

Regina Pinto de Carvalho
Silvia Maria Velasques de Oliveira

APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR NA SAÚDE



APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR NA SAÚDE

APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR NA SAÚDE

Regina Pinto de Carvalho
Silvia Maria Velasques de Oliveira



São Paulo
2017

Publicado por

Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC
Rua Maria Antonia, 294 - 4º andar
Vila Buarque - 01222-010 São Paulo - SP - Brasil
www.sbpnet.org.br

International Atomic Energy Agency - IAEA

Vienna International Centre
PO Box 100 / 1400 Vienna, Austria
www.iaea.org

Revisão

Vera Lúcia De Simoni Castro

Revisão técnica

João Alberto Osso Junior
Rejane Spiegelberg Planer
Ana Márcia Greco de Sousa

Ilustração

Henrique Cupertino

Diagramação

Christiane Morais

Ficha Catalográfica

Caroline Souza

Apoio

Agência Internacional de Energia Nuclear - IAEA
Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC
Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Sociedade Brasileira de Biociências Nucleares - SBBN
Sociedade Brasileira de Física - SBF

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C331a

Carvalho, Regina Pinto de.

Aplicações da energia nuclear na saúde [livro eletrônico] / Regina Pinto de Carvalho,
Silvia Maria Velasques de Oliveira. – São Paulo : SBPC ; Viena : IAEA, 2017.

1 livro digital. : il.

Inclui bibliografia.

Disponível em : <http://portal.sbpnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>

ISBN 978-85-86957-26-0

1. Medicina nuclear. 2. Física aplicada. 3. Educação - Ensino médio.

I. Título. II. Oliveira, Silvia Maria Velasques de.

CDD 616.075 75

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I - NOÇÕES SOBRE O NÚCLEO ATÔMICO..... | 9 |
| A composição do núcleo..... | 9 |
| Reações nucleares..... | 11 |
| Conservação da massa durante uma reação nuclear..... | 12 |
| Decaimento radioativo..... | 13 |
| Por que o conceito de meia-vida física é importante na Medicina?..... | 14 |
| Fissão nuclear..... | 15 |
| Fusão nuclear..... | 16 |
| O espectro eletromagnético..... | 17 |
| Ondas de rádio..... | 18 |
| Ondas de TV..... | 18 |
| Micro-ondas..... | 18 |
| Radiação infravermelha..... | 18 |
| Luz visível..... | 19 |
| Radiação ultravioleta..... | 19 |
| Raios X..... | 19 |
| Raios gama (raios γ)..... | 19 |
| Radiação ionizante..... | 20 |
| CAPÍTULO II - PRODUÇÃO E DETECÇÃO DE RADIAÇÃO IONIZANTE..... | 21 |
| Obtenção de material radioativo..... | 21 |
| Partículas carregadas..... | 21 |
| Nêutrons..... | 23 |
| Raios X..... | 23 |
| Métodos de obtenção e características de alguns radioisótopos..... | 24 |
| Cobalto-60..... | 24 |
| Tecnécio-99m..... | 25 |
| Flúor-18..... | 25 |
| Iodo-131..... | 26 |

| | |
|--|----|
| <i>Iridio-192</i> | 26 |
| <i>Carbono-11</i> | 27 |
| <i>Césio-137</i> | 27 |
| Interação da radiação com a matéria..... | 28 |
| <i>Radiação eletromagnética</i> | 28 |
| <i>Partículas carregadas</i> | 30 |
| <i>Nêutrons</i> | 30 |
| Interação da radiação com seres vivos..... | 31 |
| <i>Dose letal para componentes da fauna e da flora</i> | 31 |
| Detecção da radiação..... | 32 |
| <i>Primeiros detectores</i> | 32 |
| <i>Detectores atuais</i> | 32 |
| <i>Cintiladores</i> | 33 |
| <i>Cintiladores com circuito de coincidência</i> | 34 |
| <i>Detector semicondutor</i> | 35 |
| CAPÍTULO III - USOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE NA SAÚDE..... | 37 |
| Diagnóstico..... | 37 |
| <i>Raios X</i> | 37 |
| <i>Raios γ</i> | 38 |
| <i>Radiofármacos para diagnóstico</i> | 38 |
| <i>Tomografia por emissão de pósitrons</i> | 39 |
| Tratamento..... | 40 |
| <i>Fontes γ para teleterapia</i> | 40 |
| <i>Braquiterapia</i> | 40 |
| <i>Radiofármacos para tratamento</i> | 41 |
| Esterilização de material hospitalar e alimentos..... | 41 |
| Controle de insetos..... | 41 |
| CAPÍTULO IV - MITOS E VERDADES SOBRE A RADIOATIVIDADE..... | 43 |
| CAPÍTULO V - ATIVIDADES..... | 47 |
| Questões para discussão..... | 47 |
| Simulação de um decaimento radioativo..... | 47 |
| APÊNDICES..... | 51 |
| A1: Unidades de medida de radiação..... | 51 |
| A2: Formação de imagens cintilográficas..... | 53 |
| A3: Doses de radiação em procedimentos médicos..... | 58 |
| SUGESTÕES DE LEITURA..... | 61 |

Este livro é dedicado a estudantes e a professores do ensino médio. Recentemente, o assunto **energia nuclear** foi introduzido na área de Ciências da Natureza e não se identificou material didático em língua portuguesa com informações consistentes que atendessem às necessidades dos professores.

A Física Nuclear estuda os fenômenos que possibilitam o uso da energia nuclear. Há diversas aplicações importantes de radioisótopos produzidos em aceleradores ou reatores dedicados, como, por exemplo, em diagnóstico ou terapia, agricultura ou meio ambiente. Fogem ao escopo desta publicação aplicações na indústria, dentre as quais geração de energia elétrica através de reatores nucleares de potência.

São descritas as características básicas do núcleo atômico e de suas transformações, os principais radioisótopos em uso no país e o funcionamento de alguns tipos de detectores de radiação, que permitem identificar a presença de exposição às radiações ionizantes em seres humanos ou no meio ambiente. São propostas algumas questões para pesquisa e debate entre os estudantes e atividades simples que ilustram conceitos básicos.

Sempre que possível, as ilustrações foram planejadas de forma a ser legíveis para pessoas daltônicas. Se você, caro leitor, é portador dessa característica e teve dificuldades com a interpretação das figuras, entre em contato conosco: suas observações serão bem-vindas e nos ajudarão a melhorar nosso trabalho.

Gostaríamos de agradecer às inúmeras pessoas que colaboraram na redação do texto, fornecendo informações ou opinando sobre o material: Professores Edvane Borges (UFPE), Juliana Batista da Silva, Carlos Malamut, Andréa Vidal, Thessa C. Alonso e sua equipe (CNEN), Hérica Vasconcelos, Napoleão Ramalho, Orlando Aguiar e seus orientados (UFMG), Ana Márcia G. Sousa e seus alunos (Faculdade Pitágoras).

Agradecemos imensamente ao professor Aldo Malavasi (*International Atomic Energy Agency* - IAEA), que abraçou o nosso projeto e permitiu que ele atingisse uma escala muito maior do que poderíamos imaginar.

Silvia e Regina
abril/2017

I - NOÇÕES SOBRE O NÚCLEO ATÔMICO



Até o fim do século XIX, o átomo era descrito por um modelo simplificado, baseado em observações sobre o comportamento dos materiais. Nesse modelo, os elétrons negativos se movimentam em torno de núcleos positivos. Esses núcleos seriam compostos de prótons, partículas positivas de massa aproximadamente 2.000 vezes maior que a massa dos elétrons. Algumas descobertas feitas pelos cientistas no fim do século XIX e início do século XX modificaram esse modelo simplificado. Hoje, considera-se que o átomo possui um núcleo positivo e tem elétrons negativos situados em uma região em torno desse núcleo. O volume do átomo é determinado pela chamada **nuvem eletrônica** (região onde se situam os elétrons),¹ e sua massa é principalmente devida à massa do núcleo.

A composição do núcleo

As primeiras informações sobre o núcleo atômico, no fim do século XIX, foram resultado da descoberta da radioatividade pelo físico francês Henri Becquerel (1852–1908) e dos estudos subsequentes feitos pela química polonesa Marie Curie (1867–1934), auxiliada por seu marido, o físico francês Pierre Curie (1859–1906).² As emissões provenientes do núcleo foram denominadas partículas α (letra grega, *alfa*), β (letra grega, *beta*) ou γ (letra grega, *gama*), de acordo com sua capacidade de penetração na matéria (FIGURA I-1). As energias envolvidas nessas emissões são da ordem de MeV (milhões de elétrons-volt).³

A proposta de que o núcleo era composto apenas de partículas positivas deixava a desejar, uma vez que essas partículas sofreriam repulsão eletrostática entre si, impedindo que o núcleo fosse estável. A descoberta do nêutron, em 1932, pelo físico inglês James Chadwick (1891–1974), fez com que o modelo para o núcleo fosse modificado. O nêutron é uma partícula de massa semelhante à do próton e sem carga elétrica. Existem forças de atração,

¹ O raio de um átomo é em média 10^4 vezes maior que o de seu núcleo: se o núcleo tivesse um raio igual a um pontinho feito por uma caneta (~ 1 mm), o átomo teria a dimensão de uma sala de aula (~ 10 m).

² Pierre Curie fazia pesquisas sobre magnetismo, e sua esposa, Marie Sklodowska Curie, pesquisava as emissões de certos átomos, ao que denominou de radioatividade. Percebendo a importância do trabalho de Marie, Pierre passou a auxiliá-la e adiou seus estudos sobre materiais magnéticos, que ficaram inacabados devido à sua morte precoce.

³ $1\text{MeV} = 10^6\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-13}\text{J}$

denominadas forças nucleares, entre os **núcleons**, que são as partículas que compõem o núcleo (prótons e nêutrons). Assim, as forças nucleares de atração entre os núcleons compensam a repulsão eletrostática entre os prótons, e é possível se ter núcleos estáveis, com um número de nêutrons igual ou maior ao de prótons.

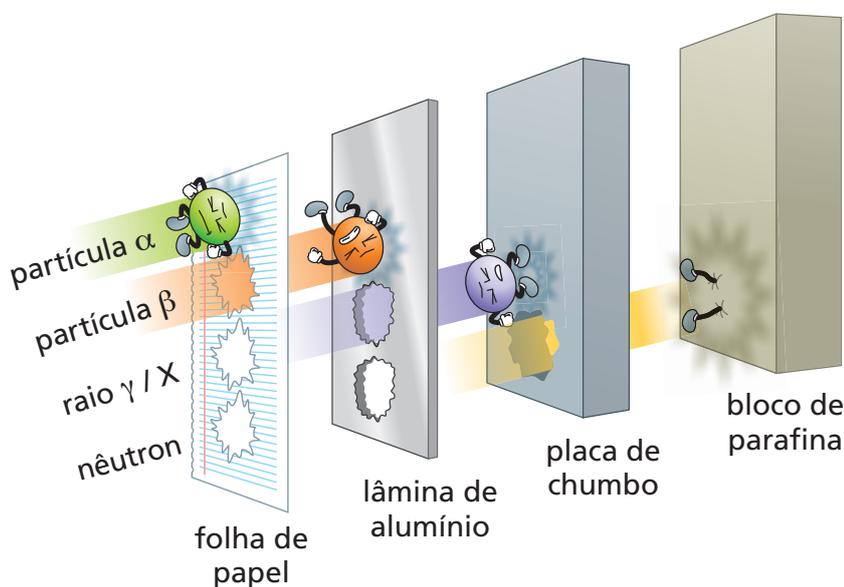
As forças nucleares são mais fortes que as forças eletromagnéticas e gravitacionais. No entanto, elas têm alcance muito curto. Por isso, não é possível se ter núcleos estáveis muito grandes: a atração nuclear age apenas entre os núcleons vizinhos, ao passo que a repulsão eletrostática atua entre todos os prótons, quer estejam próximos, quer estejam afastados uns dos outros.

Hoje, sabe-se que as partículas α são compostas de 2 prótons e 2 nêutrons e são semelhantes ao núcleo do elemento hélio; as partículas β são idênticas aos elétrons, e as partículas γ são fótons de alta energia (TABELA I-1). Nêutrons e prótons existem em permanência dentro do núcleo; as partículas β são criadas no momento de sua emissão.

Tabela I-1 – Características das partículas nucleares

| Partícula | Composição | Barrada por |
|-----------|------------------------|--|
| α | 2 prótons e 2 nêutrons | folha de papel |
| β | elétron | lâmina de Al |
| γ | fóton de alta energia | placa de Pb ou alguns metros de concreto |
| n | nêutron | bloco de boro ou parafina |

Figura I-1 – Materiais que podem blindar as partículas



Outras partículas também podem ser emitidas de um núcleo, como os pósitrons, de mesma massa que os elétrons, porém com carga positiva, descritos pelo símbolo β^+ (beta-mais), ou os neutrinos, de massa muito menor que a dos elétrons e sem carga, descritos pelo símbolo ν (letra grega, *nú* – pronuncia-se *ni*) ou $\bar{\nu}$ (*ni*-barra), no caso do antineutrino. Os neutrinos transportam quantidade de movimento e energia, sendo responsáveis pela conservação dessas grandezas durante as transformações nucleares.

Reações nucleares

Após a emissão espontânea de partículas α , β ou γ , um núcleo terá sua composição modificada. Essa emissão é denominada decaimento radioativo.

A emissão de uma partícula α diminui em 2 o número de prótons e também em 2 o número de nêutrons do núcleo; então, este núcleo se transforma em outro, com carga menor em 2 unidades, e massa menor em 4 unidades.

Uma emissão β diminui a carga do núcleo em 1 carga negativa, ou seja, aumenta a carga do núcleo em 1 unidade positiva; a massa total do núcleo não é alterada. Isso equivale a transformar um nêutron em próton. A essa emissão sempre será associada a emissão de um antineutrino $\bar{\nu}$, que transporta energia e quantidade de movimento, sem alterar a carga ou a massa do núcleo.

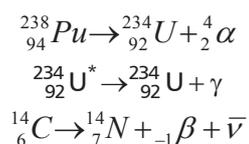
Na emissão β^+ , 1 carga positiva é retirada do núcleo, e sua massa não é alterada, o que equivale a transformar um próton em um nêutron. A essa emissão está sempre associada a emissão de um neutrino ν , que permite a conservação da energia e da quantidade de movimento.

A emissão γ carrega a energia em excesso do núcleo; ela ocorre para levar ao estado fundamental um núcleo que se encontrava em um estado de maior energia (representado por um asterisco após o símbolo do elemento), depois das emissões de partículas.

As emissões nucleares podem ser representadas de forma análoga às reações químicas: cada núcleo é representado pelo símbolo do elemento ao qual corresponde; um número à esquerda, abaixo do símbolo, representa o número de prótons desse núcleo;⁴ um número à esquerda, acima do símbolo, representa o número de massa do núcleo (número de prótons + número de nêutrons).

A seguir, temos alguns exemplos de emissões ou reações nucleares. Nessas equações é usado o símbolo n para os nêutrons, ou, em alguns casos, ${}_0^1n$. Os prótons, que são núcleos de hidrogênio, são representados pelos símbolos p , ${}_1^1p$ ou por ${}_1^1H$; para os deutérios, que são núcleos de hidrogênio com 2 núcleons, sendo 1 próton e 1 nêutron, usam-se os símbolos d , ${}_1^2d$ ou ${}_1^2H$. Os trítios (núcleos de hidrogênio com 3 núcleons, ou seja, 1 próton e 2 nêutrons) são representados como ${}_1^3H$.

O decaimentos α , β e γ podem ser representados da forma abaixo:



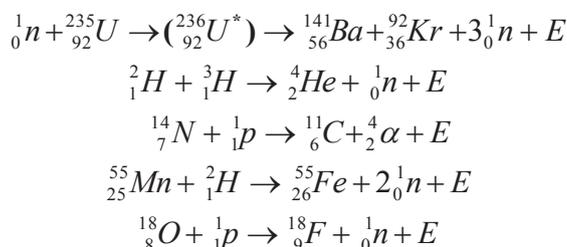
As emissões nucleares acontecem para trazer o núcleo ao seu estado fundamental (estado de mais baixa energia). Normalmente, núcleos muito grandes são instáveis; quando emitem partículas, transformam-se em outro elemento químico (quando o número de prótons se altera) ou em isótopos do mesmo elemento (quando apenas o número de nêutrons se altera).⁵ Quando emite fótons, um núcleo instável se desfaz de um excesso de energia e se aproxima do seu estado fundamental.

⁴ É dispensável escrever o número de prótons, uma vez que esse é determinado pelo símbolo do elemento; porém, pode ser útil exibir tal número, para facilitar a visualização do processo nuclear.

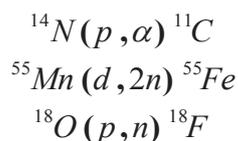
⁵ Isótopos são núcleos que diferem pelo número de nêutrons, mas têm o mesmo número de prótons. Eles correspondem, portanto, ao mesmo elemento químico, porém têm massas diferentes.

Um núcleo pode também ser modificado artificialmente, se for bombardeado por partículas, fótons ou por outros núcleos. Teremos assim uma reação nuclear em que o núcleo pode se transformar em um isótopo do mesmo elemento, em outro elemento, quebrar-se em dois ou mais núcleos menores ou fundir-se com outro núcleo, formando um núcleo maior. Em todos os casos, pode haver emissão de partículas ou de fótons, e os núcleos e partículas resultantes da reação carregam energia cinética: há sempre conservação de massa/energia e de quantidade de movimento.⁶

A seguir, temos alguns exemplos de reações nucleares:



As reações nucleares podem também ser representadas indicando-se o núcleo inicial, as partículas envolvidas entre parênteses e o núcleo final. Assim, as três últimas reações citadas podem ser representadas como abaixo:



Conservação da massa durante uma reação nuclear

A massa de um núcleo não é igual à soma das massas dos prótons e nêutrons que o compõem. Na junção das partículas para a formação do núcleo, pode haver liberação de energia, diminuindo a massa total. Inversamente, a fim de separar o núcleo em suas partículas constituintes, pode ser necessário fornecer energia ao sistema. Essa energia, denominada energia de ligação do núcleo, é determinada pela equação de Einstein, que relaciona massa (**m**) e energia (**E**):

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

onde **c** é constante e igual à velocidade da luz:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

Nas reações nucleares, a soma das massas dos produtos iniciais pode ser diferente da soma das massas dos produtos finais, e o saldo aparece como energia cedida ou liberada pelo sistema.

⁶ Como veremos a seguir, massa pode ser transformada em energia, e vice-versa.

Os exemplos mais espetaculares da equivalência entre massa e energia são a chamada criação de pares, e o fenômeno inverso, a destruição de pares.

A criação de um par elétron-pósitron pode ocorrer com a energia fornecida por um fóton, desde que essa energia seja suficiente. Isso deve acontecer nas vizinhanças de um núcleo, que recua, para que se tenha conservação da quantidade de movimento.

Na destruição de pares, um elétron se encontra com um pósitron e são gerados dois fótons de mesma energia (0,511 MeV cada um). A soma das energias dos dois fótons é equivalente às massas do elétron e do pósitron, e a direção da emissão dos fótons pode ser determinada usando-se a lei de conservação do momento.

Decaimento radioativo

Em um átomo, o núcleo está cercado pelos elétrons e, portanto, não sofre a influência da temperatura, da pressão ou de qualquer outro fator externo. As transformações que acontecem no núcleo, como o decaimento radioativo, dependem somente das suas condições internas.

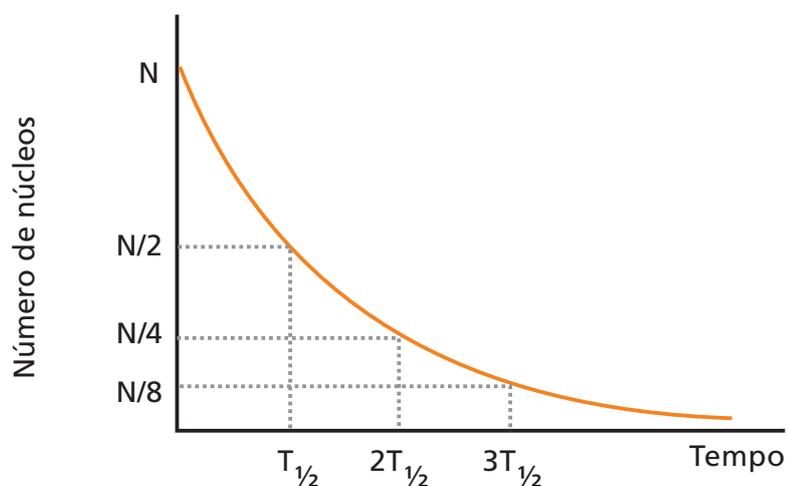
Durante o decaimento radioativo, o número N de núcleos radioativos (núcleos capazes de emitir partículas) diminui com o tempo t , segundo uma lei exponencial:

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

onde N_0 é o número inicial de núcleos radioativos, e λ é uma constante que depende de cada tipo de decaimento.

O tempo necessário para acontecer o decaimento da metade dos núcleos de uma amostra é denominado meia-vida $T_{1/2}$. Assim, se no início de uma observação existem N núcleos radioativos em certa amostra, decorrido o tempo de uma meia-vida, teremos $\frac{N}{2}$ núcleos radioativos; após 2 meias-vidas, teremos $\frac{1}{2} \cdot \frac{N}{2} = \frac{N}{4}$ núcleos radioativos, e assim por diante. A Figura I-2 mostra a variação do número de núcleos radioativos em função do tempo.

Figura I-2 – Variação do número de núcleos radioativos em função do tempo



A meia-vida dos elementos radioativos pode variar de valores muito grandes (milhões de anos) a muito pequenos (milésimos de segundos). Veja na Tabela I-2 alguns valores de meias-vidas.

Tabela I-2 – Meia-vida de alguns elementos

| Nome do elemento | Símbolo | Meia-vida |
|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| Urânio-238 | ^{238}U | 4,5 milhões de anos |
| Rádio-226 | ^{226}Ra | 1.600 anos |
| Césio-137 | ^{137}Cs | 30,2 anos |
| Iodo-131 | ^{131}I | 8,0 dias |
| Tecnécio-99 metaestável | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 6,0 h |
| Iodo-128 | ^{128}I | 25 min |
| Prata-110 | ^{110}Ag | 24,6 s |
| Radônio-217 | ^{217}Rn | 1 ms |

Fonte: MEYERHOF, W. E. **Elements of Nuclear Physics** – New York: McGraw-Hill, 1967.

Encontram-se na natureza apenas os elementos com meia-vida maior que a idade da Terra, uma vez que os outros já decaíram desde a sua formação. Assim, podemos falar em **radioatividade natural** (elementos radioativos existentes na natureza) e **radioatividade induzida** ou fontes artificiais de radiação (elementos que sofreram transformações provocadas em laboratório). Em alguns locais, elementos radioativos enterrados no subsolo afloraram em razão de ações humanas como a mineração, modificando a radioatividade natural da região.⁷ Podemos também ter elementos radioativos formados por bombardeamento de raios cósmicos, na alta atmosfera, e que depois chegam à superfície da Terra.

O valor da meia-vida $T_{1/2}$ para cada núcleo depende da sua constituição interna, que é objeto de estudos da Física de Partículas.

O conceito de meia-vida é usado também em outras áreas, relacionado com qualquer grandeza que diminui exponencialmente com o tempo. No caso de se ter diversos usos para esse conceito no mesmo texto, a meia-vida relacionada com o decaimento radioativo é denominada **meia-vida física**,⁸ para diferenciá-la de outras. Em particular, em Farmacologia, define-se a **meia-vida biológica** de um fármaco como o tempo necessário para que metade da dose administrada a um ser vivo seja eliminada do organismo, por vias renal, gástrica, respiratória, etc. A composição da meia-vida física do radioisótopo com a meia-vida biológica (que depende da biodistribuição) é chamada de **meia-vida efetiva**.

Por que o conceito de meia-vida física é importante na Medicina?

O conceito de meia-vida física é levado em consideração porque é um dos parâmetros importantes para o planejamento do procedimento.

Em aplicações de radioisótopos com finalidade diagnóstica ou terapêutica, deve-se distinguir quando a exposição é externa (por exemplo, fontes seladas para braquiterapia) ou interna (por exemplo, radiofármacos para imagens ou terapia, quando as fontes são incorporadas).⁹ No caso de fontes seladas para braquiterapia, o planejamento do tratamento

⁷ Modernamente, esse fenômeno passou a ser chamado de NORM (do inglês “*Natural Occurrence of Radioactive Materials*”).

⁸ Neste livro, sempre que não houver ambiguidade, a meia-vida física será chamada simplesmente de meia-vida.

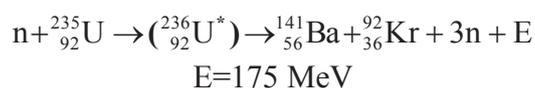
⁹ Na braquiterapia, as fontes são inseridas diretamente no local que se quer irradiar; os radiofármacos são substâncias que contêm elementos radioativos e que, administradas ao paciente, concentram-se no local de interesse para o exame ou tratamento.

leva em consideração, dentre outros fatores, a meia-vida física de cada elemento. No que diz respeito a radiofármacos, a questão é mais complexa porque também deve ser considerada a meia-vida biológica, que depende da biodistribuição do material dentro do corpo. Neste livro, não entraremos em detalhes sobre meia-vida biológica.

Quando radiofármacos são usados para exames, sua meia-vida física é compatível com o tempo de aquisição da imagem (no máximo 20 a 30 min). Mas, de nada adiantaria esse cuidado, se a imagem fosse adquirida antes do ponto máximo da biodistribuição do radiofármaco no corpo, para obter a melhor imagem possível. Os técnicos que realizam os exames têm formação profissional que permite calcular com cuidado todos os parâmetros para um bom exame. Depois que o material foi excretado pelo paciente, são tomados cuidados com a proteção radiológica por profissionais especializados em gerência de rejeitos radioativos.

Fissão nuclear

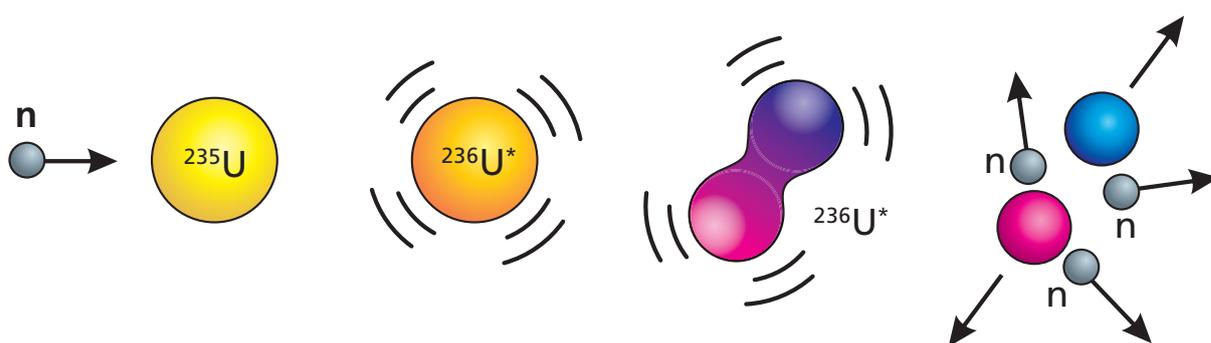
Um dos exemplos mais interessantes de reação nuclear é a **fissão**: ela ocorre quando um núcleo se separa em outros dois, em geral por causa de uma interferência externa. O urânio-235, por exemplo, ao capturar um nêutron, divide-se em dois núcleos, cada qual com cerca da metade da massa total. Durante a fissão, são liberados outros nêutrons e uma grande quantidade de energia. Um exemplo típico de fissão é dado pela reação:



A energia liberada corresponde à diferença em massa entre os componentes iniciais e os finais da reação. Embora essa seja a reação mais provável para o ${}^{235}\text{U}$, existem outras possibilidades, com outros produtos de fissão.

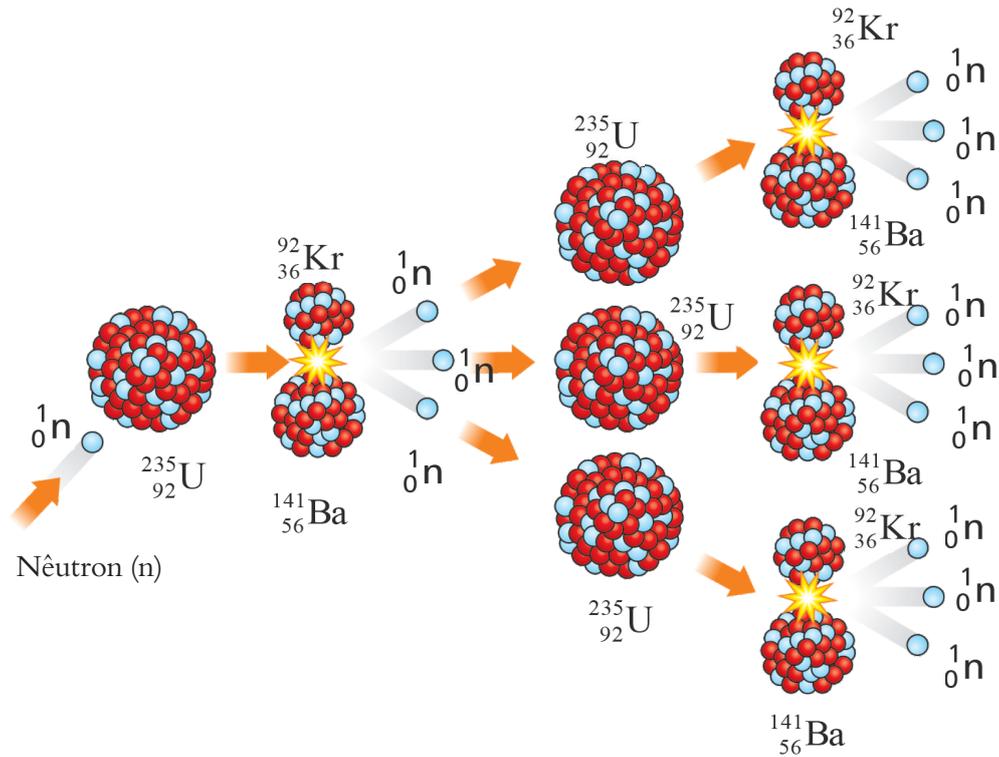
A Figura I-3 mostra um esquema da fissão nuclear.

Figura I-3 – Descrição esquemática da fissão nuclear



Durante a fissão do ${}^{235}\text{U}$, cada núcleo se divide em dois outros e libera certa quantidade de energia, além de 3 nêutrons. Se cada nêutron atingir outro núcleo, teremos a fissão de 3 núcleos, fornecendo 3×3 nêutrons e três vezes a quantidade de energia inicial, e assim por diante. O número de nêutrons e a energia liberada aumentam cada vez mais. A uma reação desse tipo chamamos de uma **reação em cadeia** (FIGURA I-4).

Figura I-4 – Reação em cadeia na fissão nuclear

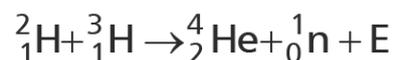


É possível controlar a reação de fissão, de forma que, em cada reação, apenas um nêutron seja aproveitado para uma nova fissão; isso é o que acontece em um reator nuclear, onde o material físsil é rodeado de absorvedores em posições e quantidade convenientes. Nesse caso, a energia liberada é sempre constante.¹⁰

A energia da fissão do ^{235}U é aproveitada em reatores de potência para aquecimento de água, cujo vapor movimentava turbinas que geram energia elétrica. Em outros tipos de reatores (reatores multipropósito), o que se pretende utilizar são os nêutrons liberados nas reações de fissão para pesquisa ou produção de radioisótopos.

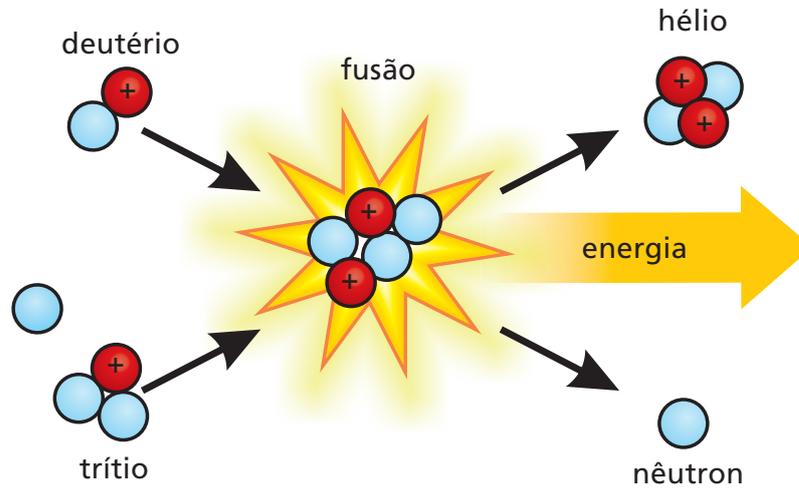
Fusão nuclear

Outro exemplo de reação nuclear é a **fusão**, que ocorre quando dois núcleos leves se unem para formar um núcleo mais pesado. Um exemplo é a fusão de um deutério (^2_1H) e um trítio (^3_1H) em hélio, com a emissão de um nêutron e certa quantidade de energia (FIGURA I-5):



¹⁰ Se mais de um nêutron for aproveitado em cada reação, a energia liberada aumentará exponencialmente de um estágio para o seguinte, podendo causar grandes estragos. Quando o material físsil é usado em grandes proporções e se aproveita propositalmente de mais de um nêutron de cada reação, obtém-se uma arma letal. Atualmente existe um acordo internacional para que não se faça uso desse tipo de arma.

Figura I-5 – Descrição esquemática da fusão



Como a soma das massas iniciais é maior que a das massas finais, há liberação de energia.

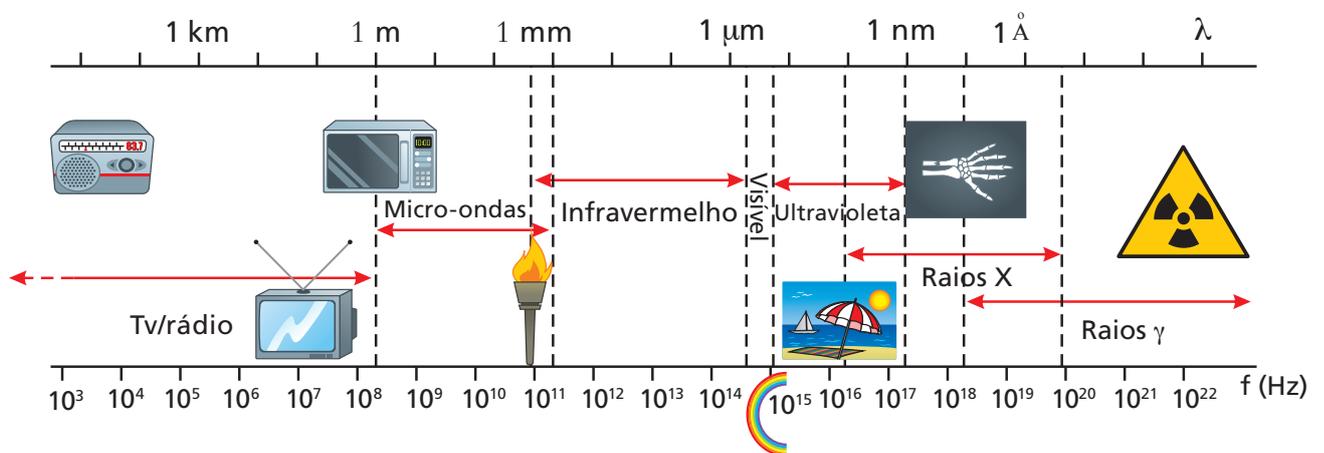
Para ocorrer a fusão, os núcleos têm de vencer a repulsão eletrostática, ao se aproximarem; por isso é necessária uma grande quantidade de energia para iniciar o processo; ele continua em seguida, uma vez que a energia liberada pela fusão é maior que a fornecida e pode ser usada para iniciar outras reações de fusão.

A fusão do hidrogênio em hélio é a principal fonte de energia no Sol e nas estrelas. A energia inicial deve ter sido fornecida durante a sua formação, com a aproximação de partículas, e a seguir foi obtida uma reação em cadeia.

O espectro eletromagnético

O conjunto de ondas eletromagnéticas, classificadas de acordo com sua frequência ou comprimento de onda, é denominado espectro eletromagnético. Os nomes dados às diversas regiões do espectro eletromagnético (FIGURA I-6) são relacionados apenas com o modo como as ondas são produzidas ou observadas, já que todas elas podem ser escritas em termos de campos elétricos e magnéticos e se propagam através do vácuo com a mesma velocidade, igual à velocidade da luz, c .

Figura I-6 – O espectro eletromagnético



As grandezas que caracterizam as ondas eletromagnéticas são seu comprimento de onda,¹¹ sua frequência¹² (que varia inversamente ao comprimento de onda) ou sua energia (que é diretamente proporcional à frequência). Tradicionalmente, usa-se uma dessas grandezas para a radiação de cada região. São apresentadas a seguir as características de cada região do espectro eletromagnético.

Ondas de rádio

São as ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda entre 1 m e vários quilômetros (frequências menores que 10^8 Hz). São usadas para transportar as informações das emissoras de rádio e TV, sendo que cada uma colocará no espaço ondas com uma frequência determinada. As ondas de rádio podem ser geradas por fontes terrestres, através da oscilação de elétrons nos fios de circuitos elétricos. Existem também fontes extraterrestres de ondas de rádio, sendo o Sol a mais importante delas. A **radioastronomia** estuda as informações vindas do espaço por meio de ondas de rádio emitidas por elétrons acelerados em estrelas e outros sistemas celestes.

Ondas de TV

As ondas de TV são ondas de rádio de pequeno comprimento de onda, entre 1 m e 10 m (f entre 10^8 Hz e 10^7 Hz) e, como aquelas, podem ser produzidas por meio de circuitos elétricos. No Brasil, os canais de TV de 2 a 6 emitem ondas de frequência menores que as da faixa de transmissão de FM em rádio (estas estão compreendidas entre $8,88 \cdot 10^8$ Hz e $1,08 \cdot 10^8$ Hz). Os demais canais situam-se em frequências maiores que as da faixa FM; tais canais são denominados canais baixos ou altos, de acordo com a posição da faixa de frequência em relação à FM. As faixas situadas acima das de FM são denominadas VHF (*Very High Frequency*).

Micro-ondas

São as ondas eletromagnéticas com comprimento de onda entre 1 mm e 1 m (f entre 10^{12} Hz e 10^9 Hz) e podem ser produzidas por osciladores em circuitos elétricos. A energia da micro-onda é usada nos laboratórios de Física para provocar transições em elétrons de alguns átomos e assim obter informações sobre o material. O forno de micro-ondas foi inventado a partir de um acontecimento ocorrido em um laboratório de Física, quando um dos pesquisadores deixou uma barra de chocolate próxima ao equipamento. Ele constatou que o chocolate havia derretido ao absorver as micro-ondas. Isso ocorreu porque a energia das micro-ondas é suficiente para aquecer as moléculas por vibração.

As micro-ondas são também usadas na transmissão de sinais de TV ou de telefone. Atualmente se detectam micro-ondas vindas do espaço e que fornecem informação sobre a constituição presente e passada do Universo.

Radiação infravermelha

É a radiação eletromagnética com comprimentos de onda maiores do que a da luz visível, de $0,7 \mu\text{m}$ a 1 mm, ou seja, frequências imediatamente inferiores às da luz vermelha (entre 10^{14} Hz e 10^{11} Hz). Em geral, a radiação infravermelha é obtida em vibrações ou rotações de átomos ou moléculas, causando uma mudança na energia interna do objeto que a recebe, e por isso é chamada de radiação de calor. Os corpos celestes emitem radiação infravermelha que complementa as informações obtidas observando sua emissão de luz visível.

¹¹ Para valores muito pequenos de comprimentos de onda, usa-se a unidade Angstrom: $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$.

¹² A frequência é geralmente medida em Hertz: $1\text{ Hz} = 1\text{ oscilação/s}$.

Luz visível

É a radiação eletromagnética à qual o olho humano é sensível. Dentro da faixa visível, a variação de frequência ou de comprimento de onda será percebida como uma variação de cor, indo de 4.000 Å (violeta) a 7.000 Å (vermelho) (f entre $7 \cdot 10^{14}$ Hz e $4 \cdot 10^{14}$ Hz). A sensibilidade do olho não é uniforme para toda a faixa visível, sendo maior para o verde-amarelado e menor para o vermelho e o violeta. Em geral, a luz visível é emitida quando elétrons fazem transições nas camadas externas dos átomos. A cor da luz informa sobre os átomos do objeto que a está emitindo e por isso o estudo da luz visível emitida pelo Sol e outras estrelas nos informa sobre sua composição.

Radiação ultravioleta

As ondas eletromagnéticas com comprimento de onda entre 1 nm e 400 nm, ou seja, com frequências imediatamente superiores à da luz violeta (entre 10^{15} Hz e 10^{17} Hz) são chamadas de radiação ultravioleta. Ela é produzida pela transição de elétrons nas camadas externas dos átomos.

O Sol é uma fonte de radiação ultravioleta, mas a maior parte dessa é absorvida pelo ozônio da atmosfera terrestre.

A radiação ultravioleta absorvida pela pele humana torna possível a produção de vitamina D, que auxilia na absorção de cálcio dos alimentos. Essa radiação provoca também o bronzeamento da pele. A exposição prolongada à radiação ultravioleta, porém, pode provocar queimaduras e câncer de pele.

A radiação ultravioleta tem a capacidade de destruir bactérias e por essa razão é utilizada para a esterilização de instrumentos e ambientes cirúrgicos, sistemas de ar-condicionado, etc., através do uso de lâmpadas especiais.

Raios X

São as ondas eletromagnéticas com comprimento de onda entre 0,01 nm e 10 nm, (f entre 10^{16} Hz e 10^{19} Hz). Os raios X são produzidos em transições dos elétrons nos níveis mais internos dos átomos ou durante a desaceleração de partículas carregadas. Os comprimentos de onda dessa radiação correspondem ao espaçamento dos átomos nos sólidos, e por isso é possível analisar a estrutura dos materiais através do espalhamento de raios X.

Os raios X são também usados em diagnósticos médicos, visto que penetram com facilidade em tecidos humanos pouco densos, sendo barrados pelo tecido ósseo.

Em sistemas de estrelas binárias, em que duas estrelas orbitam em torno do seu centro de massa comum, há emissão de raios X, graças à aceleração do material que as compõe. Essa radiação, no entanto, não consegue atravessar nossa atmosfera, e a astronomia de raios X é feita com observatórios em órbita.

Raios gama (raios γ)

São as ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda menores que 10 pm (f maiores que 10^{19} Hz). Podem ser emitidos em transições dos núcleos atômicos ou em reações nucleares.

Os raios γ são altamente penetrantes e há probabilidade de causar câncer, danos nos tecidos humanos ou alterações genéticas. Sua capacidade de destruir os tecidos humanos é usada na Medicina para eliminar tumores cancerígenos. São também usados para diagnósticos médicos, como veremos no Capítulo III.

Na Astronomia de raios γ , a detecção desse tipo de radiação informa sobre processos nucleares que ocorrem no Universo.

Raios X de alta frequência são similares aos raios γ , diferindo destes apenas pela sua origem. Se não se sabe o que provocou o aparecimento da radiação, não se podem distinguir os dois tipos.

Existe ainda outro tipo de radiação, gerado pela aniquilação de um elétron e um pósitron, que será descrita no Capítulo II. Embora não seja proveniente do núcleo atômico, ela é denominada radiação γ , graças à sua alta energia.

Radiação ionizante

As ondas eletromagnéticas de alta frequência (raios X e raios γ) têm energia suficiente para provocar ionização dos átomos (arrancar elétrons) quando incidem sobre um material. Elas são chamadas de **radiação ionizante**. Ondas de frequência menor não são capazes de ionizar materiais, porém podem produzir outros tipos de efeitos, de acordo com a energia que cedem ao material. Elas são denominadas **radiação não ionizante**.

II - PRODUÇÃO E DETECÇÃO DE RADIAÇÃO IONIZANTE



Como vimos no capítulo anterior, existem fontes naturais de radiação ionizante. Na maioria das vezes, porém, precisamos usar um material radioativo com características específicas de energia, atividade, meia-vida, etc. Vários isótopos que não existem naturalmente podem ser obtidos através de reações nucleares.

Obtenção de material radioativo

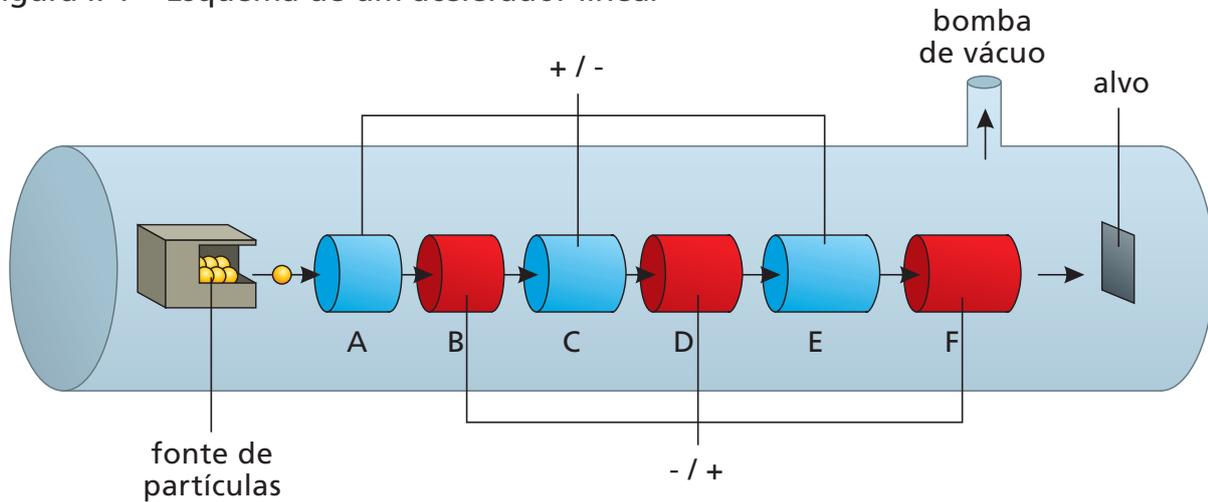
Diversos isótopos radioativos que não se encontram na natureza podem ser fabricados artificialmente, bombardeando elementos estáveis com nêutrons, partículas carregadas ou fótons de energia conveniente. Os feixes de partículas carregadas são obtidos usando um **acelerador linear** de partículas ou um **cíclotron**. Para se obter um feixe de nêutrons, usam-se os **reatores** ou as reações indiretas com partículas carregadas; e **feixes de raios X** podem ser obtidos com intensidade e energia bem determinadas.

Partículas carregadas

Num acelerador de elétrons, um filamento metálico é aquecido para separar elétrons dos átomos do metal; a seguir, esses elétrons são acelerados por um campo elétrico e concentrados em um feixe, usando campos magnéticos.¹³ Alguns aceleradores têm diversos estágios de aceleração, com campos elétricos alternados e sincronizados com o movimento dos elétrons, de modo a acelerá-los sempre na mesma direção (FIGURA II-1). O feixe de elétrons é então dirigido a um alvo e usado para fins de pesquisa ou de fabricação de radioisótopos.

¹³ Partículas carregadas em movimento, quando imersas em um campo magnético, são desviadas de sua trajetória.

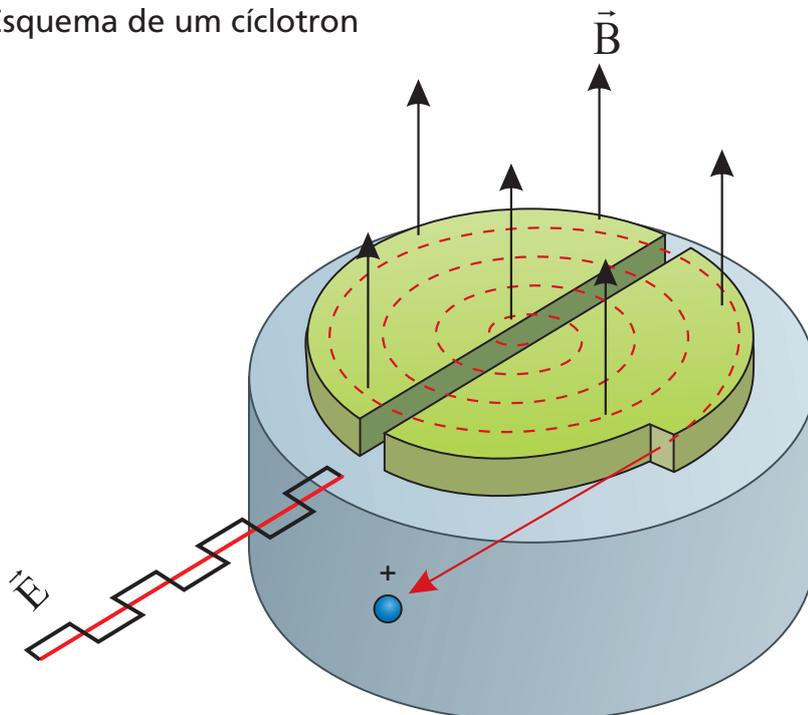
Figura II-1 – Esquema de um acelerador linear



Feixes de prótons podem ser obtidos de forma semelhante. Nesse caso, a fonte dos prótons é o gás hidrogênio, composto de moléculas de H_2 . As moléculas são separadas em átomos, que são ionizados, usando-se uma descarga elétrica. Um campo magnético separa as partículas positivas das negativas, e a seguir os prótons são acelerados por um campo elétrico de intensidade conveniente.

Para obter partículas com alta energia, é necessário se ter um acelerador linear de grande extensão. Um equipamento mais compacto é o ciclotron: ao mesmo tempo em que são aceleradas, as partículas são desviadas por campos magnéticos, percorrendo uma trajetória em espiral. A cada volta, os valores de campos elétrico e magnético são ajustados, para que as partículas aumentem mais e mais sua energia; as partículas aceleradas são extraídas pela borda do dispositivo e se movimentam em linha reta até atingir o alvo (FIGURA II-2).

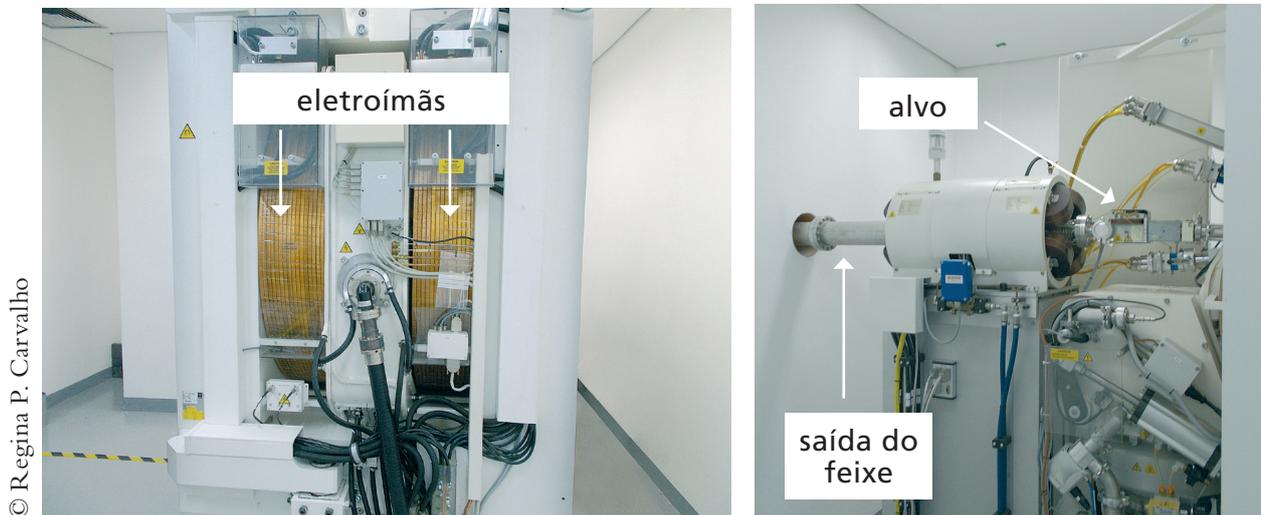
Figura II-2 – Esquema de um ciclotron



As partículas carregadas se deslocam no interior de duas estruturas em forma de **D**. Um campo magnético uniforme \vec{B} encurva sua trajetória; cada vez que passam na interseção entre as duas estruturas, essas partículas são aceleradas por um campo elétrico \vec{E} , cuja intensidade tem a forma de onda quadrada.

A Figura II-3 mostra o ciclotron usado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN - CNEN, Belo Horizonte, MG). Nesse caso, os eletroímãs estão colocados em posição vertical, portanto, o campo magnético é horizontal. São acelerados prótons, provenientes da ionização de gás hidrogênio; estes se chocam contra um alvo que pode ser sólido, líquido ou gasoso, produzindo radioisótopos e/ou um feixe de raios X que pode ser utilizado para outros fins. A produção de raios X será detalhada mais adiante, neste capítulo.

Figura II-3 – Ciclotron (CDTN-CNEN)



Nêutrons

Um feixe de nêutrons é facilmente obtido no interior de um reator de fissão: a fissão do urânio resulta em núcleos de menor massa e nêutrons, que estarão disponíveis em grande quantidade no interior do reator, porém com baixa energia, por causa da existência do material moderador contido no reator (em geral, água, ou água pesada – onde alguns átomos de hidrogênio foram substituídos por deutério, isótopo do hidrogênio que contém um próton e um nêutron). Outra forma de se obterem nêutrons é o uso de reações indiretas: partículas carregadas, provenientes de um acelerador, incidem sobre um alvo, onde ocorre uma reação em que nêutrons são emitidos com energia determinada.

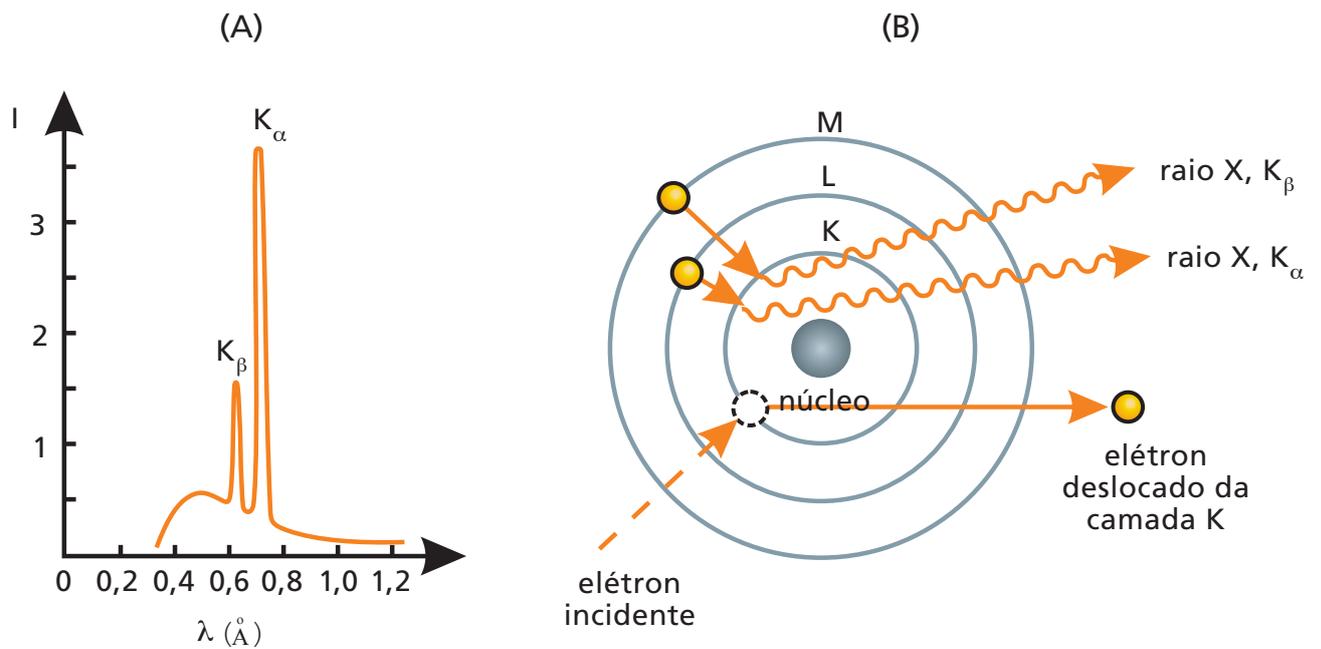
Raios X

Quando partículas carregadas são desaceleradas, há a emissão de raios X devido ao fenômeno conhecido como *bremstrahlung*, palavra alemã que significa radiação de frenamento. Para isso, o feixe proveniente de um acelerador é forçado a se chocar contra um alvo (normalmente, os alvos são constituídos de tungstênio). Os raios X obtidos têm um espectro contínuo de energia, isto é, sua energia pode ter qualquer valor em uma faixa determinada.

Ao mesmo tempo, ao se chocarem contra o alvo, as partículas deslocam elétrons internos dos átomos desse alvo (elétrons que estão nos níveis de energia mais baixos). Esses elétrons são arrancados, e elétrons de níveis mais altos “caem” para ocupar o lugar dos elétrons arrancados; a diferença entre os níveis de energia inicial e final é da ordem de grandeza da energia dos raios X. São então emitidos raios X com valor de energia bem definido para cada material do alvo, denominados raios X característicos.

A Figura II-4 mostra o espectro de energia dos raios X emitidos por um alvo de molibdênio.

Figura II-4 – Emissão de raios X por um alvo de molibdênio

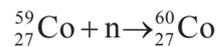


Em (A), vemos o espectro de energia dos raios X emitidos por um alvo de molibdênio, onde os picos representam os raios X característicos do material; em (B) temos a ilustração da emissão de raios X característicos.

Métodos de obtenção e características de alguns radioisótopos

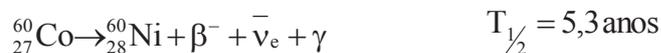
Cobalto-60

O cobalto-60 é um emissor de γ energéticos, e sua produção é feita bombardeando-se cobalto-59 (estável) com nêutrons:



O fluxo de nêutrons é obtido no interior de um reator nuclear, onde algumas das barras de absorvedores são substituídas por barras de cobalto-59.

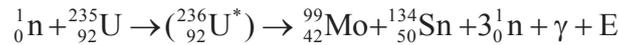
O cobalto-60 é instável e decai para níquel-60:



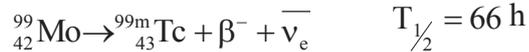
Nessa reação, são emitidos γ com energias de 1,3 MeV e 1,1 MeV, em proporções iguais. O cobalto-60 foi usado em equipamentos para Radioterapia, mas gradativamente as fontes foram substituídas por aceleradores de elétrons. Por causa da alta energia da emissão γ , o transporte e o manuseio para a troca de fontes de cobalto-60 exigem meios de proteção como blindagens e controle remoto.

Tecnécio-99m¹⁴

O tecnécio-99m é um emissor γ , obtido no decaimento do molibdênio-99; este é um produto da fissão do urânio-235 em reatores nucleares:



O molibdênio-99 é separado quimicamente dos outros produtos de fissão e decai em tecnécio metaestável:



O ${}_{42}^{99}\text{Mo}$ tem meia-vida de 66 horas e pode ser transportado desde o produtor até o hospital ou a clínica. No local da utilização, é feita a extração química do tecnécio, a partir da mistura Mo/Tc; o tecnécio metaestável ${}_{43}^{99\text{m}}\text{Tc}$ emite γ com 140 keV e decai com meia-vida de 6 horas para o estado fundamental do tecnécio-99:¹⁵



Como a meia-vida do Mo-99 é 10 vezes maior que a do Tc-99m, esse pode ser estocado, sendo a extração química feita no momento da utilização. Assim, mesmo tendo meia-vida de apenas 6 horas, o Tc-99m estará disponível para uso até cerca de uma semana depois do recebimento do material.

Após o decaimento do tecnécio-99m em tecnécio-99, este decai em rutênio-99 com emissão β^- ; a meia-vida dessa emissão é bastante longa, e, portanto, a atividade (emissões por unidade de tempo) é muito baixa, comparada à do isótopo metastável:

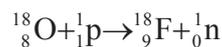


Flúor-18

O flúor-18 é emissor de pósitrons e pode ser obtido por bombardeamento de oxigênio-18 com prótons.

O oxigênio-18 é um isótopo estável do oxigênio e existe em pequena proporção na natureza. É possível fazer um enriquecimento da água, concentrando as moléculas em que o oxigênio aparece nessa forma isotópica.

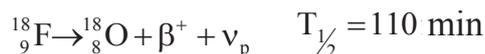
Para a produção do flúor-18, usam-se prótons acelerados em um ciclotron: gás hidrogênio (H_2) é ionizado, produzindo prótons e elétrons. Os prótons são acelerados e enviados contra um alvo de água enriquecida. Quando esses prótons atingem núcleos de oxigênio-18, ocorre a reação:



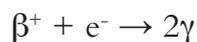
¹⁴ O símbolo m indica que o isótopo está numa forma metastável.

¹⁵ Essa é a forma principal de decaimento; em cerca de 10% dos casos, pode ocorrer o fenômeno chamado de conversão interna: um elétron absorve a energia do raio γ e é ejetado, podendo ionizar a matéria em sua vizinhança, o que aumenta a exposição.

O flúor-18 é instável, e a principal reação de decaimento envolve a emissão de um pósitron:



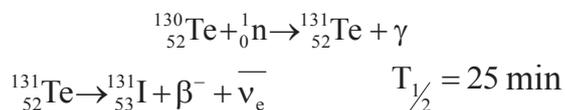
Logo após a emissão, o pósitron (β^+) encontra um elétron (e^-) em sua vizinhança¹⁶; eles se aniquilam, com a emissão de 2 fótons de 0,511 MeV em direções opostas:



O produto do decaimento, oxigênio-18, é estável e não tóxico.

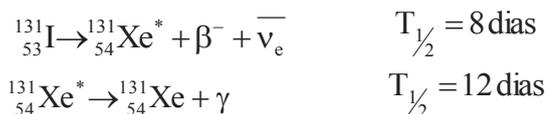
Iodo-131

O iodo é obtido a partir do decaimento do telúrio-131. O telúrio-131 é produzido em reator, bombardeando-se telúrio-130 com nêutrons para se transformar em telúrio-131, e este decai em iodo-131 por emissão β^- :



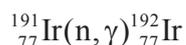
Após o bombardeamento, é realizada a separação química do iodo; por exemplo, pode ser feita a evaporação do gás por aquecimento.

O iodo-131 decai em xenônio-131 (estado excitado) por emissão β^- , com energia de 606 keV; em seguida, o xenônio decai ao seu estado fundamental por emissão γ com energia de 364,5 keV¹⁷ e meia-vida de 12 dias.



Írídio-192

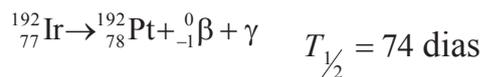
O írídio é um dos metais mais densos; sua densidade é de aproximadamente 23 g/cm³. O írídio-192 pode ser obtido em reator, por captura de nêutrons pelo írídio-191:



¹⁶ A distância percorrida pelo pósitron até seu encontro com um elétron e sua aniquilação, em geral, tem um valor entre 6 mm e 10 mm.

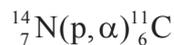
¹⁷ Esta emissão ocorre em cerca de 80% dos casos; podem ocorrer também emissões γ com menor energia, quando o núcleo não decai diretamente para o seu estado fundamental.

A energia da radiação varia entre 0,2 e 0,6 MeV e decai principalmente em platina-192, que é estável.¹⁸



Carbono-11

O carbono-11 é produzido em ciclotron, por bombardeamento de prótons sobre um alvo gasoso de nitrogênio (N_2), que contém 2% de oxigênio (O_2):



É formado então, principalmente, ${}^{11}\text{CO}_2$; forma-se também ${}^{11}\text{CO}$, que deve ser separado antes das próximas etapas de produção.

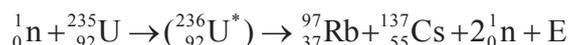
O carbono-11 sofre decaimento com emissão de pósitron:



O ${}^{11}\text{CO}_2$ pode ser usado para se substituir alguns átomos de carbono-12 por carbono-11 em moléculas orgânicas, através de procedimentos químicos, obtendo-se assim diferentes radiofármacos (substâncias preparadas usando-se radioisótopos, para uso diagnóstico ou terapêutico).

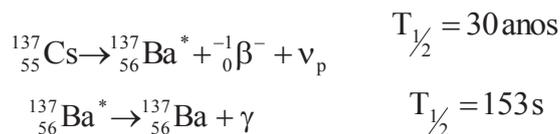
Césio-137

O césio-137 é obtido como produto da fissão do urânio-235 em reatores nucleares:



O césio é separado quimicamente dos outros produtos de fissão e preparado como cloreto de césio (CsCl) para uso como fonte de radiação β e γ .

O césio-137 decai com meia-vida de 30 anos em bário-137 instável, que, por sua vez, decai para seu estado fundamental em 153 s, emitindo γ :



¹⁸ Em cerca de 5% das vezes, ocorre o decaimento em ósmio-192 (isótopo estável), por captura de elétrons: ${}_{77}^{192}\text{Ir} + {}_{-1}^0\beta \rightarrow {}_{76}^{192}\text{Os} + \gamma$; nesse decaimento, a energia da radiação γ e a meia-vida são da mesma ordem de grandeza que as do decaimento em platina; podem ser também formados, em pequenas quantidades, outros radionuclídeos que têm meia-vida curta (entre 30 min e 19 h).

A energia do γ do ^{137}Cs é de 662 keV, e sua meia-vida é de 30 anos. Essas características físicas permitiram seu uso em equipamentos hospitalares e industriais. No entanto, a separação do césio de outros elementos é complicada, e, por razões econômicas, para uso em braquiterapia, foi substituído pelo ^{192}Ir , que tem 25% da sua emissão com energia de 604 keV, portanto próxima à do ^{137}Cs . Além disso, o cloreto de césio se apresenta em forma de pó que, em caso de acidente, se houver perda do encapsulamento, pode se espalhar facilmente e provocar contaminação.

Interação da radiação com a matéria

Ao atingir um material, a radiação ionizante interage com ele de diversas formas: poderá haver transformações químicas ou nucleares, emissão de novas partículas ou o início de uma cadeia de reações nucleares.

Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética (raios X e raios γ) interage com a matéria em três diferentes formas: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a formação de pares.

No **efeito fotoelétrico**, um fóton arranca um elétron ligado a um átomo ao se chocar contra ele. É necessário que o fóton tenha energia igual ou maior que a energia de ligação do elétron com o átomo, por isso a emissão de elétrons só ocorre a partir de um dado limiar de energia. Caso o fóton tenha mais energia que esse limiar, o saldo de energia é recuperado como energia cinética do elétron ejetado.¹⁹ Esse fenômeno ocorre para energias mais baixas do fóton (FIGURA II-5A).

No **efeito Compton**, um fóton e um elétron livre ou fracamente ligado a um átomo se comportam como duas partículas que se chocam; como resultado, temos a modificação na trajetória e na energia de ambos, seguindo as leis de conservação de energia e da quantidade de movimento. Esse fenômeno ocorre para energias intermediárias do fóton (FIGURA II-5B).

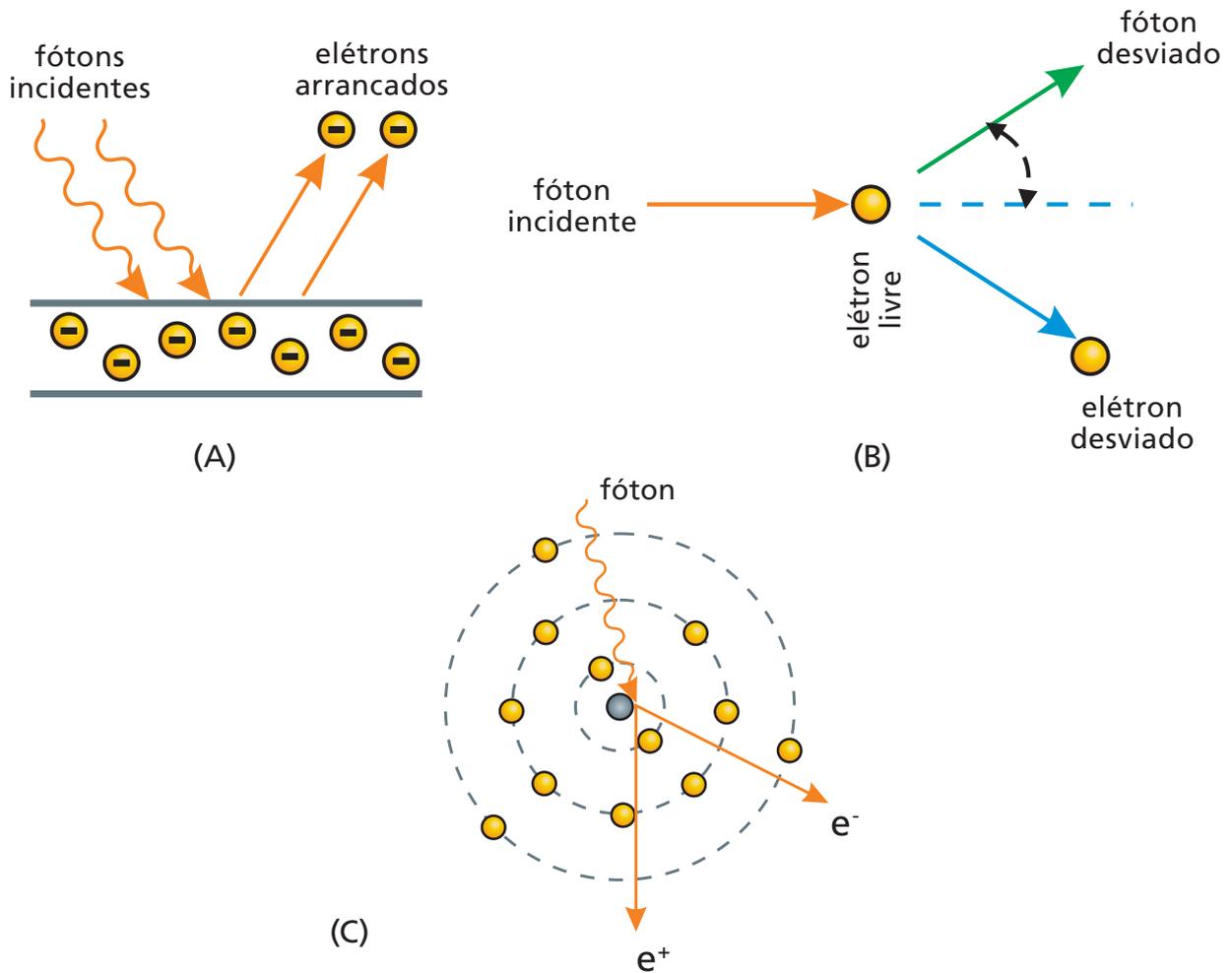
Se a energia do fóton é bastante alta, pode ocorrer a **formação de pares**: o fóton desaparece, dando surgimento a um elétron e a um pósitron. A energia mínima do fóton deve corresponder às massas do elétron e do pósitron. Caso o fóton possua energia maior que o valor mínimo, o saldo em energia será convertido em energia cinética das partículas criadas. A formação de pares deve acontecer nas vizinhanças de um núcleo, que recua, para que se tenha conservação da quantidade de movimento (FIGURA II-5C).

O pósitron criado dessa forma logo encontra um elétron, e o par se aniquila, gerando fótons de energia correspondente às massas e às energias do par.²⁰

¹⁹ Após a emissão do fotoelétrico, o átomo se acomoda emitindo raios X ou um elétron mais fracamente ligado, que é chamado de elétron Auger.

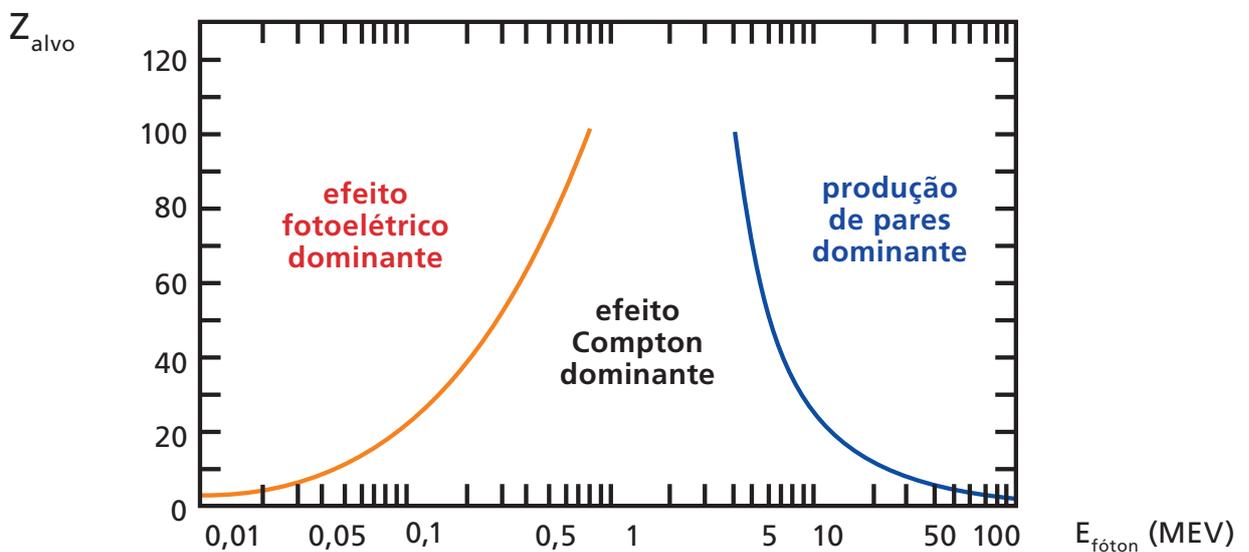
²⁰ A radiação emitida na aniquilação de pares é chamada radiação γ , embora não tenha origem nuclear.

Figura II-5 – Ilustração do efeito fotoelétrico (A) do efeito Compton (B) e da formação de pares (C)



A Figura II-6 mostra as regiões de energia onde cada um dos três fenômenos tem maior probabilidade de ocorrer, de acordo com o tamanho do núcleo-alvo.

Figura II-6 – Interação de um fóton com a matéria, em função da sua energia e do número atômico do alvo



Partículas carregadas

Partículas carregadas têm maior probabilidade de se chocarem com os átomos que de interagir diretamente com os núcleos. Elas, então, interagem com a matéria principalmente por excitação ou ionização dos átomos. Quando se chocam com os núcleos, as partículas são absorvidas e afetam a estrutura nuclear. Durante a interação com a matéria, as partículas carregadas sofrem desaceleração ou mudança na trajetória e emitem radiação eletromagnética, perdendo energia.

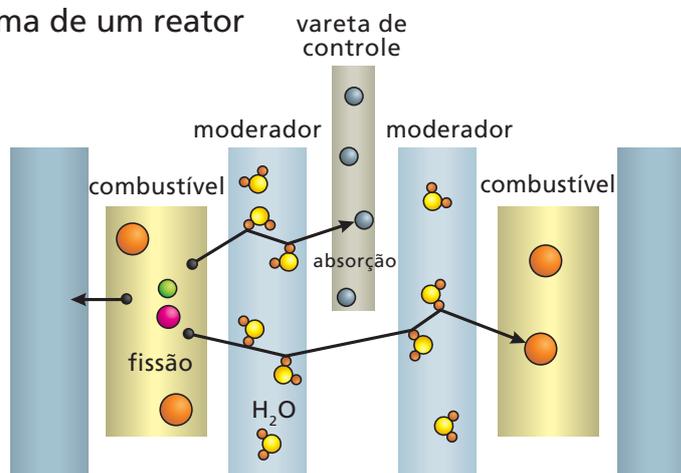
Os elétrons interagem com a matéria provocando ionização ou emitindo radiação de frenamento (*bremstrahlung*). Partículas α provocam ionização e capturam elétrons, tornando-se átomos de He neutro. O alcance das partículas α é sempre muito pequeno, e a transferência de energia se dá no final de sua trajetória. Fragmentos de fissão têm grandes massas: podem provocar ionização, mas seu alcance é muito reduzido.

Nêutrons

Os nêutrons, por não possuírem carga elétrica, interagem com a matéria através de espalhamento ou captura. No espalhamento, os nêutrons se chocam com outras partículas e ocorre troca de energia. A troca é mais efetiva se as partículas que se chocam têm massas iguais ou semelhantes. A captura de nêutrons leva um núcleo a um estado excitado, provocando reações nucleares ou a fissão do núcleo.

Os dois tipos de interação dos nêutrons acontecem em um reator de fissão. Tomando como exemplo um reator de urânio-235: sabemos que o U^{235} captura nêutrons lentos e sofre fissão, emitindo nêutrons rápidos. Para que a reação continue, é necessário diminuir a energia cinética dos nêutrons emitidos;²¹ isso é conseguido fazendo com que eles se choquem com átomos de massa ligeiramente maior que a deles. Normalmente são usados água leve²² (espalhamento pelos núcleos de hidrogênio), água pesada (moderação mais efetiva pelos átomos de deutério), ou barras de grafite ou sódio metálico, que têm núcleos um pouco maiores que o nêutron e ficarão com a maior parte da energia após a colisão. O esquema simplificado de um reator é dado na Figura II-7.

Figura II-7 – Esquema de um reator



Os nêutrons que atingem o material físsil da vareta de combustível provocam a fissão, com liberação de outros nêutrons; estes são termalizados (têm sua energia cinética reduzida) ao se chocarem com os núcleos do moderador; alguns nêutrons são capturados pelos núcleos da vareta de controle, e apenas alguns dos nêutrons liberados estarão disponíveis para iniciar novos processos de fissão.

²¹ Os nêutrons lentos são chamados nêutrons térmicos, uma vez que possuem energia correspondente à velocidade de um nêutron livre à temperatura ambiente. O efeito de reduzir a energia do nêutron é chamado termalizar o nêutron.

²² Chamamos “água leve” à água na qual os núcleos dos dois átomos de hidrogênio têm apenas um próton, e nenhum nêutron; na “água pesada”, ao menos um dos átomos de hidrogênio tem um ou mais nêutrons em seu núcleo.

Interação da radiação com seres vivos

Em seres vivos, ao incidir sobre os órgãos ou tecidos, a radiação ionizante provoca primeiramente efeitos físicos; em seguida, efeitos químicos e, por último, efeitos biológicos. Ao incidir sobre uma célula, a radiação pode ionizar diretamente uma molécula-alvo ou ionizar a água contida na célula, gerando radicais livres, que, por sua vez, reagem com a molécula-alvo. A segunda hipótese tem maior probabilidade de ocorrência, em razão de a água ser o principal componente da célula. A radiação pode danificar qualquer componente da célula, mas os danos mais severos são causados quando o DNA, que se encontra no interior do núcleo da célula, é atingido.

Após a ionização, e dependendo do grau de dano causado ao núcleo da célula, pode ocorrer:

- a) reparação do dano e a célula continua a se reproduzir normalmente;
- b) reprodução, mas a descendência da célula será inviável (morte da descendência);
- c) mutações no DNA e transmissão dessas mutações para sua descendência;
- d) ou, se os danos forem muito severos, a célula pode morrer (“apoptose”). Isso é positivo porque os danos não serão transmitidos.

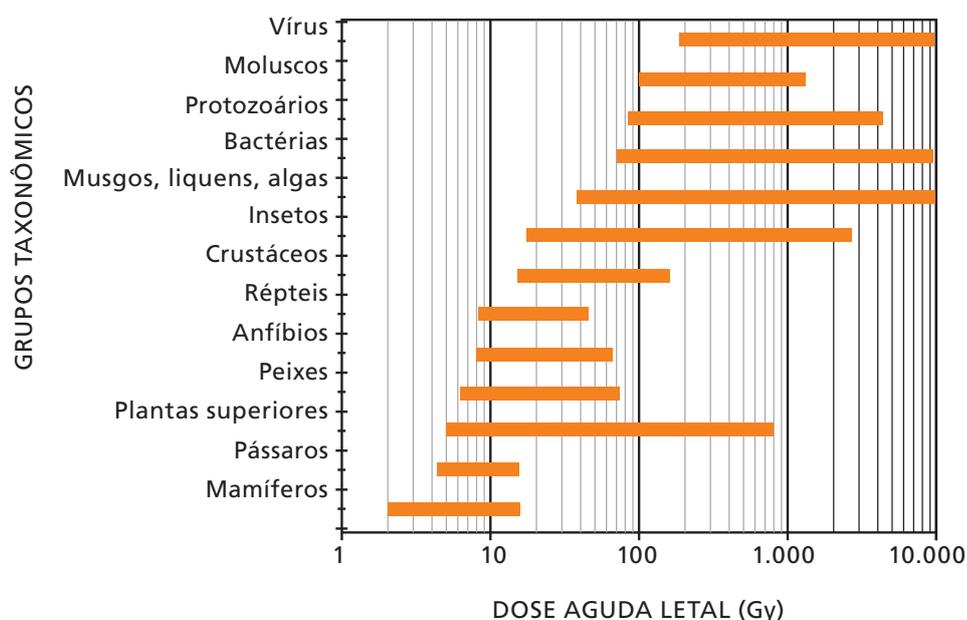
Dentro do ciclo celular, as células mais sensíveis à radiação são as que estão na fase de mitose (divisão celular) e as que não são diferenciadas. Isso ocorre porque durante a mitose o DNA é replicado, e qualquer dano pode impedir a reprodução da célula; as células não diferenciadas se dividem mais frequentemente que as diferenciadas e precisam de toda a informação contida no DNA. Já células diferenciadas utilizam apenas parte da informação do DNA, além de se reproduzirem menos frequentemente, ou, em alguns casos, não se reproduzirem. Então, um dano a apenas parte do DNA pode não ser importante para essas células. Seguindo esse raciocínio, verifica-se que, no corpo humano, as células mais afetadas pela radiação ionizante são as de medula óssea e alguns componentes do sangue (por exemplo, os leucócitos), que se multiplicam rapidamente; em seguida, vêm as células das paredes do intestino e dos órgãos reprodutores, que também se multiplicam consideravelmente. As células menos afetadas são os neurônios e as células dos músculos, que não se multiplicam.

Dose letal para componentes da fauna e da flora

Os organismos vivos apresentam uma resistência diferenciada em relação aos efeitos biológicos das radiações ionizantes. Em geral, quanto maior a sua complexidade orgânica, estrutural e neurológica, menor sua resistência. Quanto mais simplificado for o organismo, maior a sua resistência²³. A Figura II-8 mostra faixas aproximadas de dose letal para diferentes organismos vivos.

²³ Essa regra é conhecida como Lei de Bergonié-Tribondeau, em homenagem aos dois médicos franceses que primeiro a estabeleceram, em 1906: J.A.Bergonié (1857-1925) e L.M.Tribondeau (1872-1918).

Figura II-8 – Dose letal de radiação para diversos organismos vivos



A dose é dada na unidade Gray (Gy), que representa a quantidade de energia absorvida por unidade de massa. (baseado em: UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly, Annex E. Disponível em: <<http://www.unscear.org/unscear/en/publications/>>. Acesso em: maio 2017).

Detecção da radiação

O conhecimento das formas de interação da radiação com a matéria possibilita o desenvolvimento de detectores próprios para cada tipo de radiação que se deseja medir. Em geral, um detector de radiação é constituído de um elemento ou material sensível à radiação e um sistema que transforma os efeitos da radiação em uma grandeza que se possa medir e relacionar com a quantidade dessa radiação. Na maioria das vezes, a energia da radiação é transformada em uma grandeza elétrica, que se pode medir facilmente e com precisão.

Primeiros detectores

O primeiro detector de radiação foi usado acidentalmente por Becquerel: ele embrulhou um mineral radioativo com **filme fotográfico** e mais tarde verificou que o filme tinha sido sensibilizado pela radiação, que na época tinha origem desconhecida. A emulsão fotográfica consiste em grãos de haletos de prata, sendo o mais usado o brometo (AgBr). A radiação é capaz de ionizar o material, e os íons Ag^+ que se encontram na trajetória da radiação se transformam em prata metálica. O filme é tratado com soluções reveladoras e fixadoras, que mostram as regiões onde incidiu a radiação. As emulsões fotográficas foram usadas no passado para controle da radiação recebida pelos profissionais que trabalhavam com radiação ionizante. Eles foram substituídos por dosímetros termoluminescentes, que serão descritos mais adiante.

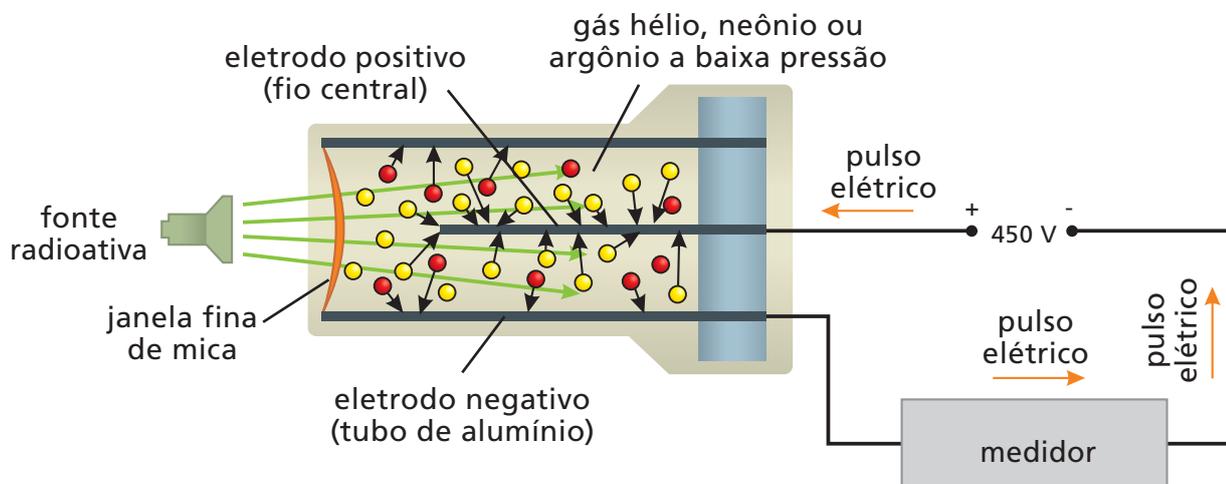
Detectores atuais

Os detectores mais comuns usados atualmente são os detectores de gás, os cintiladores e os semicondutores.

Nos detectores de gás, a radiação ioniza o gás colocado em uma câmara, provocando a passagem de corrente elétrica por um circuito. O mais conhecido deles é o **contador de Geiger-Müller**, que leva o nome dos físicos que o inventaram, no início do século XX. Consiste em uma câmara metálica cilíndrica que tem um fio condutor em seu interior e é preenchida com gás a baixa pressão. O fio e a carcaça metálica são submetidos a uma

diferença de potencial. Ao penetrar o contador, a radiação ioniza o gás nele contido, e os íons se deslocam sob a ação da diferença de potencial, provocando uma descarga elétrica quando alcançam o filamento ou a carcaça (FIGURA II-9). Esses detectores são compactos e podem ser transportados para medidas em diversos locais.

Figura II-9 – Esquema de um contador de Geiger-Muller



Cintiladores

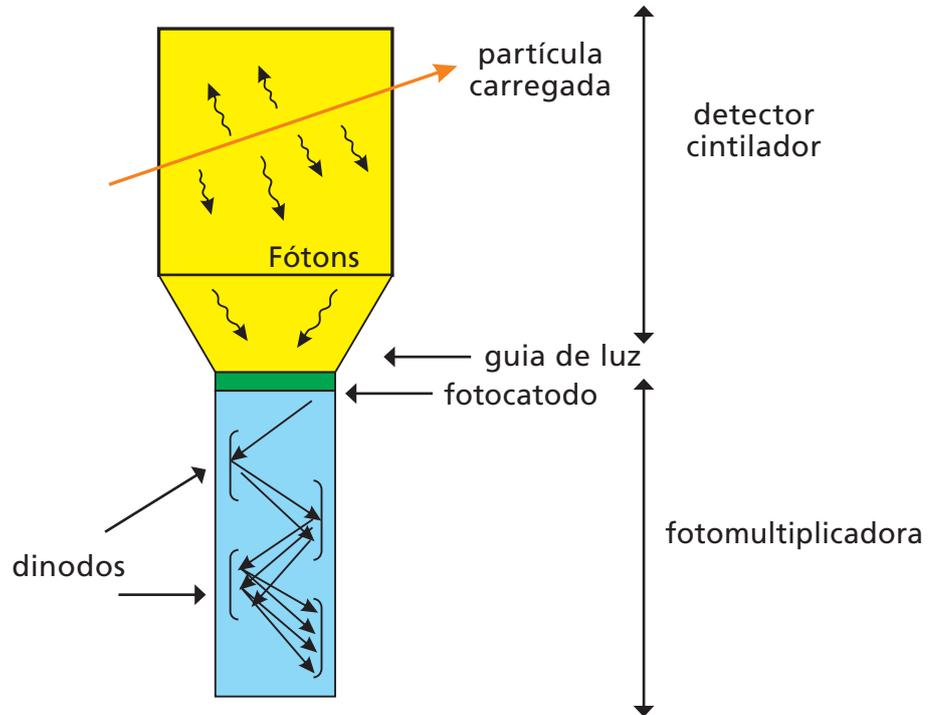
Detectores mais modernos usam **cintiladores**, que são cristais que emitem luz após a ionização provocada pela passagem de radiação, ou **detectores semicondutores**: nestes, a radiação incide sobre uma junção p-n,²⁴ criando pares de elétrons e buracos que depois se reúnem e emitem um sinal elétrico ou luminoso, multiplicado e analisado por meios eletrônicos. Os diversos tipos de detectores são adaptados para caracterizar o tipo de radiação, a quantidade de partículas ou a sua energia. Em geral, os processos de ionização são eficientes para fótons e partículas carregadas. Para distinguir diferentes formas de radiação, usam-se anteparos que eliminam da detecção as partículas menos penetrantes, comparando-se as medidas feitas com o anteparo e sem ele.

O tipo mais comum de cintilador é o detector de iodeto de sódio com pequenas quantidades de tálio [NaI(Tl)], embora existam também cintiladores que usam cristais orgânicos ou plásticos; os fótons emitidos pela cintilação geram elétrons, por meio do efeito fotoelétrico; o sinal elétrico precisa ser amplificado e analisado por meios eletrônicos, por exemplo, por uma **válvula fotomultiplicadora**. A Figura II-10 mostra o esquema de detector cintilador, acoplado a uma fotomultiplicadora.

A radiação excita os átomos do cristal cintilador, e, quando esses átomos retornam ao estado fundamental, são emitidos fótons. A luz emitida é canalizada até a fotomultiplicadora e incide sobre uma placa metálica, onde arranca elétrons pelo efeito fotoelétrico. Os elétrons arrancados são acelerados por uma diferença de potencial entre a placa fotoelétrica e outra placa, denominada dinodo; ao se chocarem com o dinodo, os elétrons arrancam outros elétrons, que são acelerados na direção de um segundo dinodo, e assim por diante. A cada colisão, o número de elétrons é multiplicado; ao final do processo, existe um número de elétrons suficiente para ser analisado como um pulso elétrico.

²⁴ Uma junção p-n é uma região onde um material que contém excesso de elétrons livres (tipo n, negativo) se justapõe a um material com falta de elétrons livres (tipo-p, positivo). O excesso ou a falta de elétrons é obtido inserindo-se no semiconductor pequenas quantidades de outros átomos, denominados dopantes ou impurezas.

Figura II-10 – Esquema de um detector cintilador, com fotomultiplicadora



Um exemplo de detector cintilador é a câmara de cintilação usada em Medicina Nuclear para exames de diagnóstico com radioisótopos que emitem radiação γ . Nessa câmara, o cristal cintilador, ao ser bombardeado com radiação γ , emite fótons na região visível. Os fótons são recebidos por uma série de pequenas fotomultiplicadoras que têm seus sinais comparados entre si. É possível localizar a origem da cintilação verificando qual ou quais fotomultiplicadoras apresentaram o sinal mais forte. Após a análise, os sinais elétricos são enviados a um computador que constrói uma imagem do objeto que emitiu a radiação.

Fazendo-se medidas em diversos ângulos em torno do emissor, pode-se obter uma reconstrução tridimensional da imagem (tomografia).

A utilização da câmara de cintilação é descrita no Apêndice A2.

Cintiladores com circuito de coincidência

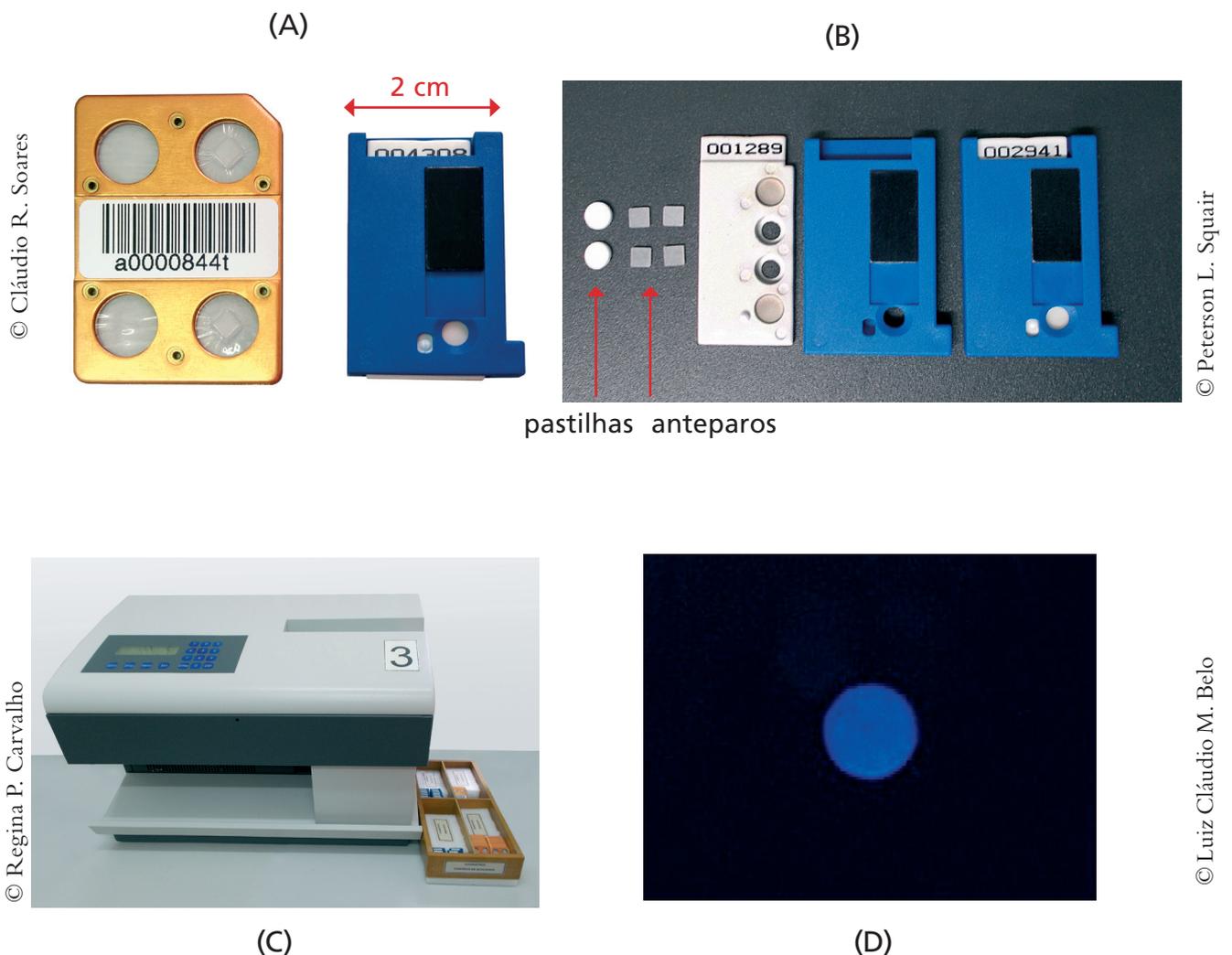
Para a detecção da emissão γ proveniente da aniquilação de pares, é necessário usar um sistema de cintiladores mais sofisticado. A aniquilação acontece quando um pósitron encontra um elétron e os dois se aniquilam, gerando dois fótons γ cuja soma da energia é equivalente às massas das duas partículas. Os dois fótons são emitidos em direções contrárias. Nesse caso, a detecção é feita através de dois conjuntos de pequenos cintiladores, colocados em posições opostas com relação ao emissor. Os sinais somente serão analisados quando forem detectados simultaneamente por duas fotomultiplicadoras, colocadas a 180° entre si, ou seja, quando houver coincidência temporal entre os dois sinais. A posição das fotomultiplicadoras informa sobre o local onde ocorreu a aniquilação. Esse sistema é usado para a detecção de emissores β^+ , uma vez que a aniquilação ocorre em região muito próxima à da emissão.

Detector semicondutor

O princípio de funcionamento dos detectores semicondutores é baseado no fato de que, nos materiais semicondutores, os elétrons preenchem totalmente o nível de energia que chamamos de **banda de valência**, não sendo possível haver deslocamento dos elétrons. O nível de energia mais alto, denominado **banda de condução**, está vazio e poderia permitir o fluxo de elétrons, porém há uma separação entre as duas bandas (a **banda proibida**), que precisa ser vencida fornecendo-se energia ao material.

Um exemplo de detector semicondutor é o **TLD** (do inglês *Thermoluminescent Dosimeter*, Dosímetro Termoluminescente). Ele é um pequeno detector usado dentro de um portadosímetro pela pessoa exposta à radiação, e analisado a cada 30 dias, para se conhecer a dose de radiação recebida pelo trabalhador (FIGURA II-11).²⁵

Figura II-11 – Detectores Termoluminescentes (TLDs)

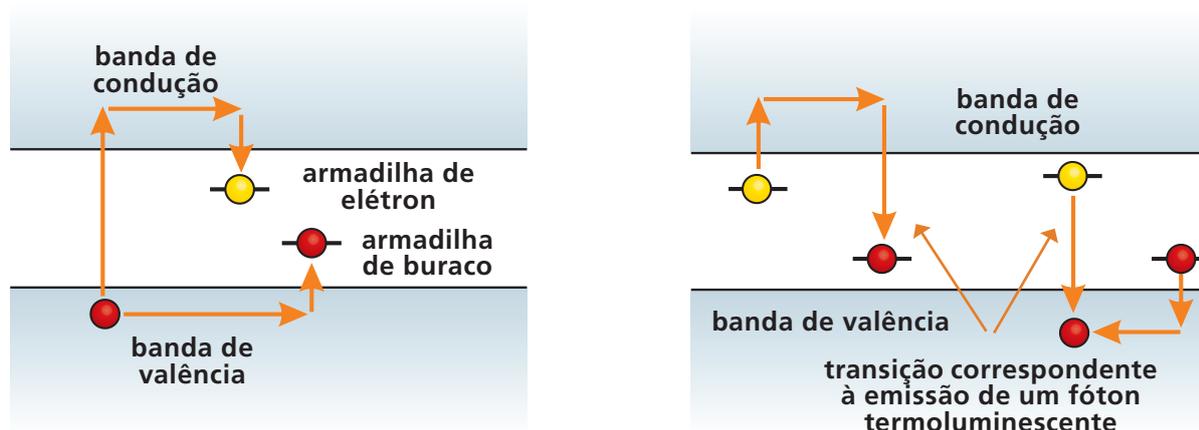


(A): detector para calibração (dourado) e para uso em crachás (azul); (B): detector desmontado, que mostra as pastilhas e anteparos; (C): equipamento para medição da dose absorvida pelo TLD; (D): luminescência da pastilha sob aquecimento

²⁵ Os TLDs podem também ser acoplados a anéis, pulseiras ou óculos, usados para medir doses absorvidas em mãos ou lentes dos olhos, quando estes possam receber exposições maiores que no restante do corpo.

O TLD é construído a partir de uma pastilha de material semiconductor – em geral, CaF ou LiF, contendo impurezas; as impurezas criam níveis de energia na banda proibida, que funcionam como “armadilhas” para elétrons ou “buracos”.²⁶ Ao receber a radiação, o cristal é ionizado, e os elétrons emitidos ficam presos nas impurezas (FIGURA II-12). Posteriormente, para se determinar a dose de radiação que incidiu sobre o TLD, este é aquecido de forma controlada; com o aquecimento, os elétrons presos nas impurezas caem para os níveis de energia que ocupavam antes, emitindo fótons. Uma fotomultiplicadora transforma os fótons em pulsos elétricos. A intensidade e o número de pulsos elétricos informam sobre a dose de radiação recebida e sua energia. Após o aquecimento, o TLD volta ao seu estado original e pode ser usado novamente.

Figura II-12 – Níveis de energia de um material semiconductor que contém impureza



Os elétrons do semiconductor estão na banda de valência, e só são liberados se adquirirem energia suficiente para atingir a banda de condução. A presença de uma impureza faz com que sejam criados níveis intermediários entre as bandas de condução e de valência, que funcionam como “armadilhas”. Com o aquecimento, os elétrons presos voltam ao seu nível fundamental e emitem fótons.

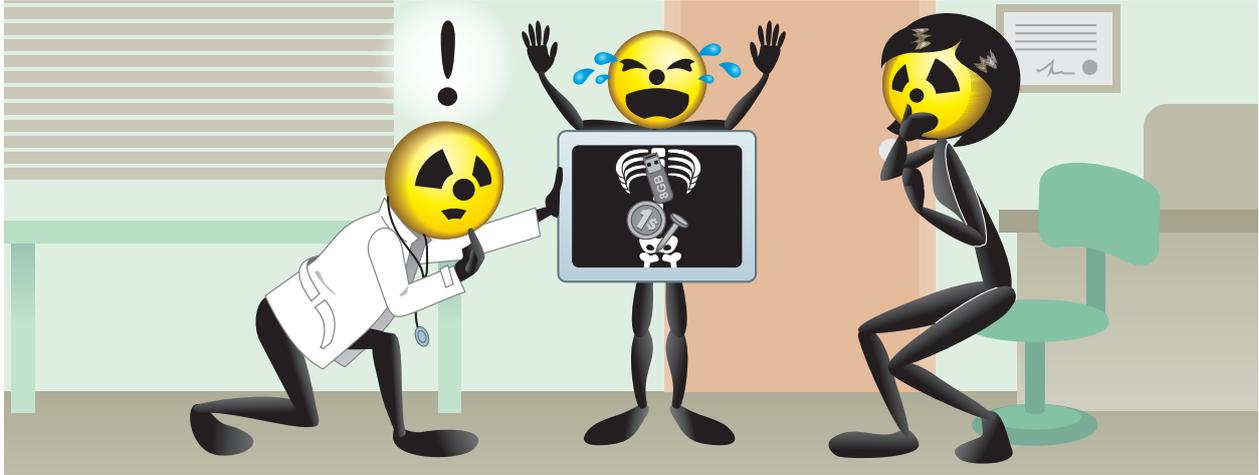
Quando se deseja detectar um tipo específico de emissão, usam-se diversas pastilhas sobre o mesmo suporte, colocando-se sobre algumas delas anteparos que barram a passagem de certo tipo de partícula. A comparação entre a radiação recebida pelas pastilhas cobertas e não cobertas vai informar sobre o tipo de radiação que incidiu sobre elas.

Outro tipo de detector é o **detector de germânio**, usado nos laboratórios de preparação de radioisótopos. O elemento germânio é um semiconductor com uma banda proibida bastante estreita. A incidência de radiação γ promove a transferência de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Sob a ação de um campo elétrico aplicado ao cristal, os elétrons se deslocam e provocam pulsos de corrente elétrica, que podem ser medidos; o número de pulsos é proporcional ao número de fótons γ que incidiram sobre o detector.

O detector de germânio deve ser operado a baixas temperaturas. Para isso, usa-se nitrogênio líquido, com temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Isso é necessário porque a banda proibida é estreita; a temperaturas acima da do nitrogênio líquido, a energia térmica dos elétrons é suficiente para vencer a barreira de energia. Se não houver o resfriamento do detector, a medida dos pulsos produzidos pelos elétrons levará em conta não somente os produzidos pela passagem de fótons γ , mas também os produzidos pela agitação térmica do cristal.

²⁶ Os “buracos” são ausências de elétrons e se comportam como se fossem “elétrons com carga positiva”.

III - USOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE NA SAÚDE



A radiação ionizante, ao atravessar um material, pode provocar **mudanças** nos átomos e nas moléculas, enquanto, ao mesmo tempo, a própria radiação sofre **atenuação**. Essas características são usadas para diagnósticos, tratamentos, esterilização de material hospitalar ou de alimentos, controle de insetos transmissores de doenças, dentre outras aplicações em Saúde. Os radioisótopos são escolhidos de forma a ter a energia e a meia-vida conveniente para cada utilização específica.²⁷

Diagnóstico

Raios X

A atenuação da radiação ao atravessar um material depende do seu número atômico e da sua densidade. Por exemplo, em nosso corpo, os ossos atenuam mais a radiação que o tecido mole; a atenuação também pode indicar alterações no tecido (inflamações, infecções ou presença de formações não esperadas, como nódulos benignos ou malignos). É possível, então, usar a radiação para adquirir uma imagem anatômica, através da transmissão de raios X.

Os raios X são colimados em direção aos órgãos em estudo do paciente, através do ajuste do equipamento, para atingir a região de interesse. A fim de evitar a radiação espalhada para regiões do corpo que não precisam ser irradiadas, são usadas proteções para órgãos específicos, como gônadas ou tireoide. Na radiologia diagnóstica, os raios X são atenuados de forma diferenciada, dependendo da densidade do órgão em estudo. Os equipamentos mais simples usam chapas fotográficas para a obtenção da imagem. Em equipamentos mais sofisticados, a chapa fotográfica é substituída por detectores cintiladores, cuja informação é processada com técnicas digitais, produzindo imagens diretamente na tela de um computador.

²⁷ Este capítulo mostra apenas algumas das inúmeras aplicações da radiação na Saúde, a título de exemplo. Elas foram escolhidas para mostrar as características mais importantes dos radioisótopos em cada caso.

Raios γ

Os raios γ permitem a obtenção de uma imagem fisiológica de órgãos internos usando-se radiofármacos, obtidos incorporando radioisótopos emissores de γ a determinadas moléculas. Esses radiofármacos são administrados ao paciente por vias intravenosa, intramuscular ou oral, e são absorvidos preferencialmente por alguns órgãos.

Um detector gama de cintilação (chamado de câmara de cintilação), situado em um equipamento chamado de **gama câmara**, pode girar em torno do paciente ou fazer uma varredura horizontal, registrando os locais de acumulação do radiofármaco. Posteriormente, usando-se ferramentas computacionais, faz-se a reconstrução de uma imagem em 3 dimensões. Assim é possível obter uma imagem dinâmica do órgão de interesse. No Apêndice 2 são mostrados os processos de aquisição e processamento de imagens.

A radiação γ tem a vantagem da monocromaticidade (os fótons emitidos em determinada transição têm a mesma energia), o que se torna importante para se diferenciar os fótons provenientes da emissão do radiofármaco de outros fótons que eventualmente possam ser detectados.

Radiofármacos para diagnóstico

Radiofármacos são substâncias preparadas usando-se radioisótopos, que serão absorvidas preferencialmente nos órgãos que se deseja analisar ou tratar. O radioisótopo é escolhido de acordo com suas propriedades (meia-vida, tipo e energia da emissão, facilidade de transporte). O radiofármaco é preparado e transportado até o local de aplicação, seguindo-se normas e regulamentos de proteção radiológica das pessoas envolvidas no processo.

O radioisótopo mais usado em diagnósticos é o $^{99m}_{43}\text{Tc}$ (tecnécio-99 metaestável). Uma vantagem do tecnécio-99m é que ele tem valências de 4 a 7, podendo marcar diferentes moléculas; é possível então obter diversos radiofármacos, usados em diversos tipos de diagnóstico, conforme o órgão em estudo. Outra vantagem é ser emissor γ e não ser emissor β , já que as câmaras de cintilação usadas para diagnóstico somente detectam radiação γ , e assim se evita radiação desnecessária para o paciente. Além disso, a energia da sua emissão γ (140 keV) é suficiente para que ela escape do corpo do paciente e seja facilmente detectada.²⁸

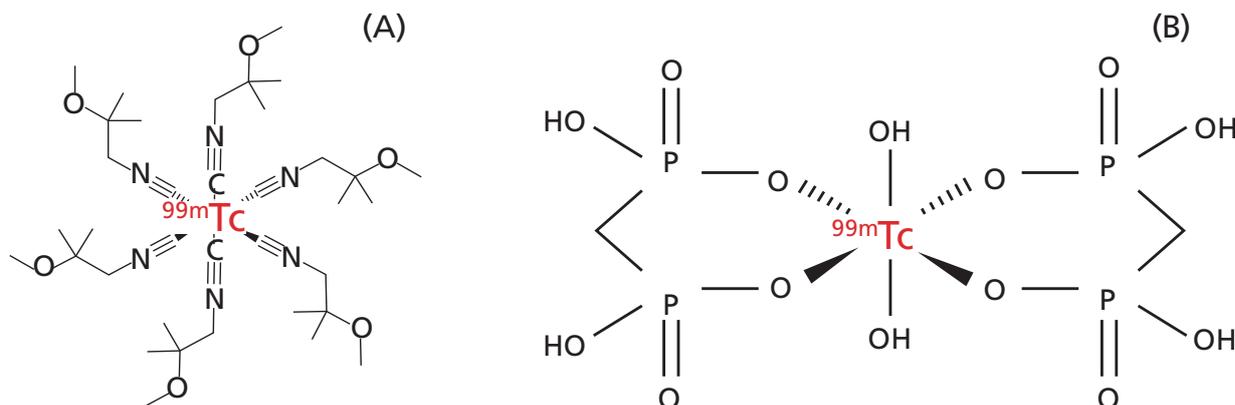
O $^{99m}_{43}\text{Tc}$ é administrado ao paciente como sal (pertenetato) ou ligado a uma molécula que será absorvida preferencialmente em um órgão do corpo.

O pertenetato se acumula principalmente nos locais onde estiver havendo regeneração do tecido ósseo (fraturas, inflamações ou tumores).

O tecnécio ligado à exametazima se acumula no cérebro, permitindo estudar alterações no fluxo sanguíneo desse órgão. Outro radiofármaco muito utilizado é o Sestamibi: neste, um átomo de $^{99m}_{43}\text{Tc}$ se liga a 6 moléculas de MIBI (metoxiisobutilnitrila); esse composto é absorvido preferencialmente pelos músculos do coração e é usado em diagnósticos cardiológicos. O $^{99m}_{43}\text{Tc}$ ligado ao MDP (metilenodifosfonato) é absorvido preferencialmente nos ossos e permite a pesquisa de metástases ósseas (FIGURA III-1).

²⁸ A faixa de eficiência dos detectores de NaI, mais usados nesse caso, é de 100 keV a 300 keV, que compreende a energia da emissão do Tc-199m.

Figura III-1 – ^{99m}Tc -sestamibi (A) e ^{99m}Tc -MDP (B)



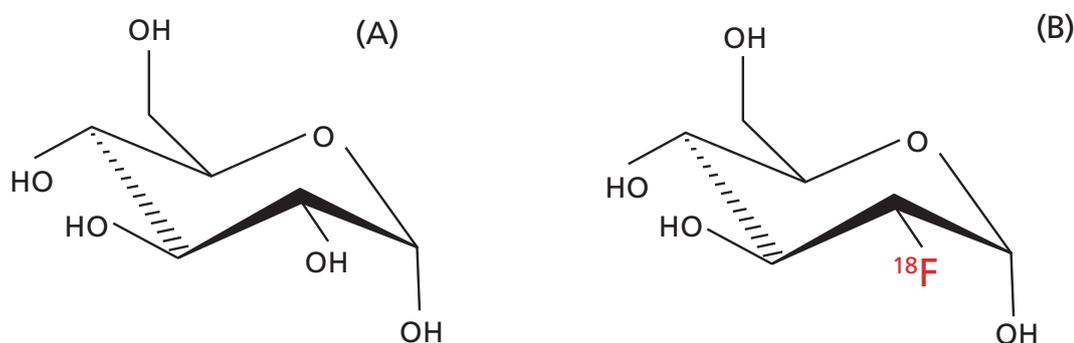
Tomografia por emissão de pósitrons

Outra técnica empregada no radiodiagnóstico é a chamada **PET** (do inglês *Positron Emission Tomography*, Tomografia por Emissão de Pósitrons). Para realizar essa técnica, um radioisótopo emissor de pósitrons é administrado ao paciente, e o pósitron emitido se aniquila com um elétron da matéria, gerando dois fótons de energia igual a 0,511 MeV cada um (correspondentes à aniquilação da massa de um elétron e um pósitron). Os fótons se espalham em direções opostas e podem ser detectados pela câmara de cintilação popularmente chamada de **PET SCAN**.

O radioisótopo mais comumente empregado é o flúor-18. Ele pode ser incorporado a algumas moléculas orgânicas como a fluorodesoxiglicose (FDG), um análogo da glicose, com um átomo de flúor substituindo uma hidroxila (FIGURA III-2).

Quando é injetada no paciente por via endovenosa, a FDG se concentra em órgãos que absorvem glicose, como o cérebro, que a usa em sinapses; os músculos, para gerar movimento; células com crescimento mais acelerado, como as cancerosas, ou em processos inflamatórios. Os locais onde houver concentração da FDG terão emissão mais acentuada de pares de fótons, detectados por cintiladores com circuito de coincidência, descritos no Capítulo II. Após a injeção, o paciente deve permanecer durante uma hora em repouso, para evitar acúmulo de FDG nos músculos, e em silêncio e penumbra, para evitar acúmulo no cérebro.

Figura III-2 – Estrutura da glicose (A) e da fluorodesoxiglicose [^{18}F -FDG] (B)



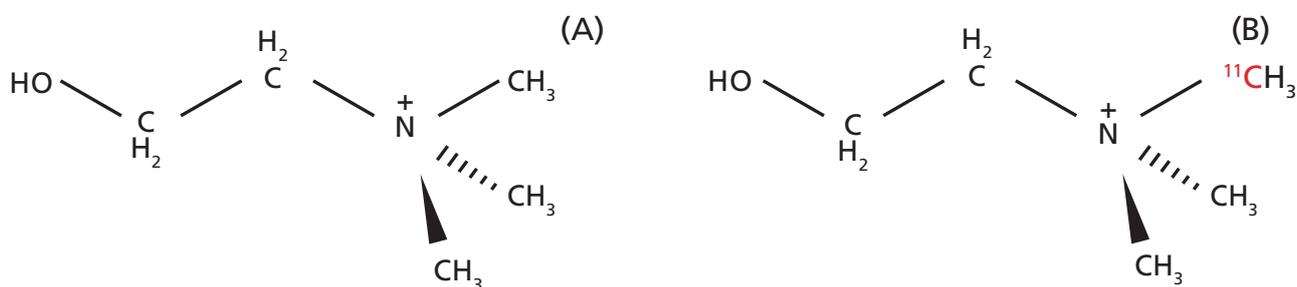
A FDG não é metabolizada pelo organismo; após o decaimento do flúor-18 em oxigênio-18, a molécula captura um próton; a glicose “pesada” (que contém oxigênio-18 no lugar de oxigênio-16) é metabolizada da mesma forma que a glicose “normal”. Em 2 horas, 20% da atividade administrada é excretada por via renal.

O flúor-18 apresenta uma série de vantagens para seu uso nos diagnósticos por imagem:

- o pósitron emitido tem baixa energia;
- não há emissão γ na reação de decaimento; os únicos fótons emitidos provêm da aniquilação elétron-pósitron, e suas energias têm valor bem definido (0,511 MeV cada um, correspondentes à aniquilação das duas partículas). Isso facilita a detecção desses fótons.
- o flúor-18 decai em oxigênio-18, estável e não tóxico.

Outro exemplo de radiofármaco é a C11-colina (vitamina do grupo B), onde um dos átomos de carbono-12 é substituído por carbono-11 (FIGURA III-3). Ela é usada para exames de próstata ou do sistema nervoso central.

Figura III-3 – Estrutura da colina



Tratamento

A radioterapia é empregada no tratamento de câncer usando-se fontes γ externas ao corpo (teleterapia), fontes inseridas diretamente no local que se quer irradiar (braquiterapia) ou radiofármacos (doses internas). Também podem ser utilizados emissores de partículas carregadas; nesse caso, como as partículas têm alcance muito curto, esses emissores são úteis na terapia de lesões superficiais, na braquiterapia e como radiofármacos.

Fontes γ para teleterapia

Inicialmente, foram muito usados equipamentos de cobalto-60 para teleterapia; a partir do fim do século XX, esses passaram a ser substituídos por aceleradores lineares. As fontes de cobalto-60 ainda são bastante utilizadas na indústria.

Braquiterapia

Um dos radioisótopos mais empregados na braquiterapia é o $^{192}_{77}\text{Ir}$, na forma de fios finos feitos com uma liga de Ir (30%) e Pt (70%). O fio é revestido com uma capa de platina ou aço inox, que blinda a radiação β proveniente do decaimento, e apenas a radiação γ é aproveitada no tratamento.

O fio é inserido dentro do tumor, e a radiação γ destrói as células tumorais; as células saudáveis, mais distantes, são preservadas.

Como o radioisótopo é muito denso, os fios podem ter pequenas dimensões e, no entanto, a taxa de dose será alta. A irradiação pode ser realizada em poucos minutos, em regime ambulatorial (o paciente não precisa ficar internado).

Radiofármacos para tratamento

O iodo-131 é um emissor β e γ , administrado ao paciente por via oral, como solução aquosa do sal iodeto de sódio ($^{131}\text{I-NaI}$). O iodo acumula-se principalmente na tireoide, e a radiação β pode destruir nódulos benignos, metástases ou tecidos remanescentes de cirurgia no caso de carcinoma. O radiofármaco meta-iodobenzilguanidina ($^{131}\text{I-MIBG}$) é usado para tratamento de ferrocrocitomas e neuroblastomas, originados pela glândula tireoide e localizados no sistema neuroendócrino. Para acompanhar a evolução da terapia, a radiação γ do ^{131}I é aproveitada para realizar imagens cintilográficas.

Esterilização de material hospitalar e alimentos

A esterilização de instrumentos hospitalares ou alimentos pode ser feita usando radiação γ , que destrói as células dos micro-organismos presentes no material. Como a irradiação é feita sem alterar a temperatura do material, o procedimento não afeta as características dele. As fontes usadas são os aceleradores (raios X de alta energia) ou fontes de cobalto-60 (raios γ).

O material hospitalar pode ser irradiado dentro de embalagens especiais, que resistam à radiação, e assim se evita contaminação posterior.

Usando doses bem determinadas de radiação, é possível eliminar micro-organismos presentes na superfície dos alimentos sem modificar as suas características. A técnica foi testada com sucesso em grãos e temperos, que tiveram sua durabilidade prolongada.

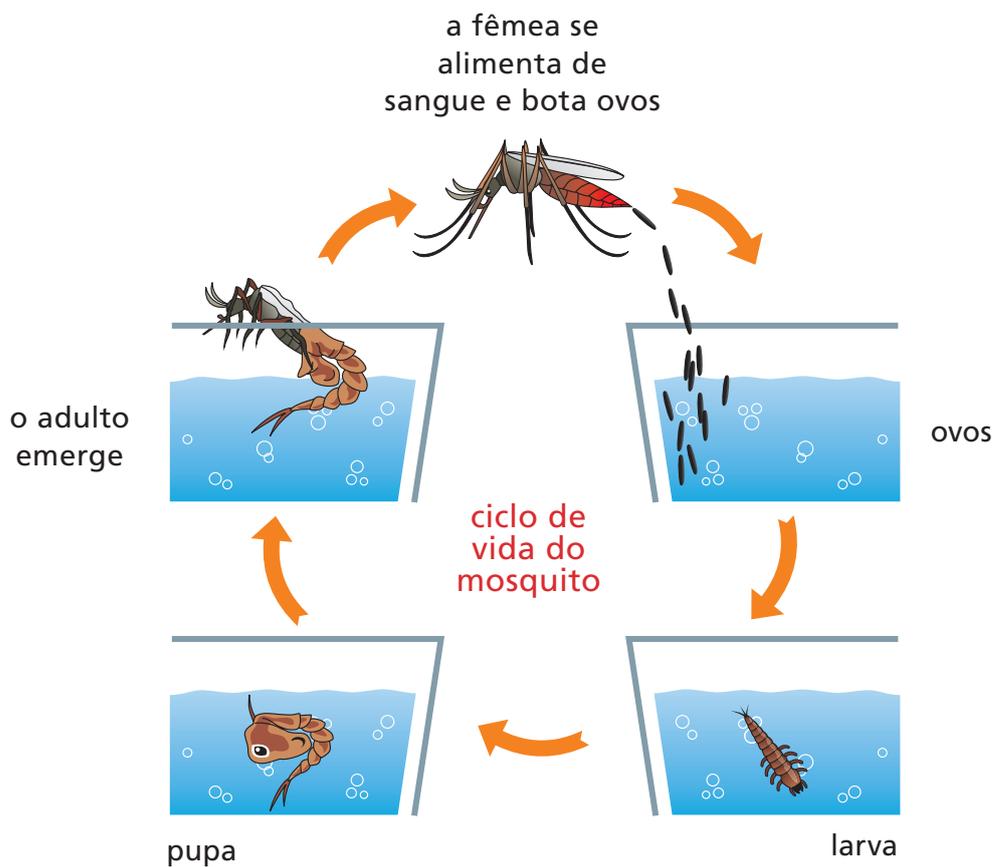
O sangue para transfusão pode ser irradiado com fontes de cobalto-60: baixas doses eliminam linfócitos, que poderiam ser rejeitados pelo paciente que recebe o sangue; doses mais altas matam micro-organismos, mas é preciso tomar cuidados especiais para não deteriorar componentes importantes do sangue (por exemplo, manter o material congelado durante a irradiação).

Controle de insetos

Certos insetos constituem pragas que destroem lavouras ou causam doenças no ser humano. Uma das técnicas de controle é a SIT (do inglês *Sterile Insect Technique*, técnica de esterilização de insetos). A técnica é usada há cerca de 50 anos para controle de moscas da fruta e moscas tsé-tsé e está atualmente sendo testada no Brasil para controle do mosquito *Aedes aegypti*, transmissor de dengue, febre amarela, chikungunya e zika vírus.

Nesta técnica, cria-se em laboratório uma grande quantidade de mosquitos, e os machos são irradiados para que se tornem estéreis. No caso do *Aedes aegypti*, os machos são separados das fêmeas na fase de pupas, uma vez que as pupas fêmeas são maiores que as machos, sendo possível fazer uma filtração. A Figura III-4 mostra as fases de desenvolvimento do inseto.

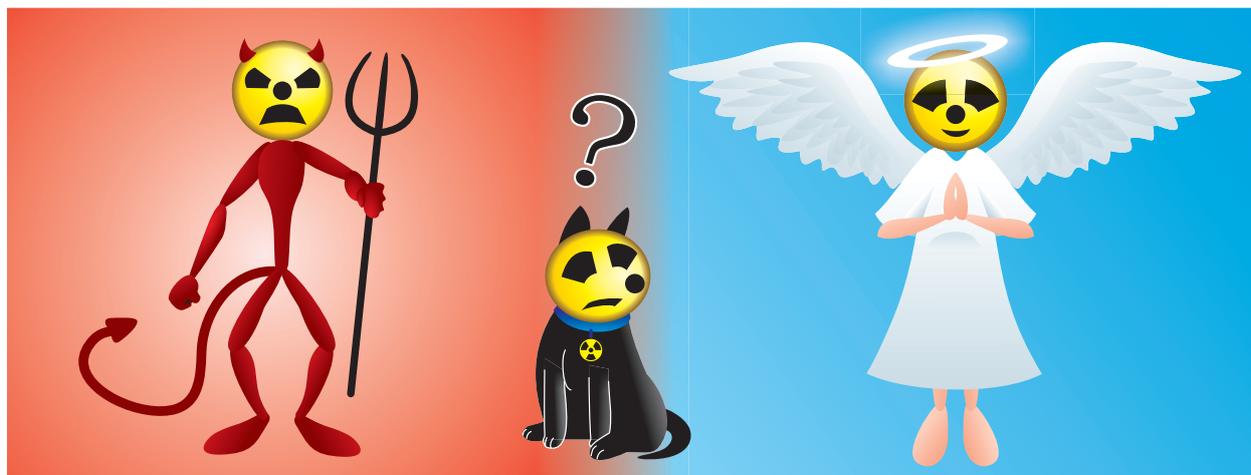
Figura III-4 – Fases de desenvolvimento de um mosquito



Depois de alcançarem a fase adulta, os insetos machos são submetidos à radiação γ , que, na dose correta, modifica o esperma do mosquito, tornando-o estéril, sem eliminar a sua capacidade de acasalamento. Os machos estéreis são soltos na natureza, onde competem com os machos selvagens no acasalamento. As fêmeas só acasalam uma vez na vida; portanto, se acasalar com um macho estéril, uma fêmea selvagem não vai gerar descendentes, e a população de mosquitos será reduzida.²⁹

²⁹ Informação gentilmente cedida pela professora Edvane Borges (UFPE).

IV - MITOS E VERDADES SOBRE A RADIOATIVIDADE



A radioatividade é uma característica atômica pouco conhecida da população em geral, e é comum encontrarmos afirmações parciais ou totalmente equivocadas sobre o assunto. Neste capítulo, procuramos esclarecer algumas dúvidas.

A radioatividade surgiu durante a Segunda Guerra Mundial: essa afirmação é falsa. Elementos radioativos existem na Terra desde a sua formação. Os radionuclídeos de meia-vida curta decaíram com o tempo, restando os que têm meia-vida maior que a idade da Terra (urânio, polônio, rádio, etc).

Existem também na natureza elementos radioativos com meia-vida mais curta, que são resultado, por exemplo, de colisões entre núcleos estáveis e partículas provenientes do vento solar. Um desses elementos é o carbono-14, formado na alta atmosfera quando o carbono-12 é bombardeado; tem meia-vida de 5.730 anos, e é usado na datação de fósseis pré-históricos.

A ideia de que a radioatividade surgiu durante a Segunda Guerra Mundial vem, talvez, do fato de que, durante o conflito, foi desenvolvida a bomba atômica, que usa a fissão do urânio para gerar uma grande quantidade de energia; essa fissão tem como subproduto uma série de elementos radioativos. No entanto, no início do século XX (e, portanto, antes dessa guerra), já existiam aplicações da radioatividade na Medicina.

A bomba atômica foi inventada por Einstein: essa é outra afirmação falsa. Einstein propôs a equação $E = Mc^2$, que relaciona os conceitos de massa e energia como duas manifestações da mesma propriedade da matéria.³⁰ A equação pode explicar, por exemplo, o aparecimento de energia na fissão de núcleos grandes, através da transformação de uma pequena quantidade de massa. Ela esclarece também como é feita a geração de energia no Sol e nas outras estrelas, por intermédio da fusão de pequenos núcleos, com transformação de pequenas quantidades de massa em grandes quantidades de energia.

³⁰ Diz-se que a equação de Einstein é a equação mais citada, e a menos compreendida, de toda a Física.

Qualquer material exposto à radiação se torna radioativo: isso depende das circunstâncias, e é preciso fazer uma distinção entre radiação ionizante e não ionizante. A radiação ionizante tem energia suficiente para ionizar os átomos onde incide, ou seja, arrancar elétrons desses átomos. Eventualmente, ela pode interagir também com os núcleos. Já a radiação não ionizante é aquela cuja energia não é suficiente para ionizar os átomos ou interagir com os núcleos.

Assim, a radiação não ionizante nunca é capaz de gerar material radioativo. Exemplos de radiação nessa categoria são as micro-ondas, luz visível, radiação ultravioleta ou infravermelha, ondas de rádio. Pequenas exposições a essa radiação podem ser benéficas, mas ela pode causar danos, se a exposição for muito intensa. Os danos são de natureza diferente dos provocados pela radiação ionizante. Esses tipos de radiação não são capazes de interagir com núcleos e gerar elementos radioativos.

Já a radiação ionizante tem energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos ou interagir diretamente com os núcleos. No caso de interação com os núcleos, podem ser gerados núcleos instáveis, que decaem para um estado de mais baixa energia emitindo fótons ou partículas; porém, isso depende do tipo de radiação, da sua intensidade e do tipo de material irradiado.

Comida preparada num forno de micro-ondas fica radioativa e pode provocar câncer: essa afirmação é falsa. As micro-ondas são ondas eletromagnéticas de comprimento de onda maior que o da luz visível (frequência menor e, portanto, energia menor). Trata-se, portanto, de radiação não ionizante, que não tem energia suficiente para interagir com os núcleos dos átomos em que incide. Essa radiação interage com certas moléculas dos alimentos aumentando sua energia de vibração, ou seja, aquecendo os alimentos. Da mesma forma, se incidir diretamente sobre uma pessoa, a radiação de micro-ondas pode provocar queimaduras.

Se se tornar radioativo, um material será radioativo para sempre: essa é mais uma falsa afirmação. Suponhamos que um objeto foi irradiado com nêutrons ou partículas carregadas, e que alguns de seu átomos se transformaram em radioisótopos. Nesse caso, existe a possibilidade de se fazer uma extração química ou física dos elementos em questão, e o resto do objeto não será radioativo. Mesmo que esse procedimento não seja possível, a radioatividade não dura “para sempre”, já que radioisótopos têm meias-vidas bem definidas. Depois de decorridas entre 5 e 10 meias-vidas, considera-se que não há mais atividade desse elemento. Apenas se a meia-vida do elemento formado for muito longa é que o objeto será radioativo por um longo período.

Uma pessoa que sofreu danos por radiação pode contaminar outras pessoas: essa afirmação nem sempre é verdadeira. Os danos por radiação vão desde queimaduras na pele até lesões internas e alterações no DNA. As lesões não são transmitidas; somente alterações nas células reprodutivas podem gerar algum efeito danoso nos descendentes.

Em geral, as pessoas que sofreram danos por radiação devem ser isoladas porque sua imunidade fica diminuída; são as outras pessoas do seu entorno que podem contaminá-las com micro-organismos que elas não serão capazes de combater.

Se foi contaminada por ingestão ou inalação de algum radioisótopo, e se este continua em seu organismo, a pessoa estará radioativa; neste caso, as pessoas de seu entorno precisam se proteger, e as secreções devem ser isoladas, por um período equivalente a 5 a 10 meias-vidas do radioisótopo. No caso da meia-vida biológica para o elemento em questão ser menor que a sua meia-vida física, a pessoa será descontaminada mais rapidamente.

Qualquer nível de radiação faz mal à saúde: isso não é verdade. Nosso organismo recebe continuamente radiação ionizante proveniente de fontes naturais, existentes na superfície do globo terrestre ou vindas do espaço. Ele se adaptou para conviver com essa radiação de fundo, e se atribuem a ela as mudanças genéticas que provocaram a evolução do ser humano. Em doses baixas, portanto, a radiação pode ser inócua ou até benéfica. Em doses elevadas, a radiação ionizante pode provocar destruição de células ou modificações no DNA.

Além disso, a radiação pode ser usada como instrumento de diagnóstico ou de tratamento de vários problemas de saúde, sendo nesse caso benéfica, desde que seu uso seja controlado.

Por outro lado, radiação não ionizante pode ser benéfica e até necessária ao desenvolvimento dos seres vivos: as plantas absorvem radiação visível, infravermelha e ultravioleta, em pequenas doses, para realizar a fotossíntese, em que transformam água e gás carbônico em matéria orgânica; pessoas precisam de pequenas doses dessas mesmas radiações, provenientes do Sol, para o bom funcionamento do seu corpo.

Ingerir iodo não radioativo neutraliza os efeitos da radioatividade: isso depende das circunstâncias. O iodo, quando ingerido, acumula-se principalmente nas glândulas tireoides. Essas glândulas absorvem o elemento até se tornarem saturadas, quando não ocorre mais absorção.

A ingestão de pastilhas de iodo pode, então, ser recomendada se houver contaminação do ambiente por esse elemento, causada, por exemplo, num acidente em usina nuclear, com perda de material combustível. A pastilha de iodeto de sódio não radioativo pode impedir a incorporação do isótopo radioativo na tireoide, desde que seja administrada antes da incorporação no organismo de iodo radioativo.

A radioatividade, porém, pode ser proveniente de outros elementos radioativos, e nesse caso a ingestão das pastilhas é inútil.

Pessoas que recebem a mesma dose de radiação apresentam o mesmo tipo de dano: tal afirmação não é verdadeira. Verifica-se que o dano causado pela radiação é diferente para cada pessoa, dependendo de diversos fatores: idade, sexo, estado físico. As crianças são mais sensíveis à radiação porque seus órgãos estão em fase de crescimento, e alguns efeitos biológicos podem ter resposta com intensidade ou tempo diferentes dos de um adulto.

O estado físico do indivíduo exposto à radiação influencia na radiosensibilidade. Se uma pessoa é forte, resistente, bem alimentada, sua resposta aos possíveis danos da radiação será atenuada quando comparada à de uma pessoa fraca, subalimentada e com deficiência imunológica.

V - ATIVIDADES



Questões para discussão

- 1) Relate um caso de uso da radiação no seu dia a dia.
- 2) Relate um caso de uso da radiação na Medicina, ao qual você ou algum conhecido já tenha se submetido.
- 3) A radioatividade pode ser considerada não natural?
- 4) O que tem sido feito com os resíduos das aplicações nucleares?
- 5) Uma substância radioativa tem, inicialmente, um número N_0 de partículas radioativas. Qual será o número de partículas radioativas depois de decorrida uma meia-vida? E depois de decorridas duas meias-vidas?

Prepare-se para discutir essas questões em sala de aula; para isso, faça uma pesquisa usando as fontes recomendadas no final do livro, entrevistas com seus conhecidos e familiares, ou outras fontes interessantes.

Simulação de um decaimento radioativo

Os físicos descobriram uma nova partícula, os *chocolátons*, e vamos investigar suas propriedades. Uma dessas partículas, denominada “M&M”, tem a propriedade interessante de que tende a decair, isto é, tende a desaparecer, mas de forma muito especial, que veremos no seguinte experimento.

Material necessário

Um pacote grande de chocolates “M&M”³¹
Uma bandeja com bordas elevadas

Procedimento

- a) Obtenha e conte uma quantidade inicial de *chocolátons*. Anote a contagem como $C(0)$.
- b) Despeje as partículas numa bandeja. Quando os “M&Ms” perdem sua energia e entram em repouso, você notará que algumas das partículas estão diferentes. Alguns “M&Ms” têm

³¹ Os chocolates podem ser substituídos por moedas.

um “M” branco visível. Tais partículas decaíram e agora são comestíveis (coma todos os “M&Ms” que estão com o “M” para cima).

c) Conte o número de *chocolátons* que sobraram (os que estão com o “M” para baixo). Anote o número como C(1).

d) Repita os passos b) e c), mudando o número da contagem para C(2), C(3), etc., até completar 10 contagens ou até acabarem os *chocolátons* (se as partículas acabarem, não inclua a contagem zero nas suas anotações).

e) Faça um gráfico do número de “M&Ms” restantes em função do número de lançamentos. Isto é, o número de “M&Ms” ficará no eixo-y (variável dependente), e o número de contagens no eixo-x (variável independente).

Trace uma curva suave ligando os pontos. Essa será a curva de decaimento dos seus doces.

f) A meia-vida das partículas é o número de lançamentos necessários para que metade do número inicial de partículas tenha decaído. Qual a meia-vida dos *chocolátons*? Compare seus resultados com os dos seus colegas, levando em conta que eles começaram com um número diferente de partículas.

(adaptado de: **Science snacks – Radioactive-decay Model** em www.exploratorium.edu - acesso em: maio/2017)

Agora repita seu experimento usando outras partículas, os *dádions*:

Material

100 ou mais dados de jogar
1 bandeja de bordas elevadas
1 cartolina branca

Procedimento

a) Jogue seus *dádions* sobre a bandeja. Separe os que tiverem caído com o número 6 para cima: esses são os que “decaíram”.

b) Faça uma coluna com os *dádions* que decaíram, no canto esquerdo da cartolina.

c) Recolha os *dádions* que ficaram na bandeja, misture-os e jogue novamente. Haverá um novo conjunto que caiu com o número 6 para cima.

d) Faça uma nova coluna com os *dádions* que decaíram no item c), colocando-a à direita da primeira.

e) Repita os passos c) e d) até completar 10 colunas, ou até acabarem os *dádions*.

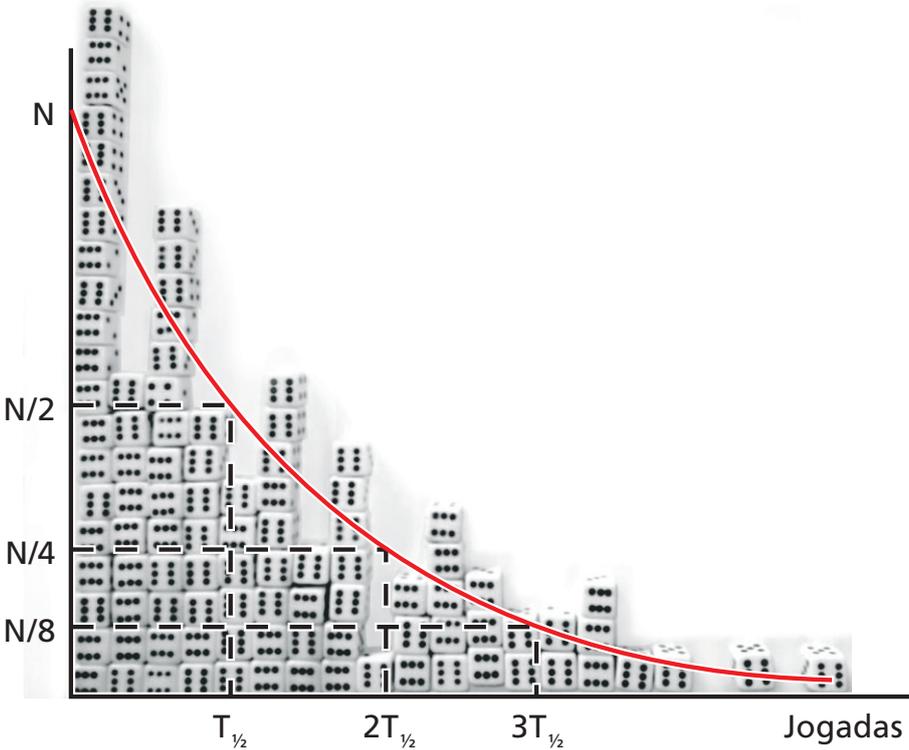
f) Analise a figura formada sobre a cartolina: ela representa a curva de decaimento dos *dádions*, onde o número de jogadas está no eixo horizontal, e o número de partículas que decaíram está no eixo vertical (FIGURA V-1).

g) Com base na figura obtida, determine a meia-vida dos *dádions*. Quais as semelhanças e as diferenças entre o decaimento dos *chocolátons* e dos *dádions*?³²

³² Observe que as grandezas medidas são diferentes nos dois experimentos: para os chocolates, foi medida a quantidade de “partículas” que não decaíram, ao passo que, em relação aos dados, foi medida a quantidade de “partículas” que decaíram. As duas quantidades, no entanto, seguem a mesma lei de decaimento, e por isso os gráficos são semelhantes. Nas medidas reais, o que se tem é a quantidade de partículas que decaíram.

Figura V-1 – Curva de decaimento dos *dádions*

© Regina P. Carvalho



APÊNDICES

A1 - Unidades de medida de radiação

A **atividade** de uma amostra radioativa é medida como o número de desintegrações ocorridas em certa unidade de tempo.

A unidade de medida de atividade mais antiga é o curie (Ci), que expressa a atividade de 1g do elemento rádio:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

A unidade SI para atividade é o becquerel:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$$

A **exposição** a uma fonte radioativa é a capacidade de ionização dessa fonte. Ela é expressa como a carga produzida por massa de ar puro e seco. A unidade SI para exposição é dada em coulombs por quilograma de ar:

$$\text{C/kg}$$

A unidade mais comumente usada é o roentgen:

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

A **dose absorvida** é expressa como a energia cedida pela radiação para uma certa quantidade de massa do absorvedor. A unidade mais usada é o rad (do inglês *radiation absorbed dose*, dose de radiação absorvida):

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ J/kg}$$

A unidade SI para dose absorvida é o Gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$$

A **dose equivalente** é a energia absorvida por um tecido biológico; ela leva em conta o efeito causado no tecido por cada tipo de radiação. A unidade mais usada é o rem (do inglês *roentgen equivalent man*, equivalente humano do roentgen) e é obtida multiplicando-se a exposição dada em roentgen por um fator que depende do tipo de radiação, o RBE (do inglês *Relative Biological Effectiveness*, efetividade biológica relativa):

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \cdot \text{RBE}$$

A unidade SI para a dose equivalente é o sievert (Sv):

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ Gy} \cdot \text{RBE}$$

A **dose efetiva** considera os efeitos epidemiológicos devidos à dose equivalente nos diversos órgãos, através de um parâmetro w que varia para cada órgão do corpo e é obtido nas estatísticas de incidência de câncer causado por radiação. A unidade de medida para a dose efetiva é também o sievert.

A2 - Formação de imagens cintilográficas

Após a administração de um radiofármaco, este se acumula em determinados órgãos do paciente, emitindo radiação. Os fótons γ são absorvidos por um cristal, que usa a energia absorvida para emitir luz visível ou ultravioleta, no processo chamado de cintilação. A luz visível é então transformada em sinal elétrico, em um conjunto de pequenas fotomultiplicadoras. Um computador faz o processamento dos sinais elétricos e calcula um par de sinais eletrônicos, representando as coordenadas espaciais x e y , que fornecem a posição correspondente à emissão do fóton. Temos assim uma imagem cintilográfica, que pode ser usada para diagnóstico.

Sistemas para aquisição de imagens planas

A imagem cintilográfica de um órgão do paciente é formada por meio da análise dos fótons γ emitidos pelo radiofármaco ali acumulado. No entanto, uma parte desses fótons é absorvida pelos tecidos ou espalhada por efeito Compton, antes de chegar ao sistema de detecção. É necessário que a emissão passe por um conjunto de **colimadores**, pequenos cilindros de chumbo que permitem que sejam coletados somente os fótons emitidos em dada direção.

A imagem é, portanto, obtida pela exclusão de uma grande parte da radiação emitida pelo radiofármaco incorporado pelo paciente. Há baixa densidade de fótons nas imagens, porque os fótons absorvidos ou espalhados pelos tecidos são eliminados. A geometria do colimador tem influência na eficiência de detecção dos fótons não espalhados. Essa eficiência geométrica varia diretamente com o tamanho da abertura e indiretamente com o comprimento e a espessura do cilindro colimador.

Os fótons γ selecionados atingem então o **cristal cintilador**. A espessura do cristal é importante: ele não pode ser muito fino, para que os fótons γ entreguem toda sua energia a ele, produzindo luz visível ou ultravioleta, que vai interagir com as fotomultiplicadoras; ao mesmo tempo, se o cristal for muito espesso, os fótons de luz visível podem não alcançar a fotomultiplicadora. Os detectores, em sua maioria, utilizam o iodeto de sódio dopado com tálio, NaI(Tl).

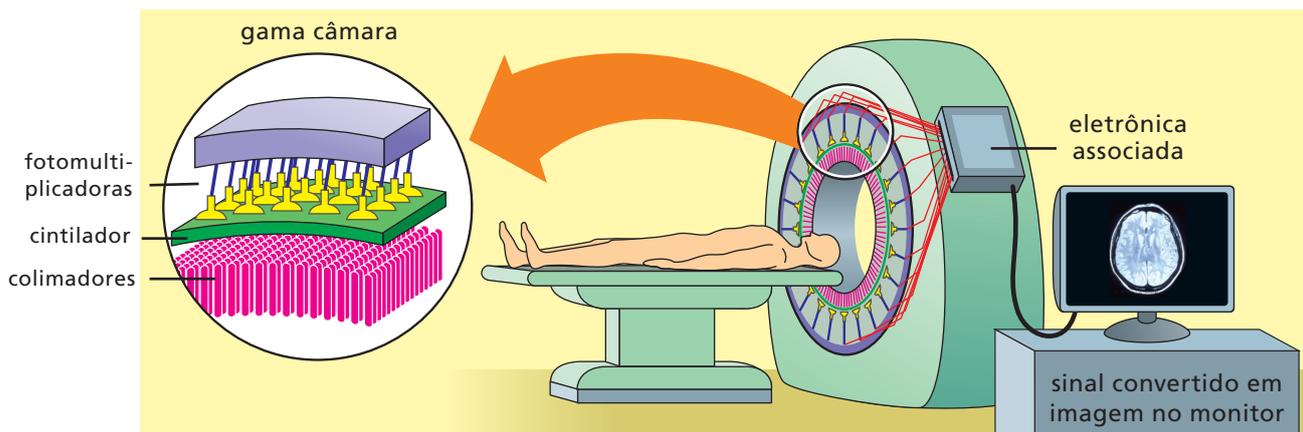
Junto ao cristal encontram-se as **fotomultiplicadoras**, acopladas ao cristal com graxa óptica, material que as mantém fixas e é transparente aos fótons gerados no cristal.³³ Quando estimuladas por poucos sinais de luz ou até mesmo por partículas β , elas produzem pulsos elétricos. Usualmente o conjunto cristal-fotomultiplicadoras é conhecido como detector de cintilação, ou “cabeça de detecção”. O sistema é acoplado de maneira que haja a menor perda por reflexão. A luz incide no fotocatodo, liberando elétrons de baixa energia, que são acelerados, em razão da aplicação de uma diferença de potencial entre o fotocatodo e o primeiro dinodo. Ao se chocarem com o dinodo, os elétrons provocam a liberação de um número maior de elétrons, que também serão acelerados para o segundo dinodo, e assim sucessivamente. Os elétrons produzidos nas fotomultiplicadoras são coletados e produzem um pulso de corrente que pode ser medido por um circuito eletrônico adequado.

O conjunto de colimadores, cristal cintilador e fotomultiplicadoras é chamado de **gama câmara**.

O pulso emitido pelas fotomultiplicadoras é analisado mediante um processamento eletrônico. O analisador de altura de pulso (*PHA*, do inglês *Pulse Height Analyzer*) descarta sinais de radiação ambiente, retroespalhada ou de emissão de energias diferentes da estipulada pela janela de energia de interesse, determinando assim quando um pulso representa um fóton que deverá ser computado para a formação da imagem.

O sistema de aquisição utilizado para a formação da imagem é ilustrado na Figura A2-1.

Figura A2-1 – Esquema do sistema de detecção de uma gama câmara



Baseada em: WAGENNAR, Douglas J. **Gamma camera basics**. Joint Program in Nuclear Medicine, March 1996. Disponível em: <<http://www.med.harvard.edu/JPNM/physics/didactics/basics.html>>. Acesso em: maio 2017.

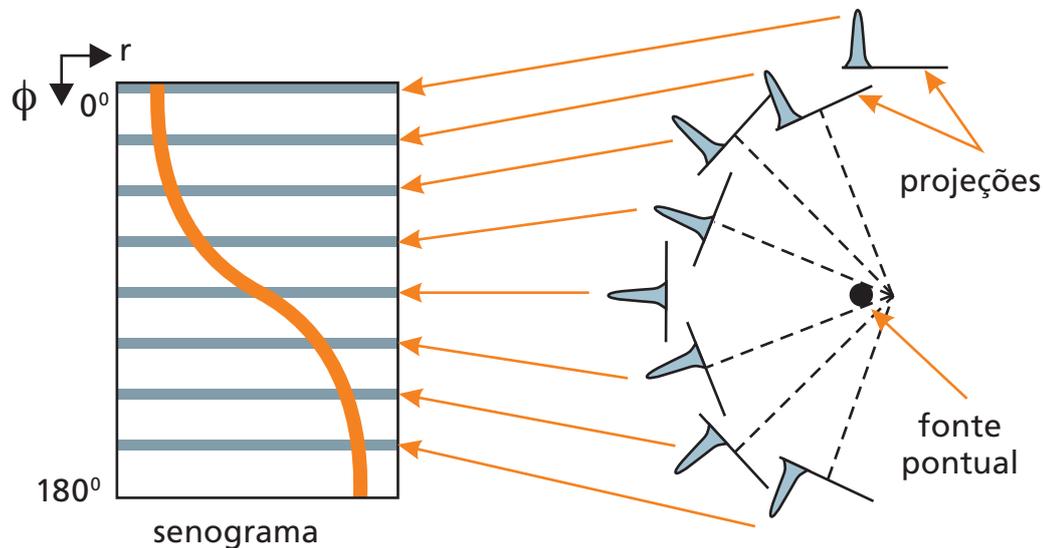
Método tomográfico SPECT

A tomografia computadorizada por emissão de fóton único (SPECT, do inglês *Single-photon emission computed tomography*) é uma técnica de obtenção de imagens muito semelhante à obtenção de imagem plana já descrita: ela usa uma gama câmara que detecta a radiação emitida pelo radiofármaco absorvido no órgão em observação. Usando-se esta técnica, porém, podem ser obtidas imagens em planos com diferentes orientações, apresentadas como cortes ou reconstruídas para representar uma visão em 3 dimensões.

³³ A grande quantidade de equipamento eletrônico eleva a temperatura da sala de exame. Ela deve ser resfriada para evitar o derretimento e a perda da graxa óptica.

Na aquisição pelo método SPECT, as imagens obtidas são projeções da fonte interna ao paciente. O sistema de detecção realiza uma rotação ao redor do paciente, coletando essas projeções e armazenando as informações em cada ângulo. A forma mais conhecida de apresentação dessas projeções é o senograma, também conhecido como transformada de Radon, que é uma função das intensidades (contagens) ao longo dos ângulos de projeção (FIGURA A2-2).

Figura A2-2 – Senograma obtido com base nas projeções de uma fonte pontual, com aquisições de 0° a 180°



ZANZONICO, Pat. Routine quality control of clinical nuclear medicine instrumentation: a brief review. **Journal of Nuclear Medicine**, v.49, n. 7, p.1114-1131, Jul. 2008.

As informações fornecidas pelo senograma são utilizadas para se obter uma imagem do objeto em três planos anatômicos (coronal, sagital e axial).³⁴ Quanto maior o número de projeções adquiridas, melhor e mais próxima da imagem original será a imagem resultante.

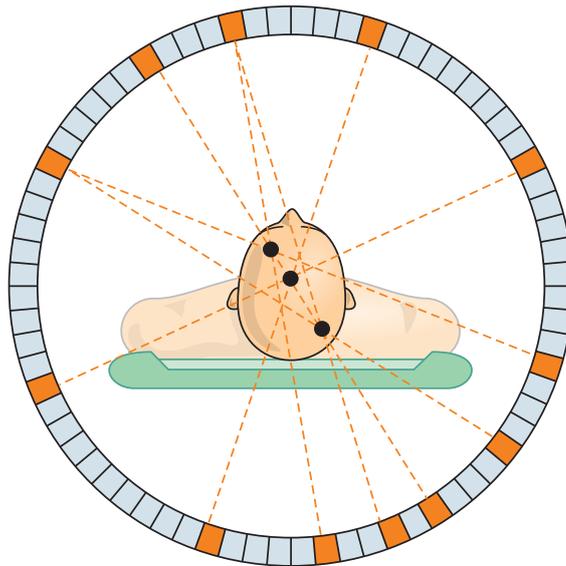
Tomografia por emissão de pósitrons

Na tomografia por emissão de pósitrons (PET, do inglês *Positron Emission Tomography*), é injetado no paciente um radiofármaco emissor de pósitrons, e analisam-se os fótons γ provenientes da aniquilação de um pósitron com um elétron da vizinhança.³⁵ A detecção é feita por um conjunto de cintiladores dispostos em anel (FIGURA A2-3). Quando há uma aniquilação, dois fótons diametralmente opostos atingem os detectores, gerando um sinal eletrônico. Isso ocorre apenas se os fótons se deslocam no plano do anel de detectores. Pulsos simultâneos em dois detectores opostos (coincidência) indicam que ocorreu uma aniquilação.

³⁴ Um plano coronal divide o corpo em partes anterior e posterior; um plano sagital divide o corpo em partes direita e esquerda; um plano axial divide o corpo em porções superior e inferior.

³⁵ No processo de aniquilação, descrito no Capítulo II, um pósitron encontra um elétron, e as duas partículas se aniquilam, gerando dois fótons com energia de 0,511 MeV cada um, correspondentes às massas das partículas. Os fótons se deslocam em direções opostas.

Figura A2-3 – Esquema de um anel de detecção para análise PET



LINKS, Jonathan M. Instrumentation. em: BERNIER, Donald R.; CHRISTIAN, Paul.E.; LANGAN, James K. (ed.). **Nuclear Medicine technology and techniques**. 3. ed. St. Louis: Mosby-Year Book, Inc., 1994.

Os cristais cintiladores mais utilizados como detectores em equipamentos PET são o BGO (germanato de bismuto), LSO (oxiortosilicato de lutécio) e GSO (oxiortosilicato de gadolínio).

A imagem obtida com a técnica PET pode ser distorcida pelo fato de que os fótons são atenuados ao atravessar o corpo do paciente. Para corrigir esse efeito, ela é combinada com a tomografia computadorizada (CT, do inglês *Computed Tomography*). Nesta, são obtidas imagens radiográficas de “fatias” da região de interesse, que podem ser processadas para formar uma imagem tridimensional. A CT fornece informações sobre a densidade dos tecidos atravessados pelos fótons γ , e os efeitos da atenuação podem ser corrigidos. A Figura A2-4 mostra um detalhe do equipamento CT-PET.

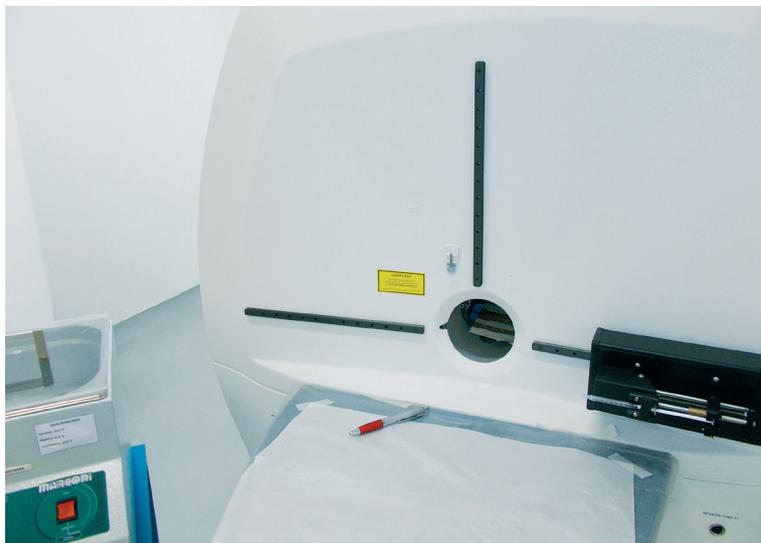
Figura A2-4 – Equipamento CT-PET (Faculdade de Medicina da UFMG)



Equipamento para pesquisa de novos radiofármacos

O teste para uso de novos radiofármacos passa por testes laboratoriais e em cobaias. A Figura A2-5 mostra o equipamento CT-PET usado no teste de radiofármacos em pequenos animais.

Figura A2-5 – Equipamento CT-PET usado para testes em pequenos animais (CDTN/CNEN)



© Regina P. Carvalho

A caneta colocada próximo ao equipamento dá ideia da dimensão de sua abertura.

A3 - Doses de radiação em procedimentos médicos

As doses absorvidas em órgãos podem ser causadas por irradiações externas (em diagnóstico com raios X e em terapia com aceleradores lineares ou fontes para braquiterapia) ou irradiações internas (com radiofármacos, tanto para diagnóstico como para terapia). Quando a fonte de irradiação é externa, é possível verificar-se a dose absorvida no órgão-alvo. No caso de incorporação de radionuclídeos, as doses não podem ser medidas diretamente nos órgãos, mas há a possibilidade de estimá-las com base em modelos ou em biodosimetria.

As doses de radiação absorvidas durante um procedimento médico podem originar efeitos **estocásticos** ou **determinísticos** da radiação. Em geral, doses em procedimentos diagnósticos têm a probabilidade de causar efeitos estocásticos, ao passo que, em procedimentos terapêuticos (tratamento), podem provocar efeitos determinísticos controlados. Por essa razão, a proteção do paciente tem sido enfatizada pela IAEA (*International Atomic Energy Agency*, Agência Internacional de Energia Atômica) visando garantir a segurança dos procedimentos.

Em todo exame que usa radiação ionizante, leva-se em conta a dose recebida pelo paciente, que deve ser sempre a mínima necessária. O profissional de saúde vai avaliar a necessidade do exame, o tempo que deve decorrer antes da sua repetição, a dose a ser administrada. O uso de detectores mais sensíveis permite a administração de doses mais baixas, sendo importante avaliar a razão custo-benefício para o paciente.

Efeitos estocásticos das radiações ionizantes – probabilidade proporcional à dose

Os efeitos estocásticos não têm limiares de doses e ocorrem quando a célula é modificada por dano no seu DNA, porém permanece viável (isto é, com capacidade de divisão por mitose), e o dano eventualmente aparece através da proliferação celular. Os efeitos estocásticos das radiações são câncer após um período de latência de muitos anos (por exemplo, de 2 a 10 anos para leucemia e de 10 a 40 anos para tumores sólidos) e defeitos hereditários severos. O risco de câncer depende do tecido irradiado, e, portanto, os órgãos e os tecidos com maior reprodução celular são mais radiosensíveis. Esses

efeitos são fortemente dependentes da idade do indivíduo no momento da irradiação e, conseqüentemente, da expectativa de vida.

Para representar a probabilidade de efeitos estocásticos em uma população, é usada a grandeza **dose efetiva**. A unidade de medida é o sievert (Sv), e 1 mSv indica a probabilidade de ocorrência de um efeito estocástico para cada 100 mil pacientes.

Efeitos determinísticos das radiações ionizantes – severidade proporcional à dose

Os efeitos determinísticos ocorrem quando há perda da função do órgão ou do tecido, por morte celular ou danos intracelulares, ou perda da capacidade de divisão das suas células (mitose). O número de células afetadas aumenta proporcionalmente com a dose de radiação, e a perda funcional do tecido torna-se evidente acima de um **limiar de dose**, que é específico para cada tecido. Em terapias, os limiares de doses absorvidas em órgãos ou tecidos podem ser propositalmente excedidos no tecido-alvo (tumor). Os efeitos determinísticos são influenciados por taxas de doses, sendo que taxas menores possibilitam tempo suficiente para ações de recuperação (mecanismos de reparo e repopulação celular). Medula óssea, gônadas e lentes dos olhos são os tecidos mais sensíveis para efeitos determinísticos.

Dosimetria

No que diz respeito a procedimentos diagnósticos, é possível trabalhar com segurança baseando-se em protocolos de rotina que utilizam estimativas de doses para grupos homogêneos de pacientes, estabelecidas por ocasião de ensaios clínicos. Em relação aos radiofármacos, as doses absorvidas para cada órgão ou tecido podem ser estimadas valendo-se de dados publicados ou medindo diretamente a atividade do radionuclídeo no corpo humano, por meio de métodos de Biodosimetria (coleta de amostras biológicas) ou quantificação da atividade através de um conjunto de imagens.

No caso da Radioterapia, levam-se em conta, ao mesmo tempo, a segurança do paciente e a garantia da qualidade dos tratamentos; são feitos planejamentos com dados complexos de imagens, para que a dose liberada no volume-alvo seja a máxima possível, mas poupando as estruturas normais adjacentes e considerando a probabilidade de complicação de tecido normal.

Quando as doses não podem ser medidas diretamente, são usados simuladores, que representam tamanho e composição dos órgãos de adultos, adolescentes ou crianças, com base em estudos anatômicos de populações. Por meio desses simuladores, podem-se calcular todas as interações físicas da radiação com o meio absorvedor e construir fatores de conversão da atividade administrada em doses absorvidas em órgãos e tecidos. Esses fatores dependem do tipo de radiação, da energia emitida por interação, da massa do órgão-alvo e da geometria dos simuladores.

A disponibilidade de dados de indivíduos submetidos a tomografias computadorizadas permitiu desenvolver simuladores tridimensionais para representar indivíduos reais, e não apenas um indivíduo médio dentro de uma população. Os avanços na tecnologia dos equipamentos e dos sistemas de aquisição de imagens permitem que os métodos de dosimetria sejam aperfeiçoados. Desta forma, incertezas nas estimativas de doses individuais podem ser reduzidas.

SUGESTÕES DE LEITURA

Os conceitos de Física Nuclear e suas aplicações, discutidos neste livro, podem ser encontrados em livros básicos, como, por exemplo:

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Física**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. v. 4.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

LUZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ALVARENGA, Beatriz Gonçalves de. **Física**: volume único. São Paulo: Scipione, 1997.

OKUNO, Emico. **Radiações**: efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: Harbra, 1988.

OKUNO, Emico; YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

PIRES, Antônio Sérgio Teixeira; CARVALHO, Regina Pinto de. **Por dentro do átomo**: física de partículas para leigos. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

TAUHATA, Luiz *et al.* **Radioproteção e dosimetria**: fundamentos. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2014.

ZAMBONI, Cibele Bugno. (Coord.). **Fundamentos da física de nêutrons**. São Paulo: Livraria da Física, 2007.

Algumas páginas da *internet* oferecem informação sobre a energia nuclear e suas aplicações:

a) Páginas em português:

CARDOSO, Simone Coutinho; BARROSO, Marta Feijó. **Rápida introdução à física das radiações**. Rio de Janeiro: UFRJ. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/~marta/cederj/radiacoes/>>. Acesso em: maio 2017.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Saúde**. Disponível em: <<http://www.cdtm.br/saude>>. Acesso em: maio 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Material de aula**. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=132>. Acesso em: maio 2017.

NOUAILHETAS, Yannick. **Radiações ionizantes e a vida**: apostila educativa. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/radiacoes-ionizantes.pdf>>. Acesso em: maio 2017.

b) páginas em inglês:

AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION. **Production and decay of radioisotopes**: a resource for NSW HSC chemistry and physics teachers and students. Nov. 2011. Disponível em: <http://ansto.gov.au/__data/assets/pdf_file/0004/63229/Production_and_Decay_of_Radioisotopes.pdf>. Acesso em: maio 2017.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Cyclotron produced radionuclides**: principles and practice. Viena: IAEA, 2008. (Technical reports series, n. 465). Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs465_web.pdf>. Acesso em: maio 2017.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Publications**. Disponível em: <<http://www.icrp.org/publications.asp>>. Acesso em: maio 2017.

NUCLEAR SCIENCE WALL CHART. **Guide to the Nuclear Wall Chart**. Disponível em: <<http://www2.lbl.gov/abc/wallchart/guide.html>>. Acesso em: maio 2017.

PODGORSK, E. B. (Ed.) **Radiation oncology physics**: a handbook for teachers and students. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1196_web.pdf>. Acesso em: maio 2017.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Publications**. Disponível em: <<http://www.unscear.org/unscear/en/publications.html>>. Acesso em: maio 2017.



Regina Pinto de Carvalho é professora e pesquisadora aposentada do Departamento de Física da UFMG, onde sempre procurou divulgar a Física em todos os níveis, por meio da orientação de estudantes ou treinamento de futuros professores. Essa preocupação continua até hoje, dentro e fora da Universidade, com a capacitação de professores e a publicação de livros de popularização da Física ou de apoio ao professor do ensino médio. Regina nasceu em Belo Horizonte, em 1950, onde vive atualmente, depois de ter trabalhado e estudado em outras cidades do Brasil e do exterior. Tem dois filhos e três netos.

Silvia Maria Velasques de Oliveira é graduada em Física pela UFRJ e doutora em Biologia pela UERJ. É pesquisadora aposentada da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), onde trabalhou em licenciamento, normatização e fiscalização de instalações médicas e industriais e realizou pesquisas em Física Médica e Dosimetria Individual. Foi consultora da Agência Internacional de Energia Atômica para controle de fontes de radiação e ministrou diversos cursos para estudantes e para profissionais no país e no exterior.

Este livro foi composto com tipografia Bembo Std 13/16 .

“Muitos dos maiores avanços feitos desde o início [do desenvolvimento da Ciência] até os tempos atuais partiram do desejo de transformar o conhecimento das propriedades da matéria em algo útil para a humanidade.”
(Lord Kelvin)



MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES**

