

# Conceitos Básicos sobre Radiação

## CAPÍTULO 1

### 1.1 — INTRODUÇÃO

Neste capítulo haverá uma introdução sobre os tipos e as características das radiações. Serão apresentadas também a teoria dos quanta e a da dualidade onda-partícula, que fazem parte dos conceitos básicos da Física moderna. Será também apresentada a aplicação do uso do elétron como onda no microscópio eletrônico.

A radiação é a propagação de energia sob várias formas, sendo dividida geralmente em dois grupos: *radiação corpuscular* e *radiação eletromagnética*.

### 1.2 — RADIAÇÃO CORPUSCULAR

Ela é constituída de um feixe de partículas elementares, ou núcleos atômicos, tais como: elétrons, prótons, nêutrons, mésons  $\pi$ , dêutrons, partículas alfa.

A energia cinética  $K$  de uma partícula de massa  $m$  com velocidade  $v$ , quando  $v \ll c$ , o que em geral acontece, é dada por

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

(1.1)

também chamada energia cinética da radiação, onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e vale  $3 \times 10^8$  m/s.

### 1.3 — RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Ondas eletromagnéticas são constituídas de campos elétricos e magnéticos oscilantes e se propagam com velocidade constante  $c$  no vácuo. Ondas de rádio, ondas luminosas (luz), raios infravermelhos, raios ultravioleta, raios X e raios gama são exemplos de radiação eletromagnética.

As grandezas usadas para a caracterização de uma onda eletromagnética são o comprimento de onda  $\lambda$  e a frequência  $f$ .

Existe uma relação entre  $\lambda$  e  $f$  para ondas em geral,

$$\lambda f = v$$

(1.2)

onde  $v$  é a velocidade de propagação da onda.

No caso particular de uma onda eletromagnética

$$\lambda f = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

(1.3)

Os comprimentos de onda das radiações eletromagnéticas que serão considerados nessa unidade são muito curtos, sendo portanto conveniente expressá-los em unidades menores que o metro:

$$1 \text{ angstrom} = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ nanometro} = 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ micrometro} = 1 \text{ \mu m} = 10^{-6} \text{ m}$$

O comprimento de onda da luz azul, por exemplo, é de 4 000 Å. A radiação eletromagnética de comprimento de onda igual a 0,1 Å é raios X.

O espectro da onda eletromagnética pode ser visto no Quadro 1.1.

Quadro 1.1. — O espectro eletromagnético.

Comprimento de onda (m)	Outras unidades	Espécies	Radiação
10 <sup>-15</sup>	1,24 MeV	núcleo dos átomos	raios gama
10 <sup>-12</sup>	0,1 Å		raios X
10 <sup>-11</sup>	1,0 Å		
10 <sup>-10</sup>	1 nm	átomos	
10 <sup>-9</sup>	100 Å		
10 <sup>-8</sup>	1 000 Å	vírus	ultravioleta
10 <sup>-7</sup>	4 000 Å	moléculas	luz visível
	7 000 Å		
10 <sup>-6</sup>	1 μm	células	infravermelha
10 <sup>-5</sup>	10 μm		
10 <sup>-4</sup>	100 μm		
10 <sup>-3</sup>	1 mm	insetos	
10 <sup>-2</sup>	1 cm		
10 <sup>-1</sup>	10 cm		
1	300 MHz	televisão e FM	ondas de rádio
10	30 MHz		
10 <sup>2</sup>	3 MHz		
10 <sup>3</sup>	1 km		

### 1.4 — TEORIA DOS QUANTA

Max Planck, em 1901, e Albert Einstein, em 1905, iniciaram a formulação da teoria dos quanta. Segundo essa teoria, a radiação eletromagnética é emitida e se propaga descontinuamente, em pequenos pulsos de energia, chamados *pacotes de energia*, *quanta* ou *fótons*. Assim, a onda eletromagnética apresenta também um caráter corpuscular.

*Fótons são partículas sem carga e massa de repouso nula* (veja Guia 3 da Unidade VI).

Planck descobriu que todos os fótons, associados a uma frequência particular  $f$  de luz, possuem a mesma energia  $E$ , diretamente proporcional a  $f$ . Isto é,

$$E = hf$$

(1.4)

em que  $h$  é uma constante universal, chamada constante de Planck, e vale  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

A energia  $E$  também pode ser calculada em função de  $\lambda$ . Substituindo-se a frequência  $f$  dada pela equação (1.3) em (1.4), obtém-se

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.5)$$

**Exemplo 1.1** — Qual é a energia de um fóton de luz amarela, sabendo-se que sua frequência é de  $6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ?

**Solução**

$$E = hf = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}) \\ E \approx 4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

O fóton é a menor quantidade de luz que pode ser emitida ou absorvida em qualquer processo. Em particular, o fóton é a menor unidade de luz que pode ser absorvida por uma célula fotossensível da retina do olho.

É interessante ter uma idéia da ordem de grandeza da energia do Exemplo 1.1. Para comparar, calcule:

- a energia cinética de uma bola de futebol de 0,5 kg com velocidade de 10 m/s;
- a energia necessária para uma pessoa de 50 kg dar um salto vertical de 50 cm.

## 1.5 — DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Desde a descoberta, em 1905, por Einstein, das propriedades corpusculares da onda, através do efeito fotoelétrico, passaram-se quase 20 anos antes que alguém especulasse sobre a possibilidade de o inverso também ser válido.

Em 1924, Louis de Broglie apresentou a teoria de que a matéria possuísse tanto características ondulatórias como corpusculares.

Essa proposição é escrita matematicamente na forma

$$mv = \frac{h}{\lambda} \quad (1.6)$$

onde  $\lambda$  é chamado *comprimento de onda de Broglie*.

O caráter corpuscular é representado pelo produto  $mv$ , pois  $m$  e  $v$  são respectivamente massa e velocidade do corpúsculo; enquanto que  $h/\lambda$  representa o caráter ondulatório, pois  $\lambda$  é o comprimento de onda da onda associada ao corpúsculo.

Será introduzida agora uma unidade de energia muito usada na Física moderna denominada *elétron-volt* (eV). Um elétron-volt é a energia adquirida por um elétron ao atravessar, no vácuo, uma diferença de potencial igual a um volt. Sendo o valor da carga do elétron e igual a  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , a energia em J equivalente a 1 eV será:

$$1 \text{ eV} = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \\ 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

\*  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ .

## 1. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE RADIAÇÃO

Assim a constante de Planck  $h$  assume o valor

$$h = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \left( \frac{1}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J}} \frac{\text{eV}}{\text{eV}} \right) = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

**Exemplo 1.2** — Determine o comprimento de onda de de Broglie de um elétron com uma velocidade de  $5 \times 10^7 \text{ m/s}$ . A massa do elétron vale  $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ .

**Solução**

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(5 \times 10^7 \text{ m/s})} \\ \lambda = 1,46 \times 10^{-11} \text{ m} = 0,146 \text{ Å}$$

**Exercício Proposto** — Determine o comprimento de onda associado a uma bola de 1 kg, cuja velocidade é de 1 m/s. Comente o resultado.

## 1.6 — APLICAÇÃO: MICROSCÓPIO ELETRÔNICO

O funcionamento do microscópio eletrônico se baseia nas propriedades ondulatórias do elétron, isto é, faz uso do elétron como onda.

A capacidade de resolução dos microscópios ópticos é limitada pelos efeitos da difração da luz, que é o fenômeno pelo qual a luz é desviada quando encontra obstáculos ou aberturas. Interferências construtivas e destrutivas ocorrem com essa luz, produzindo figuras de difração. (Mais detalhes sobre difração da luz serão vistos na Unidade III — Fenômenos Ondulatórios.)

Ao se examinarem objetos de tamanhos iguais ou menores que o comprimento de onda da luz visível, compreendido entre 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ , a difração da luz ao redor do objeto torna a imagem borrada ou não permite a formação de imagem alguma.

O microscópio eletrônico supera essa dificuldade, pois os comprimentos de onda associados a elétrons são muito menores que os da luz visível utilizados em microscópios ópticos.

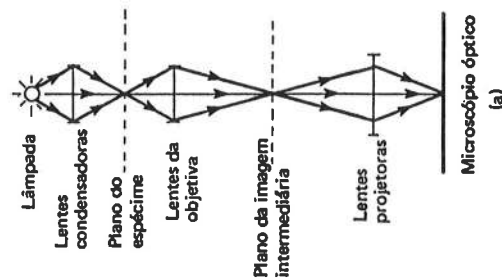


Diagrama esquemático mostrando a analogia entre o microscópio óptico e o microscópio eletrônico.

A voltagem usada para acelerar elétrons, em geral de 50 kV, faz que comprimentos de onda associados a esses elétrons sejam de cerca de  $0,06 \text{ \AA} = 0,06 \times 10^{-10} \text{ m} = 6 \times 10^{-6} \text{ \AA}$ .

Os campos elétrico e magnético são usados para focalizar os elétrons no microscópio eletrônico, da mesma forma que se usam lentes de vidro para focalizar um feixe de luz em microscópios ópticos.

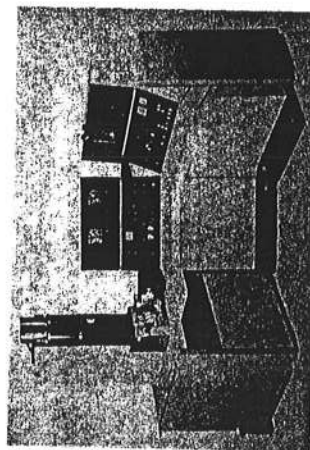
Os microscópios eletrônicos podem mostrar muito mais detalhes que os ópticos. Aumentos de até 350 000 vezes são possíveis em microscópios eletrônicos, comparados ao aumento de 2 000 vezes em microscópios ópticos convencionais.

Os microscópios eletrônicos são particularmente úteis no exame de detalhes em materiais biológicos como estruturas de bactérias, células, tecidos, vírus e no estudo de sólidos, metais e estruturas cristalinas.

Basicamente existem dois tipos de microscópios eletrônicos: microscópio eletrônico de transmissão, que observa através do objeto, e microscópio eletrônico de varredura, que mostra a superfície do espécime.

Alguns dos laboratórios que utilizam microscópios eletrônicos em pesquisas estão listados abaixo.

1. Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física — USP;
2. Departamento de Biologia do Instituto de Biociências — USP;
3. Departamento de Genética do Instituto Butantã;
4. Departamento de Patologia da Faculdade de Medicina — USP;
5. Departamento de Histologia e Embriologia do Instituto de Ciências Biomédicas — USP;
6. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT);
7. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN);
8. Centro de Energia Nuclear na Agricultura — USP, Piracicaba;
9. Departamento de Histologia da Escola Paulista de Medicina;
10. Instituto do Coração do Hospital das Clínicas da FMUSP.



Microscópio eletrônico de varredura Cambridge Stereoscan-180, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Com este instrumento pode-se estudar a superfície de espécimes, tanto inorgânicos como biológicos, obtendo-se uma imagem tridimensional. Acoplados ao aparelho há detectores de raios X para microanálise de seus elementos constituintes.\*

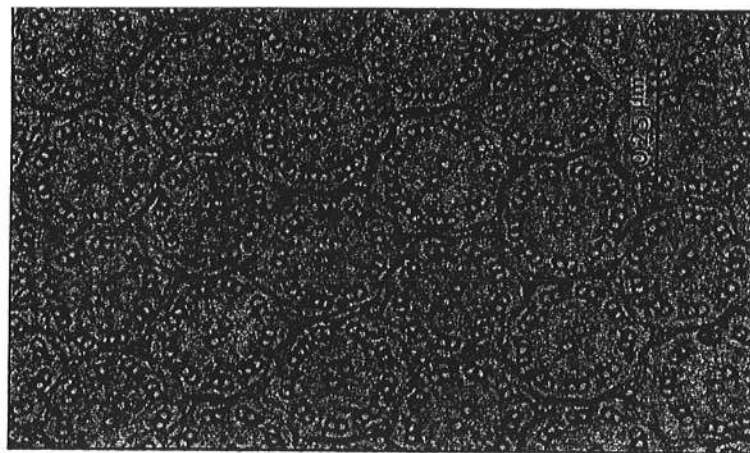


Vista geral de um epitélio ciliado (sola rastejadora de planária *Bipalium kewense*). Os cilírios (C) apresentam-se como projeções cilíndricas das células epiteliais (E), com cerca de  $5 \text{ \AA}$  de altura por  $0,25 \text{ \AA}$  de diâmetro. O batimento coordenado dos cilírios auxilia o animal a locomover-se em superfícies úmidas. X 7 300.\*

\* Cortesia de Marina Silveira, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.



Microscópio eletrônico de transmissão Siemens Elmiskop 101, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Com este tipo de instrumento estudam-se materiais com espessura da ordem de  $500 \text{ \AA}$  ou menos. O microscópio fornece ampliação máxima de 350 000 vezes, com um poder separador de  $3 \text{ \AA}$ .\*



Seção ultrafina transversal de cilírios de *Bipalium kewense*, vista ao microscópio de transmissão. Cada cilírio é envolto por uma membrana fina e possui um conjunto simétrico de microtúbulos (estrutura "9 + 2"). Do deslocamento relativo desses microtúbulos resulta o movimento de cada cilírio. X 80 000.\*

**Exemplo 1.3** — Calcule o comprimento de onda da radiação eletromagnética associada a um fóton de  $5 \text{ eV}$ .

**Solução**

Para o fóton usa-se a Equação (1.5) e não a (1.6) como para outras part(culas).

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(4,14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})}{5 \text{ eV}}$$

$$\lambda = 2,48 \times 10^{-7} \text{ m} = 2480 \text{ \AA}$$

A radiação eletromagnética com esse comprimento de onda corresponde à luz ultravioleta.

**Nota:** Compare esse exemplo com o Exemplo 1.2. Em ambos os casos, trata-se de calcular  $\lambda$ , sendo que no primeiro caso ele é associado a uma part(cula de massa  $m$  e no segundo, a um fóton.

\* Cortesia de Marina Silveira, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

## 1.7 — TIPOS DE RADIAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS

As radiações de ambos os tipos, corpusculares e eletromagnéticas, quando possuem energia suficiente, atravessam a matéria, ionizando (removendo elétrons de) átomos e moléculas, e assim modificando-lhes o comportamento químico. Como consequência, podem ocorrer mutações genéticas e modificações nas células vivas. Essa ação destrutiva sobre as células pode ser utilizada no tratamento de tumores. Embora essas radiações produzam efeitos gerais semelhantes nos seres vivos, cada uma delas possui características próprias.

A seguir serão examinadas as características individuais de alguns dos tipos mais comuns de radiação.

### 1.7.1 — Radiação alfa ou partícula alfa ( $\alpha$ )

As *partículas alfa* são núcleos do átomo de hélio, constituídos de dois prótons e dois nêutrons. Uma partícula alfa é, pois, muito mais pesada que um elétron e sua trajetória num meio material é retilínea.

Na interação de uma partícula alfa com átomos de ar, a primeira perde, em média, 33 eV por ionização. Então, uma partícula alfa com energia cinética inicial de 4,8 MeV, emitida pelo rádio-226, produz cerca de

$$\frac{4,8 \times 10^6 \text{ eV}}{33 \text{ eV}} \cong 145\,000$$

ionizações antes de parar.

A distância que uma partícula percorre antes de parar é chamada *alcance*. Num dado meio, partículas alfa de igual energia têm o mesmo alcance. Portanto, aumentando-se a energia das partículas alfa, aumenta-se o alcance para um dado meio.

Por outro lado, fixando-se a energia da partícula alfa, o alcance diminui, se a densidade do meio aumentar.

O alcance das partículas alfa é muito pequeno, como se pode ver na Tabela 1.1, o que faz que elas sejam facilmente blindadas. Uma folha finíssima de alumínio de 21  $\mu\text{m}$  barra comple-

Tabela 1.1 — Alcance das partículas  $\alpha$  e  $\beta$  no ar, no tecido humano e no alumínio.

Energia (MeV)	Alcance (cm)		
Partículas alfa	Ar	Tecido humano	Alumínio
1,0	0,55	$0,33 \times 10^{-2}$	$0,32 \times 10^{-3}$
2,0	1,04	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,61 \times 10^{-3}$
3,0	1,67	$1,00 \times 10^{-2}$	$0,98 \times 10^{-3}$
4,0	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$0,50 \times 10^{-3}$
5,0	3,50	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-3}$
Partículas beta	Ar	Tecido humano	Alumínio
0,01	0,23	$0,27 \times 10^{-3}$	
0,1	12,0	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-3}$
0,5	150	0,18	$5,9 \times 10^{-2}$
1,0	420	0,50	0,15
2,0	840	1,00	0,34
3,0	1 260	1,50	0,56

## 1. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE RADIAÇÃO

tamente um feixe de partículas alfa de 5 MeV. Mesmo sem blindagem, a referida partícula alfa não consegue atravessar a pele humana. Entretanto, a ingestão de uma fonte emissora de partículas alfa por uma pessoa poderá causar-lhe danos profundos a certas partes do corpo.

As partículas alfa são produzidas principalmente nos decaimentos de elementos pesados como urânio, tório, plutônio, rádio etc. Usualmente são acompanhadas de radiação beta e gama.

### 1.7.2 — Radiação beta ou partícula beta ( $\beta$ )

Partículas beta são elétrons ( $e^-$ ) e pósitrons ( $e^+$ , partículas idênticas ao elétron, exceto no sinal de carga), que são muito mais penetrantes que as partículas alfa, como se pode ver na Tabela 1.1.

A radiação beta, ao passar por um meio material, também perde energia ionizando os átomos que encontra no caminho. Para blindar as partículas beta pode-se usar plástico ou alumínio.

### 1.7.3 — Nêutrons (n)

Os nêutrons são partículas sem carga e não produzem ionização diretamente, mas o fazem indiretamente, transferindo energia para outras partículas carregadas que, por sua vez, podem produzir ionização.

Os nêutrons percorrem grandes distâncias através da matéria, antes de interagir com o núcleo dos átomos que compõem o meio. São muito penetrantes, e podem ser blindados por materiais ricos em hidrogênio, como, por exemplo, parafina ou água.

As características particulares como carga e massa das radiações corpusculares são apresentadas na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 — Carga e massa das radiações corpusculares.

	Alfa	Elétron	Pósitron	Nêutron	Próton
carga	$+2e$	$-e$	$+e$	0	$+e$
massa (kg)	$6,644 \times 10^{-27}$	$9,109 \times 10^{-31}$	$9,109 \times 10^{-31}$	$1,675 \times 10^{-27}$	$1,672 \times 10^{-27}$

### 1.7.4 — Radiação gama ou raios gama ( $\gamma$ )

Os raios gama são ondas eletromagnéticas extremamente penetrantes.

Eles interagem com a matéria pelo efeito fotoelétrico, pelo efeito Compton ou pela produção de pares, e nesses efeitos são emitidos elétrons ou pares elétron-pósitron que, por sua vez, ionizam a matéria.

Um fóton de radiação gama pode perder toda ou quase toda energia numa única interação, e a distância que ele percorre antes de interagir não pode ser prevista. Tudo que se pode prever é a distância em que ele tem 50% de chance de interagir. Essa distância se chama *comprimento médio livre*.

*-redução.* A Tabela 1.3 dá as camadas semi-redutoras no tecido humano e no chumbo para raios X ou raios gama de algumas energias.

Para blindagem desse tipo de radiação usa-se chumbo, concreto, aço ou terra.

Tabela 1.3 — Camada semi-redutora no tecido humano e no chumbo para os raios X ou gama.

Energia (MeV)	Camada semi-redutora (cm)	
	Raios X ou gama	Chumbo
0,01	0,13	4,5 X 10 <sup>-4</sup>
0,05	3,24	0,8 X 10 <sup>-2</sup>
0,1	4,15	1,1 X 10 <sup>-2</sup>
0,5	7,23	0,38
1,0	9,91	0,86
5,0	23,10	1,44

### 1.7.5 — Raios X

Os raios X são também ondas eletromagnéticas, exatamente como os raios gama, diferindo apenas quanto à origem, pois os raios gama se originam dentro do núcleo atômico, enquanto que os raios X têm origem fora do núcleo, na desexcitação dos elétrons. Suas características são, portanto, as mesmas da radiação gama.

## 1.8 — RADIAÇÕES NA NATUREZA

Toda vida, em nosso planeta, está exposta à radiação cósmica (partículas com grande energia provenientes do espaço) e à radiação proveniente de elementos naturais radioativos existentes na crosta terrestre como potássio, cério etc. A intensidade dessa radiação tem permanecido constante por milhares de anos. Nossos antepassados sempre estiveram expostos a ela, e nós também estamos.

Essa radiação se chama *radiação natural* ou *radiação de fundo* e provém de muitas fontes. Cerca de 30% a 40% dessa radiação se deve a raios cósmicos. Alguns materiais radioativos — como potássio-40, carbono-14, urânio, tório etc. — estão presentes em quantidades variáveis nos alimentos. Uma quantidade razoável de radiação vem do solo e de materiais de construção. Assim, pois, a radiação de fundo pode variar de local para local.

O valor médio da radiação de fundo em locais habitados é de 125 milisievert (mSv) ao ano. (Veja a definição de milisievert no capítulo sobre proteção radiológica.)

Para altitudes de 3 000 m, a radiação de fundo é 20% superior à radiação ao nível do mar. Isso porque a atmosfera se encarrega de atenuá-la.

A radiação de fundo na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, em São Paulo, vem sendo medida pelo Laboratório de Dosimetria do Instituto de Física da USP. Seu valor médio é de 1,4 mSv ao ano. Por outro lado, em Guarapari, no Estado do Espírito Santo, a radiação de fundo é uma das mais altas entre os locais habitados — cerca de 3,15 mSv por ano — e se deve à presença de areias monazíticas.

No Brasil há outros locais onde a radiação de fundo é razoavelmente alta, e estão situados próximos a minas de tório e de urânio. Popos de Caldas, em Minas Gerais, é um exemplo.

### PROBLEMAS

1. A frequência da luz verde é de  $5,5 \times 10^{14}$  Hz. Qual é a energia dessa radiação, isto é, a energia de cada fóton?
2. A faixa de um receptor AM (amplitude modulada) varia de 550 a 1 550 kHz, e a de um receptor FM (frequência modulada) de 88 a 108 MHz. Calcule os comprimentos de onda extremos usados pelas estações de rádio AM e FM.
3. Calcule o comprimento de onda e a frequência de um fóton de 100 eV.
4. Determine a energia de um fóton de  $7\,000\text{ Å}$  em J e em eV.
5. Quais são os comprimentos de onda de um fóton e de um elétron de 1 eV?
6. Davison e Gerner confirmaram a hipótese de de Broglie, realizando uma experiência de difração de elétrons, que é um fenômeno puramente ondulatório. Eles usaram um feixe de elétrons com energia cinética igual a 54 eV. Calcule o comprimento de onda de de Broglie desses elétrons.
7. Calcule a energia em J e em eV de um fóton de:
  - a. raios X, cujo comprimento de onda é de  $1,5\text{ Å}$ ;
  - b. radiação ultravioleta, cujo comprimento de onda é de  $1\,000\text{ Å}$ ;
  - c. radiação infravermelha, cujo comprimento de onda é de  $3\text{ }\mu\text{m}$ .
8. Qual é o comprimento de onda de um elétron e de um próton com velocidade igual a  $5 \times 10^7\text{ m/s}$ ?
9. Qual é a energia cinética de um elétron, cujo comprimento de de Broglie é de  $5\,000\text{ Å}$ ?
10. Num tubo de raios X, um elétron acelerado pode ceder toda a sua energia cinética emitindo um único fóton, correspondente à radiação X. Suponha que esse seja o caso de um elétron com energia cinética de  $34,3\text{ keV}$ . Determine:
  - a. o comprimento de onda de de Broglie associado ao elétron;
  - b. a velocidade do elétron;
  - c. o comprimento de onda da radiação X produzida;
  - d. a velocidade do fóton;
  - e. a energia do fóton em J.
11. O alcance de uma partícula  $\alpha$  de  $3\text{ MeV}$  é de  $1,67\text{ cm}$  no ar.
  - a. Será maior ou menor que  $1,67\text{ cm}$  o alcance da mesma partícula  $\alpha$  no tecido humano? Justifique.
  - b. Será maior ou menor que  $1,67\text{ cm}$  o alcance da mesma partícula  $\alpha$  no alumínio? Justifique.
  - c. Será maior ou menor que  $1,67\text{ cm}$  o alcance da mesma partícula  $\alpha$  de  $5\text{ MeV}$  no ar? Justifique.
12. A camada semi-redutora para a radiação gama de  $0,1\text{ MeV}$  é de  $4,15\text{ cm}$  no tecido humano.
  - a. Será maior ou menor que  $4,15\text{ cm}$  a camada semi-redutora no chumbo para a mesma radiação gama?
  - b. Será maior ou menor que  $4,15\text{ cm}$  a camada semi-redutora no tecido humano para a radiação gama de  $5\text{ MeV}$ ?
13. Para separar átomos de carbono e oxigênio que formam o monóxido de carbono, é necessária uma energia de no mínimo 11 eV. Determine a frequência mínima e o comprimento de onda máximo da radiação eletromagnética necessários para dissociar a molécula de monóxido de carbono.
14. Uma lâmpada azul de  $100\text{ W}$  emite luz de comprimento de onda de  $450\text{ nm}$ . Se 12% da energia surge sob forma de luz, quantos fótons são emitidos por segundo?
15. Seja a componente da luz solar de comprimento de onda de  $5\,000\text{ Å}$ , com intensidade de  $12\text{ W/m}^2$ . Calcule o número de fótons por segundo que entra na pupila do olho humano de  $5\text{ mm}$  de diâmetro.
16. Um cirurgião tenta colar uma retina descolada usando pulsos de raio laser com duração de  $20\text{ ms}$ , com uma potência de  $0,6\text{ W}$ . Quanta energia e quantos fótons são emitidos em cada pulso se o comprimento de onda do raio laser é de  $643\text{ nm}$ ?
17. Resultados experimentais mostraram que um pulso de luz com frequência de  $6 \times 10^{14}\text{ Hz}$  pode ser visto se a intensidade do pulso for no mínimo de  $10\text{--}12\text{ W/m}^2$ . Esse é o limiar visual, isto é, abaixo dessa inten-

sidade, a luz não pode ser vista. Sabe-se que somente 10% dos fótons incidentes na pupila atingem as células fotossensíveis da retina. Determine:

- a. a energia total em eV por segundo incidente na pupila com 5 mm de diâmetro;
- b. o número mínimo de fótons por segundo que atinge a retina e causa a visão.

18. Um microscópio eletrônico pode resolver estruturas de pelo menos 10 vezes o comprimento de onda de Broglie do elétron. Qual é a menor estrutura que pode ser resolvida num microscópio eletrônico, usando elétrons com energia cinética de  $10^4$  eV?

19. O poder de resolução de um microscópio é proporcional ao comprimento de onda dividido pela abertura numérica. Calcule a razão entre o poder de resolução de um microscópio eletrônico, usando elétrons de  $10^4$  eV, e o de um microscópio óptico, usando luz de 500 nm. Considere igual abertura numérica para ambos os microscópios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Livros

- ALONSO, M. & FINN, E. J. — *Física*. Brasil, Edgard Blücher, 1977, vols. 1 e 2.  
 BEISER, A. — *Conceitos de Física Moderna*. Brasil, Polígono e EDUSP, 1969.  
 CAMERON, J. R. & SKOFRONICK, J. G. — *Medical Physics*. USA, John Wiley & Sons, 1978.  
 CROMER, A. H. — *Physics for the Life Sciences*. USA, McGraw-Hill, 1977.  
 FULLER, H. Q.; FULLER, R. M. & FULLER, R. G. — *Physics Including Human Applications*. USA, Harper & Row, 1978.  
 HILYARD, N. C. & BIGGIN, H. C. — *Physics for Applied Biologists*. Malta, Edward Arnold, 1977.  
 HOBIE, R. K. — *Intermediate Physics for Medicine and Biology*. USA, John Wiley & Sons, 1978.  
 HOLWILL, M. E. & SILVESTER, N. R. — *Introduction to Biological Physics*. Great Britain, John Wiley & Sons, 1973.  
 MACDONALD, S. G. G. & BURNS, D. M. — *Physics for the Life and Health Sciences*. Philippines, Addison-Wesley, 1977.  
 MILLER, F. Jr. — *College Physics*. USA, Harcourt, Brace & World, 1967.  
 RESNICK, R. & HALLIDAY, D. — *Física*. Brasil, Livros Técnicos e Científicos, 1980, vols. 1, 2, 3 e 4.  
 STROTHER, G. K. — *Physics with Applications in Life Sciences*. USA, Houghton Mifflin, 1977.  
 TIPLER, P. A. — *Física*. Brasil, Guanabara Dois, 1978, vols. 1 e 2.

# Aplicação das Radiações

## CAPÍTULO

### 2.1 — INTRODUÇÃO

Logo após a descoberta dos raios X por Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895, os cientistas perceberam que esses raios poderiam ter grandes aplicações práticas. Nos 15 anos que se seguiram, os médicos trabalharam ativamente com os físicos no exame de corpos humanos. As primeiras aplicações estão relacionadas às fraturas de ossos. Os médicos aprenderam a diagnosticar fazendo uso da radiografia.

Somente por volta de 1920 é que se iniciaram os estudos relativos à aplicação de raios X na inspeção de materiais.

Hoje em dia, os raios X são usados na indústria em ensaios não-destrutivos, na Medicina em radiologia diagnóstica e em terapia, e em pesquisas científicas.

A descoberta da radioatividade artificial e o desenvolvimento dos métodos de produção de *radioisótopos* em grande escala estimularam muitos pesquisadores ao estudo de sua aplicação em diferentes ramos da Ciência. Essas pesquisas trouxeram grandes progressos, principalmente na Medicina, na Agricultura e na indústria.

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

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

- a. possuem comportamento químico idêntico ao de isótopos estáveis do mesmo elemento;
- b. apresentam emissão espontânea de radiação que pode ser detectada, indicando assim sua posição e quantidade.

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

As radiações podem também ser produzidas por máquinas; são os *aceleradores de partículas* que os físicos utilizam na pesquisa em Física nuclear. Esses aceleradores podem produzir radiação com energia muito maior que as fornecidas por radioisótopos.

No Instituto de Física da USP existem dois aceleradores de partículas: o *Pelletron*, que acelera partículas carregadas até uma energia máxima dada pela fórmula  $(Z + 1)9 \text{ MeV}$ , onde Z é o número atômico da partícula acelerada, e o *Acelerador Linear*, que acelera elétrons até uma energia de 33 MeV.

O *Bétatron*, que é outro acelerador de elétrons, foi utilizado pela primeira vez no tratamento de câncer, em 1948, nos Estados Unidos. Desde então tem crescido o uso de aceleradores de partículas na Medicina.

O *Cíclotron* é um acelerador de prótons e dêutrons e é usado em pesquisas em Física nuclear e na produção de radioisótopos. Atualmente também está sendo usado na produção de nêutrons para a neutronterapia.



Alguns hospitais no Brasil possuem aceleradores lineares que produzem elétrons e raios X de até 10 MeV e são usados na terapia, principalmente de neoplasias.

Neste capítulo serão apresentadas as aplicações da radiação nas diversas áreas. As aplicações na Medicina e na Biologia, que são inegavelmente de grande importância, serão tratadas especialmente no Capítulo 7.

## 2.2 — APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA

Dentre as inúmeras aplicações na indústria, foram selecionadas algumas que serão expostas a seguir.

### 2.2.1 — Radiografias e gamagrafias

Uma das aplicações mais importantes na indústria refere-se ao ensaio não-destrutivo, que usa a propriedade de penetração da radiação na matéria, para examinar o interior de materiais e conjuntos lacrados.

A *radiografia* é, portanto, um método não-destrutivo para detectar discontinuidades e heterogeneidades na matéria, e é obtida utilizando-se raios X. Quando se utiliza a radiação gama obtém-se a *gamagrafia*.

Esses métodos são utilizados para inspecionar a qualidade das soldas, partes de navios, componentes de aviões, como motores, asas etc.

Num processo de inspeção radiográfica, a radiação penetrante, raios X ou gama, atravessa o espécime em ensaio. Uma parte da radiação é absorvida pelo espécime, e a restante vai impressionar um filme fotográfico, onde se pode visualizar toda a estrutura do corpo de prova ou parte dela.

Tanto com a radiografia como com a gamagrafia podem-se analisar desde folhas finas de vegetais até aços com espessuras de cerca de 25 cm.

A escolha da radiação a ser utilizada depende de uma série de fatores como: densidade e espessura do material, forma geométrica do objeto e acesso ao espécime.

Atualmente existem cerca de 60 isótopos radioativos que foram utilizados com relativo sucesso em gamagrafias industriais. No entanto, cerca de 90% das gamagrafias industriais são feitas utilizando-se apenas 4 radioisótopos: cobalto-60, irídio-192, cério-137 e túlio-170.

O reator atômico do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) produz algumas fontes para uso comercial.

Em São Paulo e no Rio de Janeiro existem algumas firmas comerciais que fazem radiografias e gamagrafias verificando a qualidade de soldas em tubulações de gás, água, metrô etc.

### 2.2.2 — Medida de espessura ou de níveis de materiais

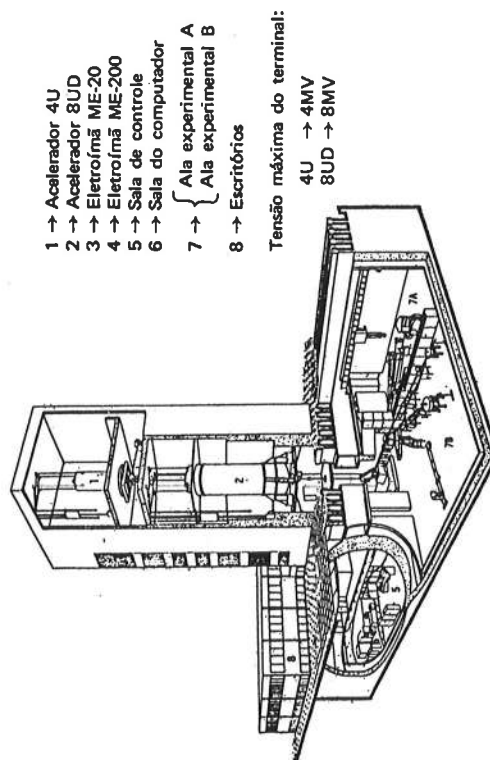
Baseia-se no fato de que o material, colocado entre a fonte de radiação e o detector, absorve ou espalha parte da radiação. A radiação que atravessa o material e atinge o detector pode dar informação sobre a espessura e a densidade do material.

Algumas das vantagens no uso dessa técnica são:

- a. não ser necessário o contato mecânico com o material a ser medido. Isso é importante quando se trata de materiais corrosivos, tóxicos ou perigosos de manusear;
- b. a medida pode ser feita continuamente e à longa distância.



Acelerador Pelletron do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.



Essa técnica é freqüentemente utilizada para medir níveis de líquidos dentro de recipientes fechados. Uma fonte radioativa flutua sobre o líquido, e o detector é colocado na base inferior. O aumento da intensidade da radiação que atinge o detector indica uma diminuição no nível do líquido.

### 2.2.3 — Medida de vazamentos

Radioisótopos empregados como traçadores oferecem um método simples, seguro e razoavelmente barato para detectar vazamento de líquidos ou gases, como de petróleo, por exemplo.

Uma pequena quantidade de material radioativo é adicionada ao fluxo. Qualquer vazamento pode ser detectado, mesmo que seja invisível.

### 2.2.4 — Pesquisas sobre desgaste de motores

Materiais radioativos são usados como traçadores na fabricação de motores. A análise do óleo lubrificante poderá fornecer informação sobre o grau de desgaste do motor.

### 2.2.5 — Conservação de alimentos

Na indústria alimentícia, a radiação pode ser usada com três objetivos:

- evitar que certas raízes ou tubérculos brotem durante o armazenamento, como é o caso de cebolas e batatas;
- eliminar insetos dos grãos, antes do armazenamento;
- preservar alimentos, inibindo ou destruindo as bactérias e outros microrganismos.

A radiação, atuando sobre as substâncias alimentícias, ioniza alguns átomos e altera a estrutura de moléculas vitais de bactérias e microrganismos, provocando sua morte. Os alimentos, contudo, não sofrem efeitos nocivos nem se tornam radioativos.

Existem, entretanto, certos problemas associados com a esterilização de alimentos como mudança no sabor, na cor e na textura, dependendo do alimento. Em outros casos, há diminuição do teor de vitamina.

Em setembro de 1976, em Genebra, uma comissão conjunta de três organizações — a Organização de Alimentação e Agricultura da ONU (FAO), a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e a Organização Mundial de Saúde (WHO) — recomendou a aceitação incondicional de cinco alimentos irradiados: galinha, mamão, batata, morango e trigo, e propôs a aceitação provisória de cebola, bacalhau e arroz irradiados.

### 2.2.6 — Esterilização de materiais cirúrgicos

A esterilização é o processo pelo qual os fungos e as bactérias são completamente destruídos dentro de um material.

Materiais hospitalares como bandagens, gases, suturas cirúrgicas, drogas, vacinas, seringas etc. são normalmente fornecidos na forma esterilizada.

A esterilização pode ser feita de várias maneiras. O método tradicional é por aquecimento do material entre 150°C e 170°C.

Radiações suficientemente energéticas podem destruir as bactérias e, portanto, são consideradas agentes esterilizantes.

Um dos problemas introduzidos com a esterilização por radiação é a mudança na estrutura de alguns plásticos, tornando-os quebradiços, o que diminui as chances de reciclagem desses produtos. Dentre as vantagens dessa técnica, está a possibilidade de esterilizar materiais:

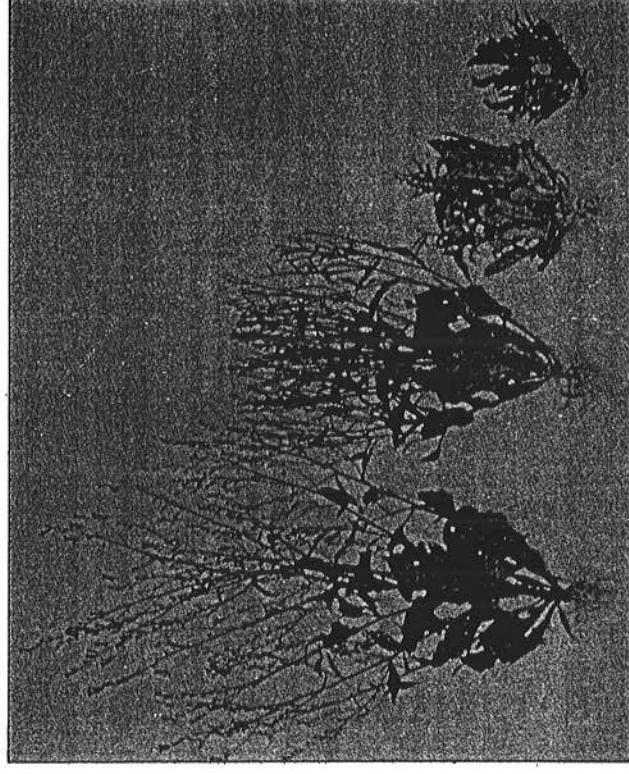
- sem a aplicação de calor, que pode deteriorar o produto, dependendo do caso;
- já embalados, por causa do grande poder de penetração da radiação empregada.

Existem firmas comerciais no Estado de São Paulo que esterilizam materiais cirúrgicos com fonte de cobalto-60 de cerca de 400 quilocuries.

## 2.3 — APLICAÇÕES NA AGRICULTURA

Uma das aplicações mais importantes dos radioisótopos diz respeito à resolução de problemas básicos da produção de alimentos. Alguns dos benefícios trazidos com o uso dos radioisótopos são:

- criação de novas variedades de plantas com características melhoradas;
- capacidade de aumentar e de melhorar a produção de alimentos através do conhecimento do metabolismo vegetal e animal;
- controle ou eliminação dos insetos.



Efeito da radiação gama no crescimento de *Nicotiana glauca*. A planta à esquerda não foi irradiada artificialmente. As plantas à direita, dez semanas após a semeadura, foram expostas a 250, 325 e 400 R durante 20 h, por um período de dez semanas.



A obtenção de variedades melhoradas de plantas, quando feita naturalmente, requer anos de produção e seleção. Irradiando-se sementes ou plantas é possível aumentar cerca de 1 000 vezes ou mais a taxa de um largo espectro de mutações genéticas. Dentre as novas variedades produzidas, o geneticista deve selecionar as que exibirem características melhoradas.

Dessa forma, podem-se obter plantas que produzam mais, amadureçam num período menor e sejam resistentes a doenças.

O Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo em Piracicaba, realiza pesquisas nessa área e tem conseguido produzir sementes que aumentam sensivelmente a produção de milho e de arroz. A irradiação das sementes é feita com uma fonte de cobalto-60.

O estudo do crescimento e do metabolismo das plantas é feito com radioisótopos, utilizando-os como traçadores. Os isótopos mais comumente empregados são: carbono-14, fósforo-32, enxofre-35, cálcio-45, hidrogênio-3, potássio-42 etc.

O processo de absorção dos nutrientes, da água e dos fertilizantes é também pesquisado, podendo-se distinguir entre a absorção pela raiz e pela folhagem. Com isso, obtém-se também informação sobre o local mais adequado para a colocação de fertilizante.

A erradicação ou o controle de insetos são muito importantes na agricultura devido a infestação, depredação e destruição das colheitas alimentares.

A erradicação de certos insetos já foi feita, com sucesso, mediante irradiação dos machos até a esterilização, na ilha de Curaçao. Os insetos foram irradiados com a bomba de cobalto-60 e soltos do avião à razão de 400 machos estéreis por milha quadrada, por semana. Conseguiu-se a total erradicação após a quarta geração.

Esse método é mais eficiente em áreas fechadas, como é o caso de ilhas ou de áreas limitadas por desertos, oceanos e montanhas.

## 2.4 — OUTRAS APLICAÇÕES

### 2.4.1 — Análise por ativação com nêutrons

É uma técnica na qual a amostra é irradiada com nêutrons, a fim de tornar radioativos seus elementos constituintes. Como cada radioisótopo emite um espectro de radiação característico, é possível, por esse meio, identificar e medir os elementos presentes na amostra.

Há duas vantagens importantes desse método sobre outros:

- a. a análise por ativação é não-destrutiva;
- b. para alguns elementos consegue-se uma sensibilidade muito maior que a obtida pela análise química.

A elevada sensibilidade da análise por ativação, na determinação da presença de certos elementos em quantidades diminutas, tem sido de grande utilidade para as autoridades policiais.

O cabelo humano, por exemplo, contém pequeníssimos traços de elementos metálicos, como o sódio, o ouro e o cobre. A análise por ativação do cabelo humano demonstrou que a quantidade desses elementos presentes em cada fio de cabelo de um indivíduo é relativamente constante, mas varia de indivíduo para indivíduo. Esse fato pode, portanto, ser usado para auxiliar na elucidação de um crime.

A morte de um indivíduo por envenenamento também pode ser determinada efetuando-se uma análise por ativação de seu cabelo. Doses de arsênico, mesmo não letais, podem fazer que certas áreas — como, por exemplo, o cabelo — fiquem ricas desse veneno.

Amostras de cabelo com até 100 anos de idade podem ser analisadas por esse método. Análises feitas nos cabelos de Napoleão Bonaparte denunciaram a presença de arsênico em quantidade suficiente para demonstrar que o ex-imperador foi envenenado lentamente até a morte.

Essa técnica não se aplica só a atividades sinistras; ela também foi utilizada para estudar a composição dos minerais da superfície lunar, e é usada para determinar a alteração no metabolismo de proteína, a quantidade de sais etc. em pacientes que foram submetidos a neutronterapia.

### 2.4.2 — Estudo de poluição do ar

A análise da quantidade de poluentes na atmosfera vem sendo feita através do método PIXE (Particle Induced X-ray Emission), em que a amostra de ar coletada é irradiada com prótons ou partículas alfa.

Os prótons ou partículas alfa altamente energéticas arrancam os elétrons das camadas mais internas dos elementos constituintes da amostra. Quando os elétrons das camadas mais externas passam a ocupar os lugares vazios deixados pelos elétrons arrancados, raios X característicos são emitidos com energia específica para cada elemento. A detecção e a análise desses raios X fornecerão as informações sobre a qualidade do ar da amostra coletada.

Essa pesquisa está sendo feita pelo grupo que estuda a poluição do ar, do Instituto de Física da USP, irradiando as amostras de ar com prótons e partículas alfa acelerados pelo Acelerador Pelletron.

### 2.4.3 — Coloração de cristais por radiação

A radiação provoca danos nos cristais, criando o que se chama centros de cor, que podem mudar ou intensificar a cor dos cristais.

Cristais com pouca cor ou sem ela e, portanto, com baixo valor gemológico ou sem ele podem adquirir cor e, conseqüentemente, valor comercial através da irradiação.

Essa técnica tem grande aplicação na gemologia, e o grupo de centros de cor em cristais do Instituto de Física da USP vem desenvolvendo pesquisa nessa área.

### 2.4.4 — Datação por meio da radiação

A datação de peças arqueológicas, de fósseis e de rochas pode ser feita quantitativamente. A seguir serão relatados dois métodos, ambos relacionados à medida da radiação.

**Datação pelo método de carbono-14** Por esse método podem-se medir idades de materiais orgânicos de centenas e até dezenas de milhares de anos. Por outro lado, para determinar a idade das rochas que têm milhões ou bilhões de anos emprega-se o método de urânio-238.

No ar existe uma pequeníssima fração de carbono-14, em forma de gás carbônico. Para cada  $10^{12}$  átomos de carbono-12 há um de carbono-14. Esses átomos de carbono-14 são produzidos por colisões de raios cósmicos, incidentes nas camadas mais externas da atmosfera, com o nitrogênio do ar.

O carbono-14, radioativo, assim produzido se desintegra, e desapareceria por completo se sua produção não fosse contínua na atmosfera.

Os organismos vivos — plantas e animais — absorvem o carbono do ar diretamente, pela fotossíntese, ou indiretamente, pela ingestão de plantas ou animais. O carbono existente nos seres vivos como caules, folhas, tecidos humanos, ossos etc. contém, portanto, a mesma fração de carbono-12 para o carbono-14 existente no ar.

Quando morre, o organismo cessa de absorver o carbono 14. A quantidade de carbono-12 se mantém constante. O carbono-14, por sua vez, vai se desintegrando sem ser substituído. Portanto, a fração de carbono-14 no carbono total vai diminuindo. Dessa forma, medindo-se a radioatividade existente no material, pode-se determinar a fração de carbono-12 para carbono-14. A comparação dessa fração com a que havia antes da morte do organismo fornecerá informação para se deduzir a idade da peça.

No Brasil há dois laboratórios que fazem datação por carbono-14: o Laboratório de Geocronologia da USP e o Laboratório do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia.

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

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

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

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

O Laboratório de Dosimetria do Instituto de Física da USP faz datação pelo método da termoluminescência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Atas de Simpósios

- Food Preservation by Irradiation — Proceedings of a Symposium. Austria, Nov., 1977, vols. I e II.  
 Sterility Principle for Insect Control, 1974 — Proceedings of a Symposium. Austria, Jul., 1974.  
 Radiation and Radioisotopes for Industrial Microorganisms — Proceedings of a Panel. Austria, Dec., 1969.  
 Effects of Agricultural Production on Nitrates in Food and Water with Particular Reference to Isotope Studies — Proceedings of a Panel. Austria, Jun., 1973.  
 Isotopes and Radiation in Soil Organic Matter Studies — Proceedings of a Symposium. Austria, Jul., 1968.  
 Mutation Breeding for Disease Resistance — Proceedings of a Panel. Austria, Oct., 1970.  
 Evaluation of Seed Protein Alteration by Mutation — Proceedings of a Research Coordination Meeting. Hahnentke, May, 1975.  
 Radiosterilization of Medical Products, 1974 — Proceedings of a Symposium. India, Dec., 1974.  
 Isotope Hydrology — Proceedings of a Symposium. Neuberberg, Jun., 1978.  
 Stable Isotopes in the Life Sciences — Proceedings of a Technical Committee Meeting. Germany, Feb., 1977.  
 Induced Mutations against Plant Diseases — Proceedings of a Symposium. Austria, Feb., 1977.

# Proteção Radiológica

## CAPÍTULO 3

### 3.1 — INTRODUÇÃO

Tendo em vista os danos biológicos causados nos seres vivos pela exposição à radiação, tornou-se necessário estabelecer meios de proteção aos que trabalham com radiação e à população em geral.

Foram criados organismos internacionais como a "International Commission on Radiological Protection" (ICRP) e a "International Commission on Radiation Units and Measurements" (ICRU), que definem as grandezas de medida da radiação e suas unidades e estabelecem os limites máximos permissíveis de dose para os que trabalham com radiação e para o público em geral.

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é a responsável pela legislação e pela fiscalização do uso da radiação. Ela elaborou normas, conhecidas como "Normas Básicas de Proteção Radiológica", que regem o uso da radiação no país.

### 3.2 — UNIDADES DE RADIAÇÃO

Três grandezas físicas são definidas para medir a radiação.

#### 3.2.1 — Exposição (X)

Os raios X ou gama, ao interagir com os átomos de um meio, produzem elétrons ou pares elétron-pósitron. A *exposição* X é uma grandeza física definida para esses raios, tendo o ar como meio de interação. Essa grandeza é dada pelo quociente  $\Delta Q/\Delta m$  onde  $\Delta Q$  é a soma das cargas elétricas de todos os íons de um mesmo sinal, *produzidos no ar*, quando todos os elétrons e pósitrons liberados pelos fótons da radiação X ou gama, num elemento de volume de ar cuja massa é  $\Delta m$ , são completamente freados no ar.

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

(3.1)

A unidade de exposição é o roentgen (R)

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

### 3.2.2 — Dose absorvida (D)

Uma vez que a exposição é definida em termos de ionização das partículas do ar, ela não é adequada para descrever a energia de qualquer tipo de radiação absorvida por qualquer tipo de meio. Por outro lado, as mudanças químicas e biológicas que ocorrem, por exemplo, no tecido exposto à radiação X dependem da energia absorvida pelo mesmo. Dessa forma, foi introduzida a grandeza *dose absorvida D*. Ela é definida pela ICRU como sendo a energia *E* absorvida da radiação pela massa *m* do absorvedor.

$$D = \frac{E}{m} \quad (3.2)$$

A unidade oficial de dose absorvida recomendada pela ICRU de 1950 a 1975 foi o rad (*radiation absorbed dose*), definida como

$$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 10^{-2} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

O rad foi definido de tal forma que uma exposição à radiação X ou gama de 1 R resultasse numa dose absorvida pelo tecido mole ou água de aproximadamente 1 rad, isto é, a razão  $\text{rad}/\text{R} = 1$ , independente da energia da radiação. Mas isso nem sempre é verdade para outros meios. No caso do osso, por exemplo, essa razão vale aproximadamente 4 para raio X de baixa energia usada em radiologia diagnóstica, isto é, uma exposição de 1 R corresponde a uma dose absorvida pelo osso de 4 rad; para energias superiores a 300 keV, a razão  $\text{rad}/\text{R}$  é aproximadamente igual a 1.

Em 1975, a ICRU adotou para a unidade de dose absorvida o gray (Gy) no Sistema Internacional de Unidades.

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

A relação entre o Gy e o rad é dada por

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

**Exemplo 3.1** — Injeta-se intravenosamente mercúrio-197 que emite radiação gama em um paciente com 74 kg. Calcule a dose absorvida pelo paciente em rad e em Gy, se a energia total absorvida pelo organismo do paciente for  $7,4 \times 10^{-2} \text{ J}$ .

**Solução**

$$D = \frac{E}{m} = \frac{7,4 \times 10^{-2} \text{ J}}{74 \text{ kg}} = 10^{-3} \text{ Gy}$$

$$10^{-3} \text{ Gy} = 10^{-3} \times 10^2 \text{ rad} = 10^{-1} \text{ rad}$$

### 3.2.3 — Dose equivalente (H)

Os efeitos químicos e biológicos que ocorrem num meio exposto à radiação dependem não só da energia absorvida pelo meio, mas também do tipo da radiação incidente e da distribuição da energia absorvida. Por exemplo, para uma mesma dose absorvida por um meio, o dano será tanto maior quanto maior for a densidade de ionização produzida pela radiação no meio. Para se

levar em conta esses fatos, foi introduzida a grandeza *dose equivalente H*, definida como o produto da dose absorvida *D* pelo fator de qualidade *Q* e pelos fatores de modificação *N*.

$$H = D \cdot Q \cdot N \quad (3.3)$$

onde *Q* e *N* são adimensionais.

O *fator de qualidade Q* leva em conta que a radiação que produz maior número de ionização no tecido, por unidade de comprimento, causa maior dano biológico do que aquela que produz menor número de ionização por unidade de comprimento. No primeiro caso estão, por exemplo, partículas alfa, fragmentos de fissão, e, no segundo, raios X, raios gama e elétrons, conforme se pode ver na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 — Fatores de qualidade para diferentes tipos de radiação.

Tipo de radiação	Fator de qualidade Q
raios X, raios gama e elétrons	1
nêutrons e prótons	10
partículas alfa e de carga superior a 1	20

*N* é o produto de todos os outros fatores de modificação especificados pela ICRP, que se relacionam também com o número de ionização produzido no tecido por unidade de comprimento, além de seus valores dependerem do meio onde ocorre a ionização. A obtenção do valor de *N* para cada caso é muito complicada, e a ICRP fixou seu valor em 1, até que se encontre uma forma mais apropriada para esse cálculo.

A unidade de dose equivalente, adotada pela ICRU até 1975, foi o rem (*roentgen equivalent man*).

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times Q \times N$$

Para fótons  $Q = N = 1$  e portanto  $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad}$ .

Em 1975, a unidade adotada pela ICRU foi mudada para o sievert (Sv) no Sistema Internacional.

$$1 \text{ sievert} = 1 \text{ gray} \times Q \times N$$

Para fótons  $Q = N = 1$  e portanto

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$$

A relação entre o sievert e o rem é

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

Em resumo, para raios X, raios gama e elétrons um gray é igual a um sievert. Para radiação incidente X ou gama a dose absorvida, pelo tecido mole, é praticamente igual à exposição. Portanto, para fontes artificiais de maior uso, o roentgen, o gray e o sievert possuem praticamente os mesmos valores.

**Exemplo 3.2** — Uma pessoa ingere uma pequena quantidade de trítio que emite radiação beta de 18 keV. A dose média absorvida pelo tracto gastrointestinal é de 500 mrad. Determine a dose equivalente em rem e em Sv.

**Solução**

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

$$Q = 1 \text{ pela Tabela 3.1}$$

$$H = D$$

$$\text{Portanto } H = 500 \text{ mrem} = 5 \text{ mSv}$$

### 3.3 — LIMITES MÁXIMOS PERMISSÍVEIS

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

A CNEN e a ICRP recomendam, então, limites de doses equivalentes diferentes para os trabalhadores\* com radiação e para o público em geral. Elas acreditam que um método válido para julgar a aceitabilidade do nível de risco no trabalho com radiação seja compará-lo com o de outras ocupações reconhecidas como tendo alto grau de segurança, ou seja, aquelas onde o nível médio anual de mortalidade devida a acidentes de trabalho não exceda a 1 em 10 000.

Levando em conta esses fatores e experiências anteriores, a ICRP fixou em 50 mSv o limite anual de dose equivalente para os que trabalham com radiação. Nessa dose não está incluída a proveniente de exposição a radiação natural nem a de exposições médicas. Acredita a Comissão que, neste último caso, a pessoa que recebe a radiação é a mesma que recebe os benefícios dessa exposição — como um diagnóstico correto, por exemplo — que podem ser maiores que o prejuízo eventual por ela causado. A Comissão recomenda apenas que exposições desnecessárias sejam evitadas. Para indivíduos do público, a Comissão limitou em 5 mSv a dose equivalente anual.

**Exemplo 3.3** — Determine a dose equivalente máxima permissível por hora para um trabalhador com radiação.

#### Solução

Considere-se que um ano de um trabalhador com radiação corresponda a 50 semanas X 40 h/semana.

Sabe-se que o limite máximo permissível (LMP) para um trabalhador com radiação é de 50 mSv/ano; portanto,

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

$$\text{ou } 0,025 \times 10^{-3} \times 100 \frac{\text{rem}}{\text{h}} = 2,5 \frac{\text{mrem}}{\text{h}}$$

### 3.4 — PRECAUÇÕES

Precauções devem ser tomadas pelos trabalhadores com radiação a fim de limitar os riscos e prevenir acidentes. Esses podem ser causados por exposição à radiação proveniente de fontes internas ou externas ao organismo.

A *exposição interna* ocorre quando houver contaminação radioativa do organismo com a introdução de radioisótopos por via respiratória, digestiva, transcutânea ou traumática. As seguintes precauções devem ser tomadas por trabalhadores com radiação para que não ocorra exposição interna:

\* Definições de termos dadas pelas Normas Básicas de Proteção Radiológica (CNEN):

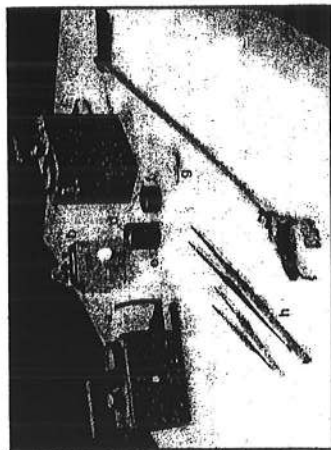
- *Trabalhador* — É qualquer indivíduo adulto que poderá ser irradiado, de maneira regular ou ocasional, durante e em consequência de seu trabalho.
- *Indivíduos do público* — A categoria de indivíduos do público é caracterizada por indivíduos que vivem nas imediações de instalações nucleares.
- *População como um todo* — População inteira, compreendendo trabalhadores, indivíduos do público e a população geral.
- *População geral* — População na sua parte maior e comum, excluindo trabalhadores e indivíduos do público.

a. usar máscaras, evitando inalação de gases radioativos;

b. não pipetar com a boca, não colocar dedos na boca, e não fumar nos locais de trabalho. Lavar as mãos, sempre que necessário, com água e sabão;

c. utilizar luvas e roupas especiais, pois alguns produtos como o trítio podem ser absorvidos pelo organismo através da pele, principalmente quando houver cortes ou arranhões.

A *exposição externa* ocorre quando o organismo for irradiado por uma fonte externa a ele. Três fatores devem ser levados em conta para diminuir o risco devido a essas exposições: *tempo t* e *distância d* de permanência relativos a fonte de radiação e *blindagens* apropriadas.



Detectores de radiação e materiais utilizados para nuclear fontes radioativas. (a) Detector de raios alfa e beta; (b) detector de raios gama; (c) detector de fluxo de nêutrons; (d) material radioativo; (e) castelo de chumbo; (f) tampa do castelo de chumbo; (g) dosímetro pessoal; (h) pinças.

De uma forma geral, pode-se dizer que a exposição  $X$  é diretamente proporcional ao tempo e inversamente proporcional ao quadrado da distância em relação à fonte, considerada como pontiforme, isto é:

$$X = \frac{kt}{d^2}$$

(3.4)

onde  $k$  é uma constante.

Mesmo que a fonte seja grande, ela poderá ser considerada pontiforme se as distâncias em relação à mesma forem grandes.

No caso de tubos de raios  $X$ , a constante  $k$  está relacionada à corrente eletrônica e à diferença de potencial aplicada aos eletrodos do tubo. Por outro lado, para uma fonte emissora de raios gama, ela é função da energia da radiação, assim como da intensidade da fonte. Nesses casos, a dependência de  $X$  com  $1/d^2$  é puramente geométrica.

Para fontes emissoras de partículas alfa ou beta não se pode mais usar a Equação (3.4), pois deve se levar em conta a atenuação que ocorre no ar. De qualquer forma, nesses casos, a exposição decrescerá com a distância elevada a uma potência maior do que 2.

Para diminuir as exposições externas, as seguintes precauções devem ser tomadas:

a. permanecer o mínimo tempo possível próximo à fonte de radiação;

b. trabalhar à máxima distância possível da fonte;

c. usar blindagens adequadas, para diminuir ou para atenuar completamente a radiação.

**Exemplo 3.4** — A taxa de dose equivalente para um trabalhador com radiação gama é de 0,15 rem/h, a 1 m da fonte. Sabendo-se que a máxima taxa de dose equivalente permissível para esse trabalhador é de 2,5 mrem/h, a que distância da fonte ele poderá permanecer?

## Solução

Desde que o fator de conversão de rem para rad para raios X e gama é igual a 1 e o de rad para roentgen para o tecido mole também é aproximadamente igual a 1, a exposição máxima permitível a esse tipo de radiação é frequentemente considerada de 2,5 mR/h.

Sendo  $X_1 = 0,15 \text{ R/h}$  e  $d_1 = 1 \text{ m}$  e  
 $X_2 = 2,5 \text{ mR/h}$ , e sabendo-se que

$$X_1 = \frac{kt}{d_1^2} \quad \text{e} \quad X_2 = \frac{kt}{d_2^2}$$

obtem-se que

$$d_2^2 = \frac{X_1 d_1^2}{X_2} = \frac{0,15 \times 1^2}{2,5 \times 10^{-3}} = 60 \text{ m}^2$$

$$d_2 \cong 7,75 \text{ m}$$

**Exercício Proposto** — Uma pessoa que trabalha com radiação gama está submetida a uma exposição de 1 R, trabalhando 48 h a 2 m de uma fonte radioativa. Calcule a diminuição que ocorrerá na exposição, se ela trabalhar:

- 10% menos que 48 h;
- a uma distância 10% superior a 2 m.

## PROBLEMAS

- Durante um exame com raios X, são absorvidas uniformemente pelo útero 5 rads. Determine a energia absorvida por grama pelo útero.
- Calcule a energia térmica absorvida por unidade de massa por um bloco de grafite de um calorímetro quando a temperatura do bloco se eleva de  $0,2^\circ\text{C}$ . Suponha que o calor específico do grafite seja de  $170 \text{ cal/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ .
- Suponha que todas as partes do corpo de um trabalhador com radiação de 60 kg recebam a mesma dose, numa irradiação de corpo total, com radiação gama. Calcule a energia máxima que pode ser absorvida por hora por esse trabalhador, levando em consideração o limite máximo permitível.
- Determine a máxima dose equivalente permitível por semana para um trabalhador com radiação.
- O tubo de raios X de um dentista opera com uma taxa de exposição de 3 R/h a 1 m do tubo. Aumentando-se a corrente eletrônica do tubo por um fator 10, a nova taxa de exposição será 30 R/h. A que distância da máquina deverá trabalhar o dentista para que a taxa de exposição continue sendo de 3 R/h?
- A taxa de dose equivalente a 1 m de uma fonte que emite radiação gama é de 0,64 rem/h. Levando em consideração o limite máximo permitível, calcule:
  - a distância da fonte na qual uma pessoa pode trabalhar durante 50 semanas ao ano, a 40 horas por semana;
  - a redução que deve ser feita no número de horas por semana, se a máxima distância possível de trabalho for de 11,3 m.
- O radioisótopo fósforo-32 é administrado a um paciente com 64 kg. Cada átomo desse radioisótopo emite uma partícula beta com energia de 0,698 MeV numa desintegração. Se a dose absorvida não deve superar 1 rad, calcule a quantidade em gramas de fósforo-32 que pode ser ingerida pelo paciente.
- $1,97 \times 10^{-9} \text{ g}$  de mercúrio-197 é administrado a um paciente de 74 kg, na detecção de um tumor. Cada átomo de mercúrio-197 emite um raio gama de 77 keV numa desintegração. Calcule a energia total e a dose total absorvida pelo paciente.
- Uma pessoa que trabalha com radiação X está submetida a uma exposição de 2 R, trabalhando 8 h a 1 m do tubo de raios X. O que se pode fazer, se a exposição deve ser diminuída de 10%?

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## Livros

- ANDREWS, H. L. — *Radiation Biophysics*. USA, Prentice Hall, 1974.  
 HENDEE, W. R. — *Medical Radiation Physics*. USA, Year Book Medical, 1979.  
 HENRY, H. — *Fundamentals of Radiation Protection*. USA, Wiley Interscience, 1969.  
 JOHNS, H. E. & CUNNINGHAM, J. R. — *The Physics of Radiology*. USA, Charles C. Thomas, 1974.  
 SCAFF, L. A. M. — *Bases Físicas da Radiologia*. Brasil, Sarvier, 1979.

## Artigo de Periódico

MAYNEORD, W. V. — SI Units in Medical Physics. *Contemporary Physics* 17:1, 1976.

## Publicações Especiais

- ICRP — Publication 26. *Radiation Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. USA, Pergamon Press, 1977.  
 ICRU — Report 10a 1962. *Radiation Quantities and Units*, International Commission on Radiological Units and Measurements. USA, NBS Hand b 84, 1962.  
 ICRU — Report 19, 1971. *Radiation Quantities and Units*, International Commission on Radiological Units and Measurements. USA, 1971.  
 Resolução CNEN — 6/73. *Normas Básicas de Proteção Radiológica*, Diário Oficial, p. 3132. Brasil, 19 de setembro de 1973.  
*Quadro Geral de Unidades de Medida*, Diário Oficial. Brasil, 4 de maio de 1978.

# Modelos Atômicos

## CAPÍTULO 4

### 4.1 — INTRODUÇÃO

Grande número de conceitos físicos básicos é necessário a fim de se entenderem a natureza e a origem dos espectros de emissão e de absorção, característicos dos átomos, das moléculas químicas e bioquímicas etc.

Um equipamento importante nas pesquisas em Bioquímica, Biofísica, Microbiologia, Fisiologia etc. é o espectrofotômetro, que fornece o espectro de absorção dos materiais.

Neste capítulo, os conceitos físicos básicos serão introduzidos através de uma discussão da estrutura do átomo de hidrogênio, o que permite compreender seus espectros de absorção e de emissão.

O modelo atômico do hidrogênio, escolhido por ser o mais simples, servirá também de base para o entendimento do espectro característico de raios X, que será tratado no Capítulo 6.

### 4.2 — MODELOS DE J. J. THOMSON E DE E. RUTHERFORD

No século XIX, os cientistas aceitavam a idéia de que os elementos químicos eram formados de átomos. Mas, além do conhecimento de que o átomo era uma unidade extremamente pequena de matéria, quase nada se sabia sobre sua natureza.

A descoberta do elétron e a concepção de que todos os átomos contêm elétrons constituíram o primeiro passo importante para se entender a estrutura atômica. Os elétrons possuem carga elétrica negativa, enquanto que os próprios átomos são eletricamente neutros. Portanto, cada átomo deve possuir matéria carregada positivamente para contrabalançar a carga negativa de seus elétrons.

#### 4.2.1 — O modelo atômico de J. J. Thomson

Esse modelo atômico foi proposto em 1904 e consistia de um volume esférico positivamente carregado, com elétrons uniformemente distribuídos pelo volume. Foi denominado "pudim de ameixa", sendo os elétrons representados pelas ameixas.

Em 1909, Hans Geiger e E. Marsden realizaram uma experiência, sugerida por Ernest Rutherford, aluno de Joseph John Thomson, para testar o modelo de ameixas, bombardeando uma folha fina de ouro com partículas alfa.

**Questão** — Que resultado era esperado, segundo o modelo de Thomson, sabendo-se que a massa da partícula alfa era aproximadamente 7 000 vezes a massa do elétron?

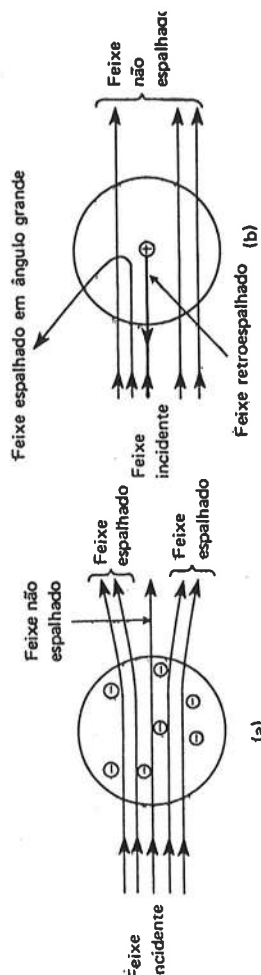


Figura 4.1 — Espalhamento de partículas alfa, segundo o modelo atômico de Thomson (a) e de Rutherford (b).

A experiência mostrou que, enquanto a maior parte das partículas alfa atravessava a folha de ouro sem sofrer desvio, algumas eram espalhadas (desviadas) formando ângulos muito grandes, chegando mesmo a ocorrer o retroespalhamento (espalhamento para trás), como ilustra a Figura 4.1b.

#### 4.2.2 — O modelo atômico de E. Rutherford ou modelo nuclear

Os resultados experimentais levaram Rutherford a propor o seguinte modelo para o átomo: ele é constituído de um núcleo minúsculo, positivamente carregado e rodeado pelos elétrons que giram em seu redor, analogamente ao sistema planetário, que tem o Sol como núcleo.

A carga do núcleo deve ser positiva e igual à soma da carga negativa dos elétrons constituintes do átomo, uma vez que o átomo como um todo é neutro.

Quase toda a massa do átomo é concentrada no núcleo, sendo portanto o átomo um amplo espaço vazio. É fácil perceber por que a maior parte das partículas alfa atravessa a fina folha de ouro sem se desviar, mesmo porque os elétrons, sendo leves, não afetam de modo apreciável o movimento das partículas alfa. Quando uma partícula alfa se aproxima de um núcleo, encontra um campo elétrico intenso, e é provável que seja espalhada formando ângulo grande.

#### 4.3 — O MODELO DO ÁTOMO DE HIDROGÊNIO DE BOHR

Em 1913, Niels Bohr, físico dinamarquês e aluno de Rutherford, propôs um modelo para o átomo de hidrogênio. Nesse modelo, ele introduziu conceitos quânticos para explicar a estabilidade e a origem das linhas espectrais do átomo de hidrogênio.

Bohr baseou-se no modelo nuclear do átomo de Rutherford. A experiência de Rutherford havia mostrado que grande parte da massa do átomo estava associada à carga positiva num pequeno volume localizado no centro do átomo. Os elétrons em número suficiente giravam em órbitas circulares, ao redor do núcleo.

Havia, entretanto, uma séria falha nesse modelo. Segundo a teoria eletromagnética clássica, qualquer partícula carregada emite radiação eletromagnética quando acelerada. Em particular, espera-se que um elétron numa trajetória circular, e portanto acelerado, ao redor do núcleo, emita radiação eletromagnética. Consequentemente, o movimento orbital de um elétron seria instável porque ele iria espiralando em direção ao centro, à medida que fosse perdendo energia, até cair no núcleo. E não é isso o que ocorre na realidade. As previsões da teoria eletromagnética, já confirmadas experimentalmente no mundo microscópico, tiveram que ser descartadas quando se tratava



do reino submicroscópico dos átomos. Caso análogo ocorreu com a mecânica clássica de Newton, que teve de ser substituída pela teoria da relatividade de Einstein para velocidades dos corpos próximas à da luz.

O primeiro conceito *quântico* de Bohr pode ser melhor entendido em termos da natureza ondulatória do elétron, sugerida por de Broglie em 1924:

um elétron pode girar em torno de seu núcleo indefinidamente, sem irradiar energia, desde que sua órbita contenha um número inteiro de comprimento de onda de de Broglie. Essa órbita é chamada *órbita estacionária* pois nela a onda associada ao elétron é estacionária. Numa onda estacionária, os nós estão permanentemente em repouso e os ventres sofrem deslocamentos máximos. Sendo  $2\pi r$  o comprimento de circunferência de uma órbita circular de raio  $r$ , a condição de estabilidade do elétron na órbita pode ser escrita como

$$(4.1)$$

$$n \lambda_n = 2\pi r_n$$

onde  $r_n$  é o raio de órbita que contém  $n$  comprimentos de onda;  $n$  é chamado *número quântico principal*, vale 1, 2, 3 ... e é um número associado à órbita.

A Figura 4.2 mostra a órbita com  $n = 2$ , isto é, com 2 comprimentos de onda de de Broglie.

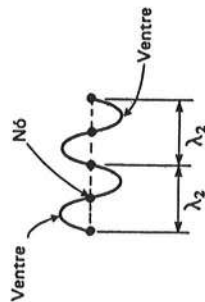


Figura 4.2 — Onda estacionária numa órbita com  $n = 2$ .

A Figura 4.3 mostra a órbita com  $n = 3$ , isto é, com 3 comprimentos de onda de de Broglie.

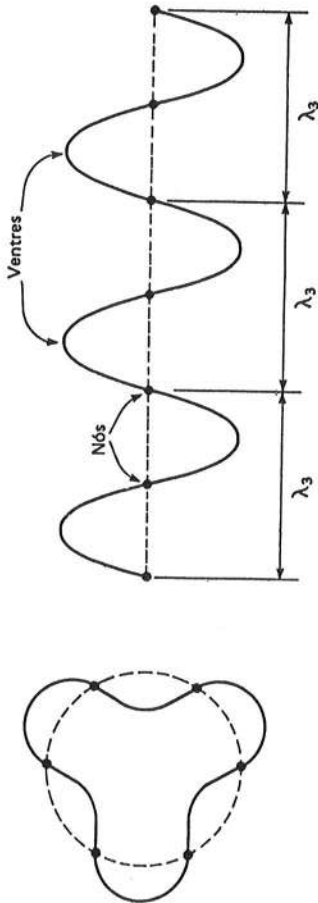


Figura 4.3 — Onda estacionária numa órbita com  $n = 3$ .

Como já foi visto, o comprimento de onda de de Broglie associado ao elétron vale

$$\lambda_n = \frac{h}{mv_n} \quad (4.2)$$

Substituindo (4.2) em (4.1):

$$n \frac{h}{mv_n} = 2\pi r_n \quad (4.3)$$

Portanto,

$$r_n = \frac{n}{2\pi} \frac{h}{mv_n} \quad (4.4)$$

A velocidade  $v_n$  do elétron pode ser obtida da condição de estabilidade da órbita e levando-se em conta que é a força elétrica entre o núcleo e o elétron o que causa o movimento circular. Assim sendo, a força centrípeta  $F_c$  é a força elétrica  $F_e$ :

$$F_c = F_e = \frac{mv_n^2}{r_n} \quad (4.5)$$

Sendo a carga do elétron e a do núcleo  $-e$  e  $+e$  respectivamente, a força elétrica entre eles é:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} \quad (4.6)$$

onde  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo e vale  $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ . Inserindo (4.6) em (4.5)

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = \frac{mv_n^2}{r_n} \quad (4.7)$$

obtem-se para  $v_n$

$$v_n = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m r_n}} \quad (4.8)$$

Substituindo (4.8) em (4.4)

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \quad (4.9)$$

A Equação (4.9) dá os valores dos raios para as órbitas estacionárias. Essas órbitas e os raios correspondentes também são designados órbitas e raios permitidos. Portanto, o menor raio permitido se obtém fazendo-se  $n = 1$  e substituindo-se as constantes:

$$r_1 = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m} = 0,53 \text{ \AA} \quad (4.10)$$

As órbitas permitidas são aquelas com raio

$$r_n = n^2 r_1 \quad (4.11)$$

Diz-se, então, que os raios das órbitas circulares são *quantizados (discretos)*.

**Exercício Proposto** — a. Calcule  $r_n$  em função de  $n$  e coloque-os numa tabela; b. faça um esboço das órbitas permitidas, segundo o modelo de Bohr, em escala.

#### 4.4 — NÍVEIS DE ENERGIA

As várias órbitas permitidas envolvem diferentes energias do elétron. A energia do elétron no  $n$ -ésimo estado do átomo de hidrogênio pode ser deduzida a partir das leis de Newton e de Coulomb.

A energia total  $E_n$  de um elétron é a soma de sua energia potencial elétrica  $U_n$  e cinética  $K_n$ .

$$E_n = U_n + K_n \quad (4.12)$$

onde

$$U_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} \quad (4.13)$$

$$K_n = \frac{1}{2} m v_n^2 \quad (4.14)$$

Introduzindo (4.8) em (4.14),

$$K_n = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} \quad (4.15)$$

que por sua vez, substituída juntamente com (4.13) em (4.12),

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} \quad (4.16)$$

Eliminando-se  $r_n$  da Equação (4.16), por meio de (4.9),

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 n^2} \frac{1}{r_n} \quad (4.17)$$

$E_1$  é a energia do elétron para  $n = 1$ , cujo valor pode ser calculado, substituindo-se as constantes na Equação (4.17):

$$E_1 = -13,6 \text{ eV} \quad (4.18)$$

Portanto,

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad (4.19)$$

$E_1$  é o nível de energia mais baixo, e quando o elétron se encontra nesse estado, diz-se que o átomo está no estado *fundamental*. Quando o elétron se encontra em estados superiores  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$  etc., diz-se que o átomo está no estado *excitado*. As energias desses níveis são todas negativas, significando que o elétron não possui energia suficiente para escapar do átomo.

A medida que  $n$  cresce,  $E_n$  se aproxima de zero, até que para  $n = \infty$ ,  $E_\infty = 0$  e o elétron não se encontra mais ligado ao núcleo.

**Exercício Proposto** — a. Calcule os níveis de energia  $E_n$  em função de  $n$ ;

b. faça um gráfico dos níveis de energia do átomo de hidrogênio;

c. verifique a quantização dos níveis de energia.

Quando o átomo se encontra no estado fundamental, são necessários 13,6 eV para levar o elétron até  $E = 0$ , isto é, para separá-lo do átomo. Essa energia é chamada *energia de ionização* do átomo de hidrogênio. Por outro lado, é chamada *energia de excitação* a necessária para levar o elétron do estado fundamental a qualquer estado excitado.

A propriedade natural de todos os átomos é permanecer no estado fundamental. Mas, se por algum meio são excitados, os elétrons retornam, na maior parte dos casos, ao estado fundamental num tempo muito curto, da ordem de  $10^{-8}$  s.

**Exemplo 4.1** — Seja o elétron do átomo de hidrogênio no estado com  $n = 10$ .

- Calcule a energia desse nível.
- Ela é maior ou menor que a energia do estado fundamental?
- Qual é a energia necessária para remover esse elétron do átomo?

**Solução**

$$a. E_{10} = -\frac{13,6}{10^2} = -\frac{13,6}{100} = -0,136 \text{ eV}$$

$$b. \text{ Desde que } E_1 = -13,6 \text{ eV} \\ E_{10} > E_1$$

- Nesse caso é necessário fornecer ao átomo de hidrogênio uma energia de pelo menos +0,136 eV para remover seu elétron.

#### 4.5 — ESPECTROS ATÔMICOS

O *segundo conceito quântico* de Bohr resume-se na seguinte afirmação:

a radiação eletromagnética é *emitida* ou *absorvida* quando o elétron faz uma transição de uma órbita estacionária a outra. Por outro lado, enquanto a órbita do elétron permanecer a mesma, o átomo não perderá nem ganhará energia. Portanto, quando um elétron passa de um nível de energia para outro, a energia perdida ou ganha é emitida ou absorvida sob forma de um único fóton de frequência  $f$ .

$$\text{Energia inicial} - \text{Energia final} = \text{Energia do fóton}$$

Usando-se (4.19),

$$\text{Energia inicial, } E_i = -\frac{13,6}{n_i^2} \text{ eV}$$

$$\text{Energia final, } E_f = -\frac{13,6}{n_f^2} \text{ eV}$$

Se  $E_i$  for maior do que  $E_f$  haverá a emissão de um fóton, mas se  $E_i$  for menor do que  $E_f$  haverá absorção de um fóton.

$$\text{Energia do fóton} = hf$$

Portanto,

$$E_i - E_f = 13,6 \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = hf \text{ (eV)} \quad (4.20)$$

## 4.5.1 — Espectro de emissão

A presença de níveis definidos e discretos de energia no átomo de hidrogênio fornecerá, portanto, um *espectro de emissão* de linhas, o que está de acordo com as observações experimentais.

Uma fotografia da emissão espectral do átomo de hidrogênio, na região visível do espectro eletromagnético, pode ser vista na figura da página 35.

Essa figura pode ser obtida fotografando-se a radiação emitida por um gás de átomos de hidrogênio, após ser decomposta por um prisma ou espectrógrafo. O gás de átomos, a uma pressão pouco menor que a atmosférica, emite essa radiação quando convenientemente excitado, em geral pela passagem de corrente elétrica.

O arranjo para a obtenção do espectro de emissão está esquematizado na Figura 4.4.

Johann J. Balmer, em 1885, obteve uma fórmula empírica que fornecia os comprimentos de onda do conjunto de linhas ou raios espectrais, que foi denominado série de Balmer. Tal série corresponde, segundo o modelo de Bohr, a radiações eletromagnéticas emitidas pelo átomo de hidrogênio quando o elétron efetua a transição de  $n_{\text{inicial}} \geq 3$  para  $n_{\text{final}} = 2$ .

**Exemplo 4.2** — Calcule o comprimento de onda da radiação emitida quando o elétron do átomo de hidrogênio efetua a transição de  $n_i = 3$  para  $n_f = 2$ .

**Solução**

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = E_3 - E_2$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_3 - E_2} = \frac{hc}{-\frac{13,6}{9} + \frac{13,6}{4}} = \frac{(4,14 \times 10^{-15})(3 \times 10^8)}{-1,51 + 3,40}$$

$$\lambda = 6,57 \times 10^{-7} \text{ m} = 6570 \text{ Å}$$

Essa radiação é vermelha e a raia espectral correspondente é chamada  $H_\alpha$ . Ela é a radiação de maior comprimento de onda da série de Balmer. As raios  $H_\beta$  e  $H_\gamma$  também da série de Balmer são emitidas pelo átomo de hidrogênio quando o elétron efetua a transição de  $n_i = 4$  e 5 para  $n_f = 2$ .

**Exercício Proposto** — Sabendo que  $H_\infty = 3650 \text{ Å}$ , verifique em qual transição do elétron do átomo de hidrogênio essa radiação é emitida. Essa linha  $H_\infty$  é chamada limite da série de Balmer.

Posteriormente, outras séries foram descobertas, mas todas fora da região visível do espectro de radiação eletromagnética.

Na região do ultravioleta está a série de Lyman, contendo raios espectrais emitidas pelo átomo de hidrogênio quando o elétron efetua a transição de  $n_i \geq 2$  para  $n_f = 1$ .

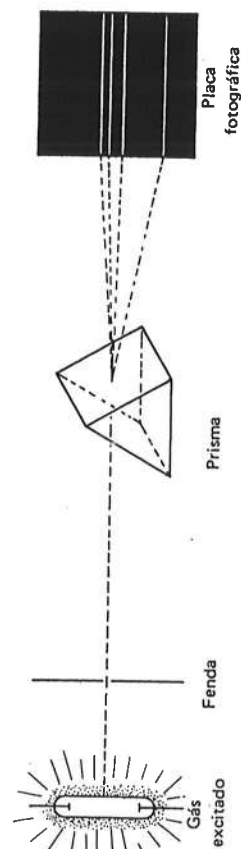
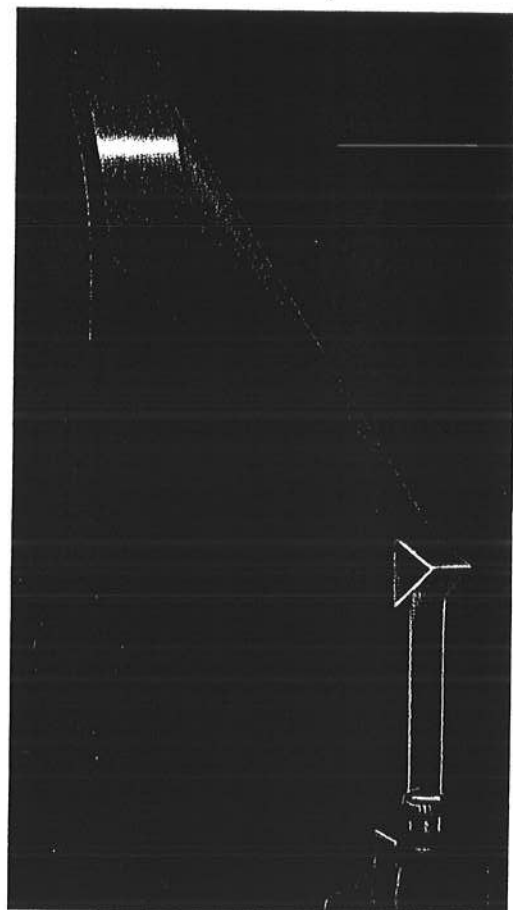
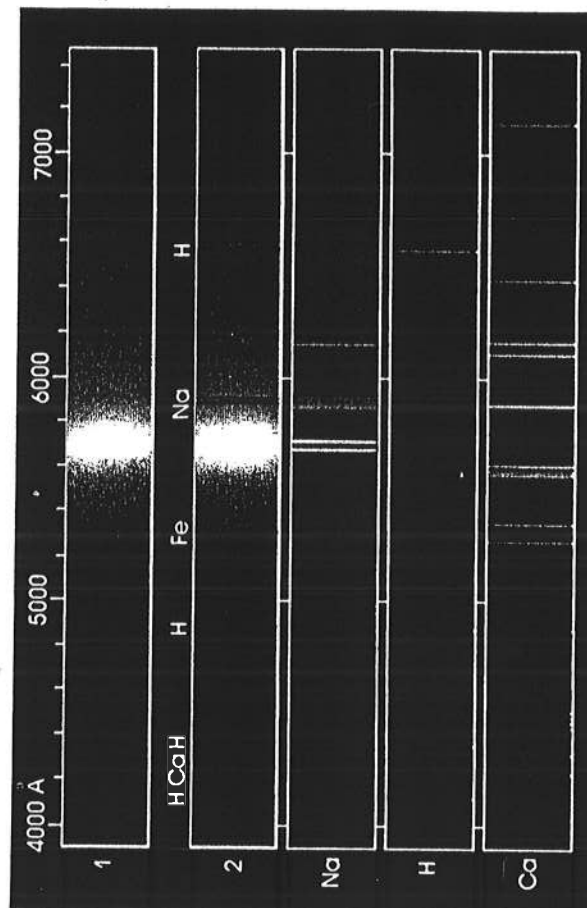


figura 4.4 — Arranjo experimental para a obtenção do espectro de emissão.



Espectro contínuo.



(1) Espectro contínuo de um sólido incandescente. (2) Espectro solar, mostrando linhas de absorção (Fraunhofer). (3-5) Espectros de emissão descontínuos de sódio, hidrogênio, cálcio.

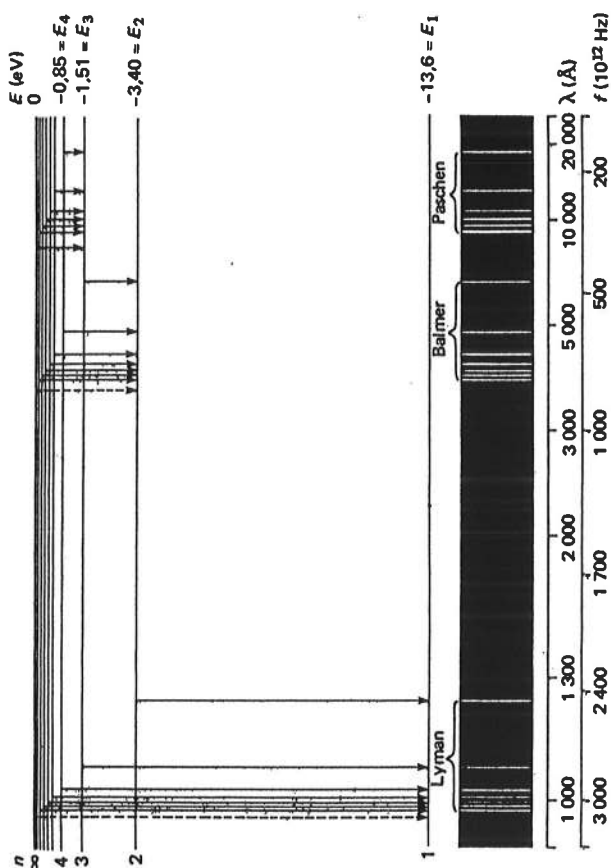


Figura 4.5 — Diagrama de níveis de energia do átomo de hidrogênio.

As séries de Paschen, Brackett e Pfund, todas no infravermelho, são devidas à passagem do elétron, respectivamente, de  $n_i \geq 4$  para  $n_f = 3$ , de  $n_i \geq 5$  para  $n_f = 4$ , de  $n_i \geq 6$  para  $n_f = 5$ .

A Figura 4.5 mostra a origem das séries espectrais no átomo de hidrogênio.

#### 4.5.2 — Espectro de absorção

Além do espectro de emissão, constituído de linhas claras sobre fundo escuro, os átomos apresentam ainda um espectro característico de absorção formado de linhas escuras sobre fundo claro.

O espectro de absorção é obtido colocando-se o gás de átomos que se quer analisar entre uma fonte de luz contínua e a fenda, segundo o esquema da Figura 4.6. Nesse caso, o gás não é excitado previamente.

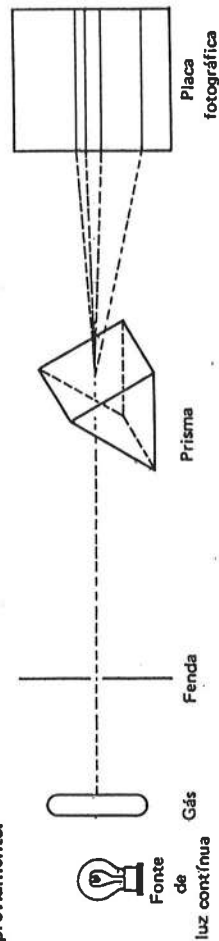


Figura 4.6 — Arranjo experimental para a obtenção do espectro de absorção.

**Exemplo 4.3** — Monte-se um sistema experimental para fotografar espectros de hidrogênio atômico contido num tubo de quartzo, com filme branco e preto, sensível à luz visível, à radiação ultravioleta e infravermelha. Inicialmente, com um pedaço de filme fotografa-se o espectro de absorção, sem excitar os átomos de hidrogênio. A seguir, com os átomos de hidrogênio excitados, fotografa-se com um outro pedaço de filme, o espectro de emissão. Os espectros serão iguais?

#### Solução

Os espectros de emissão e de absorção não serão iguais, pelos seguintes fatos:

- o de emissão apresentará um fundo escuro sobre raias brilhantes e o de absorção será o negativo do anterior, isto é, apresentará um fundo claro sobre raias pretas;
- no espectro de absorção aparecerão somente as raias da série de Lyman, no ultravioleta, isto é, transições do elétron de  $n = 1$  para  $n = 2, 3, 4$  etc., pois os átomos de hidrogênio não são previamente excitados. As raias da série de Lyman em ambos os espectros coincidem. No espectro de emissão aparecerão além das raias da série de Lyman, aquelas correspondentes às séries de Balmer, Paschen, Brackett e Pfund.

**Exercício Proposto** — Esboce as duas fotografias do exemplo anterior e compare-as.

## 4.6 — CONCLUSÃO

O modelo básico do átomo é o mesmo para todos os elementos. Cada átomo possui uma série de níveis de energia que podem ser ocupados por seus elétrons.

Quando um átomo absorve ou emite energia, o(s) elétron(s) mudam de um nível de energia para outro. Desde que os níveis de energia são quantizados, o átomo somente é capaz de absorver ou emitir quantidades discretas de energia.

O diagrama de níveis de energia para átomos de cada elemento é uma característica desse elemento. Ele pode ser obtido através dos espectros de absorção e de emissão. Portanto, os espectros de absorção e de emissão de um material indicam a presença de átomos de diferentes elementos no material.

A espectroscopia de absorção ou de emissão tem um papel importante nas análises químicas dos materiais em geral, pois a composição química de um material pode ser deduzida dos exames dos espectros.

Para reduzir os efeitos de interações entre átomos vizinhos, é melhor estudar os materiais, quando possível, sob forma gasosa.

A exemplo dos átomos, também as moléculas apresentam espectros de emissão e absorção que as identificam, embora exibindo complexidade maior.

O espectro de absorção é mais importante no estudo de moléculas de interesse biológico, já que esse espectro pode ser obtido à temperatura ambiente. Na obtenção do espectro de emissão, em geral ocorre a elevação de temperatura, que pode provocar a degradação das moléculas.

## PROBLEMAS

- Calcule o comprimento de onda da linha espectral correspondente à transição do elétron do átomo de hidrogênio de  $n = 4$  para  $n = 2$ . A que região do espectro eletromagnético pertence essa linha?
- Qual a energia necessária para ionizar o átomo de hidrogênio quando o elétron está no estado  $n = 3$ ?
- Qual é o raio da órbita de Bohr do átomo de hidrogênio para  $n = 5$ ? Qual é a energia desse nível? Estando o elétron nesse nível, que energia será necessária para removê-lo do átomo? Qual o comprimento de onda da radiação emitida quando esse elétron efetua a transição para o estado fundamental?

- Todas as transições do elétron do átomo de hidrogênio que vão diretamente ao nível de energia com  $n = 1$  pertencem à série de Lyman. Encontre o comprimento de onda
  - mais curto da série de Lyman;
  - mais longo da série de Lyman;
  - a que região do espectro eletromagnético pertence essa série?

- Qual é o comprimento de onda de de Broglie do elétron do átomo de hidrogênio no estado fundamental?

- Qual é a velocidade do elétron no estado fundamental do átomo de Bohr?
- Quantas revoluções, em média, deve efetuar um elétron no estado  $n = 2$  de um átomo de hidrogênio antes de passar para o estado  $n = 1$ ? A vida média de um estado excitado é de aproximadamente  $10^{-8}$  s.

- Calcule a frequência e o comprimento de onda da radiação emitida pelo átomo de hidrogênio quando seu elétron efetua a transição do nível de energia de  $-0,38$  eV para o de  $-3,40$  eV. A que série corresponde essa raia espectral?
- Calcule as energias total  $E_n$ , potencial  $U_n$  e cinética  $K_n$  do elétron do átomo de hidrogênio nos estados quânticos com  $n = 1, 10$  e  $\infty$  em eV.

- Alguns níveis energéticos de um átomo hipotético com um só elétron valem:

$n$	$E$ (eV)
1	-15,60
2	-5,30
3	-3,08
4	-1,45

- trace o diagrama de níveis de energia;
- determine a energia necessária para ionizar esse átomo;
- calcule o comprimento de onda mínimo da série que termina com  $n = 2$ ;
- calcule a energia necessária para excitar o átomo até  $n = 3$ ;
- de que comprimentos de onda se constitui o espectro de absorção?

- Os seis primeiros níveis de energia do elétron mais externo do átomo de sódio são:

Estado	$E$ (eV)
3s	-5,1
3p	-3,0
4s	-1,9
3d	-1,6
4p	-1,4
5s	-1,1

- Qual é a energia de ionização do átomo de sódio?
- Qual é o comprimento de onda da radiação emitida na transição do elétron do estado 3d para 3p?
- Em que transição do elétron é emitida a linha amarela de 5 890 Å num átomo de sódio?

- Calcule:

- o menor comprimento de onda e
- o maior comprimento de onda

correspondentes a linhas de absorção óptica observadas no espectro de absorção dos átomos de hidrogênio, não previamente excitados.

Determine também:

- a menor energia e
- a maior energia

do fóton da radiação absorvida.

- a. Qual é o raio da órbita de Bohr do átomo de hidrogênio para o estado com número quântico principal igual a 3?
- Qual é a energia desse nível?

- Estando o elétron nesse nível, que energia será necessária para removê-lo do átomo?
- Explique quantitativamente, em termos de energia e comprimento de onda, o que ocorre quando esse elétron efetua a transição para o estado fundamental.

- Explique quantitativamente, em termos de energia e comprimento de onda, o que ocorre quando esse elétron (a  $n = 3$ ) efetua a transição para o estado fundamental.

14. Suponha o elétron do átomo de hidrogênio no estado com número quântico principal igual a 8.

- Calcule a energia de ionização para esse átomo.
- O que ocorre a esse elétron se ele absorver 0,0765 eV de energia?
- O que ocorre a esse elétron se houver a emissão de um fóton com comprimento de onda igual a 927,7 Å?

## 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.
- PRENCH, A. P. — *Principles of Modern Physics*. USA, John Wiley & Sons, 1959.
- KONDRATYEV, K. — *The Structure of Atoms and Molecules*. URSS, Mir, 1967.
- LEIGHTON, R. B. — *Principles of Modern Physics*. USA, McGraw-Hill, 1959.
- LOPES, J. L. — *Introdução à Teoria Atômica da Matéria*. Brasil, Ao Livro Técnico, 1959.
- McKELVEY, J. P. & GROTH, H. — *Física*. Brasil, Harper & Row, 1979, vol. 4.
- OLDENBERG, O. — *Introduction to Atomic Physics*. USA, McGraw-Hill, 1954.
- SEMAT, H. — *Física Atômica y Nuclear*. España, Aguilar, 1957.

# Desintegração Nuclear

## CAPÍTULO 5

### 5.1 — INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foi estudado o modelo do átomo, no qual o núcleo foi considerado como sendo uma esfera minúscula, carregada positivamente e responsável pela quase totalidade da massa do átomo. Neste capítulo serão feitas considerações gerais sobre o núcleo e serão apresentadas as leis da desintegração nuclear, juntamente com uma série de grandezas correlacionadas.

### 5.2 — CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um núcleo atômico é constituído de prótons e de nêutrons. Cada elemento químico tem um número específico de prótons no núcleo; assim, por exemplo, o carbono tem 6 prótons, o nitrogênio 7 prótons, e o oxigênio 8 prótons. Entretanto, o número de nêutrons dentro do núcleo pode variar para cada elemento.

Os núcleos de um dado elemento com número diferente de nêutrons são chamados *isótopos* do elemento. Estes podem ser estáveis ou instáveis.

Os núcleos dos *isótopos instáveis* estão em níveis energéticos excitados e eventualmente podem dar origem à emissão espontânea de uma "partícula" do núcleo, passando, então, de um núcleo (pai) para outro (filho) em nível energético menos excitado ou fundamental. Essa "partícula" pode ser alfa, elétron, pósitron ou fóton da radiação gama. A esse fenômeno dá-se o nome de *desintegração* ou *decaimento nuclear*, ou *desintegração* ou *decaimento radioativo*. Os isótopos instáveis são portanto radioativos e também conhecidos por *radioisótopos*.

Os *isótopos estáveis* não sofrem desintegração radioativa e são portanto não-radioativos.

O carbono por exemplo tem dois isótopos estáveis ( $^{12}_6\text{C}$  e  $^{13}_6\text{C}$ ) e diversos radioisótopos ( $^{11}_6\text{C}$ ,  $^{14}_6\text{C}$ ,  $^{15}_6\text{C}$  etc.). O índice superior indica o número de prótons mais o de nêutrons no núcleo e é chamado *número de massa* (A). O índice inferior, muitas vezes omitido, representa o número de prótons no núcleo, e é chamado *número atômico* (Z). A diferença entre esses índices dá, portanto, o número de nêutrons no núcleo.

Os elementos com número atômico de 1 (hidrogênio) a 92 (urânio) são encontrados na natureza, enquanto que aqueles com Z entre 93 e 103 são produzidos artificialmente. Todos os elementos com Z superior a 82 (chumbo) são, entretanto, radioativos e se desintegram, passando de um núcleo a outro, através de uma série, até se transformar num isótopo estável de chumbo.

Com o desenvolvimento de reatores nucleares e aceleradores de partículas, tornou-se possível a produção de grandes quantidades de isótopos radioativos artificiais, que são usados em pesquisa nas diversas áreas da Ciência, na Medicina, na Agricultura e na indústria.