

Física das Radiações



Emico Okuno
Elisabeth Yoshimura

oficina de textos

Física das Radiações

Emico Okuno
Elisabeth Mateus Yoshimura

oficina de textos

© 2010 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990,
em vigor no Brasil a partir de 2009.

CAPA Malu Vallim
DIAGRAMAÇÃO Casa Editorial Maluhy & Co.
PROJETO GRÁFICO Douglas da Rocha Yoshida
PREPARAÇÃO DE TEXTO Gerson Silva
REVISÃO DE TEXTO Marcel Iha
IMPRESSÃO E ACABAMENTO ...

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Okuno, Emico

Física das radiações / Emico Okuno, Elisabeth Mateus Yoshimura. – São Paulo : Oficina
de Textos, 2010.

Bibliografia.

ISBN 978-85-7975-005-2

1. Física nuclear 2. Radiação 3. Radiação ionizante 4. Radiação - Efeito fisiológico
I. Yoshimura, Elisabeth Mateus. II. Título.

10-07037

CDD-539.7707

Índices para catálogo sistemático:

1. Radiações : Física atômica e nuclear : Estudo e ensino 539.7707

Todos os direitos reservados à **Editora Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 959

CEP 04013-043 São Paulo SP

tel. (11) 3085 7933 fax (11) 3083 0849

www.ofitexto.com.br

atend@ofitexto.com.br

Prefácio

Somos, com muito orgulho, duas professoras. Gostamos de ensinar, de dar aulas, de interagir com alunos, e fazemos dessa arte uma missão prazerosa, inclusive porque também aprendemos em todo esse processo. Nesses tempos em que a educação não tem recebido a atenção que merece, estamos nos esforçando para dar nossa contribuição. É o mínimo que podemos fazer para retribuir a instrução que recebemos gratuitamente ao longo de nossa vida estudantil, além de acreditarmos ser a educação o pilar mais importante para o futuro de qualquer nação. E temos certeza de que fizemos – e fazemos – diferença para muitos alunos que passaram pelas nossas mãos. Somos também pesquisadoras, o tempo todo, inclusive quando lecionamos e quando escrevemos um livro.

Iniciamos ministrando disciplinas relacionadas à Física das Radiações, a partir de 1987, no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, e fomos questionadas pelos alunos sobre a existência de bibliografia em português. Procuramos suprir essa necessidade com apostilas e textos de apoio. A decisão de transformar esse material em livro-texto veio, finalmente, por não existir nada similar em língua portuguesa, pelo aumento do número de cursos de Física Médica criados recentemente no Brasil e por termos acordado com a Editora Oficina de Textos pela publicação. Essa determinação nos trouxe imensa satisfação e entusiasmo, mas também muito trabalho e grande responsabilidade. Pelo fato de o projeto deste livro vir sendo pensado e trabalhado há vários anos, acreditamos ser uma obra madura, porque muito do conteúdo do texto e os exercícios já foram testados com nossos alunos, que serviram de cobaia, no bom sentido.

O livro consta de 13 capítulos. O Cap. 1 é uma introdução à teoria atômica e à Física Nuclear. O Cap. 2 discute os raios X e sua atenuação. O Cap. 3 discorre sobre elementos químicos e radioisótopos. O decaimento nuclear de uma forma geral é abordado no Cap. 4 e os tipos de decaimento, no Cap. 5. O Cap. 6 apresenta uma introdução acerca da interação da radiação com a matéria. Mais detalhadamente, os Caps. 7

e 8 abordam, respectivamente, a interação de partículas carregadas e de fótons. No Cap. 9 são apresentadas as grandezas e as unidades de Física das Radiações e, no Cap. 10, os efeitos biológicos. Os detectores de radiação estão no Cap. 11; as aplicações das radiações, no Cap. 12 e a introdução à proteção radiológica, no Cap. 13. Entremendo o texto, há exercícios resolvidos, para melhor aprendizado e entendimento do aluno, e uma lista de exercícios em quase todos os capítulos, além de histórias relativas a cada tópico. No final de cada capítulo, coletamos dados bibliográficos de cientistas mais expressivos que colaboraram para a pesquisa e o ensino na área, e escrevemos uma pequena biografia. É possível notar que nem todos os capítulos têm o mesmo aprofundamento em cada tema, sendo possível explorar o livro fora da ordem que escolhemos, dependendo das necessidades do leitor. O texto não trata de Física das radiações não ionizantes.

A presente obra pode ser utilizada em cursos de Física, Física Médica, Engenharia Clínica, Tecnologia em Radiologia, nos cursos de aprimoramento para físicos na área da saúde e nas pós-graduações que possuem temas relacionados com a Física Médica. Pode-se utilizá-la como livro-texto ou para consulta ou aprofundamento em alguns de seus tópicos. Também professores de Física do ensino médio podem usufruir desta obra para sanar dúvidas e aumentar os conhecimentos na área, já que, apesar da sua importância no mundo moderno, a Física de Radiações quase nunca é incluída nos currículos das licenciaturas em Física.

Nosso desejo mais profundo é que este livro seja, de fato, útil para o aprendizado de Física das Radiações Ionizantes pela comunidade envolvida profissionalmente com o tema.

Nos vários anos dedicados à produção deste livro, foram muitos os colegas e amigos que nos auxiliaram das mais diversas maneiras – com cessão de material, sugestões de bibliografias, discussões, incentivos e palavras amigas –, que não vamos conseguir nomear e agradecer a todos. Para simbolizá-los, escolhemos um amigo, o nosso primeiro leitor, Almy A. R. da Silva, a quem agradecemos os comentários, a dedicação e a rapidez com que nos deu retorno. Agradecemos também aos nossos ex-alunos do Instituto de Física da USP, por terem ajudado na produção do texto e por manterem em nós o entusiasmo pela docência. À toda equipe da Editora Oficina de Textos, representada pela Shoshana Signer, pelo esmero e eficiência na produção da presente obra, o nosso muito obrigado. Somos gratas, ainda, a nossos familiares, que nos deram retaguarda para essa tarefa intensa, principalmente durante a reta final.

São Paulo, 19 de fevereiro de 2010

Emico Okuno
Elisabeth Mateus Yoshimura

Sumário

Radiação, 11

- 1.1 – INTRODUÇÃO, 11
- 1.2 – RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E O CORPO HUMANO, 12
- 1.3 – ÁTOMOS, MOLÉCULAS E ÍONS, 16
- 1.4 – A ESTRUTURA ATÔMICA, 20
- 1.5 – MODELOS ATÔMICOS, 20
- 1.6 – MODELO DE BOHR DO ÁTOMO DE HIDROGÊNIO, 21

Raios X, 33

- 2.1 – INTRODUÇÃO, 33
- 2.2 – PRODUÇÃO DE RAIOS X, 36
- 2.3 – ATENUAÇÃO DOS RAIOS X, 40

Radioisótopos, 53

- 3.1 – INTRODUÇÃO, 53
- 3.2 – ISÓTOPOS E RADIOISÓTOPOS, 54
- 3.3 – UM POUCO DE HISTÓRIA, 55
- 3.4 – PRODUÇÃO ARTIFICIAL DE RADIOISÓTOPOS, 59
- 3.5 – MEIA-VIDA FÍSICA, MEIA-VIDA BIOLÓGICA E MEIA-VIDA EFETIVA, 61
- 3.6 – CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL COM RADIOISÓTOPOS, 62

Desintegração nuclear, 69

- 4.1 – INTRODUÇÃO, 69
- 4.2 – MASSAS ATÔMICAS, 73
- 4.3 – RAZÕES PARA A DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR, 74
- 4.4 – DECAIMENTO NUCLEAR, 77
- 4.5 – ATIVIDADE DE UMA AMOSTRA RADIOATIVA, 79
- 4.6 – DECAIMENTOS SUCESSIVOS, 81

Tipos de decaimento, 87

- 5.1 – ESTADO DA ARTE EM FÍSICA DE 1900 A 1940, 87
- 5.2 – DECAIMENTO ALFA, 88
- 5.3 – DECAIMENTO BETA, 92
- 5.4 – EMISSÃO DE ELÉTRONS AUGER, 99
- 5.5 – DECAIMENTO GAMA, 101
- 5.6 – INSTABILIDADE DE RADIOISÓTOPOS, 102

Interação da radiação, 109

- 6.1 – INTRODUÇÃO, 109
- 6.2 – RADIAÇÃO DIRETAMENTE IONIZANTE: PARTÍCULAS CARREGADAS RÁPIDAS PESADAS, 110
- 6.3 – RADIAÇÃO DIRETAMENTE IONIZANTE: PARTÍCULAS CARREGADAS RÁPIDAS LEVES, 111
- 6.4 – RADIAÇÃO INDIRETAMENTE IONIZANTE: FÓTONS, 113
- 6.5 – RADIAÇÃO INDIRETAMENTE IONIZANTE: NÊUTRONS, 116
- 6.6 – DEPOSIÇÃO DE ENERGIA NO MEIO PELA RADIAÇÃO: DOSE ABSORVIDA, 117

Interação de partículas carregadas rápidas com a matéria, 125

- 7.1 – CARACTERIZAÇÃO DAS INTERAÇÕES, 125
- 7.2 – PODER DE FREAMENTO, 127
- 7.3 – PARTÍCULAS CARREGADAS PESADAS, 128
- 7.4 – PARTÍCULAS CARREGADAS LEVES: ELÉTRONS E PÓSITRONS, 134
- 7.5 – DEPOSIÇÃO DE ENERGIA NA MATÉRIA POR PARTÍCULAS CARREGADAS, 141

Interação de raios X e gama com a matéria, 151

- 8.1 – ATENUAÇÃO DO FEIXE DE FÓTONS, 151
- 8.2 – ESPALHAMENTO COERENTE OU RAYLEIGH, 153
- 8.3 – EFEITO COMPTON, 153
- 8.4 – EFEITO FOTOELÉTRICO, 159
- 8.5 – PRODUÇÃO DE PAR ELÉTRON-PÓSITRON, 161
- 8.6 – O COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO, 164
- 8.7 – ENERGIA TRANSFERIDA AO MEIO NAS INTERAÇÕES DE RAIOS X E GAMA, 168
- 8.8 – APLICAÇÕES, 169

Grandezas e unidades, 181

- 9.1 – INTRODUÇÃO, 181
- 9.2 – GRANDEZAS E UNIDADES, 182
- 9.3 – GRANDEZAS FÍSICAS, 183
- 9.4 – GRANDEZAS DE PROTEÇÃO, 193
- 9.5 – GRANDEZAS OPERACIONAIS, 195
- 9.6 – RESUMO, 197

Efeitos biológicos das radiações nos seres vivos, 203

- 10.1 – INTRODUÇÃO, 203
- 10.2 – OS ESTÁGIOS DA AÇÃO, 204
- 10.3 – MECANISMOS DE AÇÃO DAS RADIAÇÕES, 204
- 10.4 – NATUREZA DOS EFEITOS BIOLÓGICOS, 212
- 10.5 – INDUÇÃO DE OUTRAS DOENÇAS RESULTANTES DE EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO IONIZANTE, 219
- 10.6 – RESULTADOS RECENTES DOS EFEITOS BIOLÓGICOS, 220
- 10.7 – RESUMO DA DIFERENÇA ENTRE OS EFEITOS DE DOSE ALTA E DOSE BAIXA, 221
- 10.8 – HORMESIS, 221

Detectores de radiação, 231

- 11.1 – INTRODUÇÃO, 231
- 11.2 – DETECTORES A GÁS E O CONTADOR GEIGER-MÜLLER, 235
- 11.3 – DETECTORES CINTILADORES, 238
- 11.4 – DETECTORES DOSIMÉTRICOS: DETECTORES LUMINESCENTES E CALORÍMETRO, 242

Aplicações da radiação ionizante, 249

12.1 – APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 249

12.2 – APLICAÇÕES MÉDICAS, 254

Proteção radiológica, 263

13.1 – INTRODUÇÃO, 263

13.2 – EVOLUÇÃO DOS VALORES DE LIMITE DE DOSE, 264

13.3 – MODELO DA RELAÇÃO ENTRE EFEITO E DOSE, 266

13.4 – CÁLCULO DE RISCO, 270

13.5 – BASE E ESTRUTURA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA, 272

13.6 – EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL, 273

13.7 – REGRAS BÁSICAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA, 274

Bibliografia, 283

Índice remissivo, 291

Desintegração nuclear

4.1 INTRODUÇÃO

Como tantas descobertas importantes feitas acidentalmente, a **radioatividade** também não fugiu à regra. Embora se trate de um processo descrito como “*serendipity*”, “acidentalmente” não seria bem a expressão correta, pois muitos outros pesquisadores talvez já tivessem se deparado com o fenômeno, mas na verdade não foram capazes de interpretá-lo corretamente. Pode-se dizer que essa também é a história do ovo de Colombo. (A palavra *serendipity* foi introduzida por Horace Walpole no século XVIII para referir-se ao dom dos heróis da lenda persa *The three princes of Serendip*. O autor aludia às descobertas feitas pelos três príncipes, acidentalmente ou por esperteza. Serendip é também o nome antigo da ilha de Sri Lanka.)

Se o tempo não tivesse ficado nublado, talvez Antoine-Henri Becquerel não teria descoberto a radioatividade no início de 1896. Essa descoberta marcou o início da *Física Nuclear*. Becquerel havia tomado conhecimento da descoberta dos raios X por Röntgen, numa sessão da Academia de Ciências de Paris, em 20/1/1896, por meio de Henry Poincaré, que havia recebido uma cópia do artigo de Röntgen. Este dizia que esses raios eram emitidos pela parede fosforescente do tubo de Crookes e que, ao incidir num anteparo pintado com platino cianeto de bário, produzia **luminescência**. Becquerel interessou-se imediatamente pelo assunto, pois tanto ele quanto seu pai e avô haviam trabalhado com o fenômeno da luminescência.

O processo da luminescência refere-se à emissão de radiação óptica por certos materiais quando expostos à radiação eletromagnética. De uma maneira clássica, podemos distinguir dois processos de luminescência, a **fosforescência** e a **fluorescência**, pelo intervalo de tempo

entre a irradiação (excitação) e a emissão de luz. No caso da fosforescência, esse tempo é maior do que 10^{-8} s, e no caso da fluorescência, menor do que 10^{-8} s (quase instantânea). A fluorescência para quando termina a excitação, mas a fosforescência continua mesmo após cessar a excitação. O comprimento de onda da luz emitida é, na maior parte das vezes, maior do que a da radiação incidente e é característico da substância que luminesce.

Becquerel decidiu então verificar se todos os materiais fosforescentes apresentavam a mesma propriedade. O experimento baseava-se em colocar material fosforescente sobre uma chapa fotográfica embrulhada com papelão preto e expor o conjunto ao sol. Ele supunha que a energia solar faria o material fosforescer, isto é, emitir luz, a qual, por sua vez, sensibilizaria o filme. As primeiras experiências realizadas com substância fosforescente não deram certo. As esperanças de Becquerel recaíram então sobre os sais de urânio, que pareciam ter propriedades interessantes do ponto de vista da fosforescência e da absorção de luz.

Para continuar os experimentos, Becquerel teve que esperar que os cristais de sulfato duplo de urânio e potássio – $K_2(UO_2)(SO_4)_2$ –, que ele havia fabricado há 15 anos e emprestado a Gabriel Lippmann, lhe fossem devolvidos. Na nova experiência, após poucas horas de exposição do conjunto à luz solar, ele observou uma imagem fraca do contorno do cristal ao revelar a chapa fotográfica, resultado este apresentado no dia 24 de fevereiro de 1896 na Academia de Ciências de Paris.

Becquerel tentou repetir o experimento nos dias 26 e 27 de fevereiro de 1896, com dois cristais de sulfato duplo de urânio e potássio, que eram fosforescentes, e com uma fina cruz de cobre interposta entre um dos cristais e o filme. Como o céu ficou nublado, ele guardou o conjunto dentro de uma gaveta e ficou esperando por dias ensolarados para continuar a iluminação. Como o tempo não melhorou, ele decidiu revelar o filme mesmo assim, no dia 1º de março, esperando ver manchas muito claras, em razão da iluminação difusa. Qual não foi sua surpresa quando viu manchas muito mais escuras do que aquelas obtidas anteriormente, ao iluminar o conjunto com os raios solares fortes, mas por pouco tempo. A Fig. 4.1 mostra o que ele viu. Becquerel percebeu que estava diante de raios emitidos, mesmo na ausência do sol. No dia 2 de março, ele relatou seu achado à revista *Comptes Rendus*, da Academia de Ciências de Paris. No dia 9 do mesmo mês, descobriu que os raios emitidos pelo sal de urânio produziam a descarga de corpos eletrificados da mesma forma que os raios X. Concluiu dizendo que essas emissões (radiações) apresentavam uma grande analogia com aquelas observadas por Röntgen. Foi no dia 22 de março que ele finalmente relatou à Academia de Ciências que os sais de urânio (uranosos), que não são fosforescentes, também emitem radiação invisível com a mesma intensidade que os sais de urânio (urânicos) fosforescentes. Portanto, essa emissão nada tinha a ver com fosforescência, mas sim com urânio.

Em dezembro de 1891, a polonesa Maria Salomea Sklodowska havia chegado a Paris para estudar na Sorbonne. Após sua licenciatura em Matemática, casou-se com Pierre Curie, passando a chamar-se Mme. Curie. No início de 1897, ela procurou Becquerel para orientá-la em uma tese de doutorado, o qual sugeriu-lhe o tema “Sobre a Natureza dos Raios de Becquerel”. Posteriormente, porém, ela mudou de tema e passou a buscar outros elementos com propriedade similar, isto é, a de emitir radiação. Foi ela quem cunhou a



Fig. 4.1 Radiografia com o contorno dos dois cristais de sulfato duplo de urânio e potássio, e de uma cruz de cobre interposta entre um dos cristais e o filme. As anotações são do próprio Becquerel
Fonte: Allisy (1996).

palavra *radioatividade* e publicou um artigo, juntamente com P. Curie, em julho de 1898, reportando-se à descoberta de um novo elemento químico, que ambos batizaram com o nome de *polônio* e símbolo *Po*. Em dezembro desse mesmo ano, anunciaram a descoberta de outro elemento radioativo: o *rádio*. Assim, foram mais dois elementos que vieram a fazer parte da Tabela Periódica de Mendeléev.

Em 1903, o casal Curie e Becquerel receberam o prêmio Nobel de Física. Em seu discurso na Academia Sueca, P. Curie disse:

Finally, in the biological sciences the rays of radium and its emanation produce interesting effects which are being studied at present. Radium rays have been used in the treatment of certain diseases (lupus, cancer, nervous diseases). In certain cases their action may become dangerous. If one leaves a wooden or cardboard box containing a small glass ampulla with several centigrams of a radium salt in one's pocket for a few hours, one will feel absolutely nothing. But 15 days afterwards a redness will appear on the epidermis, and then a sore which will be very difficult to heal. A more prolonged action could lead to paralysis and death. Radium must be transported in a thick box of lead.

It can even be thought that radium could become very dangerous in criminal hands, and here the question can be raised whether mankind benefits from knowing the secrets of Nature, whether it is ready to profit from it or whether this knowledge will not be harmful for it.

Finalmente, em Ciências Biológicas os raios do rádio e sua emanção produzem efeitos interessantes que estão sendo estudados no momento. Os raios do rádio foram usados no tratamento de algumas doenças (lúpus, câncer, doenças nervosas). Em certos casos, sua ação pode tornar-se perigosa. Se alguém levar em seu bolso, por algumas horas, uma caixa de madeira ou de papelão contendo uma pequena ampola de vidro com vários centigramas de um sal de rádio, não sentirá absolutamente nada. Mas, depois de 15 dias, aparecerá na

epiderme uma vermelhidão e, em seguida, uma ferida de difícil cicatrização. Uma ação mais prolongada poderia levar à paralisia e à morte. O rádio deve ser transportado numa caixa espessa de chumbo.

Pode-se até pensar que o rádio em mãos criminosas poderia tornar-se muito perigoso, e aqui pode ser levantada a questão se a humanidade se beneficia em conhecer os segredos da Natureza, se ela está pronta para lucrar com isso ou se esse conhecimento não lhe trará prejuízos.

(http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/pierre-curie-lecture.html)

Pierre Curie fez um paralelo com a invenção de dinamite por Nobel, dizendo ainda que a humanidade deveria fazer uso das novas descobertas mais para o bem do que para o mal.

Quem veio a pesquisar a natureza dos raios de Becquerel foi Ernest Rutherford (Prêmio Nobel de Química em 1908), na McGill University, no Canadá, onde havia sido contratado em 1898. Rutherford mediu a razão carga/massa das partículas alfa e identificou-as provisoriamente como íons positivos de hidrogênio ou de hélio. Só mais tarde, em 1911, foram estabelecidas como núcleo de átomo de hélio.

Em 1899, Ernest Rutherford escreveu:

These experiments show that the uranium radiation is complex, and that there are present at least two distinct types of radiation – one that is very readily absorbed, which will be termed for convenience the α radiation, and the other of a more penetrative character, which will be termed the β radiation.

Esses experimentos mostram que a radiação do urânio é complexa e que estão presentes ali pelo menos dois tipos de radiação - uma facilmente absorvida, que será chamada, por conveniência, de radiação alfa, e a outra com caráter mais penetrante, que será chamada de radiação beta.

(Rutherford, 1899, p. 116)

Em 1900, Paul Villard identificou a existência de um terceiro tipo de radiação. Somente três anos depois, Rutherford batizou-a de **radiação gama** (γ), que, ao contrário dos dois primeiros tipos, não sofria deflexão em campo magnético. Foi Rutherford quem estabeleceu que a radiação gama é uma onda eletromagnética da mesma natureza que os raios X.

Mme. Curie ganhou o segundo prêmio Nobel, desta vez em Química, após quatro anos de pesquisa para determinar a massa atômica do novo elemento, o rádio. Em seu discurso de Prêmio Nobel, *Radium and the New Concepts in Chemistry*, em 11/12/1911, ela disse:

Some 15 years ago the radiation of uranium was discovered by Henri Becquerel, and two years later the study of this phenomenon was extended to other substances, first by me, and then by Pierre Curie and myself. This study rapidly led us to the discovery of new elements, the radiation of which, while being analogous with that of uranium, was far more intense. All the elements emitting such radiation I have termed radioactive, and the new property of matter revealed in this emission has thus received the name radioactivity.

Cerca de 15 anos atrás, a radiação do urânio foi descoberta por Henri Becquerel, e dois anos mais tarde, o estudo desse fenômeno foi estendido a outras substâncias, primeiro por mim, e depois por Pierre Curie e por mim. Esse estudo rapidamente nos conduziu à descoberta de

novos elementos, a radiação dos quais, embora sendo análoga àquela do urânio, era muito mais intensa. Todos os elementos que emitem tal radiação eu designei radioativos, e a nova propriedade da matéria revelada nessa emissão recebeu então o nome de radioatividade.

(http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1911/marie-curie-lecture.html)

4.2 MASSAS ATÔMICAS

Os núcleos atômicos são constituídos de Z prótons e $N = A - Z$ nêutrons, sendo A o número de massa, que é igual ao número de prótons mais o de nêutrons. Os prótons e os nêutrons são denominados núcleons. Como já foi mencionado, os isótopos de um elemento têm o mesmo Z , mas diferentes valores de N . O próton tem carga positiva $+e$, cujo valor é $1,6 \times 10^{-19}$ C, mas o nêutron não tem carga elétrica.

No início do século XIX, os cientistas conseguiram prever as massas relativas dos átomos a partir de reações químicas. Por sugestão de John Dalton, ao redor de 1805, foi atribuída ao hidrogênio, o mais leve dos elementos químicos, a massa relativa de 1 u.m.a. (**unidade de massa atômica**). Tudo indicava que as massas relativas dos outros elementos seriam múltiplos inteiros desse valor. Assim, o oxigênio, por exemplo, teria massa relativa de 16 u.m.a.

Depois, o elemento químico referência foi mudado para oxigênio, porque este formava compostos com muitos outros elementos, o que facilitava a determinação de sua massa atômica, além de manter em 1 u.m.a. a massa do hidrogênio. Por sugestão do químico Jean Servais Stas, os químicos passaram a definir a u.m.a. como 1/16 da massa do elemento oxigênio, a partir de 1905.

Francis William Aston inventou a técnica de espectrometria de massa, com a qual descobriu isótopos de um grande número de elementos químicos, e por esse trabalho ganhou o Prêmio Nobel de Química em 1922. Ele descobriu, em 1929, que o oxigênio era composto de três isótopos: ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O . Os físicos passaram a atribuir a um átomo de ^{16}O , o isótopo mais abundante do oxigênio na natureza, a massa exata de 16,000000 u.m.a., e todas as outras massas atômicas eram definidas em relação a esse padrão, ou seja, 1 u.m.a. ficou definida como sendo 1/16 da massa de um átomo de ^{16}O . Assim, entre os padrões químico e físico havia uma diferença de um fator 1,000275.

A sugestão para unificar esses padrões surgiu em 1957 e, a partir de 1960, a unidade de massa passou a ser u (**unidade de massa unificada**) ou Dalton (Da), definida como 1/12 da massa de um átomo de ^{12}C , que é o isótopo estável do átomo de carbono mais abundante na natureza. De modo equivalente, a massa do átomo de ^{12}C ficou definida como sendo exatamente 12,000000 u. A nova unidade de massa, u, não pertence ao SI e foi oficialmente adotada pela IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) em 1960, e pela IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) em 1961.

A massa de 1 u pode ser determinada a partir do número de Avogadro N_A :

$$1 \text{ u (g)} = (1/N_A) = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Sabemos também que em 12 kg de ^{12}C estão contidos $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ átomos/(g·mol) ou $6,02 \times 10^{26}$ átomos/(kg·mol). Assim, a massa de um átomo de $^{12}\text{C} = 12 \text{ kg}/(6,02 \times 10^{26} \text{ átomos}) = 1,99 \times 10^{-26} \text{ kg} = 12 \text{ u}$, por definição. Portanto,

$$1 \text{ u} = 1,99 \times 10^{-26} \text{ kg}/12 = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}, \text{ mais precisamente } 1,66053886(28) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

De acordo com a teoria da relatividade restrita de Einstein, há uma equivalência entre massa de repouso m_o de uma partícula e energia de repouso E_o , dada pela equação:

$$E_o = m_o c^2 \quad (4.1)$$

Então, a energia equivalente a 1 u pode ser calculada assim:

$$\begin{aligned} E_o = 1 \text{ u} c^2 &= (1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg})(2,997925 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,49242 \times 10^{-10} \text{ J} \\ &= (1,49242 \times 10^{-10} \text{ J})/(1,602177 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 931,494 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Portanto, a massa de 1 u equivale à energia de 931,494 MeV.

Para o caso do próton:

$$\begin{aligned} E_o &= (1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg})(2,997925 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1,50534 \times 10^{-10} \text{ J} \\ &= 938,28 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Tab. 4.1 MASSA DE REPOUSO DO PRÓTON, NÊUTRON E ELÉTRON EM DIFERENTES UNIDADES

Partícula	kg	u	MeV/c ²
próton	$1,6726 \times 10^{-27}$	1,007276	938,28
nêutron	$1,6750 \times 10^{-27}$	1,008665	939,57
elétron	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	0,511

As massas do próton e do nêutron, que são cerca de 1.840 vezes maiores que a massa do elétron, e a massa do elétron estão na Tab. 4.1.

4.3 RAZÕES PARA A DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR

Diz-se que ocorre a **desintegração nuclear** ou o **decaimento radioativo** quando há a *emissão espontânea* de partícula ou energia do interior de um núcleo atômico. Rutherford e Frederick

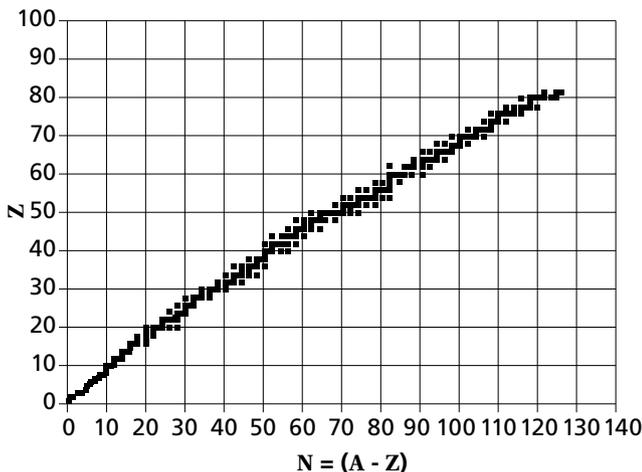


Fig. 4.2 Número de prótons Z em função do número de nêutrons N de núcleos estáveis

Soddy, respectivamente Prêmio Nobel de Química em 1908 e em 1921, demonstraram que a emissão das partículas alfa e beta envolvia transmutação de elementos, ou seja, a transformação de um elemento em outro, que sempre foi a meta dos alquimistas. A transmutação artificial foi conseguida por Irène Curie e Frédéric Joliot em 1934, como vimos no Cap. 3.

Existem os núcleos estáveis e os instáveis. Os primeiros não decaem, ao contrário dos segundos, que são radioativos. A Fig. 4.2 mostra o gráfico do número de prótons Z em função do número de nêutrons N de núcleos estáveis encontrados na natureza. A estabilidade é ditada pelo equilíbrio entre **forças nucleares**

Interação de partículas carregadas rápidas com a matéria

7

7.1 CARACTERIZAÇÃO DAS INTERAÇÕES

Como vimos no Cap. 6, **partículas carregadas** interagem um número muito grande de vezes até perderem totalmente sua energia cinética. Neste capítulo aprofundaremos o entendimento dos processos de interação, verificando sua variação com energia da partícula carregada e composição do meio.

Em geral, quando um feixe de partículas carregadas atinge um material, o número de partículas no feixe praticamente não muda, mas a energia média das partículas diminui. O estudo dessas partículas interessou diversos pesquisadores, como William H. Bragg, N. Bohr e E. Rutherford, e foi iniciado logo após a descoberta da radioatividade e da identificação da partícula alfa e do elétron. O principal objetivo desses estudos é a previsão e quantificação das perdas de energia das partículas e, conseqüentemente, a previsão da deposição de energia no meio. Graças a esses conhecimentos, é possível utilizar partículas carregadas para gerar feixes de raios X empregados em **radiologia diagnóstica** e em radioterapia; utilizar prótons em irradiações de tumores e realizar exames sofisticados com o uso de tomografia por emissão de pósitrons.

As interações mais frequentes das partículas carregadas são com a nuvem eletrônica, mas elas podem também acontecer com o átomo como um todo e com o núcleo. Resumidamente, podemos classificar as interações – boa parte delas envolvendo os campos elétricos da partícula e dos alvos – em:

- i. *Colisão inelástica com o átomo (colisão suave)*: trata-se da interação entre a partícula e todo o átomo ou os elétrons de camadas eletrônicas externas, resultando em excitação atômica e, raramente, ionização. A partícula sofre uma pequena perda de energia e de momento. É a interação mais frequente para partículas pesadas, embora não seja nessas interações que a partícula perca a maior parte de sua energia. Uma pequena fração da energia perdida pelas partículas em colisões

suaves pode ocorrer por emissão de **radiação de Cherenkov** (trata-se da emissão de luz, com λ predominantemente na faixa azul do espectro, que ocorre quando uma partícula atravessa um meio com velocidade maior que a velocidade da luz naquele meio, que vale c/n , onde n é o índice de refração da luz no meio. A luz azul que se vê na piscina do reator nuclear nas proximidades do combustível nuclear é a radiação de Cherenkov). Mais detalhes em Cherenkov (1958).

- ii. *Colisão inelástica com elétron fortemente ligado (colisão dura)*: é uma colisão frontal na qual pode ocorrer grande perda de energia pela partícula e ionização do átomo. O elétron ejetado do átomo pode adquirir energia cinética suficiente para se afastar da trajetória da partícula inicial, criando um caminho de ionizações fora da região do feixe incidente. A esse elétron dá-se o nome de **raio delta**.
- iii. *Colisão elástica com o núcleo*: a partícula primária aproxima-se do núcleo e sofre uma grande mudança na direção da trajetória, sendo a compensação de momento dada pelo recuo do núcleo.
- iv. *Colisão inelástica com o núcleo*: a partícula primária aproxima-se do núcleo e perde uma parcela muito grande da sua energia (até toda ela), na forma de um fóton de raios X, no processo conhecido como **Bremsstrahlung**. Nas energias usuais de partículas carregadas, só é observado se a massa de repouso da partícula é pequena, como é o caso de elétron e pósitron. A parcela da energia cinética do elétron convertida em radiação é tanto maior quanto mais próximo ele estiver do núcleo no momento da emissão. Os cálculos quânticos mostram que só em uma pequena fração (2% a 3%) das interações elétron-núcleo a **radiação de freamento** é emitida – na grande maioria desses eventos ocorre simplesmente uma deflexão da trajetória da partícula, sem perda de energia. Classicamente se esperaria a emissão de radiação em todas essas colisões.
- v. *Aniquilação do pósitron*: ocorre, em geral, entre o pósitron com velocidade muito baixa e um elétron praticamente em repouso no meio. Pode acontecer também quando a velocidade do pósitron é ainda grande – chamada de *aniquilação em voo* –, caso em que a energia cinética que possui é convertida também em energia dos fótons.
- vi. *Reações nucleares*: para energias muito elevadas (\sim GeV), podem ocorrer, em proporções consideráveis, reações com o núcleo como um todo ou com os núcleons individualmente, com probabilidades mais elevadas. Essas interações não são atualmente consideradas na **Física Médica**, por serem pouco prováveis nas energias usuais (elétrons e pósitrons com até dezenas de MeV e íons com até centenas de MeV). Nas situações em que íons são usados para irradiar seres humanos (radioterapia com prótons, por exemplo), é importante verificar as probabilidades de ocorrerem reações nucleares, pois partículas densamente ionizantes podem ser liberadas do núcleo nesses eventos. As interações podem envolver campos eletromagnéticos ou forças nucleares.

Cada uma dessas seis interações tem uma probabilidade de ocorrer que depende da velocidade, da massa e da carga da partícula, e do **parâmetro de impacto** da colisão (distância entre a trajetória da partícula e o centro de forças). Como o núcleo ocupa uma região muito pequena do átomo e seu campo elétrico é blindado pela nuvem eletrônica, interações com o núcleo são mais raras do que com os elétrons atômicos. As colisões suaves são mais frequentes que as colisões duras.

7.2 PODER DE FREAMENTO

Para cada interação, meio e partícula, são calculadas as perdas de energia ΔK_i da partícula. Para as colisões duras e suaves, as ΔK_i são devidas às ionizações e excitações do meio; a produção de *Bremsstrahlung* e a aniquilação em voo correspondem a perdas de energia das partículas que contribuem para a produção de radiação eletromagnética (fótons de raios X e gama). A composição dos possíveis valores de ΔK_i ponderados pela probabilidade de ocorrência de cada tipo de interação resulta na grandeza conhecida como **poder de freamento** (*stopping-power*), que representa a *perda média de energia por unidade de caminho* da partícula em um determinado meio e é simbolizada por $\frac{dE}{dx}$ ou S , com unidade [MeV/cm]. Também se usam os símbolos $\frac{dE}{\rho dx}$ ou s para representar o **poder de freamento mássico** em unidades [MeV·cm²/g], para situações em que o caminho percorrido no meio é dado em g/cm². As unidades utilizadas nas duas situações não pertencem ao SI, mas são largamente empregadas em Física Nuclear.

O poder de freamento tem valores sempre positivos e, apesar do símbolo, não é uma derivada da energia. É considerado como o limite da perda de energia da partícula para percursos dx muito pequenos. Como cada partícula tem sua própria história e trajetória no meio, o poder de freamento é um conceito estatístico em que a *média* é considerada *sobre um conjunto grande de partículas idênticas e com mesma energia*. Além disso, é importante frisar que o poder de freamento muda com a energia da partícula e, portanto, muda ao longo da trajetória de cada partícula. Sabin e Oddershede (2005) fazem uma boa revisão conceitual sobre o poder de freamento.

Em termos práticos, conhecida a energia cinética ou a velocidade das partículas que incidem em um meio, é possível obter a energia perdida em uma espessura pequena Δx (se $\Delta x \ll$ alcance) pela aproximação:

$$\Delta E \cong \Delta x \frac{dE}{dx} = \Delta x \rho \frac{dE}{\rho dx}. \quad (7.1)$$

Pelas razões já relatadas no Capítulo 6, há expressões distintas para o poder de freamento para *elétrons* e para *partículas carregadas pesadas*, como será explicitado nas próximas seções. Para ambos os tipos de partículas, no entanto, é feita a aproximação, segundo a qual a perda de energia é contínua em todo o percurso, pois os eventos que correspondem a perdas muito elevadas são raros. Essa aproximação recebe a sigla em inglês de **CSDA**, correspondente a *Continuous Slowing-Down Approximation*.

O conceito de *alcance*, já introduzido no Cap. 6, merece também alguns comentários. Experimentalmente, o que se pode obter é a espessura de um material suficiente para frear todo o conjunto de partículas que incidiu perpendicularmente nele. Há situações em que essa espessura é muito próxima do comprimento médio da trajetória das partículas no meio, mas, em geral, é menor do que ela. Uma vez conhecido o poder de freamento e sua variação com a energia, é possível obter uma estimativa de alcance, na condição CSDA, pela integral:

$$\mathfrak{R}_{CSDA} = \int_{K_0}^0 \frac{1}{dE/\rho dx} dE \quad (\text{em g/cm}^2)$$

que representa o **percurso médio** das partículas no meio e é uma estimativa superior ao alcance obtido experimentalmente.

7.3 PARTÍCULAS CARREGADAS PESADAS

7.3.1 Poder de freamento para partículas carregadas pesadas

No cálculo do poder de freamento dessas partículas, são incluídos somente os processos de colisões suave e dura, e, portanto, o poder de freamento está relacionado com a ionização e a excitação dos átomos do meio, sendo chamado de **poder de freamento eletrônico** ou **por colisão**. Somente quando a energia das partículas carregadas pesadas (PCP) é muito baixa, torna-se importante também o espalhamento elástico com o núcleo, cuja perda de energia é computada separadamente, no **poder de freamento nuclear**, com valores muito inferiores ao eletrônico.

Além das dificuldades inerentes aos cálculos de perda de energia na matéria – conhecimento da distribuição de elétrons no meio com aproximações adequadas (Hartree-Fock, por exemplo), avaliação da polarização dos átomos pelo campo da partícula em movimento, conhecimento do potencial de interação em cada ponto do espaço –, deve-se incluir ainda a possibilidade de mudanças da carga da partícula durante sua trajetória na matéria e também a excitação de seus estados eletrônicos quando é um íon “vestido” (átomo do qual nem todos os elétrons foram retirados). Na verdade, pode haver muitas capturas e perdas de elétrons ao longo do caminho de um íon na matéria. Mesmo um dos menores íons, a partícula alfa, muda de estado de ionização em torno de mil vezes em um trajeto completo, segundo Evans (1955). Define-se então uma **carga efetiva** que diminui à medida que o íon perde velocidade. A forma com que ocorre essa diminuição depende do meio (Bohr, 1941; Ziegler; Biersack; Ziegler, 2008).

Apesar de não haver uma expressão analítica para poder de freamento eletrônico válida para todas as faixas de energia, a Eq. (7.2) apresenta uma boa aproximação (para carga fixa do íon e velocidade da partícula muito maior que as velocidades dos elétrons nos orbitais atômicos), apenas para que as variações com o meio e com carga, massa e velocidade da partícula possam ser analisadas (Attix, 1986):

$$S_{PCPC} = \left(\frac{dE}{\rho dx} \right)_{PCPC} = 0,3071 \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta} \right)^2 \left[13,8373 + \ln \left(\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 - \ln I - \frac{C}{Z} \right] \quad (7.2)$$

onde o subíndice C significa que é o **poder de freamento por colisão**; $Z, A, e I$ são, respectivamente, o número atômico, o número de massa e o potencial de excitação médio do átomo do meio que é atingido; e ze e βc são a carga e a velocidade da partícula. O termo C/Z é chamado **correção de camada** (*shell correction*) e corrige a expressão no caso de a energia da partícula não ser muito maior que a dos elétrons nas camadas eletrônicas. Na Eq. (7.2), os valores numéricos foram obtidos de modo que o poder de freamento é dado em $[\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$.

A primeira verificação que se faz na Eq. (7.2) é que *não há dependência em relação à massa da partícula*: íons de mesma carga e velocidade possuem o mesmo poder de freamento (vale lembrar que, se as massas são diferentes, as *energias cinéticas* não são as mesmas). Também é notável, na Eq. (7.2), que a principal dependência em relação ao meio apareça na forma (Z/A) , que é uma razão decrescente à medida que Z aumenta, mas pouco variável ao longo da Tabela Periódica (Z/A vale 0,5000 para o oxigênio e 0,3865 para o urânio). A dependência com relação ao meio está também no **potencial de excitação médio**, I , que aparece na Eq. (7.2) como $-\ln I$ e representa a energia média gasta para ionizar e excitar os átomos do meio irradiado. Esse valor é, em geral, obtido semiempiricamente, pois os cálculos teóricos não levam a um bom resultado. Seus valores são tabelados, notando-se uma dependência praticamente linear com relação a Z – pode ser grosseiramente aproximado por $I = 10Z$, em eV (Evans, 1955). Segundo a Eq. (7.2), portanto, o poder de freamento mássico decresce com o número atômico do material. Essa variação pode ser avaliada na Fig. 7.1, em que a variação com a energia para feixes de prótons é vista para vários elementos (C, O, Pb) e compostos (água e osso).

No caso de misturas e compostos, se não há valores específicos, obtidos teórica ou experimentalmente, calcula-se o poder de freamento a partir da combinação dos elementos químicos que formam o composto:

$$\left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{\text{mist}} = w_1 \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_1 + w_2 \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_2 + \dots + w_i \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_i + \dots \quad (7.3)$$

onde os w_i são as frações em massa de cada elemento químico i presente no composto. A Eq. (7.3) é chamada de **Regra de Bragg** e vale também para o poder de freamento por colisão de elétrons.

A variação do poder de freamento com a carga da partícula é forte: S_{PCP} cresce com o quadrado da carga, segundo a Eq. (7.2). Assim, uma partícula alfa de mesma velocidade que um próton perde quatro vezes mais energia por unidade de caminho que o próton – em consequência, tem um alcance aproximadamente quatro vezes menor que o do próton. Já a variação do poder de freamento com a velocidade da partícula não fica óbvia na Eq. (7.2) e, além disso, essa equação não é válida para energias baixas da partícula.

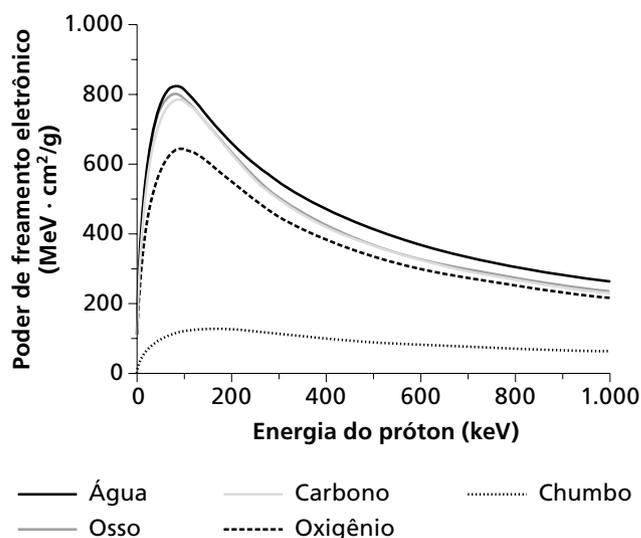


Fig. 7.1 Poder de freamento mássico eletrônico para prótons ($^1\text{H}^+$) incidentes em água, osso compacto, carbono (grafite), oxigênio e chumbo em função da energia cinética do próton. Valores obtidos da base de dados PStar (Berger et al., 2010a)

A Fig. 7.2 apresenta a variação do poder de freamento eletrônico de partículas carregadas com a energia e com a velocidade da partícula, para íons positivos incidentes em água, obtida com cálculos mais sofisticados que a Eq. (7.2), por método de Monte Carlo. Nota-se claramente na Fig. 7.2 que, para velocidades muito baixas, s_{PCP} tem um comportamento crescente com β , chegando a um valor máximo. Para valores de β acima de $\sim 0,2$, pode-se observar, na Fig. 7.2A, que a previsão de variação de s_{PCP} com o quadrado da carga do íon é válida, pois os valores do poder de freamento para He^{2+} e C^{6+} são aproximadamente 4 e 36 vezes maiores que o poder de freamento para H^+ , como mostram os segmentos auxiliares que representam essas razões. Para velocidades menores, esse fato não se verifica, e as discrepâncias em relação ao comportamento esperado pela Eq. (7.2) são grandes, em razão das aproximações contidas na sua obtenção e, principalmente, pelo fato de a carga do íon diminuir quando sua velocidade é muito baixa.

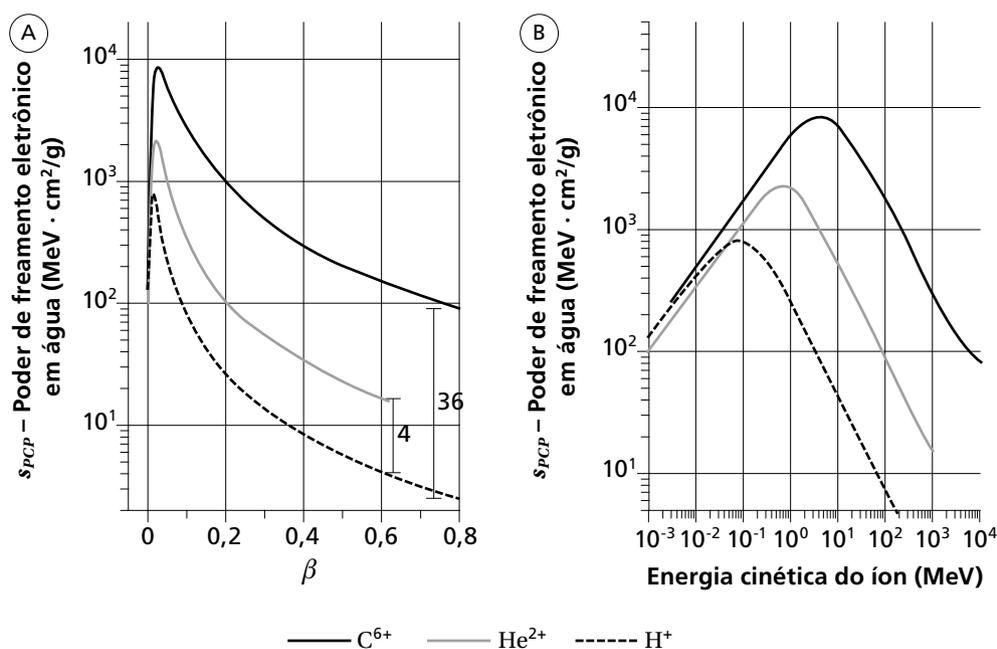


Fig. 7.2 (A) Poder de freamento mássico eletrônico para três íons – próton (${}^1\text{H}^+$), partícula alfa (${}^4\text{He}^{2+}$) e carbono (${}^{12}\text{C}^{6+}$) – incidentes em água, em função da velocidade dos íons; (B) mesmos valores de poder de freamento, em função da energia cinética das partículas. Valores obtidos com os programas PStar e AStar (Berger et al., 2010a) e MStar (Paul, 2010)

Exemplo 7.1

Obtenha a energia perdida por um feixe de prótons de 20 MeV com 10^{10} partículas, que incide na córnea do olho. Suponha que a córnea tenha 0,60 mm de espessura e que sua composição química seja muito próxima à da água.

Resolução

Com base na Tab. 6.1, obtém-se que o alcance de prótons dessa energia em água é de 4,26 mm. Então, podemos considerar que a espessura da córnea é suficientemente pequena para que valha a Eq. (7.1).

Desde a descoberta da radioatividade e do raio X no final do século XIX, a radiação tem se tornado cada vez mais importante no dia a dia das pessoas, com aplicações importantes em indústrias e, principalmente, na Medicina. São inúmeros os usos da radiação na detecção e no tratamento de doenças por meio da radiologia, radioterapia e medicina nuclear.

Este livro aborda os principais temas no estudo da Física das Radiações, desde os elementos químicos e os radioisótopos, o decaimento nuclear e a interação da radiação com a matéria, até as aplicações da radiação e seus efeitos biológicos, além da detecção e proteção radiológica.

Física das Radiações apresenta o tema de forma didática, oferecendo exercícios resolvidos, e ainda amplia os horizontes do leitor com as biografias de cientistas de expressão na área, curiosidades históricas e listas de exercícios. Uma obra fundamental para alunos de graduação e pós-graduação em Física, Física Médica e Engenharia Clínica, assim como referência para todos os profissionais envolvidos em Radiologia.



ISBN 978-85-7975-005-2



9 788579 750052