

5.3 — LEIS DA DESINTEGRAÇÃO RADIOATIVA

Numa desintegração radioativa, o núcleo emite espontaneamente uma partícula alfa (um núcleo de ${}^4_2\text{He}$), uma partícula beta (um elétron ou um pósitron) ou um raio gama (um fóton), adquirindo, assim, uma configuração mais estável.

5.3.1 — Meia-vida ($T_{1/2}$)

Uma fonte radioativa contém muitos átomos e não há modo de dizer quando um dado núcleo irá se desintegrar. Entretanto, em média, pode-se prever que após um dado intervalo de tempo, chamado *meia-vida* ($T_{1/2}$), metade dos núcleos (portanto, metade dos átomos) ter-se-á desintegrado. Na próxima meia-vida, metade dos átomos remanescentes irá sofrer decaimento. Cada radioisótopo tem uma meia-vida característica. Um radioisótopo irá sofrer decaimento mais lentamente que aquele com uma meia-vida curta.

As meias-vidas $T_{1/2}$ dos radioisótopos variam de um segundo a muitos milhões de anos. Entretanto, a meia-vida dos radioisótopos com aplicação na Biologia deve estar dentro de um certo intervalo de tempo limitado. Por exemplo, a meia-vida do ${}^{131}\text{I}$, usado no estudo do funcionamento da tireóide, é de 8 dias, enquanto que a do ${}^{15}\text{O}$, empregado na investigação respiratória, é de 2,1 minutos e a do ${}^{14}\text{C}$, utilizado na pesquisa de comportamento metabólico de proteínas, açúcares e gorduras, é de 5 760 anos.

Exemplo 5.1 — Seja uma fonte de ouro radioativo (${}^{198}\text{Au}$), inicialmente, com 100×10^6 átomos. Sua meia-vida é de 2,7 dias. Portanto, passados 2,7 dias, a fonte radioativa terá 50×10^6 átomos; após $2 \times 2,7$ dias acima referidos.

Solução

Na Figura 5.1 pode ser visto o decaimento exponencial da fonte.

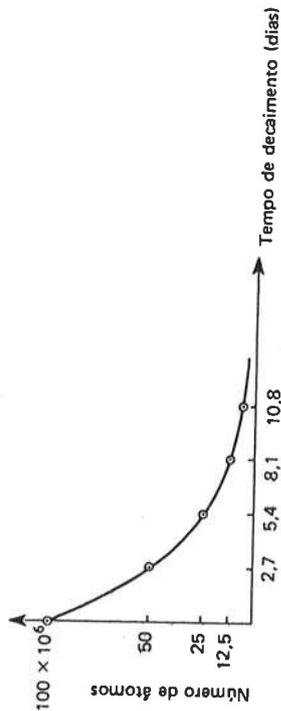


Figura 5.1 — Gráfico do decaimento exponencial de uma fonte de ${}^{198}\text{Au}$ radioativo, com escalas lineares.

Diz-se que esse tipo de curva apresenta um decaimento exponencial com o tempo. O fato de desintegração radioativa seguir a lei exponencial é uma indicação de que tal fenômeno é de natureza estatística: cada núcleo em uma amostra de material radioativo possui uma certa probabilidade de desintegração, mas não há um meio de se conhecer, antecipadamente, qual núcleo se desintegrará num dado intervalo de tempo.

Se os mesmos dados do Exemplo 5.1 forem colocados num papel de gráfico semilogarítmico (na qual a escala vertical é logarítmica e a horizontal linear, em vez de se obter uma curva, obter-se-á na reta. Esse gráfico pode ser visto na Figura 5.2).

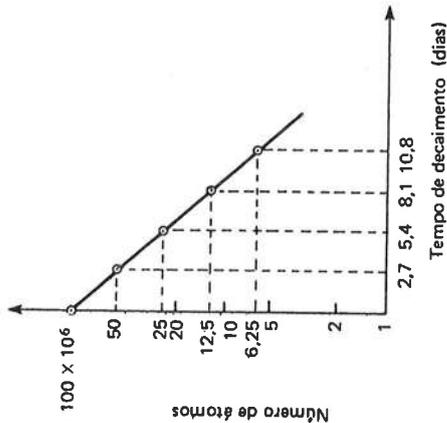


Figura 5.2 — Gráfico do decaimento exponencial de uma fonte de ${}^{198}\text{Au}$ radioativo com escala de tempo linear e escala do número de átomos logarítmica (gráfico semilogarítmico).

5.3.2 — 1.ª expressão matemática

Uma maneira de representar matematicamente o decaimento exponencial, conhecendo-se a constante de decaimento λ , ou seja, a probabilidade de desintegração por unidade de tempo, é através da equação

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5.1)$$

onde N_0 é o número de átomos inicialmente presentes, N o número de átomos que ainda não se desintegraram após um intervalo de tempo t e e é a base dos logaritmos naturais ou neperianos. Cada radioisótopo possui um λ característico.

5.3.3 — 2.ª expressão matemática

Uma outra expressão matemática para o número N de átomos radioativos que ainda não se desintegraram após um tempo t , conhecendo-se a meia-vida $T_{1/2}$ e o número N_0 de átomos presentes no instante $t = 0$ é

$$N = \frac{N_0}{2^{t/T_{1/2}}} = N_0 [2^{-(t/T_{1/2})}] \quad (5.2)$$

Calculando N para $t = T_{1/2}, 2T_{1/2}, 3T_{1/2}$ obtém-se, respectivamente, $\frac{N_0}{2}, \frac{N_0}{4}$ e $\frac{N_0}{8}$, como era esperado. O cálculo de N pela Equação (5.2) é fácil somente para t igual a números inteiros de $T_{1/2}$.

Exemplo 5.2 — Calcule o número de átomos de ${}^{198}\text{Au}$ após 12,15 dias se, inicialmente, a amostra era constituída de 10^8 átomos? A meia-vida do ${}^{198}\text{Au}$ é de 2,7 dias.

Solução

Utilizando a Equação (5.2)

$$N = \frac{10^8}{2^{2,7}} = \frac{10^8}{2^4 \cdot 2^{0,5}} = \frac{10^8}{2^4 \cdot 2^{1/2}} = \frac{10^8}{2^4 \cdot \sqrt{2}}$$

Racionalizando,

$$N = \frac{\sqrt{2}}{2^5} \times 10^8 = \frac{\sqrt{2} \times 10^8}{32} \cong 4,4 \times 10^6 \text{ átomos}$$

Exercício Proposto — A meia-vida de ^{24}Na é de 15 horas. Qual é o tempo necessário para que 93,75% de uma amostra desse isótopo se desintegre?

5.4 — RELAÇÃO ENTRE A CONSTANTE DE DESINTEGRAÇÃO E A MEIA-VIDA

Sabendo-se que, para $t = T_{1/2}$, N será igual a $N_0/2$, e utilizando a Equação (5.1), obtém-se

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (5.3)$$

Uma vez que N_0 é diferente de zero, pode ser eliminado de ambos os membros.

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (5.4)$$

Calculando o logaritmo neperiano de ambos os membros,

$$\ln 2 = \lambda T_{1/2} \quad (5.5)$$

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

Exercício Proposto — Utilize a Equação (5.6) e demonstre a equivalência das Equações (5.1) e (5.2).

Exemplo 5.3 — Calcule a constante de desintegração de ^{198}Au , cuja meia-vida é de 2,7 dias.

Solução

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{2,7} = 0,257 \text{ desintegrações por dia}$$

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

Exercício Proposto — Calcule o número de átomos de ^{198}Au que se desintegram em um dia, se inicialmente há 10^8 átomos, sendo $\lambda = 0,257$ desintegrações por dia.

5.5 — ATIVIDADE

A *atividade* de uma amostra de qualquer material radioativo é definida como sendo o número de desintegrações dos núcleos de seus átomos constituintes por unidade de tempo, isto é, a velocidade de desintegração dos átomos. Esse conceito é útil, uma vez que não há modo direto para

átomos. Existem equipamentos, como os contadores Geiger, que medem diretamente a atividade de uma amostra.

A atividade A de uma amostra radioativa num dado instante pode ser expressa por

$$\boxed{A = \lambda N} \quad (5.7)$$

Substituindo-se o N da equação acima por (5.1), obtém-se

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (5.8)$$

em que, $A_0 = \lambda N_0$ é a atividade inicial.

A atividade pode, também, ser escrita como:

$$\boxed{A = \frac{A_0}{2^{t/T_{1/2}}} = A_0 [2^{-(t/T_{1/2})}]} \quad (5.9)$$

A unidade da constante de desintegração λ e da atividade A é a mesma, isto é, s^{-1} , embora λ seja uma característica de cada radioisótopo e a atividade de uma amostra radioativa dependa do número N de seus átomos constituintes com uma λ própria.

Visto que a atividade de uma amostra radioativa é diretamente proporcional ao número de átomos presentes, os gráficos das Equações (5.8) e (5.9) são os mesmos das Figuras 5.1 e 5.2, diferindo apenas na constante λ . A passagem de um gráfico a outro é feita multiplicando-se a escala do eixo vertical pela constante λ , característica de cada radioisótopo.

5.5.1 — Unidade de atividade

Uma das unidades de atividade utilizada é o curie (Ci), igual a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo, sendo seus submúltiplos o milicurie e o microcurie.

$$1 \text{ mCi} = 3,7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 3,7 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$$

Em 1975, a Comissão Internacional de Unidades e Medidas Radiológicas (ICRU) recomendou o uso do becquerel (Bq) como unidade de atividade no Sistema Internacional de unidades. 1 becquerel (Bq) é definido como 1 desintegração por segundo

Portanto, $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

Exemplo 5.4 — A taxa de desintegração de 1 g de ^{40}K é 10^5 s^{-1} . Qual é sua constante de decaimento?

Solução

40 g de ^{40}K contém $6,03 \times 10^{23}$ átomos de potássio (número de Avogadro). Portanto, 1 g conterá N átomos de potássio.

$$N = \frac{6,03 \times 10^{23}}{40} = 1,5 \times 10^{22} \text{ átomos}$$

Como a atividade $A = 10^5 \text{ s}^{-1}$ e $A = \lambda N$, obtém-se

$$\lambda = \frac{A}{N} = \frac{10^5}{1,5 \times 10^{22}} = 6,7 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

5.6 — VIDA MÉDIA (\bar{T})

Considere uma fonte de ouro radioativo, com a atividade inicial de 300 desintegrações por segundo, cujo decaimento exponencial é apresentado pela curva (a) na Figura 5.3. O número total de desintegrações da fonte é dado pela soma N_0 de todos os seus átomos, que pode ser obtida calculando-se a área sob a curva exponencial desde o tempo de decaimento igual a zero até infinito. Esse cálculo pode ser feito exatamente pelo método matemático da integração. Um outro método de cálculo leva em conta que, durante um intervalo de tempo Δt , centrado em torno de um tempo t , a atividade da amostra é A . O número de desintegrações durante Δt é dado por $A \Delta t$ que é a área do paralelogramo hachurado na Figura 5.3.

Considere agora uma fonte hipotética cuja atividade permanece constante e igual a A_0 até um instante \bar{T} , como mostra a reta (b) da Figura 5.3 quando todos os átomos da amostra se desintegram ao mesmo tempo. O cálculo da área sob esse segmento de reta é o do paralelogramo: $A_0 \bar{T} = N_0 \lambda \bar{T}$ que por sua vez deve ser igual a N_0 . Portanto, pode-se concluir que

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \tag{5.10}$$

\bar{T} é chamado *vida média* de um elemento radioativo e é calculado dividindo-se a soma das idades de todos os átomos pelo número total de átomos.

Substituindo-se o λ da Equação (5.10) pelo obtido de (5.6), tem-se

$$\bar{T} = \frac{T_{1/2}}{0,693} = 1,44 T_{1/2}$$

Como já foi visto, a meia-vida de ^{198}Au é de 2,7 dias. Portanto, a vida média \bar{T} do ^{198}Au é de 3,89 dias. Uma fonte radioativa de ^{198}Au dá o mesmo número total de desintegrações, considerando-se um decaimento exponencial com meia-vida de 2,7 dias calculando-se a área sob a exponencial ou um decaimento total num tempo t igual a 3,89 dias, isto é, calculando-se a área do paralelogramo $A_0 \times 3,89$. No caso do exemplo da Figura 5.3, obtém-se para o número total de átomos da amostra o valor 10^8 .

Exemplo 5.5 — Uma fonte de radônio de 2 mCi, cuja meia-vida é de 3,83 dias, é permanentemente implantada num paciente. Qual é a radiação total emitida?

Solução

$$A_0 = 2 \text{ mCi} = 2 \times 3,7 \times 10^7 \text{ s}^{-1} = 7,4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

$$T_{1/2} = 3,83 \times 24 \times 60 \times 60 = 3,3 \times 10^5 \text{ s}$$

A radiação total emitida é dada pelo número total de desintegrações da fonte radioativa, ou pelo número total de átomos da amostra.

$$N_0 = A_0 \bar{T} = A_0 \times 1,44 \times T_{1/2}$$

$$N_0 = 7,4 \times 10^7 \times 1,44 \times 3,3 \times 10^5 = 3,5 \times 10^{13} \text{ átomos.}$$

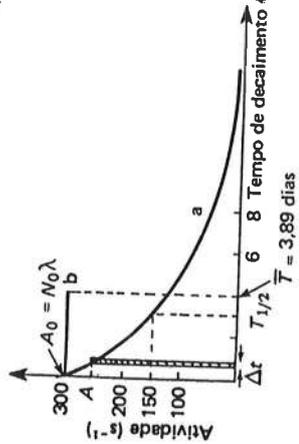


Figura 5.3 — Decaimento de atividade de uma fonte de ouro radioativo.

PROBLEMAS

1. Foi feita uma brincadeira com 100 dados. Toda vez que um número pré-fixado, por exemplo o 6, saísse, numa jogada, os dados correspondentes eram retirados do jogo. Na primeira jogada com 100 dados saíram 17 com o número 6. Foram retirados, portanto, 17 dados do jogo, e a jogada seguinte prosseguiu com 83 dados, e assim por diante. A tabela abaixo dá o número de dados retirados e o dos restantes em cada jogada.

Jogada.	Dados retirados	Dados restantes
0	—	100
1ª	17	83
2ª	14	69
3ª	12	57
4ª	9	48
5ª	8	40
6ª	7	33
7ª	5	28
8ª	5	23
9ª	4	19
10ª	3	16

- Faça um gráfico num papel milimetrado e um outro num papel semilogarítmico, colocando num dos eixos o número de dados restantes e no outro a ordem das jogadas.
- Faça um paralelo entre esse jogo e as desintegrações radioativas.
- Determine graficamente em qual jogada o número de dados restantes será a metade do número de dados inicial; calcule a probabilidade de sair o número 6 em cada jogada.
- Com quais grandezas cada um dos resultados do item anterior se relacionaria, caso a tabela acima se referisse a isótopos radioativos ao invés de a dados?

- O oxigênio radioativo ^{15}O tem uma meia-vida de 2,1 minutos.
 - Quanto vale a constante de decaimento?
 - Quantos átomos radioativos existem numa amostra com uma atividade de 4 mCi?
 - Qual o tempo necessário para que a atividade seja reduzida por um fator 8?

- Uma fonte radioativa A é colocada em frente a um contador Geiger, que registra 1 100 contagens em 5 minutos; Quando uma outra fonte radioativa B é colocada na mesma posição, o contador também conta 1 100 em 5 minutos que são devidas a radiação de fundo. Pergunta-se:
 - Quantas contagens o contador registrará em 5 minutos se as fontes A e B forem colocadas juntas na mesma posição anterior?
 - A fonte A tem uma meia-vida de 2 anos, e a fonte B de 3 anos. Quantas contagens em 5 minutos registrará o contador após um período de 6 anos se as fontes A e B forem colocadas novamente juntas, na mesma posição anterior?

- Um certo elemento radioativo tem uma meia-vida de 20 dias.
 - Qual é o tempo necessário para que 3/4 dos átomos inicialmente presentes se desintegram?
 - Quanto vale a constante de desintegração e a vida média?

5. Na desintegração do ^{226}Ra é emitida uma partícula alfa. Se essa partícula se chocar com uma tela de sulfeto de zinco, produzirá-se uma cintilação. Desse modo é possível contar diretamente o número de partículas alfa emitidas por segundo por um grama de ^{226}Ra , tendo sido determinado esse número por Hess e Lawson como sendo igual a $3,72 \times 10^{10}$. Use esses dados e o número de Avogadro — $6,02 \times 10^{23}$ moléculas por mol — para calcular a meia-vida do rádio.

6. A atividade de um certo fósforo diminuiu de 1 530 desintegrações por minuto para 190 desintegrações por minuto já com correção da radiação de fundo, durante o processo de fossilização. Sendo a meia-vida do isótopo radioativo do ^{14}C de 5 760 anos, determine a idade do fóssforo!

7. O carvão do fogão de um antigo acampamento indígena apresenta uma atividade devida ao ^{14}C de 3,83 desintegrações por minuto por grama de carbono da amostra. A atividade do ^{14}C na madeira das árvores vivas independe da espécie vegetal e vale 15,3 desintegrações por minuto por grama de carbono da amostra. Determine a idade do carvão.
8. Um material radioativo contém inicialmente 3 mg de ^{234}U , cuja meia-vida é de $2,48 \times 10^5$ anos.
 - a. Quantos miligramas de ^{234}U existirão após $4,96 \times 10^5$ anos?
 - b. Calcule a atividade inicial e aquela no final do período citado no item a.
9. Uma amostra de ^{128}I contém $2,0 \times 10^{10}$ átomos radioativos. Sendo a meia-vida desse isótopo de 25 minutos, calcule o número de átomos que decaem por segundo.
10. O volume de fluido extracelular pode ser medido injetando-se sulfato de sódio marcado com ^{35}S . Uma tal fonte tem uma atividade inicial de 2 mCi. Sabendo-se que este isótopo tem uma meia-vida de 87 dias, calcule a atividade da fonte após 60 dias em curies e em becquerels. Após quanto tempo a atividade cai a 0,5 mCi?
11. O sódio radioativo ^{24}Na que tem uma meia-vida de 15 horas é enviado de um laboratório para um hospital, gastando no percurso 3 horas. Sabendo-se que sua atividade deve ser de 10 mCi ao chegar ao hospital, calcule a atividade da fonte na saída do laboratório.
12. Uma fonte de ^{131}I com vida média de 11,52 dias tem uma atividade inicial de 3 mCi. Encontre a meia-vida e o número total de desintegrações da fonte.
13. Átomos de plutônio-238 (^{238}Pu) emitem partículas alfa de 5,1 MeV. Sua meia-vida é de 90 anos. A energia de 180 mg de plutônio-238 é usada para fazer funcionar um tipo de marca-passo cardíaco. Calcule a potência inicial máxima do marca-passo.
14. O isótopo de ^{32}P é administrado a um paciente que pesa 64 kg. Esse isótopo tem uma meia-vida no paciente de 10 dias. A energia da partícula beta emitida por esse isótopo por desintegração é de 0,698 MeV. Se a dose absorvida não deve superar 1 rad,
 - a. Quantos gramas de ^{32}P devem ser administrados ao paciente?
 - b. A quantos μCi correspondem?
 - c. Qual é a atividade após 20 dias?
15. O isótopo ^{197}Hg emite radiação gama de 77 keV por desintegração. $1,97 \times 10^{-9}$ g desse material é administrado a um paciente de 74 kg, na detecção de um tumor. Se a meia-vida desse isótopo no organismo do paciente for de 51,1 h, calcule:
 - a. a atividade inicial da amostra no corpo em μCi ;
 - b. o tempo necessário para que a atividade seja reduzida a 1/32 do seu valor inicial;
 - c. a dose total absorvida pelo paciente.
16. Vinte milicuries de $^{99}\text{Tc}^m$ são injetados num paciente que faz um mapeamento cerebral. Em cada desintegração desse radioisótopo cuja meia-vida é de 6 h é emitido um raio gama de 0,143 MeV. Admitindo que metade dos raios gama escapa do corpo sem interagir, calcule a dose absorvida por um paciente de 60 kg e a quantidade em gramas de $^{99}\text{Tc}^m$ injetada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

- BEISER, A. — *Conceitos de Física Moderna*. Brasil, Polígono e EDUSP, 1969.
- EISBERG, R. & RESNICK, R. — *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*. USA, John Wiley & Sons, 1974.
- JOHNS, H. E. & CUNNINGHAM, J. R. — *The Physics of Radiology*. USA, Charles C. Thomas, 1974.
- MACDONALD, S. G. G. & BURNS, D. M. — *Physics for the Life and Health Sciences*. Philippines, Addison-Wesley, 1977.
- MARION, J. B. — *Physical Science in the Modern World*. USA, Academic Press, 1974.
- OLDENBERG, O. — *Introduction to Atomic Physics*. USA, McGraw-Hill, 1954.
- SEMAT, H. — *Física Atômica y Nuclear*. España, Aguilar, 1957.
- STROTHER, G. K. — *Physics with Applications in Life Sciences*. USA, Houghton Mifflin, Boston, 1977.

Raios X

CAPÍTULO 6

6.1 — INTRODUÇÃO

Os raios X, desde sua descoberta por Wilhelm Conrad Röntgen em 1895, têm sido amplamente utilizados na Medicina, na indústria e em pesquisas científicas. Poucas são as pessoas que atingem a fase adulta sem nunca ter tirado radiografia de uma parte do corpo ou de um dente.

Os raios X, como os raios gama, são ondas eletromagnéticas e, portanto, sua velocidade de propagação é a da radiação eletromagnética e vale $c = 3 \times 10^8$ m/s no vácuo. Eles diferem somente quanto à origem, pois os raios gama provêm do núcleo ou da aniquilação de partículas, enquanto que os raios X têm sua origem fora do núcleo.

Um núcleo instável pode passar a um estado mais estável liberando energia na forma de radiação gama. Por outro lado, quando elétrons rápidos colidem com certos materiais, parte de sua energia ou toda ela é convertida em fótons de raios X.

A Figura 6.1 mostra os componentes básicos de um sistema de produção de raios X. O filamento aquecido emite elétrons que são acelerados pela diferença de potencial V entre o catodo e o anodo e incidem sobre o alvo produzindo raios X.

Os mesmos componentes básicos de um sistema de produção de raios X são encontrados nos aparelhos de TV. Num televisor branco e preto, os raios X produzidos são de baixa energia, sendo, portanto, absorvidos pelo vidro do tubo. Alguns anos atrás, nos Estados Unidos, foi detectada uma quantidade considerável de raios X provenientes de aparelhos de TV a cores defeituosos, com energia suficiente para atravessar o vidro do tubo.

Em meados de 1979, medidas de controle, em cerca de dez televisores a cores, de diferentes marcas, em bom funcionamento, foram feitas pelo Laboratório de Dosimetria e Proteção Radiológica do Instituto de Física da USP. Essas medidas foram feitas colocando-se dosímetros termoluminescentes na tela dos tubos dos televisores, durante um mês. Os dosímetros usados foram cristais de fluoreto de lítio de $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$. Após o período de um mês, os dosímetros foram retirados das telas e "lidos" no aparelho leitor termoluminescente. A leitura consiste na medida, por meio

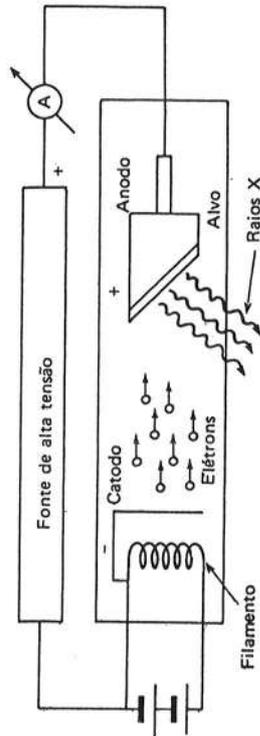


Figura 6.1 — Diagrama de um sistema de produção de raios X.

de uma fotomultiplicadora, da intensidade luminosa emitida pelo cristal durante o aquecimento. A intensidade luminosa medida está relacionada à quantidade de radiação incidente. Os resultados obtidos indicaram que a radiação X que atravessa o vidro do tubo é menor que 10% da radiação de fundo ou natural, sendo, portanto, desprezível.

6.2 — PRODUÇÃO DE RAIOS X

Num tubo de raios X a maioria dos elétrons incidentes sobre o alvo perde sua energia cinética de modo gradual nas inúmeras colisões, convertendo-a em calor. Esta é a razão pela qual um alvo deve ser feito de material de alto ponto de fusão. A temperatura atingida pelo alvo é tão alta que ainda são necessários métodos especiais para seu esfriamento.

Uma pequena parte dos elétrons incidentes se aproxima dos núcleos atômicos do alvo, podendo perder de uma só vez uma fração considerável de sua energia cinética, emitindo um fóton de raios X. Em outras palavras, o fóton de raios X é produzido quando um elétron sofre uma desaceleração brusca. A radiação gerada desse modo é conhecida como *radiação de freamento* ou *bremsstrahlung*.

Os fótons de raios X podem ter qualquer energia, desde valores próximos do zero até um valor máximo, determinado pela energia do elétron incidente. Então, quando há um feixe de elétrons, haverá a produção de um *espectro contínuo* de raios X de várias energias ou, melhor, de vários comprimentos de onda, uma vez que

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6.1)$$

onde E é a energia de um fóton da radiação X emitida; h a constante de Planck; f a frequência da radiação X emitida; c a velocidade da luz; e λ o comprimento de onda da radiação emitida.

Admitindo-se que a energia cinética K do elétron acelerado pela alta voltagem V do tubo valha

$$K = eV \quad (6.2)$$

sendo e a carga do elétron, e que toda essa energia seja usada para produzir um único fóton, a energia desse fóton seria máxima, e dada por

$$E_{\text{máx}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{mín}}} = eV \quad (6.3)$$

Portanto, a relação entre a voltagem aplicada aos eletrodos do tubo e o $\lambda_{\text{mín}}$ de raios X produzidos vale:

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{hc}{eV} = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})V}$$

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{1,24 \times 10^{-6}}{V} \text{ (V} \cdot \text{m)} \quad (6.4)$$

Por exemplo, para $V = 35 \text{ kV}$,

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{1,24 \times 10^{-6} \text{ (V} \cdot \text{m)}}{35 \times 10^3 \text{ V}} = 0,35 \times 10^{-10} = 0,35 \text{ \AA}$$

Esse valor mínimo independe do material de que é feito o alvo e é inversamente proporcional a V . Esse fato pode ser verificado na Figura 6.2, onde são apresentados três espectros contínuos, para alvo de tungstênio e V iguais a 30, 40 e 50 kV.

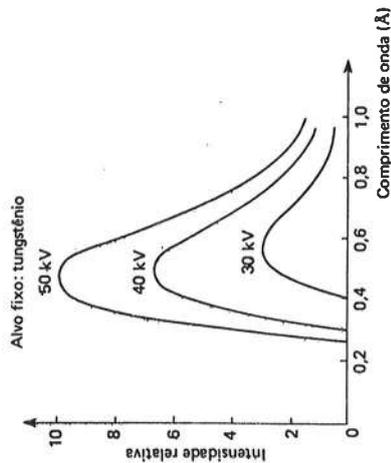


Figura 6.2 — Espectro contínuo de raios X emitidos de um tubo com alvo de tungstênio, para três valores do potencial acelerador.

Na Figura 6.3 podem-se ver dois espectros obtidos com alvo de tungstênio e molibbdênio para V fixo em 35 kV. Nota-se que o $\lambda_{\text{mín}}$ é o mesmo para ambos os alvos. Por outro lado, além do espectro contínuo, pode haver um espectro de linhas superposto ao contínuo, chamado *espectro característico* ou *de linhas*. Esse espectro provém da interação de elétrons incidentes com elétrons orbitais dos átomos do alvo. Se na interação ocorrer a remoção de elétron das camadas mais internas do átomo do alvo, seu lugar será rapidamente preenchido por um elétron da camada externa. Durante a transição do elétron da camada externa para a interna haverá a produção de um fóton de raio X, cuja energia representa exatamente a diferença entre os níveis de energia externa e interna dos elétrons orbitais. Uma vez que cada elemento possui níveis de energia específicos, a energia desses raios X característicos é própria do material de que é feito o alvo. Na Figura 6.3 pode-se ver o espectro característico superposto ao espectro contínuo no caso de alvo de molibbdênio para $V = 35 \text{ kV}$.

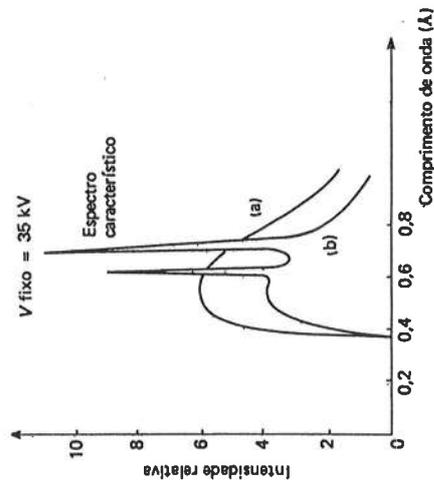


Figura 6.3 — (a) Espectro contínuo de raios X emitidos de um tubo com alvo de tungstênio para $V = 35 \text{ kV}$. (b) Espectro característico superposto ao espectro contínuo de raios X emitidos de um tubo com alvo de molibbdênio para $V = 35 \text{ kV}$.

Nas Figuras 6.2 e 6.3 não se observa nenhum espectro de linhas para o alvo de tungstênio. Isto se explica porque mesmo os elétrons de máxima energia de 50 keV ainda não são suficientemente energéticos para arrancar elétrons das camadas mais internas do átomo de tungstênio.

Exemplo 6.1 – Calcule a energia máxima e o comprimento de onda mínimo de um fóton produzido num tubo de raios X, quando a diferença de potencial entre seus eletrodos for de 40 kV.

Solução

$$E_{\text{máx}} = eV = e \times 40 \text{ kV} = 40 \text{ keV}$$

$$E_{\text{máx}} = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(40 \times 10^3 \text{ V}) = 6,4 \times 10^{-15} \text{ J}$$

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{hc}{E_{\text{máx}}} = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{6,4 \times 10^{-15} \text{ J}}$$

$$\lambda_{\text{mín}} = 3,1 \times 10^{-11} \text{ m} = 0,31 \text{ \AA}$$

6.3 — ATENUAÇÃO DE RAIOS X

Os raios X não são absorvidos da mesma forma por diferentes materiais. É por essa razão que se consegue, por exemplo, radiografar partes do corpo humano para diagnose.

Elementos pesados, tais como cálcio e bário, são melhores absorvedores de raios X que elementos leves como hidrogênio, carbono e oxigênio. Portanto, estruturas como ossos aparecem nitidamente em radiografias. O ar é um péssimo absorvedor de raios X.

A intensidade dos raios X e também dos raios gama — que é proporcional ao número de fótons do feixe — decresce quando os raios atravessam certos meios. A esse fato se chama *atenuação*, que é devida a absorção e espalhamento do feixe. Para um feixe monoenergético esse decréscimo pode ser descrito pela seguinte expressão exponencial

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (6.5)$$

onde I é a intensidade do feixe após a passagem através de um meio de espessura x ; I_0 é a intensidade inicial do feixe; I e I_0 são medidas em $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; μ é o coeficiente de atenuação linear do meio, que depende do meio e da energia da radiação; e é a base dos logaritmos neperianos. O produto μx deve ser adimensional.

Observe que essa equação é do mesmo tipo da do decaimento radioativo.

A espessura de um absorvedor, que reduz à metade a intensidade da radiação incidente, é chamada *camada semi-redutora*. Pode-se mostrar facilmente que a camada semi-redutora $X_{1/2}$ vale

$$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} \quad (6.6)$$

Exercício Proposto — Deduza a Equação (6.6).

A $X_{1/2}$ é usada como medida da penetrabilidade da radiação. Para o chumbo, por exemplo, a $X_{1/2}$ é de 0,86 cm para um raio X ou gama de 1 MeV. (Veja a Tabela 1.3 do Capítulo 1.) Isto significa que 0,86 cm de chumbo são necessários para diminuir à metade a intensidade do feixe acima referido. A $X_{1/2}$ no ar para o mesmo feixe é de aproximadamente 25 m.

Levando em conta o conceito de camada semi-redutora, a Equação (6.5) também pode ser escrita na forma

$$I = \frac{I_0}{2^{(x/X_{1/2})}} = I_0 [2^{-(x/X_{1/2})}] \quad (6.7)$$

Exercício Proposto — Deduza a Fórmula (6.7).

Exemplo 6.2 — Qual é a percentagem de raios X transmitida através de um material de 10 cm de espessura, sendo $\mu = 0,2 \text{ cm}^{-1}$?

Solução

$$\text{Usando a equação } I = I_0 e^{-\mu x}, \text{ e sendo } \mu x = 0,2 \times 10 = 2$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-2} = 0,135$$

Portanto, $\frac{I}{I_0} = 13,5\%$ (percentagem transmitida).

Exercício Proposto — A camada semi-redutora para um raio X de 1 MeV é de 0,86 cm. Que espessura de chumbo é necessária para frear 96,875% dessa radiação?

PROBLEMAS

1. Calcule a energia máxima e o comprimento de onda mínimo de raios X produzidos por um tubo operando a 15 e a 150 kV. Os aparelhos de raio X diagnóstico, em geral, funcionam nesse intervalo.
2. O comprimento de onda mínimo da radiação X emitida por um tubo de raios X é de $8,29 \times 10^{-3} \text{ nm}$. Calcule a energia de um fóton dessa radiação em J e em eV. Qual é a diferença de potencial aplicada no tubo?
3. Os tubos de televisão a cores operam com diferença de potencial em torno de 22 000 V. Há, neste caso, produção de raios X? Qual é a energia máxima de um fóton de raios X? Qual é o comprimento de onda do feixe de raios X correspondente?
4. Os coeficientes de atenuação linear para raios X de certa energia na água e no cálcio são, respectivamente, 400 m^{-1} e $1,57 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$. Calcule:
 - a. a percentagem de absorção de raios X em 1 mm de água;
 - b. a espessura de cálcio necessária para produzir a mesma redução na intensidade, que a calculada no item anterior.
5. Um feixe de raios X de 50 keV, isto é, contendo fótons de 50 keV é usado para tirar uma radiografia do pulmão. Qual é a razão entre a intensidade do feixe incidente na frente do tórax e a emergente nas costas? Considere a espessura do tórax de 10 cm. Consulte a Tabela 1.3 do Capítulo 1.
6. O coeficiente de atenuação do tecido humano para fótons de 1 MeV é de 7 m^{-1} . Calcule a espessura do tecido que reduzirá a intensidade incidente por um fator 2. Essa espessura é a camada semi-redutora.
7. Que percentagem da intensidade incidente de um feixe de fótons de 1 MeV será transmitida através de 20 cm de tecido humano? Use os dados do problema anterior.
8. A intensidade de um feixe de raios X ou gama pode ser diminuída usando-se absorvedores. Sejam 10 folhas de absorvedores de igual espessura e de mesmo material e I_0 a intensidade do feixe incidente no primeiro absorvedor. Suponha que cada folha de absorvedor diminua a intensidade incidente de 10%. Coloque num gráfico a intensidade de um feixe de raios X em função do número de folhas de absorvedores usados. Determine a intensidade final e o coeficiente de atenuação linear do absorvedor em função da espessura.

9. Se 1 cm de um certo absorvedor reduzir a intensidade de um feixe de raios X por um fator 10, isto é, $I = I_0/10$, que espessura desse mesmo absorvedor será necessária, para se ter igual intensidade final se a inicial for

- dobrada?
- triplicada?

10. Que espessura de (a) água e (b) alumínio é necessária para blindar uma fonte radioativa de forma equivalente a uma blindagem de chumbo de espessura igual a 1 cm? Admita que as intensidades inicial e final sejam as mesmas para os três materiais. São dados: $\mu_{Al} = 0,435 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{Pb} = 60 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{H_2O} = 0,167 \text{ cm}^{-1}$.

11. Um feixe de raios X é usado para tirar uma radiografia de um abdome de 16 cm de espessura. A relação entre as intensidades da radiação na pele da frente e de trás é de 16. Calcule a camada semi-redutora do tecido humano para esse feixe.

12. A camada semi-redutora para raios X de 0,1 MeV no tecido humano é de 4,15 cm. Calcule a espessura de tecido após a qual a intensidade da radiação é de somente:

- 1/4 do seu valor original;
- menor que 1% do seu valor original.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

- ANDREWS, H. L. — *Radiation Biophysics*. USA, Prentice Hall, 1974.
 BEISER, A. — *Conceitos de Física Moderna*. Brasil, Polígono e EDUSP, 1969.
 CROMER, A. H. — *Physics for the Life Sciences*. USA, McGraw-Hill, 1977.
 EISEBERG, R. & RESNICK, R. — *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*. USA, John Wiley & Sons, 1974.
 HENDEE, W. R. — *Medical Radiation Physics*. USA, Year Book Medical, 1979.
 JOHNS, H. E. & CUNNINGHAM, J. R. — *The Physics of Radiology*. USA, Charles C. Thomas, 1974.

Aplicações das Radiações em Biologia e Medicina

CAPÍTULO 7

7.1 — INTRODUÇÃO

Como já foi visto no Capítulo 2, são inúmeras as aplicações das radiações nos mais variados campos. Dentre as mais importantes, podem ser citadas as relacionadas à Biologia e à Medicina. Quanto à Biologia, as aplicações são feitas em pesquisas básicas nos campos da Genética, da Fisiologia, da Botânica etc.

Na Medicina, por outro lado, as aplicações são feitas num campo genericamente designado *radiologia*, que por sua vez compreende a radioterapia, a radiologia diagnóstica e a medicina nuclear.

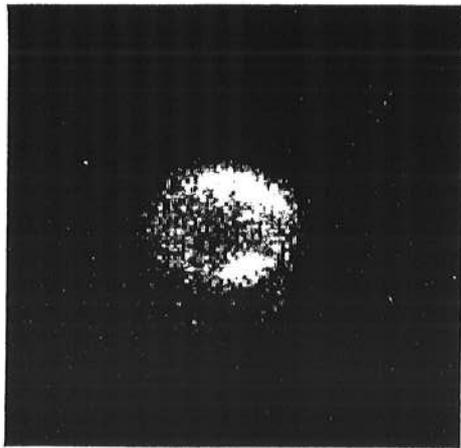
A *radioterapia* utiliza a radiação no tratamento de tumores, na maior parte malignos, e se baseia na transferência de energia ao meio onde ocorre a interação. A evolução da radioterapia ocorreu concomitantemente com o desenvolvimento dos aparelhos por ela utilizados, de tubos de raios X a equipamentos de teleterapia usando isótopos radioativos de cobalto, célio, rádio e finalmente aceleradores de partículas.

A *radiologia diagnóstica* consiste na utilização de um feixe de raios X para a produção de imagens em várias tonalidades de cinza numa chapa fotográfica ou numa tela fluoroscópica. O médico, ao examinar uma chapa ou uma tela fluoroscópica, pode verificar as estruturas anatômicas do paciente e descobrir a existência de qualquer anormalidade. Essas imagens podem ser tanto estáticas como dinâmicas. O equipamento mais recente usado na radiologia diagnóstica foi desenvolvido comercialmente a partir de 1972, pela firma inglesa EMI e se chama tomografia computadorizada que faz a reconstrução de imagem por computação. Esse sistema produz uma imagem de um corte transversal do corpo humano, onde detalhes que não são visualizados numa chapa de raio X convencional podem ser analisados. Os cientistas que desenvolveram essa técnica, Godfrey Newbold Hounsfield (engenheiro eletrônico) e Allen MacLeod Cormack (físico nuclear) foram agraciados com o Prêmio Nobel de Fisiologia e Medicina em 1979.

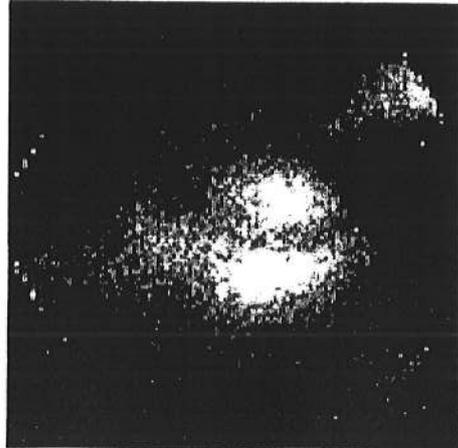
A *medicina nuclear* aplica materiais radioativos e técnicas de Física nuclear na diagnose, no tratamento e no estudo de doenças. Ela compreende uma parte clínica, diretamente relacionada com o paciente, e uma parte biomédica, onde pesquisas básicas sobre doenças e ação de drogas são desenvolvidas. A principal diferença entre o uso de raios X e o de radioisótopos na diagnose está no tipo da informação obtida. No primeiro caso, a informação está mais relacionada com a anatomia do que com a fisiologia. No segundo, a informação fornecida pelos radioisótopos está mais relacionada com o metabolismo e a fisiologia do que com a própria anatomia. A principal diferença entre a radioterapia e a terapia na medicina nuclear se refere ao tipo de fontes radioativas usadas. No primeiro caso usam-se fontes seladas nas quais o material radioativo não entra em contato direto com o paciente ou com as pessoas que as manuseiam. No segundo, materiais radioativos não selados são ingeridos ou injetados a fim de ser incorporados às regiões do corpo humano a ser tratadas.



Projeção pósterio-anterior de uma cintilografia de perfusão pulmonar normal obtida com o uso de macroagregado de albumina humana (MAH) marcado com $^{99}\text{Tc}^m$. A hipoperfusão da base esquerda é devida à absorção pela área cardíaca.*

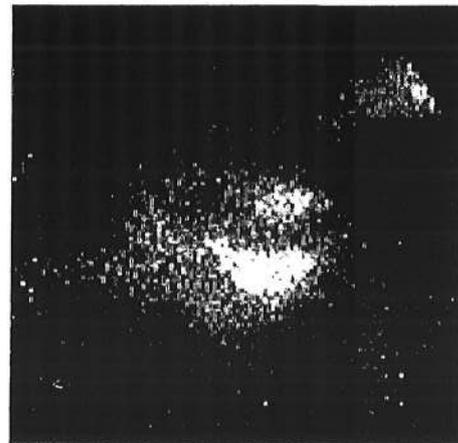


Projeção oblíquo-anterior-esquerda 45° de uma cintilografia de perfusão do miocárdio, utilizando o radioisótopo ^{201}Tl . A parede anterior do ventrículo esquerdo apresenta uma menor concentração do radiofármaco, que pode ser devida à isquemia.*



(a)

Projeções oblíquo-anterior-esquerdas 45° das cavidades cardíacas, obtidas com hemácias marcadas com $^{99}\text{Tc}^m$ (a) Corresponde à fase diastólica, enquanto que (b), à fase sistólica. A fração de ejeção ventricular esquerda é cerca de 66%.*



(b)

* Cortesia da Seção de Radioisótopos do Instituto do Coração do Hospital das Clínicas da FMUSP.

Na radioterapia a dose absorvida por tratamento varia de 700 a 7 000 rad (7 a 70 Gy), na radiologia diagnóstica de 10^{-2} a 1 rad (10^{-4} a 10^{-2} Gy) por chapa e na medicina nuclear, ela é da ordem de dezenas de mrad (10^{-4} Gy) por exame. Veja apêndice de ordens de grandeza.

Existem doses máximas permissíveis calculadas para o corpo todo, para as gônadas e, dependendo do composto portador da radiação, para órgãos críticos como tireóide, pele, útero etc. As doses em diagnose são em geral pequenas; entretanto deve-se evitar o uso indiscriminado de técnicas baseadas no uso da radiação, pois seu efeito é cumulativo. Além disso, precauções especiais devem ser tomadas quando o paciente é novo, ou é mulher grávida, pois células em desenvolvimento são especialmente sensíveis à radiação.

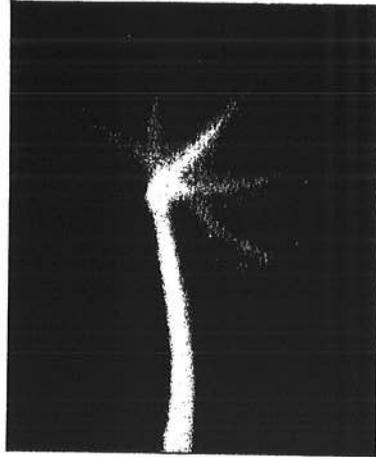
7.2 — APLICAÇÕES NA BIOLOGIA

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

7.2.1 — Estudo de transporte nas plantas

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

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



Auto-radiografia de uma folha de feijão, obtida por um grupo de alunos do Curso de Física para Ciências Biológicas da Universidade de São Paulo, em 1981.

7.2.2 — Divisão de cromossomos *

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

7.2.3 — Determinação do volume de um compartimento usando-se um traçador radioativo

Técnicas que utilizam radioatividade podem ser empregadas para determinar o volume total ocupado por um fluido.

Para medir, por exemplo, o volume de sangue no corpo, injeta-se intravenosamente 5 ml de albumina marcada com ^{125}I , com uma atividade tal que forneça 10^5 desintegrações por segundo. Após cerca de 5 a 15 minutos, quando a albumina marcada já estiver completamente misturada, retira-se 5 ml de sangue do outro braço. Admitindo-se que o número de desintegrações por segundo da amostra retirada seja de 10^2 , o volume total de sangue do corpo pode ser calculado:

$$5 \text{ ml} \times \frac{10^5 \text{ desint/s}}{10^2 \text{ desint/s}} = 5\,000 \text{ ml}$$

7.2.4 — Auto-radiografia alfa de tecido epitelial dos brônquios **

Estudos recentes de microdistribuição de emissores alfa no tecido epitelial dos brônquios de cadáveres estão sendo feitos em alguns centros de pesquisa. Traços de emissores alfa (^{210}Po , ^{210}Pb) presentes na atmosfera e no fumo podem ser inalados e depositados no pulmão. O detector utilizado é um plástico especial CR-39 muito sensível a partículas alfa, cujo traço pode ser observado pelo processo de "etching" (corrosão por ácido). Esse plástico é colocado em contato com o tecido que se deseja estudar, por um período de até vários meses. Dessa forma, a localização da fonte emissora de partícula alfa da superfície de um tecido pode ser determinada com uma precisão de poucos μm . Por esse processo foi detectada a presença de possíveis "manchas quentes" nas bifurcações da árvore brônquica, em maior número nas dos fumantes e nas dos trabalhadores de minas de urânio e tório.

* FEINENDEGEN, L. E. — Tritium-labeled Molecules in Biology and Medicine. USA, American Institute of Biological Science and USAEC, 1967.

** HENSHAW, D. L., FEWS, A. P. & WEBSTER, D. J. — A Technique for High-sensitivity Alpha Auto

7.3 — RADIOTERAPIA

A radioterapia se baseia na destruição do tumor pela absorção da energia da radiação incidente, tendo como princípio maximizar o dano ao tumor e minimizar o dano em tecidos vizinhos, normais, o que se consegue irradiando o tumor de várias direções. Os processos bioquímicos envolvidos na destruição das células pela radiação ainda são objeto de estudos.

A radioterapia se subdivide em teleterapia e braquiterapia.

7.3.1 — Teleterapia

Nesse caso a fonte radioativa é colocada a muitos centímetros da região a ser tratada. Os equipamentos utilizados na teleterapia podem ser de *quilovoltagem*, de *megavoltagem* e de *teleisotopotopia*.

Equipamentos de quilovoltagem São tubos convencionais de raios X. A voltagem aplicada entre os eletrodos é no máximo de 250 kV. Para a voltagem de 200 kV, a dose máxima ocorre na pele, decrescendo até atingir 50% a 5 cm de profundidade, 25% a 10 cm e sendo praticamente desprezível a 25 cm. Por essa razão, esses equipamentos são usados principalmente no tratamento de câncer da pele. Nesse tratamento o paciente é submetido a doses diárias de 300 rad (3 Gy) até atingir um total de 6 000 rad (60 Gy). Os raios X nessa faixa de energia ainda podem ser usados por seus efeitos térmicos na terapia de artrite, artrose, bursite ou até calos, e diminuir a rejeição no caso de transplantes.

Equipamentos de megavoltagem Nessa classe se situam os aceleradores de partículas como aceleradores lineares e betatrons. Num caso típico em que os elétrons atingem uma energia de 22 MeV, a dose máxima devida a raios X ocorrerá entre 4 e 5 cm de profundidade, decresce para 83% a 10 cm e para 50% a 25 cm. São, portanto, mais utilizados na terapia de tumores nos órgãos mais profundos como pulmão, bexiga, próstata, útero, laringe, esôfago etc. As principais vantagens desses equipamentos são a ocorrência de dose máxima abaixo da pele, seu grande poder de penetração e baixa absorção pelos ossos.

Nesse caso o que se utiliza é a radiação X produzida pelos elétrons acelerados por tubos de megavoltagem. O paciente recebe entre 5 000 e 6 000 rad (50 e 60 Gy) no tumor, distribuídas em frações diárias de 200 rad (2 Gy).

Equipamentos de teleisotopotopia Empregam-se isótopos radioativos, sendo os mais comuns de ^{60}Co , ^{137}Cs e ^{226}Ra . A Tabela 7.1 mostra a energia da radiação gama emitida e a meia-vida desses radioisótopos.

Tabela 7.1 — Característica dos radioisótopos usados na teleisotopotopia.

Elemento	Energia (MeV)	Meia-vida (anos)
^{60}Co	$\left\{ \begin{array}{l} 1,17 \\ 1,33 \end{array} \right.$	5,3
^{137}Cs	0,66	30
^{226}Ra	0,18 a 2,2	1 620

No caso de terapia com ^{60}Co , a dose máxima ocorre a 5 mm de profundidade da pele, caindo lentamente para atingir 52% a 10 cm da pele e de 20% a 25% a 25 cm.

Um tubo de raios X, para produzir radiação equivalente à emitida por ^{60}Co , deverá operar com tensão de 3 MV, e como consequência o complexo se torna volumoso.

A unidade de telecobalto apresenta vantagens por ser mais compacta, além do fato de não ter um largo espectro de energia como no caso de raios X.

7.3.2 — Braquiterapia

Nesse caso a fonte está em contato com o tecido a ser tratado ou nele implantado.

Alguns materiais radioativos como ^{226}Ra , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir e ^{198}Au podem ser usados selados, dentro de recipientes sob forma de tubos, agulhas, fios metálicos, "sementes"; esses recipientes podem absorver radiação beta, caso exista. Uma das vantagens da braquiterapia é a possibilidade de irradiar o tumor com dose alta e os tecidos vizinhos normais com dose mínima, bem menor que no caso de teleterapia. Esse tipo de tratamento é utilizado, por exemplo, no câncer ginecológico.

Na braquiterapia, a aplicação pode ser externa, intracavitária ou intersticial, podendo nas duas últimas aplicações ser temporária ou permanente.

Um tipo especial de braquiterapia usa partículas beta e se chama *betaterapia*. As fontes radioativas que emitem partículas beta mais usadas são:

a. ^{90}Y (ítrio-90) que é emissor beta puro com meia-vida de 64 h. A energia máxima da partícula beta é de 2,27 MeV. É frequentemente utilizada na destruição do câncer da hipófise. O ^{90}Y é usado encapsulado numa agulha que é colocada intersticialmente na hipófise.

b. ^{90}Sr que emite partícula beta com energia máxima de 0,54 MeV, com meia-vida de 28 anos. O ^{90}Sr é depositado numa superfície de placa metálica que é usada externamente, em contato, para tratamento de doenças e lesões na pele, para prevenção de quelóides e de pterígio.

7.3.3 — Outras fontes de radiação

Além dos raios X produzidos por equipamentos de quilovoltagem, de megavoltagem e dos raios gama emitidos por isótopos radioativos, outras partículas estão sendo usadas na terapia:

a. Elétrons energéticos, produzidos por aceleradores de megavoltagem são usados no tratamento de doenças na pele como a micose fungóide, ou próximas à pele, e no tratamento complementar de câncer de mama após a mastectomia.

b. Mésons π^- , produzidos por aceleradores depositam a maior parte de sua energia no fim do alcance. O seu uso ainda está em fase de investigação. O custo desse tratamento é bastante alto, pois envolve aceleradores de alta energia.

c. Nêutrons emitidos pelo radioisótopo califórnio-252 (^{252}Cf) sob forma de implante, ou nêutrons produzidos por aceleradores de partículas no tratamento de câncer de forma geral.

7.4 — RADIOLOGIA DIAGNÓSTICA

A radiologia diagnóstica com raios X baseia-se em sua transmissão através de partes do corpo, após absorção por diferentes tecidos. A absorção dos raios X não é a mesma para todos os tecidos. Gorduras, tecidos moles e ossos podem ser distinguidos numa chapa de raios X. Isso se deve à diferença na densidade e no número atômico médio, como se pode ver na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 — Densidade e número atômico médio de alguns materiais.

Material	Densidade (g/cm ³)	Z médio
Gordura	0,91	5,92
Tecido mole, músculo, água	1,00	7,42
Ossos	1,85	13,85
BaSO ₄	1,20	23,00

A atenuação de um feixe de raios X é a redução de sua intensidade, devida a absorção e espalhamento dos fótons pelo meio material. Como já foi visto em 6.3, para um feixe de raios X monoenergéticos, vale a equação:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (6.5)$$

sendo μ o coeficiente de atenuação linear do meio, que é uma função do material e da energia do raio X.

Para visualizar alguns órgãos do corpo, é necessário injetar o que se chama contraste, que pode ser um meio que absorva mais ou menos raios X que os tecidos vizinhos. Os contrastes mais comuns são ar, compostos de iodo e de bário. O ar é um pobre absorvedor de raios X, e é usado como contraste em radiografias como pneumoencefalograma e pneumopelviografia. Compostos de iodo são injetados no fluxo sanguíneo para se obterem imagens das artérias. Compostos de bário são tomados oralmente para radiografar o tracto gastrointestinal, esfôago e estômago.

7.4.1 — Imagens radiográficas

Podem ser produzidas sobre um filme, um anteparo fluorescente ou uma tela de televisão.

a. Para produzir uma boa imagem num filme de raios X, deve-se usar um filme com sensibilidade adequada e tempo de exposição correto, exatamente como quando se deseja obter uma boa fotografia comum. A revelação também deve ser cuidadosa. A imagem obtida não deve ser muito escura nem muito clara. A densidade óptica deve estar entre 0,4 e 2,0.

A densidade óptica DO é definida como:

$$DO = \log \frac{I_0}{I} \quad (7.1)$$

onde I_0 é a intensidade incidente e I é a intensidade após atenuação.

Exercício Proposto — A que transmissões da intensidade incidente correspondem densidades ópticas de 0,4 e 2,0?

b. Movimentos de estruturas internas são visualizados, incidindo-se um feixe de raios X que atravessa o paciente numa tela fluorescente. Na fluoroscopia, pelo fato da imagem ser analisada enquanto é gerada, o tempo de exposição do paciente é muito maior que o requerido para se bater uma chapa. Além disso, a fluorescência é um processo em geral ineficiente, uma vez que a maior parte dos fótons de raios X perde energia sob forma de calor e uma pequena parte na produção de fluorescência. Não é, portanto, aconselhável o uso dessa técnica, a não ser em casos indispensáveis.

c. A produção de imagens numa tela do televisor vem sendo cada vez mais empregada em diversos tipos de radiologia diagnóstica. A luz da tela fluoroscópica é coletada por uma lente e focalizada num tubo de câmara de TV. É usada, por exemplo, para acompanhar um cateterismo. O aspecto dinâmico do exame radiológico pode ser gravado por equipamento de *vídeo tape*, quando há interesse em registrar seqüências de detalhes do exame, que podem ser de grande importância para estudos posteriores e para propósitos didáticos.

7.4.2 — Abreografia

Foi desenvolvida pelo cientista brasileiro, Manuel Dias de Abreu em 1936 e tem sido amplamente usada no controle da tuberculose no Brasil. Nesse processo o feixe de raios X após passar pelo paciente incide num anteparo fluorescente, e a luz resultante é focalizada num pequeno filme (7 cm). Disso resulta uma razoável economia de filme e a conseqüente vantagem no seu armazenamento. A principal desvantagem está no fato de que a exposição a raios X é cerca de 5 vezes maior que numa radiografia normal de tórax, além de mostrar menos detalhes.

7.4.3 — Tomografia

Numa radiografia convencional as imagens de todos os órgãos no trajeto de um feixe de raios X são superpostas e projetadas num plano. As estruturas normais podem mascarar ou interferir na imagem dos tumores ou regiões anormais. Além disso, enquanto a distinção entre o ar, o tecido mole e o osso pode ser feita facilmente, o mesmo não ocorre com os tecidos normais e anormais que apresentam uma pequena diferença na absorção de raios X numa chapa.

As técnicas de *tomografia convencional*, propostas em 1930, e de *tomografia computadorizada*, desenvolvida a partir de 1972, possibilitam a visualização de uma seção plana do corpo e nesta última podem-se distinguir materiais e estruturas com diferenças na absorção de raios X de até 0,5%.

Na tomografia computadorizada o tubo de raios X e o detector, este último substituindo o filme de raios X, executam uma varredura linear durante a qual se fazem as medidas de radiação transmitida através do corpo do paciente. A seguir, o tubo de raios X e o detector são girados de 1° em relação ao eixo perpendicular ao plano cuja imagem se deseja obter e novamente é efetuada a varredura linear. Isso é ilustrado na Figura 7.1.

Esse processo se repete, até completar os 180° , isto é, 180 varreduras lineares. Os dados coletados são armazenados num computador que efetua a análise para reconstruir uma imagem das estruturas anatómicas de uma seção transversal de uma das partes do corpo. A imagem que reflete as propriedades de absorção é, então, apresentada num anteparo de um tubo de raios catódicos.

Na tomografia computadorizada mais moderna, empregam-se até 320 detectores enfileirados ao longo de um arco para se medir simultaneamente toda a radiação transmitida através do corpo, empregando-se um feixe em leque de raios X, como se pode ver na Figura 7.2.

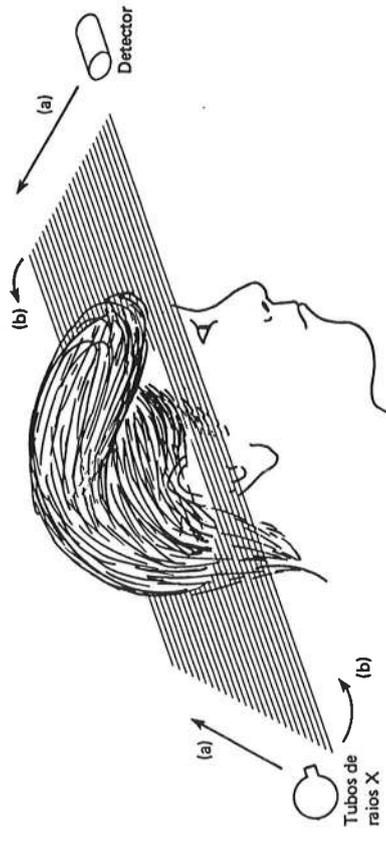


Figura 7.1 — Tomografia cerebral. (a) Varredura linear num ângulo fixo; (b) rotação de 1° para cada varredura linear até completar 180° .

Nesse sistema moderno foi eliminada a varredura linear, efetuando-se somente movimentos rotacionais do tubo de raios X e do conjunto de detectores, diminuindo-se assim o tempo de exposição do paciente de 4 minutos no primeiro sistema descrito para até 5 segundos neste último.

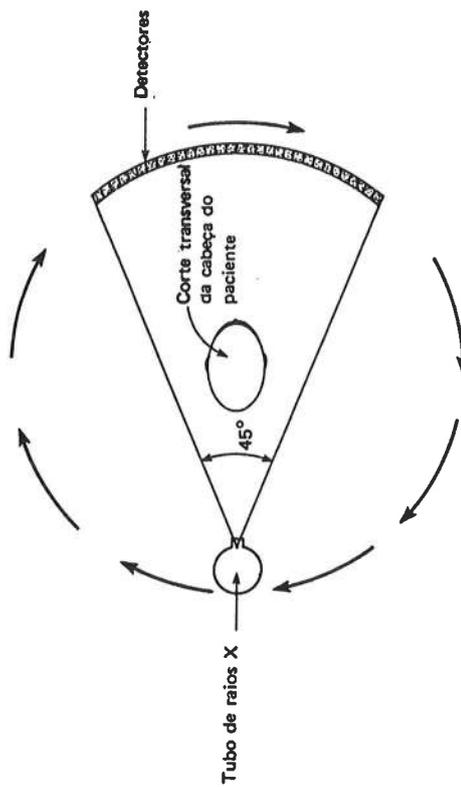
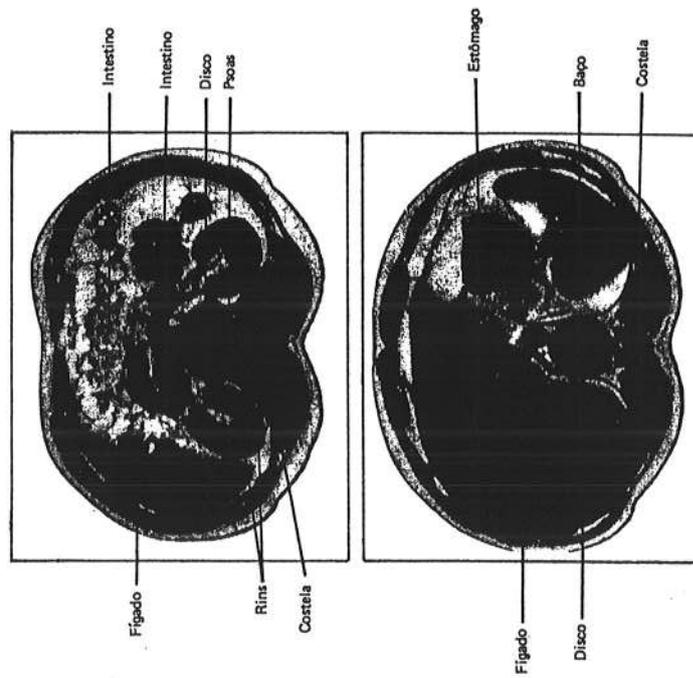


Figura 7.2 — Vista transversal de um moderno sistema de tomografia computadorizada.



7.4.4 — Exposições típicas

Exposições típicas a que se submete em média um adulto em diversas radiografias nos Estados Unidos estão na Tabela 7.3.

Tabela 7.3* — Exposições típicas em diversas radiografias nos Estados Unidos.

Radiografia	Exposição (mR)
Tórax	23
Crânio	270
Abdome	560
Coluna (cervical)	230
Coluna (lombal)	790
Interproximal dentária	650

Num levantamento feito nos Estados Unidos com diferentes aparelhos de raios X, foi constatada uma grande variação nas exposições. Em 500 radiografias de tórax encontrou-se uma variação de 3 a 2.300 mR.

7.5 — MEDICINA NUCLEAR

O uso clínico do material radioativo iniciou-se em 1927, quando Herrmann Blumgart e Soma Weiss injetaram na veia de um braço o radioisótopo natural rádio C (radon), e mediram o intervalo de tempo que este levou para chegar ao outro braço, usando como detector uma câmara de Wilson. Essa medida permitiu estimar a velocidade do fluxo sanguíneo entre os dois braços. Em 1948, M. Prinzmetal, E. Cordey e colaboradores obtiveram o primeiro radiocardiograma com um contador Geiger-Müller acoplado a um registrador, após injetar, intravenosamente, o cloreto de sódio marcado com o sódio radioativo ^{24}Na .

Com o desenvolvimento de aceleradores nucleares, como o cíclotron, e de reatores nucleares, radioisótopos artificiais foram produzidos e, posteriormente, um grande número deles foi usado na marcação de compostos para estudos biológicos, bioquímicos e médicos. A produção desses compostos é efetuada pela área de radiofarmácia, onde radioisótopos são incorporados a drogas por mecanismos específicos.

Podem-se efetuar os estudos clínicos *in vivo* ou *in vitro*. No primeiro caso, a obtenção de dados é feita diretamente do paciente, como é o caso do mapeamento hepático com o colóide de enxofre marcado com o tecnécio metaestável $^{99}\text{Tc}^m$. No segundo caso, o composto radioativo é administrado ao paciente, e amostras de sangue ou da excreção são coletadas para análise posterior. Esse processo é usado, por exemplo, no estudo de absorção da vitamina B₁₂ por pacientes com anemia. Os radioisótopos podem ser usados também em terapia, por exemplo, no tratamento de disfunção tireoideana.

Quanto aos estudos básicos não clínicos, o radioisótopo, por exemplo, o ^{14}C é usado na avaliação de atividades enzimáticas, na detecção de microrganismos, ou o ^3H , usado no estudo da divisão celular através de auto-radiografias.

7.5.1 — Instrumentação e radiofármacos

A medicina nuclear utiliza, basicamente, a instrumentação da Física nuclear adaptada às condições clínicas, isto é, um sistema de detecção de radiação acoplado a mecanismos que permitam registrar a distribuição espacial e/ou a passagem temporal de radioisótopo dentro de uma pessoa. O detector pode ser um cristal de cintilação — por exemplo, o iodeto de sódio dopado com tálio — NaI(Tl) — ou um detector semicondutor, por exemplo, o germânio-lítio — GeLi.

O detector de cintilação, que é o mais usado, tem como propriedade a produção de cintilações dentro do cristal devida à interação da radiação gama com o mesmo. Essas cintilações são detectadas por um tubo fotomultiplicador que produz um pulso elétrico, cuja altura h está relacionada com a energia da radiação E_γ que interagiu com o cristal de cintilação. A Figura 7.3 esquematiza esse processo. De um eletrodo (dínodo) para outro, os elétrons são acelerados, e devido às colisões com os eletrodos, eles se multiplicam, dando origem a uma cascata de elétrons que forma o pulso elétrico de saída. Em geral, o fator de multiplicação entre 2 dínodos consecutivos está entre 2 e 5, dependendo da diferença de potencial entre eles.

Se o detector de cintilação for pequeno, com diâmetro da ordem de 5 cm, seu sinal de saída pode ser injetado a um graficador que produzirá curvas (por exemplo, o renograma) representando a passagem temporal de um radiofármaco através de uma região (os rins) sobre a qual está o detector. Pode-se ligar também o detector a um sistema de varredura, que percorre regiões delimitadas sobre uma pessoa, e o sinal de saída do mesmo ligado, por exemplo, a um impressor, que produz um mapa da distribuição da radioatividade dentro dessas regiões. A Figura 7.4 esquematiza esse tipo de sistema de detecção de varredura linear.

No final dos anos 50, Hal Anger construiu a primeira câmara de cintilação ou gama-câmara, constituída de um cristal de NaI(Tl) com 10,2 cm de diâmetro e 0,64 cm de espessura, acoplado a 7 tubos fotomultiplicadores, que permitia a visualização global de pequenas regiões como a tireóide. Com essa inovação, a imagem de um órgão pode ser obtida com o detector estacionário.

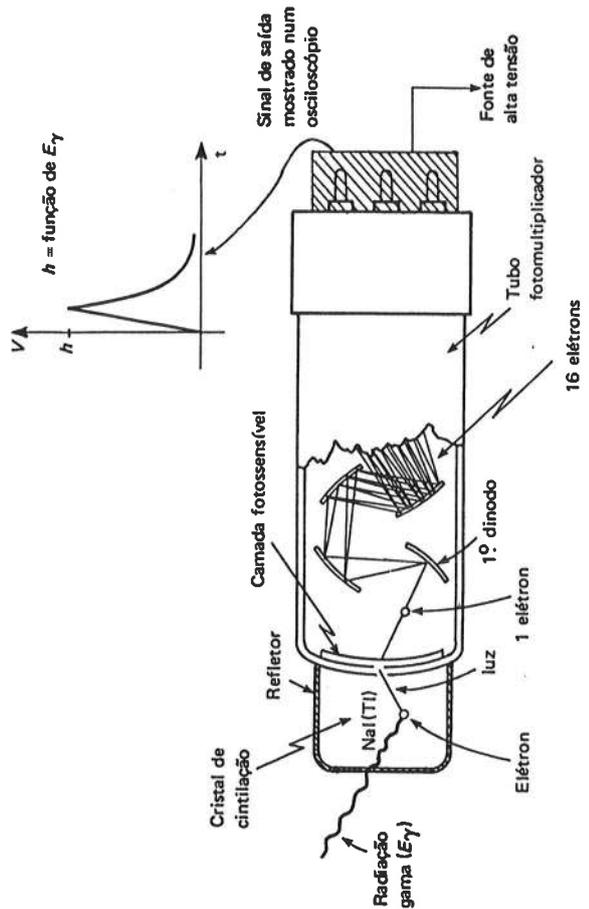


Figura 7.3 — Esquema dos processos ocorridos dentro do cristal de cintilação e do tubo fotomultiplicador.

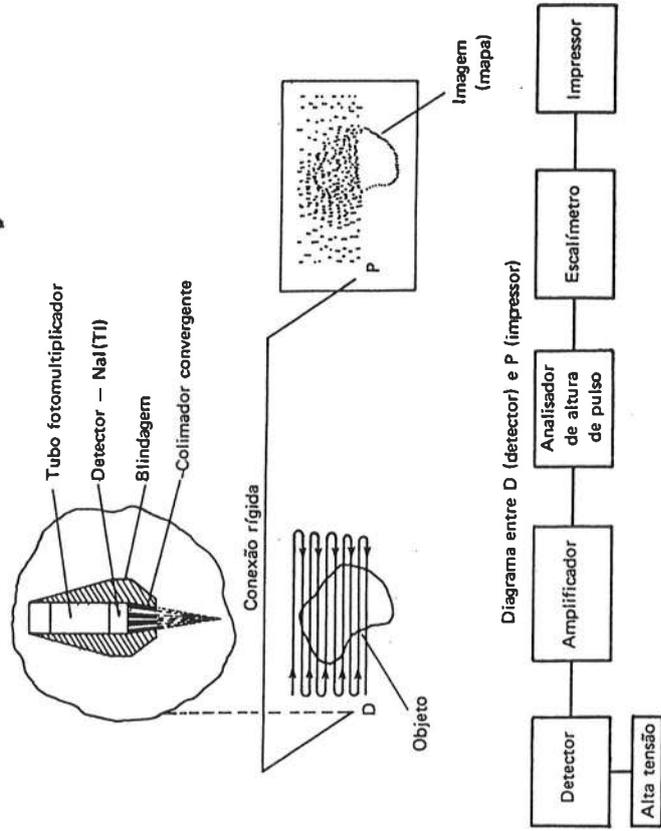


Figura 7.4 — Esquema de um sistema de detecção móvel para a obtenção de mapeamentos.

As câmaras modernas possuem diâmetros de até 45 cm acopladas a 37 tubos fotomultiplicadores, e são ligadas a um sistema de computação, de maneira que a tomada de dados é feita automaticamente, e a análise pode ser bastante elaborada.

Nos estudos *in vitro* e *básicos*, além dos cristais sólidos de cintilação, usam-se também cristais de cintilação líquidos, aos quais podem ser adicionadas quantidades muito pequenas de amostras contendo radiação beta. Esse método é empregado na detecção daquele tipo de radiação porque ele é facilmente blindado por qualquer obstáculo — por exemplo, o tubo de ensaio que contém a amostra. Misturando-se o espécime com o detector líquido, a radiação beta interage diretamente com o cristal, produzindo cintilações que são “vistas” pelos tubos fotomultiplicadores sendo, consequentemente, registradas.

De modo geral, o radiofármaco administrado a uma pessoa é um agente que fornece informações sobre uma função fisiológica e/ou sobre anormalidades anatômicas. Por exemplo, informações sobre a função cardíaca podem ser obtidas utilizando-se a albumina humana marcada com $^{99}\text{Tc}^m$. Por outro lado, pode-se usar ainda o radioisótopo como marcador, que permite obter informações sobre a bioquímica ou a farmacologia de uma droga que será empregada em forma estável, não-radioativa.

A utilidade de um radiofármaco depende essencialmente do comportamento químico e biológico do material marcado e das características do radioisótopo incorporado. A Tabela 7.4 resume alguns dos radiofármacos “bem estabelecidos” e suas aplicações.

Tabela 7.4 — Exemplos de radiofármacos e suas aplicações.

Isótopo	Forma química	Uso
$^{99}\text{Tc}^m$	Pertechnetato ($\text{Na}^{99}\text{Tc}^m\text{O}_4$)	Estudos dinâmicos cardíaco e cerebral Imagens de { cérebro placenta tireóide
$^{99}\text{Tc}^m$	Soro de albumina humana	Estudo dinâmico cardíaco Imagens da { placenta efusão do pericárdio
$^{99}\text{Tc}^m$	Microesferas de albumina Macroagregados de albumina	Imagens dos pulmões
$^{99}\text{Tc}^m$	Colóide de enxofre	Imagens de { medula óssea fígado baço
$^{99}\text{Tc}^m$	Fosfatos	Imagens do osso
^{95}Se	Selenometionina	Imagens do pâncreas
^{13}N	Nitrogênio gasoso	Estudos de perfusão e ventilação pulmonares
^{13}N	Amônia ($^{13}\text{NH}_4$)	Deteção de enfartes cardíacos
^{111}In	$^{111}\text{InCl}_3$, albumina, globulina	Imagens de { cérebro tecidos moles
^{123}I	Na^{123}I	Imagens da tireóide
^{11}C	^{11}CO	Imagens da placenta
^{11}C	$^{11}\text{CO}_2$	Estudo dinâmico dos <i>shunts</i> cardíacos e dos pulmões
^{201}Tl	Cloreto	Imagem do miocárdio

7.5.2 — Doses absorvidas

Em geral, a dose da radiação absorvida pelo corpo num estudo na medicina nuclear não é uniforme, pois os radioisótopos tendem a se concentrar em órgãos específicos. O órgão que recebe a maior dose durante um processo é chamado órgão crítico. Essas doses variam de pessoa para pessoa, mesmo quando as atividades administradas forem iguais. Isso porque no cálculo da dose são levados em conta a geometria do órgão, a estatura e o peso do paciente, o metabolismo do com-

posto pelo órgão em estudo, além das características físicas do radioisótopo e do intervalo de tempo em que o radioisótopo ficou no órgão.

O intervalo de tempo durante o qual o radiofármaco ficou num órgão depende da meia-vida física ($T_{1/2}^{fís}$) e da meia-vida biológica ($T_{1/2}^{bio}$). A meia-vida biológica de um elemento num órgão é o tempo necessário para que a metade da quantidade inicial do elemento seja removida do mesmo, e ela independe do fato do elemento ser radioativo ou não. A meia-vida efetiva é então calculada por:

$$T_{1/2}^{ef} = \frac{(T_{1/2}^{bio})(T_{1/2}^{fís})}{T_{1/2}^{bio} + T_{1/2}^{fís}}$$

Se uma das meias-vidas é bem menor que a outra, a meia-vida efetiva é praticamente igual ao menor valor.

Exemplo 7.1 — Qual é a meia-vida efetiva do ^{131}I na tireóide se $T_{1/2}^{fís} = 8$ dias e $T_{1/2}^{bio} = 15$ dias?

Solução

$$T_{1/2}^{ef} = \frac{(15 \text{ dias})(8 \text{ dias})}{(15 + 8) \text{ dias}} = 5,2 \text{ dias}$$

Exercício Proposto — Calcule a meia-vida efetiva do ^{18}F no osso se $T_{1/2}^{bio} = 7$ dias e $T_{1/2}^{fís} = 110$ min.

Como foi mencionado, a dose de radiação absorvida depende de vários fatores, entre os quais as características físicas do radioisótopo. Isso significa que a dose é função: *do tipo de radiação*, isto é, se esta é radiação gama pura ou mista, emitindo também partículas como o elétron; *da energia liberada por cada uma das radiações*; *da interação com o tecido formador do órgão em particular*. Esses fatores, juntamente com os citados anteriormente, fazem que o cálculo da dose seja extremamente individual. No entanto, foi criada uma pessoa padrão, cujas dimensões, massas e características, assim como as de seus órgãos, foram tabeladas, de tal modo que seja possível ter um valor aproximado da dose absorvida antes de se decidir sobre a quantidade de radioisótopos a ser administrada.

7.5.3 — Aplicações clínicas

As aplicações clínicas podem ser, em geral: *diagnósticas*, compreendendo a detecção e localização de anormalidades como tumores, a avaliação do metabolismo e da fisiologia; *terapêuticas*; e *análise por ativação* por nêutrons, onde a determinação *in vivo* de elementos-traço é feita com bastante precisão. Serão apresentados a seguir alguns exemplos dessas aplicações.

Captção de iodo e mapeamento da tireóide Devido à afinidade do iodo pela tireóide, os radioisótopos mais usados para se estudar essa glândula são o ^{131}I e o ^{123}I na forma de iodeto de sódio. Esse composto é administrado oralmente ao paciente e efetuam-se provas de captação após 2 horas e 24 horas. A percentagem da quantidade ingerida captada pela glândula pode fornecer informações sobre a atividade da mesma, isto é, se ela é hiper-, normal ou hipofuncionante.

Podem-se obter uma idéia das regiões funcionantes da glândula através de seu mapeamento. Em casos de atividade anormal, as regiões correspondentes são localizadas nos mapas ou nas imagens

obtidas com o detector de varredura ou com a gama-câmara, respectivamente. Para isso, usa-se tanto o iodeto de sódio marcado quanto o pertecnetato de sódio.

É preciso lembrar que níveis de normalidade dependem muito da dieta e do local, pois níveis considerados normais à beira-mar são muitas vezes considerados altos para regiões longe da costa.

Função pulmonar O estudo da função pulmonar pode ser efetuado com gases radioativos ou com partículas radioativas. Os gases podem ser ou inspirados, como o $^{15}\text{O}_2$, C^{15}O , $^{13}\text{N}_2$, ^{133}Xe , ou injetados intravenosamente, como o ^{133}Xe , $^{13}\text{N}_2$. No primeiro caso, a distribuição da radiação dá o grau de ventilação pulmonar, enquanto que no segundo a informação fisiológica é sobre a perfusão nas várias regiões dos pulmões.

O uso de partículas radioativas, como as microesferas ou macroagregados de albumina humana marcados com $^{99}\text{Tc}^m$, fornece medidas do fluxo sanguíneo arterial regional pulmonar.

Fisiologia cardíaca Parâmetros básicos sobre a hemodinâmica podem ser obtidos após a injeção intravenosa de um traçador, como a albumina humana ou as hemácias marcadas com $^{99}\text{Tc}^m$, ou o pertecnetato de sódio $\text{Na}^{99}\text{Tc}^m\text{O}_4$. A partir da análise de passagem do traçador pelo sistema circulatório central, isto é, as cavidades cardíacas, os pulmões e as grandes artérias, pode-se obter a velocidade do fluxo sanguíneo, os tempos de trânsito entre um compartimento e outro, o débito cardíaco, as frações de ejeção dos ventrículos, a velocidade e o padrão de contração do miocárdio etc.

Se elementos como o cloreto marcado com ^{201}Tl ou ^{43}K forem injetados intravenosamente durante o máximo de esforço físico, imagens da distribuição do radioisótopo no miocárdio fornecerão informações sobre a existência ou não de anormalidades devidas a isquemia ou enfarte.

Doenças metabólicas Podem-se estudar doenças metabólicas com o uso de radioisótopos de elementos presentes no organismo como o carbono, o hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio, o fósforo, o enxofre, o ferro etc.

O metabolismo do ferro pode ser estudado medindo-se externamente o acúmulo do ferro radioativo ^{59}Fe no pâncreas, no fígado e na medula óssea.

No estudo do metabolismo da vitamina B_{12} usa-se o ^{57}Co para marcar essa vitamina e obtém-se o grau de absorção medindo a quantidade da radioatividade excretada 3 a 5 dias após a ingestão da vitamina marcada.

Terapia Pode-se usar o radioisótopo na terapia de algumas doenças como o ^{131}I no hipertireoidismo e em carcinomas tireoideanos; o colóide do ouro (^{198}Au) e o ítrio radioativo (^{90}Y) no tratamento de efusões pleural e peritoneal; o fósforo ^{32}P é usado no tratamento da leucemia crônica etc. A escolha do radioisótopo para determinada terapia depende do metabolismo do composto, como é o caso do ^{131}I , e/ou do tipo de radiação, como o caso do ^{32}P que emite partículas β de curto alcance mas que são eficientes para destruir as células da região comprometida.

Análise por ativação por nêutrons Numa análise por ativação, a amostra a ser estudada é exposta a um feixe intenso de nêutrons que interagem com os átomos da amostra para produzir isótopos radioativos. Após um intervalo de tempo suficientemente longo para produzir uma quantidade de radioisótopos conveniente para ser detectada, a amostra é levada para ser analisada. Um dos métodos é a análise da radiação para identificação dos elementos-traço da amostra. A precisão nesse tipo de análise é bastante boa, pois pode-se observar até 0,005 partes por mil de arsênio em tecido.

Uma das aplicações clínicas, além da determinação de elementos-traço, é o estudo do metabolismo de proteínas por pacientes que sofreram grandes cirurgias, ou o metabolismo do cálcio por pacientes que receberam neutronterapia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

- COGGRE, J. E. — *Biological Effects of Radiation*. UK, Wykehem, Science Series n.º 14, 1971.
 HENDEE, W. R. — *Radioactive Isotopes in Biological Research*. USA, John Wiley & Sons, 1971.
 QUIMBY, E. H., FEITELBERG, S. & GROSS, W. — *Radioactive Nuclides in Medicine and Biology: Basic Physics and Instrumentation*. USA, Lea & Febiger, 1970.
 SILVER, S. — *Radioactive Nuclides in Medicine and Biology: Medicine*. USA, Lea & Febiger, 1968.
 THORNBURN, C. C. — *Isotopes and Radiation in Biology*. UK, Butterworths, 1972.
 WAGNER, Jr., H. N. (ed.) — *Nuclear Medicine*. USA, H. P., 1975.

Artigos de Periódicos

- BROWN, J. W. — Image Reconstruction (I): Computerized X ray Scanners. *Science* 190:542, 1975.
 GORDON, R., HERMAN, G. T. & JOHNSON, S. A. — Image Reconstruction from Projections. *Scientific American* 233:56, Oct., 1975.
 ROBINSON, A. L. — Image Reconstruction (II): Computerized Scanner Explosion. *Science* 190:647, 1975.

Atas de Simpósios

- Biomedical Dosimetry — Proceedings of a Symposium. Austria, Mar., 1975.
 Radioisotope Sample Measurement Techniques in Medicine and Biology — Proceedings of a Symposium. Austria, May, 1965.
 Medical Radionuclide Imaging — Proceedings of a Symposium. USA, Oct., 1976.
 Diagnosis and Treatment of Incorporated Radionuclides — Proceedings of a Seminar. Austria, Dec., 1975.

Efeitos Biológicos da Radiação

CAPÍTULO 8

8.1 — INTRODUÇÃO

Em 1896, quatro meses após a descoberta dos raios X por Röntgen, o médico J. Daniels, da Universidade de Vanderbilt, notificou à comunidade científica o primeiro efeito biológico da radiação: a queda de cabelo de um de seus colegas, cuja radiologia de crânio havia sido tirada.

Em 1899, dois médicos suecos conseguiram curar um tumor de pele na ponta do nariz de um paciente, e em 1903 um médico americano obteve a diminuição do baço de um paciente com leucemia.

O uso de raios X na terapia estava, entretanto, produzindo resultados desagradáveis. Eritema de pele e a seguir ulcerações se desenvolveram nas mãos dos médicos e, em alguns casos, câncer dos ossos, como resultado das exposições durante o tratamento dos pacientes.

Desde então não só os benefícios trazidos pela radiação mas também seus efeitos danosos têm interessado os cientistas de todo o mundo.

Os estudos dos mecanismos básicos da radiobiologia permitem análises microscópicas do que ocorre com a passagem da radiação e liberação de sua energia em volumes muito pequenos como células ou partes das células. A energia liberada pode produzir ionização e excitação dos átomos e quebra de moléculas e, como consequência, formação de íons e radicais livres altamente reativos. Estes, por sua vez, podem atacar moléculas de grande importância como a molécula de DNA (ácido desoxirribonucleico) do núcleo da célula, causando-lhes danos. A destruição de uma molécula de DNA resulta numa célula capaz de continuar vivendo, mas incapaz de se dividir. Assim, a célula acaba morrendo e não sendo renovada. Se isso ocorrer em um número muito grande de células, sobrevém o mau funcionamento do tecido constituído por essas células e, por fim, a sua morte. Existem efeitos biológicos da radiação que se manifestam a curto e a longo prazo.

8.2 — EFEITOS A CURTO PRAZO OU AGUDOS

São efeitos observáveis em apenas horas, dias ou semanas após a exposição do indivíduo à radiação.

Esses efeitos estão geralmente associados a altas doses de radiação, acima de 1 Sv, recebidas por grandes áreas do corpo, num curto período de tempo. Dependendo da dose, pode ser provocada a chamada síndrome aguda de radiação, em que podem ocorrer náuseas, vômitos, prostração, perda de apetite e de peso, febre, hemorragias dispersas, queda de cabelo e forte diarreia.

Dependendo da dose de radiação recebida e da condição de resistência do indivíduo exposto, o resultado final pode ser letal.

Os três sistemas de órgãos que parecem ser os mais importantes na síndrome aguda de radiação são o sistema hematopoético — para doses equivalentes abaixo de 5 Sv; o sistema gastrointestinal —

para doses equivalentes entre 5 e 20 Sv, e o sistema nervoso central — para doses equivalentes acima de 50 Sv.

Os seres vivos não são igualmente sensíveis a radiações. Com base em experiências realizadas em laboratório, as doses equivalentes letais para os diferentes seres vivos foram estimadas: para a maior parte dos mamíferos — entre 2 e 10 Sv; para os insetos — entre 10 e 10³ Sv; para as plantas que florescem — entre 10 e 10³ Sv; para os microrganismos — entre 10¹ e 10⁴ Sv.

8.3 — EFEITOS A LONGO PRAZO OU TARDIOS

Esses efeitos podem surgir de *altas doses num curto intervalo de tempo*: são os casos de animais adultos que receberam dose de radiação que não foi letal, portanto com recuperação aparente, podendo ainda vir a sentir os efeitos muitos anos mais tarde; e de *pequenas doses, mas crônicas num longo intervalo de tempo*: são os casos de pessoas ocupacionalmente expostas, como radiologistas e pesquisadores com radiação.

Os efeitos tardios ainda se subdividem em *genéticos* e *somáticos*.

8.3.1 — Efeitos genéticos

Eles consistem de mutações nas células reprodutoras que afetam gerações futuras. Esses efeitos podem surgir quando os órgãos reprodutores são expostos a radiação, e aparentemente não afetam o indivíduo que sofre a exposição, mas apenas seus descendentes.

Quando a radiação atinge as células reprodutoras ou seus precursores, pode ocorrer uma alteração na informação genética codificada, provocando uma mutação genética. Se o espermatozóide ou o óvulo que sofreu a mutação for, posteriormente, utilizado na concepção, a alteração será incorporada ao óvulo fertilizado, e durante a gravidez, quando o zigoto se reproduzir milhares de vezes, essa alteração será fatalmente reproduzida. Todas as células do recém-nascido conterão, então, informações genéticas modificadas, incluindo aquelas que anos mais tarde irão se transformar em espermatozoides ou óvulos. Isto significa que, quando esse indivíduo atingir a fase fértil e se reproduzir terá grande probabilidade de transferir a informação genética alterada, podendo assim continuar por muitas gerações. Algumas dessas mutações chegam a ser letais, antes do nascimento do feto. Outras podem produzir defeitos físicos ou mentais ou, simplesmente, aumentar a suscetibilidade a determinadas doenças crônicas, ou a anormalidades bioquímicas.

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

8.3.2 — Efeitos somáticos

São aqueles que afetam diretamente o indivíduo exposto à radiação e não são transmitidos a gerações futuras. Esses efeitos dependem dos seguintes fatores:

- tipo de radiação;
- profundidade atingida, que está relacionada à energia da radiação e ao tipo de tecido irradiado;
- área ou volume do corpo exposto;
- dose total recebida;
- tempo de irradiação.

Entre os efeitos somáticos no homem, os mais importantes são:

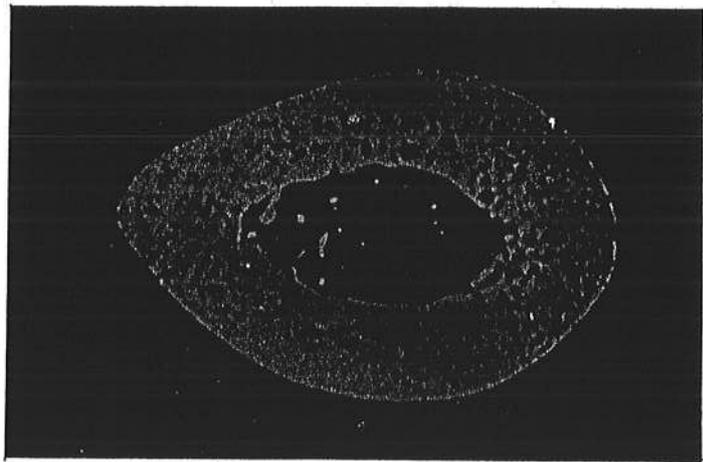
- aumento na incidência de câncer;
- anormalidade no desenvolvimento do embrião;
- indução de catarata;
- redução da vida média.

Aumento na incidência de câncer Dentro os efeitos somáticos a longo prazo, talvez o mais temido seja o efeito carcinogênico. Experiências realizadas em laboratórios com animais mostraram a possibilidade de induzir neles os mais variados tipos de tumores, dependendo da radiação empregada e da parte do corpo exposta.

Dados humanos disponíveis mostram que há uma relação entre exposição à radiação e leucemia, câncer da pele, da tireóide, dos ossos e do seio.

Algumas das informações acumuladas ao longo dos anos referem-se aos primeiros radiologistas, quando pouco ainda se conhecia sobre os efeitos deletérios dos raios X. Esses indivíduos receberam grandes doses cumulativas, principalmente nas mãos, e como resultado muitos deles desenvolveram câncer nas regiões expostas.

Grande incidência de câncer nos ossos foi constatada em pessoas que pintavam os mostradores de relógios com rádio radioativo, no período de 1913 a 1925. Essas pessoas afinavam o pincel com a língua, ingerindo, dessa forma, o rádio. A necrose observada nos ossos foi causada pela radiação emitida pelo rádio, depositado nos ossos por causa das semelhanças químicas entre o rádio e o cálcio. Muitos desses indivíduos desenvolveram também câncer na boca e no esôfago.



Micrografia de seção transversal de osso humano. À esquerda, amostra de osso normal; à direita, amostra de osso de uma pessoa com uma carga corpórea de rádio radioativo extremamente alta (radiação γ).

Uma das evidências mais fortes dos efeitos tardios refere-se aos sobreviventes de bombardeios atômicos nas cidades de Hiroxima e Nagasáqui em 1945. Foi verificado um aumento de incidência de leucemia e de câncer na tireóide e nos ossos, dependendo da dose recebida.

Anormalidade no desenvolvimento do embrião A observação do efeito direto no embrião está ligada a evidências adquiridas com animais nos laboratórios.

Em geral, as pessoas mais jovens são mais sensíveis à radiação, sendo inclusive a fase fetal a que merece mais atenção. Em certos períodos do desenvolvimento do feto a radiação pode causar deformações.

Fetos de ratos que receberam a dose de 1 Sv de raios X no útero, no oitavo dia após a concepção, apresentaram, em alguns casos, anomalias físicas, e outros nasceram mortos. Anomalias nos embriões dos ratos surgem com doses desde 0,25 Sv.

Indução de catarata Quando a vista humana é diretamente atingida pela radiação, as células que morrem não são substituídas ou expelidas, como acontece com outros órgãos do corpo. As células mortas permanecem, e, se forem em grande número, produzem opacidade do cristalino, isto é, catarata.

O período latente entre a irradiação e a opacidade pode ser de meses ou anos.

A dose equivalente crítica para formação de catarata no olho humano tem sido estimada por alguns autores como sendo de 2 Sv para dose única e 15 Sv, fracionada num período de 50 anos.

Os nêutrons são especialmente importantes na produção de cataratas.

Redução da vida média Para a verificação desse efeito, grande número de animais foram irradiados, para se terem resultados com significado estatístico. Observou-se, então, um encurtamento da vida média nos animais irradiados.

Tem-se observado também que a vida média dos radiologistas é inferior à de médicos de outras especialidades. Estatísticas obtidas entre os anos de 1955 e 1958 mostraram um aumento na taxa de mortalidade, entre 65 e 79 anos, de 15% para os radiologistas em relação a outras especialidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

- ACKERMAN, E. — *Biophysical Science*. USA, Prentice Hall, 1962.
 ANDREWS, H. L. — *Radiation Biophysics*. USA, Prentice Hall, 1974.
 CAMERON, J. R. & SKOFFRONICK, J. G. — *Medical Physics*. USA, John Wiley & Sons, 1978.
 CASARETT, A. P. — *Radiation Biology*. USA, Prentice Hall, 1968.
 FREIRE-MAIA, N. — *Radiogenética Humana*. Brasil, EDUSP, 1972.
 HENRY, H. — *Fundamentals of Radiation Protection*. USA, Wiley Interscience, 1969.
 STUHLMAN, O. Jr. — *An Introduction to Biophysics*. USA, John Wiley & Sons, 1943.

Artigos de Periódicos

- PUCK, T. T. — Radiation and the Human Cell. *Scientific American* 202:142, April, 1960.
Scientific American 201:3, Sept., 1959. Volume especial sobre radiação ionizante.

LEITURAS SUPLEMENTARES

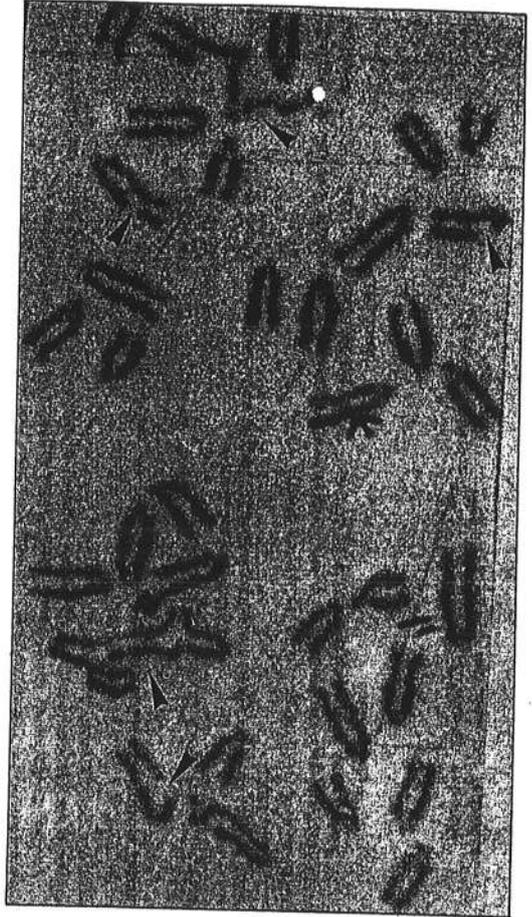
INFLUÊNCIA DE INIBIDORES NO MECANISMO DE REPARO DE QUEBRAS CROMOSSÔMICAS INDUZIDAS POR RADIAÇÃO

Hamilton João Targa
 Departamento de Biologia
 Instituto de Biociências
 Universidade de São Paulo

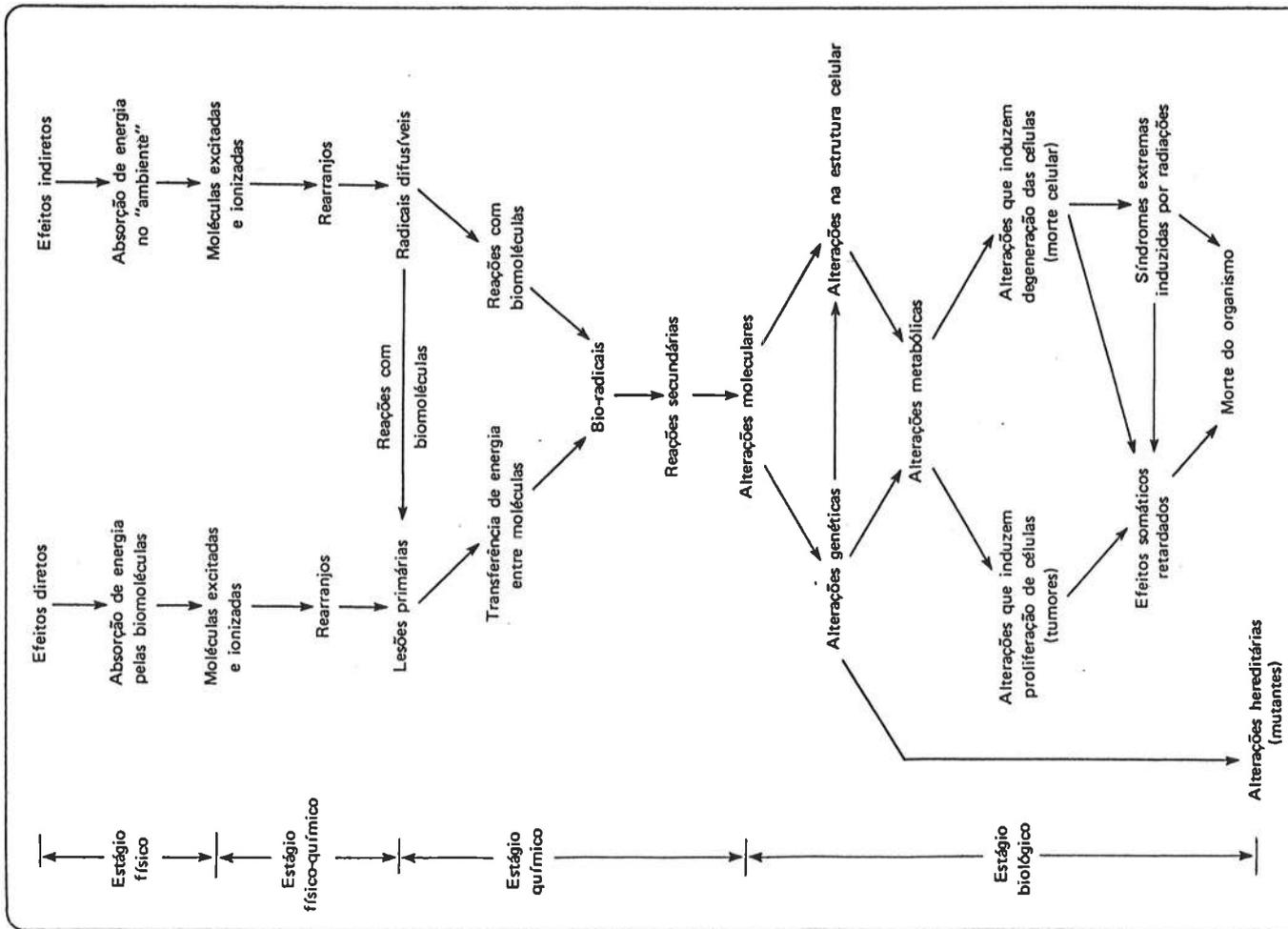
As evidências comentadas anteriormente, bem como inúmeros resultados encontrados na literatura, não permitem dúvidas a respeito das possíveis consequências da exposição dos seres humanos à ação das radiações. Tal exposição pode, conforme está esquematizado na página 76, desencadear uma série de reações as quais poderão resultar na morte do organismo ou então na indução de mutações em seu material genético. Essas mutações são em sua grande maioria condicionadoras de características indesejáveis, sendo bastante raras aquelas que poderão beneficiar seus portadores.

Contudo, deve-se salientar que o material genético de cada célula não se encontra totalmente desprotegido da ação de agentes físicos ou químicos. Experimentos recentes têm demonstrado que a maioria das lesões induzidas no DNA são reparadas por mecanismos especiais existentes no interior das células.

Assim, dímeros de pirimidina formados no DNA de células tratadas principalmente com luz ultravioleta são reparados pelos mecanismos de fotoreativação ou de excisão ou pós-replicacional. No primeiro caso, mecanismo de fotoreativação, a ligação formada pela UV entre as duas bases próximas, é rompida por uma enzima produzida pela exposição do material à luz visível. Essa enzima não é característica de cada espécie, e também não atua sobre as demais bases não danificadas do DNA.



Fotomicrografia de cromossomos de camundongo *Mus musculus* exibindo rearranjo e quebras cromossômicas induzidas por raios gama. (Cortesia de Hamilton João Targa.)



No reparo por excisão, o qual não depende da luz visível para sua atuação, os dímeros formados são reconhecidos por enzimas especiais, as quais provocam sua eliminação da fita de DNA. A porção danificada é a seguir reparada, através da reposição de bases que ocupavam anteriormente aquela posição no DNA. Todo esse processo é realizado por um sistema enzimático que envolve uma endonuclease, uma exonuclease, uma polimerase e uma lipase.

O mecanismo de reparo pós-replicacional atua apenas durante o período normal de síntese de DNA, quando a partir de uma molécula, são formadas duas novas moléculas de DNA. Essa síntese é semiconservativa, sendo que cada hélice do DNA servirá de molde para a formação da hélice complementar. No caso da hélice molde conter dímeros que não foram reparados, aparecerão lacunas na região complementar da hélice que está sendo sintetizada. Essas lacunas serão posteriormente preenchidas pelo mecanismo de reparo pós-replicacional, com bases dispostas na mesma seqüência original.

Além desses sistemas de reparo, existe um outro bastante documentado, mas sobre cuja natureza pouco se conhece até o momento. Trata-se do reparo de quebras cromossômicas que podem ser induzidas por agentes físicos ou químicos em células somáticas ou da linhagem germinativa. Tais quebras terão como seqüência a divisão do cromossomo em, no mínimo, duas porções: uma sem centrômero (acêntrica) e outra com centrômero (cêntrica). O fato do fragmento acêntrico não ter, durante as divisões celulares, condições de se ligar às fibras do fuso faz que o mesmo não seja transmitido regularmente às células que são originadas pelo processo da meiose ou da mitose. Formam-se, assim, células deficientes em relação aos genes contidos no fragmento acêntrico. Essa deficiência pode resultar na morte da célula que recebeu o complemento cromossômico deficiente. No caso de células da linhagem germinativa, a morte da célula pode se dar durante o processo da oogênese ou da espermatogênese, ou, ainda, após a formação do zigoto.

Embora se desconheça o mecanismo que possibilita a soldadura, ou o reparo, de cromossomos danificados por radiação, resultados obtidos em nosso laboratório parecem corroborar as idéias de S. Wolff de que o mesmo depende de proteínas ou enzimas especiais. De acordo com nossos experimentos em *Musca domestica*, tais enzimas seriam produzidas em maior quantidade, possibilitando maior reparo, nas células que apresentam maior atividade metabólica.

Também bastante interessante devido a suas implicações entre os seres humanos são os resultados obtidos recentemente em nosso laboratório. Esses resultados reforçam os indícios obtidos em outros centros de pesquisa de que o mecanismo de reparo de quebras cromossômicas pode ser inibido pela cafeína. Em *Musca domestica* essa inibição é obtida alimentando-se os insetos, anteriormente à irradiação, com uma dieta contendo 10-3 M de cafeína.

Tais resultados se mostram particularmente interessantes para os trabalhos de radioterapia, pois a utilização de agentes inibidores de reparo (agentes sinérgicos) poderia levar a uma redução nas doses utilizadas nos tratamentos de tumores.

REFERÊNCIAS PARA CONSULTAS:

- AUERBACH, C. — *Mutation Research: Problems, Results and Perspectives*. Great Britain — Chapman and Hall, 1976.
- JENKINS J. B. — *Genetics*. USA, Houghton Mifflin, 1979.
- KIMBAL, R. F. — DNA repair and its relationship to mutagenesis, carcinogenesis, and cell death. *In Cell Biology*, vol. 2 — D.M. Prescott e L. Goldstein (eds.). USA, Academic Press, 1979.