucleares induzidas por prótons, dêuterons, nêutrons e fótons podem resultar em produtos radioativos. Os radionuclídeos artificiais podem ser caracterizados por sua meia-vida e pela radiação que emitem, analogamente aos radionuclídeos naturais.

Após as descobertas de Curie e Joliot, elementos radioativos artificiais têm sido produzidos e são lançados no meio ambiente desde a década de 40,

com a descoberta da fissão atômica e do subsequente desenvolvimento de tecnologias de geração de energia e de bombas nucleares. Estes resíduos, que em grande parte são constituídos de  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{137}\text{Cs}$ , permitiram a realização de diversos estudos científicos por meio da inclusão de uma nova linha de pesquisa denominada de Radioecologia. Por exemplo, no estudo de processos de erosão e sedimentação do solo utilizando traçadores nucleares, o  $^{137}\text{Cs}$  tem sido o radioelemento de meia-vida longa mais estudado. Estes trabalhos têm demonstrado que este radioisótopo, embora seja fortemente absorvido por vários tipos de solos, apresenta distribuições distintas em função da composição e das características de cada camada.

## **5.2 A contribuição do homem para o aumento da radioatividade no ambiente**

Os testes superficiais das bombas nucleares ou o vazamento de reatores nucleares ocasionaram o surgimento de vários elementos radioativos artificiais, encontrados atualmente em todo o globo terrestre devido ao *fallout* (que significa “precipitação radioativa”). Quando uma explosão nuclear ocorre, uma nuvem de gás e vapor a alta temperatura é produzida. A altura e o diâmetro da nuvem dependem da potência da bomba nuclear.

Nas detonações com produção de energia na faixa de quilotons, a nuvem atômica geralmente não alcança o topo da troposfera, e todas as partículas finas, presentes nos resíduos de tais explosões, permanecem na troposfera até serem depositadas. Esse mecanismo de deposição na troposfera é complexo, tendo em vista o envolvimento de vários processos em adição a simples deposição gravitacional. De todos, o mais importante processo é o efeito de remoção das partículas de material contaminado por reações químicas com o vapor de água das nuvens, sendo precipitado posteriormente pelas chuvas, neve ou outras formas de umidade. A taxa de remoção de material contaminado da troposfera, em qualquer tempo, é proporcional à quantia do material presente naquele instante. Então, o tempo para metade do material ser depositado, chamado de “tempo médio de residência”, é uma quantidade característica. Para o *fallout* troposférico, esse tempo médio é da ordem de poucas semanas, tal que os resíduos da explosão não permanecem muito tempo na troposfera. Os fragmentos menores que alcançam a troposfera são transportados ao redor do globo terrestre pelos ventos, que tem sentido predominante de oeste para leste, sendo depositados na superfície terrestre pela precipitação atmosférica numa faixa de 20° a 30° a partir da latitude onde ocorre a explosão, num período de 4 a 7 semanas.

Para explosões de alta produção de energia, na faixa de megatons, aproximadamente todos os resíduos passarão através da troposfera e entrarão na estratosfera. As partículas maiores serão depositadas localmente,

porém as partículas mais finas permanecerão na estratosfera, difundindo-se globalmente. Como a estratosfera é muito rarefeita e ausente de nuvens e chuva, as partículas se precipitarão muito lentamente no solo. O tempo médio de residência de partículas depositadas na estratosfera é em torno de 7 anos. Durante este longo tempo de residência na estratosfera, os resíduos da bomba se difundem lentamente em todas as direções, podendo entrar na troposfera em qualquer ponto do globo. Uma vez na troposfera, os resíduos finos se comportarão como no *fallout* troposférico, sendo depositados na terra principalmente pelas chuvas.

Uma característica importante do *fallout* global é que uma pequena fração é depositada continuamente na superfície da terra, pois os resíduos finos estão estocados na estratosfera. Desse modo, o *fallout* estratosférico é uma deposição de resíduos radioativos de forma lenta e contínua sobre toda superfície da terra, com a taxa de deposição dependendo da quantia total de resíduos presentes na estratosfera. Dependendo das condições de um teste nuclear, os resíduos radioativos podem ser inicialmente divididos em várias regiões da atmosfera.

Em uma escala global, a incorporação dos elementos radioativos na biosfera provém da deposição dos elementos da atmosfera para a superfície da Terra, ou seja, através do *fallout*. Portanto, não podemos imaginar o *fallout* como um perigo imediato após precipitação, mas, sim, um perigo em potencial. Ao se precipitarem sobre o solo, os produtos de uma explosão nuclear podem depositar-se diretamente sobre os alimentos de homens ou

animais, ou então, incorporar-se aos nutrientes dos vegetais e ser por eles absorvidos, quer por via foliar, quer através do solo. Ora, os animais herbívoros estão sujeitos à contaminação, tomando grande importância quando são animais pertencentes à cadeia alimentar do ser humano. Por exemplo, o gado leiteiro: o leite que este produz não escapa à poluição radioativa. Disto pode-se concluir que o leite, um dos mais completos alimentos e que possui um consumo mundial enorme, pode vir a se tornar um integrador de contaminação radioativa.

O *fallout* a que estamos expostos hoje é proveniente dos testes com armas nucleares que aconteceram entre 1952 e 1963, quando foi assinado um tratado de proibição de testes nucleares na superfície do planeta.

No mundo, também existem áreas com altas concentrações de radionuclídeos produzidos pelo homem. Nestes lugares ocorreram acidentes radiológicos ou nucleares, testes ou uso de armas nucleares. Por exemplo, Belarus, Ucrânia, Rússia e lugares vizinhos foram contaminados em diferentes graus durante o acidente no reator de Chernobyl, em 1986. Bombas atômicas foram explodidas em Hiroshima e Nagasaki em 1945, na segunda guerra mundial. Entre 1945 e 1958, o Atol de Bikini (Ilhas Marshall) foi um dos lugares usados pelos EUA para testes nucleares. No Brasil, em 1987, ocorreu um acidente radiológico com uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  na cidade de Goiânia (GO), cuja taxa de dose de radiação gama é da 15 mSv ao ano.

Outro aspecto importante a ser analisado é a possibilidade de ocorrer um acidente nuclear em alguma parte do mundo e isso afetar indiretamente a

saúde da população de outras regiões por meio da importação de alimentos contaminados. Isso chegou a ocorrer no Brasil, após o acidente de Chernobyl em 1986, quando várias marcas de leite em pó importadas da Europa Oriental foram retiradas temporariamente do mercado, após a constatação dos altos níveis de radioatividade presentes neste alimento.

No ano de 2011, o mundo parou com a notícia de um terremoto seguido de um tsunami no Japão. Como consequência, o sistema de refrigeração do circuito primário (onde estão as varetas de urânio) da usina nuclear de Fukushima foi afetado e um grande acidente nuclear aconteceu. Na realidade, o colapso na usina de Fukushima não foi causado pelo terremoto, embora o tremor tenha atingido assombrosos 8,9 graus na escala Richter (o máximo é 9). O problema começou porque o terremoto cortou as linhas de energia que mantinham ligado o sistema de refrigeração dos reatores. Dentro desses enormes sistemas, que são câmeras de concreto, o combustível nuclear fica mergulhado em piscinas, que ajudam a diminuir o calor. Para casos como esse, as usinas contam com um segundo sistema de refrigeração, movido por geradores a diesel. Porém, em Fukushima, esses geradores estavam em uma área baixa e foram inundados pelo tsunami, a onda gigante provocada pelo terremoto. A água que envolvia o combustível nuclear esquentou a ponto de começar a evaporar. A pressão nos reatores aumentou, causando explosões que destruíram o telhado dos prédios onde eles ficavam. Todas as medidas de segurança foram tomadas e discussões sobre o programa nuclear em diversos países, inclusive no Brasil, foram

iniciadas para avaliação. Além da discussão sobre os avanços da energia nuclear, novas medidas de segurança para usinas nucleares são debatidas nestes encontros, com o objetivo de aumentar os níveis de segurança nas usinas e assim diminuir as chances de acidentes nucleares. Fukushima é mais um acidente que entra para a história da energia nuclear.

### **5.3 O $^{137}\text{Cs}$ : a criação do homem que está no meio ambiente**

O céσιο (Cs) foi descoberto em 1860 por Robert W. Bunsen e Gustav Kirchoff durante estudos espectroscópicos de metais alcalinos em água mineral. O céσιο é caracterizado por um espectro de emissão contendo duas linhas de luz na região do azul e por isso tem o nome derivado do latim da palavra “caesius”, que significa “azul celeste”. O céσιο encontra-se distribuído por toda crosta terrestre em combinação com outros elementos e em concentrações muito pequenas. Existem dois minerais de céσιο conhecidos: a polucite (alumino-silicato hidratado de céσιο) e a rodizite (borato hidratado de alumínio, berílio, sódio e céσιο). O céσιο tem ponto de fusão a  $28,5^{\circ}\text{C}$  e ponto de ebulição a  $705^{\circ}\text{C}$ , sendo, juntamente com o gálio e o mercúrio, os únicos metais existentes no estado líquido à temperatura ambiente.

O céσιο não tem papel biológico, entretanto, devido ao fato de comportar-se quimicamente como o potássio, é capaz de substituí-lo nos animais e plantas. No corpo humano, o céσιο distribui-se uniformemente por

todo o corpo, tendendo a se concentrar nos músculos. Como o potássio, o céσιο é excretado do corpo de forma razoavelmente rápida: os 10% iniciais são excretados com uma meia-vida biológica em torno de 2 dias, e o restante é excretado do corpo com uma meia-vida biológica em torno de 110 dias. O único isótopo de céσιο que ocorre naturalmente é o  $^{133}\text{Cs}$  (céσιο de massa 133), que é estável. Entretanto, vários radionuclídeos têm sido produzidos através da fissão do urânio e do plutônio, sendo o  $^{137}\text{Cs}$  o produto de fissão mais comum.

Por ser o radionuclídeo mais comum, possuir uma meia-vida longa (30,07 anos) e ter sido distribuído globalmente pela precipitação radioativa, o  $^{137}\text{Cs}$  tem sido muito estudado em pesquisas ligadas à erosão e sedimentação de solos. O  $^{137}\text{Cs}$  foi introduzido no globo terrestre principalmente pelos testes termonucleares de superfície. A deposição de  $^{137}\text{Cs}$  no globo terrestre começou a ser significativa a partir de 1952, com a explosão da primeira bomba termonuclear. O maior período de deposição global de  $^{137}\text{Cs}$  foi entre 1958 e 1963/64 e o menor período entre 1971 e 1974. Pequenas deposições de  $^{137}\text{Cs}$  ocorreram até meados da década de 1980. Além disso, eventos locais, como o acidente de Chernobyl, tiveram impactos significativos a nível regional, que causou a deposição de grande quantidade de  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{137}\text{Cs}$  no ambiente. Ainda hoje, estes radionuclídeos são detectáveis em certos alimentos, apesar de esses eventos pouco afetarem sua deposição. O  $^{137}\text{Cs}$  é fortemente adsorvido às partículas de argila e de

material orgânico do solo, tendo sua mobilidade no solo gerada principalmente pelos processos físicos.

Com relação à absorção de  $^{137}\text{Cs}$  por plantas, é importante saber que os íons  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$  e  $\text{Cs}^+$  formam uma série homóloga, na qual apresentam um grande grau de semelhanças físico-químicas quando comparados com quaisquer outras séries de íons, à exceção dos halogênios. O íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é uma importante fonte de nitrogênio para os vegetais. Uma vez que o íon de céσιο ( $\text{Cs}^+$ ) possui características eletrônicas semelhantes ao potássio e ao amônio, há uma competição entre estes íons quando se trata de absorção pelas raízes e o posterior transporte no interior do vegetal.

Os radionuclídeos artificiais gerados pelo homem têm contribuído negativamente para aumentar o grau de exposição à radiação em nosso planeta. Os avanços científicos jamais apagarão a mancha escura deixada pelas bombas nucleares e pela sede de poder. Por outro lado, quando somos expostos à radiação ambiental, estamos nos submetendo ao ciclo natural que o próprio ambiente construiu. A vida na Terra se defende da radiação do universo. Infelizmente, porém, nem sempre podemos nos proteger de nossa própria espécie.

## Referências Bibliográficas

BITELLI, T. **Dosimetria e Higiene das Radiações**. São Paulo: Ed. Grêmio Politécnico, 1982.

GLASSTONG, S. **The Effects of Nuclear Weapons**. Oak Ridge: USAEC, 1964.

LIKAR, A.; OMAHEN, G.; LIPOGLAVSEK, M.; VIDMAR, T. A Theoretical Description of Diffusion and Migration of  $^{137}\text{Cs}$  in Soil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 57, 191–201 (2001).

PEREL'MAN, F. M. 1965. **Rubidium and Cesium**. New York: Macmillan Press, 1965.

WALLING, D. E. and QUINE, T. A. Calibration of caesium 137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation and Rehabilitation*, 2, 161–175 (1990).

HELLEN E.; JONES, A. F.; HARRISON, J. M.; POSKITT, J. D. ROBERTS, G. C. The Effect of Potassium Nutrition on  $^{137}\text{Cs}$  Uptake in Two Upland Species. *Journal of Environ Radioactivity*, 14, 279-294 (1991).