



OP-087MR-20  
CÓD.: 7891182030465

# Concursos - Área Médica

## Técnico em Radiologia

A APOSTILA PREPARATÓRIA É ELABORADA  
ANTES DA PUBLICAÇÃO DO EDITAL OFICIAL COM BASE NO EDITAL  
ANTERIOR, PARA QUE O ALUNO ANTECIPE SEUS ESTUDOS.

# Conhecimentos Específicos

## Técnico em Radiologia

Física das radiações. ....	01
Efeitos biológicos das radiações ionizantes. ....	08
Sistema de proteção às radiações. ....	12
Noções básicas sobre as radiações; riscos na radiologia diagnóstica. ....	15
Normas de radioproteção. ....	21
Fundamentos de dosimetria e radiobiologia. ....	38
Operação de equipamentos em radiologia. ....	41
Câmara escura; revelação manual e automática; componentes da câmara escura; filmes radiológicos, revelador, fixador, componentes químicos e processadora de films. ....	42
Câmara clara, seleção de exames, identificação; exames gerais e especializados em radiologia. ....	46
Exames radiológicos de: mão, ossos do carpo, quirodáticos, idade óssea, punho, cotovelo, antebraço, braço, ombro, omoplata, articulação acrômio clavicular e articulação externo clavicular. ....	48
Exames radiológicos de: Pé, antepé e retro-pé; pododáticos; calcâneo; pés planos; articulação tibia társica (rugas ligamentares); joelho, patela, fêmur e colo do fêmur. ....	55
Exames radiológicos de: Articulação coxo femoral; bacia, púbis; articulação sacro ilíaca e escanograma. ..	63
Exames radiológicos de: Coluna vertebral; coluna cervical; coluna torácica; coluna lombo-sacra; cóccix; crânio; sela túrcica; mastoides e seios da face. ....	67
Radiografias simples de abdômen e do tórax radiografias gerais no paciente politraumatizado e radiografias de corpos estranhos. ....	75
Radiografias odontológicas. Panorâmicas e periapicais. ....	78
Técnicas radiográficas em tomografia computadorizada. ....	81
Bases físicas e tecnológicas aplicadas a ressonância magnética. ....	82
Bases físicas e tecnológicas aplicadas a medicina nuclear. ....	99
Protocolos de exames em tomografia computadorizada e ressonância magnética. ....	106
Protocolos de exames de medicina nuclear. ....	114
Processamento de imagens digitais. ....	115
Informática aplicada ao diagnóstico por imagem. ....	129
Portaria da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde nº 453, de 1 de junho de 1998. ...	131



## AVISO IMPORTANTE



A Apostilas Opção **não** está vinculada as organizadoras de Concurso Público. A aquisição do material **não** garante sua inscrição ou ingresso na carreira pública.



Sua Apostila aborda os tópicos do Edital de forma prática e esquematizada.



Alterações e Retificações após a divulgação do Edital estarão disponíveis em **Nosso Site** na **Versão Digital**.



Dúvidas sobre matérias podem ser enviadas através do site: <https://www.apostilasopcao.com.br/contatos.php>, com retorno do Professor no prazo de até **05 dias úteis**.



**PIRATARIA É CRIME:** É proibida a reprodução total ou parcial desta apostila, de acordo com o Artigo 184 do Código Penal.



**Apostilas Opção, a Opção certa para a sua realização.**



# CONTEÚDO EXTRA

**Aqui você vai saber tudo sobre o Conteúdo Extra Online**



Para acessar o **Conteúdo Extra Online** (*vídeoaulas, testes e dicas*) digite em seu navegador: [www.apostilasopcao.com.br/extra](http://www.apostilasopcao.com.br/extra)



O **Conteúdo Extra Online** é apenas um material de apoio complementar aos seus estudos.



O **Conteúdo Extra Online** **não** é elaborado de acordo com Edital da sua Apostila.



O **Conteúdo Extra Online** foi tirado de diversas fontes da internet e **não** foi revisado.



A Apostilas Opção **não** se responsabiliza pelo **Conteúdo Extra Online**.

---

**CONHECIMENTOS ESPECÍFICOS  
TÉCNICO EM RADIOLOGIA**

---

Física das radiações. ....	01
Efeitos biológicos das radiações ionizantes. ....	08
Sistema de proteção às radiações. ....	12
Noções básicas sobre as radiações; riscos na radiologia diagnóstica. ....	15
Normas de radioproteção. ....	21
Fundamentos de dosimetria e radiobiologia. ....	38
Operação de equipamentos em radiologia. ....	41
Câmara escura; revelação manual e automática; componentes da câmara escura; filmes radiológicos, revelador, fixador, componentes químicos e processadora de films. ....	42
Câmara clara, seleção de exames, identificação; exames gerais e especializados em radiologia. ....	46
Exames radiológicos de: mão, ossos do carpo, quirodáctilos, idade óssea, punho, cotovelo, antebraço, braço, ombro, omoplata, articulação acrômio clavicular e articulação externo clavicular. ....	48
Exames radiológicos de: Pé, antepé e retro-pé; pododáctilos; calcâneo; pés planos; articulação tíbio társica (raturas ligamentares); joelho, patela, fêmur e colo do fêmur. ....	55
Exames radiológicos de: Articulação coxo femural; bacia, púbis; articulação sacro ilíaca e escanograma. ....	63
Exames radiológicos de: Coluna vertebral; coluna cervical; coluna torácica; coluna lombo-sacra; cóccix; crânio; sela túrcica; mastoides e seios da face. ....	67
Radiografias simples de abdômen e do tórax radiografias gerais no paciente politraumatizado e radiografias de corpos estranhos. . .	75
Radiografias odontológicas. Panorâmicas e periapicais. ....	78
Técnicas radiográficas em tomografia computadorizada. ....	81
Bases físicas e tecnológicas aplicadas a ressonância magnética. ....	82
Bases físicas e tecnológicas aplicadas a medicina nuclear. ....	99
Protocolos de exames em tomografia computadorizada e ressonância magnética. ....	106
Protocolos de exames de medicina nuclear. ....	114
Processamento de imagens digitais. ....	115
Informática aplicada ao diagnóstico por imagem. ....	129
Portaria da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde nº 453, de 1 de junho de 1998. ....	131

**FÍSICA DAS RADIAÇÕES.**

Física das Radiações é o nome tradicional da área da Física que estuda a interação das radiações ionizantes com a matéria, com interesse especial nos resultados dessas interações, e em particular na transferência de energia da radiação para o meio. Em primeiro lugar, é importante ressaltar que há dois conceitos importantes relacionados ao tema, que nem sempre são bem esclarecidos: interação e radiação ionizante. Interação é o termo que representa, na Física, a ação de uma força e o efeito causado por essa ação. Por exemplo, duas partículas carregadas em repouso interagem pela ação da força coulombiana. Radiação ionizante, por sua vez, é qualquer radiação, com ou sem massa de repouso, que pode remover elétrons de átomos e moléculas. O conjunto das radiações ionizantes usualmente estudadas compreende:

I. radiação eletromagnética com energia de fóton acima de 12 eV, que recebe várias denominações de acordo com a origem: raios X – originados de desexcitações atômicas (raios X característicos) e da desaceleração de partículas carregadas (Bremsstrahlung); raios gama – originados de desexcitações nucleares; fótons de aniquilação – originados da aniquilação de pares partícula-antipartícula;

II. partículas eletricamente carregadas e que possuem energia cinética bem maior que a energia térmica, e superior a energias de ligação de elétrons atômicos, chamadas Partículas Carregadas Rápidas. Suas origens podem ser a emissão por núcleos atômicos (partículas alfa e beta e os produtos de fissão nuclear, por exemplo), a emissão por átomos (elétrons Auger), feixes produzidos em aceleradores de partículas (elétrons, pósitrons, prótons, dêuterons, íons em geral, de qualquer número atômico ou número de massa), a radiação cósmica primária ou produtos de sua interação com a atmosfera (múons, píons etc.), produtos de reações nucleares, etc;

III. nêutrons livres com qualquer energia cinética e de qualquer origem.

Essa classificação das radiações ionizantes tem fundamentação nas forças responsáveis pelas interações e na modelagem utilizada para descrevê-las. Fótons interagem pela ação de campos eletromagnéticos, atuando sobre partículas carregadas do meio; partículas carregadas têm sua ação em elétrons do meio aproximada por interações coulombianas consecutivas; já os nêutrons atuam sobre prótons e nêutrons de núcleos atômicos pela força nuclear forte. As áreas da Física que tratam dessas interações são a Eletrodinâmica Quântica para interações entre campos eletromagnéticos e cargas em movimento, e a Física Nuclear para as interações entre nucleons. Em geral não há soluções analíticas para o problema completo, e a Física da Radiação se fundamenta em soluções analíticas parciais e aproximações numéricas combinadas com resultados experimentais. Neste artigo pretendemos revisar os principais marcos dessas interações, assim como as suas consequências.

### ***Interações da radiação eletromagnética***

Na faixa de energias que inclui os raios X e gama, há várias interações possíveis com o átomo ou com elétrons atômicos ou ainda com o núcleo, mas há também a possibilidade de não-interação, ou seja, a interação da radiação eletromagnética (REM) pode atravessar distâncias consideráveis em um meio material sem modificá-lo e sem se modificar. As probabilidades de interação (e de não-interação) dependem de características do meio e da radiação. A REM ionizante é tratada, em boa parte dos casos, como um conjunto de partículas – os fótons. A cada energia de fóton  $h\nu$  corresponde um momento associado  $h\nu/c$ , e, dessa forma, podem ocorrer ‘colisões’ em que o fóton transfere energia e momento para outras partículas. As principais interações que ocorrem na matéria com fótons de energias na faixa de poucos keV até dezenas de MeV são:

- espalhamento coerente (ou efeito Rayleigh): corresponde à absorção e re-emissão da radiação pelo átomo, em uma direção diferente da de incidência. Somente neste efeito a radiação é tratada como onda; em todos os outros se considera a REM como constituída de fótons;

- efeito fotoelétrico: o fóton é absorvido pelo átomo e um elétron atômico é liberado para se mover no material. A energia cinética adquirida por esse elétron é a diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron ao átomo;

- efeito Compton (ou espalhamento inelástico): trata-se do espalhamento de um fóton por um elétron livre do material. Há transferência de parte da energia e do momento do fóton para o elétron, e um fóton com a energia restante é espalhado em outra direção;

- produção de pares elétron-pósitron: Neste processo, o fóton é absorvido e toda sua energia é convertida em massa de repouso e energia cinética de um par partícula/antipartícula – elétron/pósitron. É interpretada como a transição de um elétron de um estado de energia total negativa para um estado de energia total positiva; a diferença de energia entre os dois estados é a energia do fóton incidente, que é absorvido; a lacuna de um elétron no conjunto de estados de energia negativa é observada como um pósitron. É possível a criação de outros pares de partícula/antipartícula, mas a energia necessária do fóton é muito mais elevada. O efeito é resultado da interação entre o fóton e o campo eletromagnético, e ocorre normalmente nas vizinhanças do núcleo, podendo também acontecer devido à interação do fóton com o campo de qualquer partícula carregada, incluindo os elétrons atômicos. Neste caso particular, um elétron atômico também é ejetado e o efeito é chamado de produção de tripleto. É mais provável quanto mais intenso for o campo;

- reações fotonucleares: a principal reação nuclear provocada por fótons é a fotodesintegração, que equivale a um ‘efeito fotonuclear’ num paralelo com o efeito fotoelétrico. O fóton com energia maior que a energia de ligação de nucleons é absorvido pelo núcleo que libera um próton ou um nêutron com energia cinética suficiente para abandonar o núcleo, que se transforma em outra espécie nuclear.

O fóton é absorvido nos processos de efeito fotoelétrico, produção de par e reações fotonucleares. A Tabela 1 mostra, para cada efeito, quais são as consequências para o meio e para a radiação, e quais radiações ionizantes são produzidas ou liberadas em decorrência da interação.

**Tabela 1.** Interações possíveis de ocorrer para radiação eletromagnética ionizante – raios X, raios gama e fótons de aniquilação – e consequências das interações

Interação – símbolo da seção de choque	O que muda no meio	O que muda na radiação incidente	Radiação ionizante produzida
Espalhamento Coerente - $\sigma_{coer}$ (espalhamento da radiação pelo átomo)		Direção de propagação, (mantém energia)	REM espalhada de mesma energia
Fotoelétrico - $\tau$ (ejeção de elétron ligado)	Ionização e excitação do átomo, recuo do núcleo	Fóton é absorvido	Elétron rápido, raios X característicos, elétrons Auger
Compton - $\sigma_{inc}$ (espalhamento do fóton por um elétron)	Ionização do átomo	Fóton perde energia e muda de direção	Elétron rápido, fóton com menor energia, espalhado
Produção de Par - $\kappa$ (energia do fóton é consumida na criação do par ( $e^- e^+$ ))	Recuo do núcleo; aniquilação do pósitron	Fóton é absorvido	Elétron e pósitron rápidos, raios X de aniquilação
Reação Fotonuclear (ejeção de nucleon ligado)	Núcleo modificado (Z ou A) e excitado	Fóton é absorvido	Partículas subnucleares, em geral nêutrons

Sob o ponto de vista de probabilidades de ocorrência, a ordem em que estão apresentadas as interações na Tabela 1 corresponde, grosso modo, à prevalência de cada efeito em função da energia de fóton: os efeitos coerente e fotoelétrico ocorrem com maior probabilidade para baixas energias, enquanto o efeito Compton ocorre para intermediárias. Produção de par e reações fotonucleares só acontecem acima de um limiar de energia: no primeiro caso, é necessário que o fóton tenha no mínimo 1,022 MeV de energia (equivalente a duas massas de repouso de elétron) para que toda sua energia se converta em massa de repouso e energia cinética do par ( $e^- e^+$ ); já para as reações fotonucleares, a energia do fóton deve ser superior à energia de ligação de nucleons (ao menos alguns MeV, em geral mais de 10 MeV) para que um nêutron ou próton seja retirado do núcleo. A Figura 1 mostra com mais clareza que o efeito Compton predomina para todos os elementos da tabela periódica se as energias de fótons estão entre algumas centenas de keV e alguns MeV, e predomina para todas as energias se os números atômicos são baixos (região sombreada na Figura 1). Para números atômicos elevados o efeito fotoelétrico é o mais provável para energias baixas e a produção de par para energias elevadas.

As reações fotonucleares ocorrem com probabilidades muito menores que os outros efeitos e não são em geral computadas nas probabilidades de interação. No entanto, sua ocorrência é importante pois os nêutrons produzidos podem ser um problema de proteção radiológica.

É conhecida a lei de atenuação de um feixe de fótons, que relaciona o número de fótons incidentes perpendicularmente em um material homogêneo ( $N_0$ ) e o número de fótons que emerge desse meio sem interagir com ele ( $N$ ):  $N=N_0e^{-\mu x}$ , que também pode ser apresentada na sua forma diferencial:  $dN=-\mu dx$ . O coeficiente  $\mu$ , chamado de coeficiente de atenuação, representa a seção de choque de interação entre cada fóton e o meio que atravessa, por unidade de volume. O coeficiente de atenuação é a soma de coeficientes parciais (símbolos na Tabela 1) para cada um dos efeitos, considerados independentes:  $\mu=\sigma_{coer}+\sigma_{inc}+\tau+\kappa$ , ou, como é mais comum, os coeficientes mássicos:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{coer}}{\rho} + \frac{\sigma_{inc}}{\rho} + \frac{\tau}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho},$$

que são o resultado da divisão dos coeficientes lineares pela densidade do material ( $\rho$ ) e representam seções de choque por unidade de massa do material. O termo  $e^{-\mu x}$  representa a probabilidade de não interação por qualquer dos efeitos, ao atravessar uma espessura  $x$  de material.

A Figura 2 mostra, para três dos átomos que compõem o corpo humano – oxigênio, carbono e cálcio –, a variação desses coeficientes mássicos parciais com a energia. Nota-se com clareza a forte dependência da probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico com a energia do fóton:  $\left(\frac{\tau}{\rho} \propto \frac{1}{(h\nu)^5}\right)$  (aproximadamente).

Quanto maior a energia do fóton comparada à energia de ligação dos elétrons ao átomo, menor a probabilidade de desencadear o efeito fotoelétrico. Ainda na Figura 2, para o átomo de Ca, é possível notar uma descontinuidade na curva de  $\tau$  contra energia chamada de borda K: esse aumento na seção de choque do efeito fotoelétrico ocorre quando a energia do fóton coincide com a energia de ligação dos elétrons mais ligados desse átomo, o que permite que também os dois elétrons desse nível de energia passem a poder ser arrancados do átomo, reforçando a noção de que a interação é praticamente um efeito ressonante.

A produção de par é o único dos efeitos cuja seção de choque cresce monotonicamente com a energia, o que produz a inversão da tendência decrescente de  $\mu$  com o aumento da energia do fóton. Por esse fato, fótons de mais alta energia podem ser menos penetrantes que fótons de mais baixa energia e, para a maioria dos materiais, um mesmo valor de coeficiente de atenuação pode corresponder a dois valores bem distintos de energia de fóton. A produção de par se torna o efeito predominante para todos os materiais em altas energias de fóton, mas o crescimento de  $\kappa$  com a energia do fóton é muito mais lento para energias altas que para as energias logo acima do limiar de 1,022 MeV.

O espalhamento coerente, cuja seção de choque como função da energia é mostrada na Figura 3, tem dependência forte de número atômico do meio e energia do fóton. Recentemente têm sido desenvolvidas aplicações desse efeito para obtenção de imagens médicas com o uso do contraste de fase para obtenção da imagem ou para redução de ruído; as defasagens da onda eletromagnética são resultado da interferência entre ondas espalhadas coerentemente ou refratadas por meios distintos. Para esse tipo de imagem é necessário um feixe monocromático e coerente – de um síncrotron, em geral.

Outra forma de observar a predominância de cada efeito é pela variação das probabilidades de interação com o material. Como já se nota na Figura 2, para o efeito Compton quase não há variação da seção de choque para os diversos elementos químicos. Mas para efeitos fotoelétrico e de produção de par a variação é expressiva com o número atômico do meio. Examinando os gráficos da Figura 4, conclui-se que a variação de  $\tau/\rho$  com Z está próxima de uma potência entre 3 e 4. Já a produção de par tem o coeficiente  $\kappa/\rho$  que cresce de maneira praticamente linear com Z. Como há uma tendência linear de aumento da densidade dos elementos com o número atômico (veja Apêndice A), a divisão dos coeficientes lineares por  $\rho$  tende a tornar as seções de choque menos dependentes de Z: o coeficiente linear  $\tau$  tem a dependência próxima de uma potência 4 e 5 com Z,  $\kappa$  varia com o quadrado de Z, e  $\sigma_{inc}$  uma dependência linear com Z.

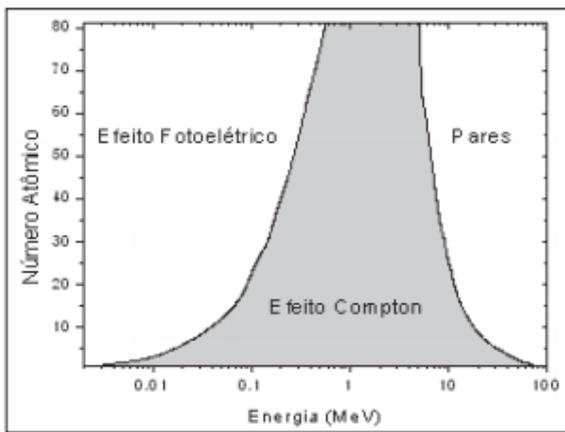


Figura 1. Gráfico que apresenta os valores de número atômico e de energia que tornam iguais as probabilidades de ocorrência dos efeitos fotoelétrico e Compton (curva à esquerda) e dos efeitos Compton e produção de par (curva à direita). Valores obtidos a partir da base de dados XCOM.

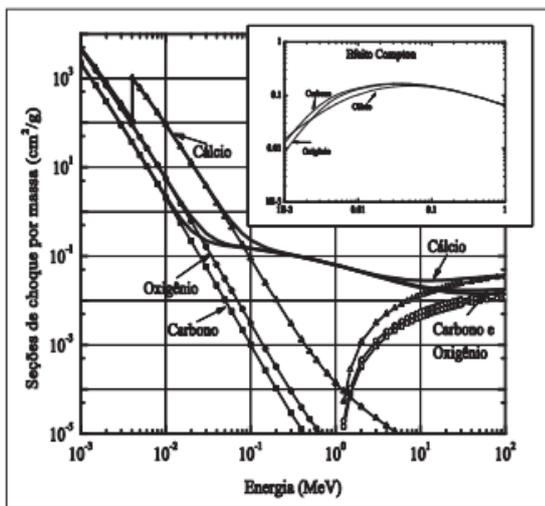


Figura 2. Seções de choque, por unidade de massa, total (linhas cheias grossas) e parciais, para os efeitos fotoelétrico (símbolos cheios) e produção de par (símbolos vazios) para três dos principais átomos que constituem o corpo humano – C, O, Ca. No destaque, o mesmo para Efeito Compton. As linhas unindo pontos são para guiar os olhos. Valores obtidos a partir da base de dados XCOM.

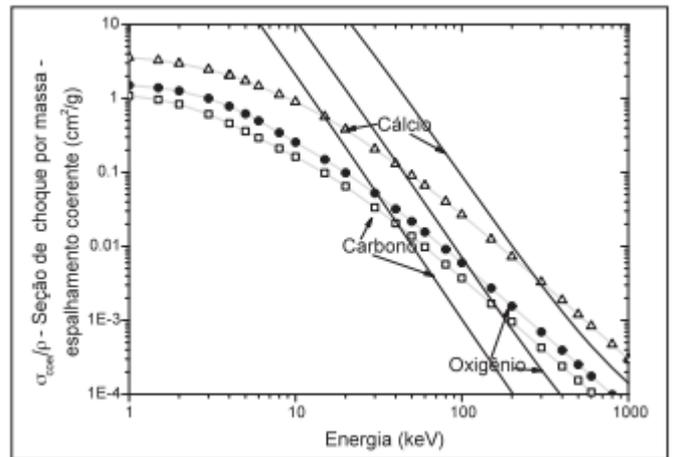


Figura 3. Pontos unidos por linhas - seções de choque parciais, por unidade de massa, para o espalhamento coerente em carbono, oxigênio e cálcio. Curvas cheias: seção de choque para efeito fotoelétrico dos mesmos elementos. Valores obtidos a partir da base de dados XCOM.

#### Interações das partículas carregadas rápidas

Ao contrário da REM, partículas carregadas têm probabilidade de 100% de interagir no meio material, pois há cargas distribuídas no meio e a força coulombiana é de longo alcance. O modelo mais frequentemente utilizado para descrever a passagem de uma partícula carregada pela matéria supõe que há uma sequência contínua de interações nas quais a partícula perde pequenas frações de sua energia, até ser completamente freada e não ser mais considerada uma radiação ionizante. Essa aproximação recebe o nome, em inglês, de continuous slowing-down approximation (CSDA). A esse continuum de interações suaves somam-se algumas interações mais intensas, nas quais uma grande perda de energia acontece.

Entre as radiações ionizantes o elétron é a partícula carregada de menor massa de repouso ( $m_e c^2 = 0,511$  MeV), de maneira que sua energia cinética (T), em geral, não é desprezível se comparada com a energia de repouso. Esse é o principal motivo para que o tratamento físico da interação das partículas carregadas rápidas (PCRs) com a matéria seja subdividido em dois grandes grupos: elétrons (que inclui elétrons e pósitrons) e partículas carregadas pesadas (todas as outras PCRs). Do ponto de vista fenomenológico, as diferenças estão explicitadas na tabela 2.

São necessárias algumas observações sobre a Tabela 2. Algumas das interações listadas como restritas a elétrons e pósitrons podem ocorrer também para íons pesados se suas energias cinéticas forem suficientemente altas. Por exemplo, a emissão de radiação de freamento proveniente da interação da partícula carregada com o campo eletromagnético do núcleo tem uma seção de choque, obtida com cálculos de Eletrodinâmica Quântica, que é inversamente proporcional ao quadrado da massa da partícula. Assim, um elétron com 0,25MeV de energia cinética tem uma probabilidade três milhões de vezes maior de emitir fótons de Bremsstrahlung que um próton com mesma velocidade (a energia cinética do próton seria de 500 MeV), interagindo com o mesmo material. As reações nucleares são também pouco prováveis para todos os casos, a menos que a energia cinética seja muito elevada.

**Tabela 2.** Interações possíveis de ocorrer para partículas carregadas rápidas e consequências das interações

Partícula carregada	Interações possíveis	O que muda no meio de interação	Radiação ionizante produzida
Elétrons, pósitrons e íons pesados	Colisão inelástica com o átomo (colisão suave)	Excitação e eventual ionização de átomos em camada de valência	Partícula primária com pequena mudança de direção, eventualmente um elétron rápido (secundário)
	Colisão com elétron fortemente ligado (colisão dura)	Ionização (camada interna) e excitação do átomo	Partícula primária, elétron rápido (secundário), raios X característicos, elétrons Auger
	Choque elástico com o núcleo	Recuo do núcleo	Partícula primária com mesma energia e outra trajetória
Elétrons e pósitrons	Choque inelástico com o núcleo	Recuo do núcleo	Partícula primária e radiação de freamento (Bremsstrahlung)
Pósitrons	Aniquilação com um elétron do meio	Ionização e excitação do átomo	Dois fótons de aniquilação, cada um com $h\nu \geq 0,511$ MeV
Todos	Reação nuclear	Núcleo modificado (Z ou A) e excitado	Partículas subnucleares, raios gama de desexcitação nuclear

A ocorrência de cada tipo de interação e a correspondente perda de energia pela PCR dependem basicamente do parâmetro de impacto da interação, ou seja, da distância entre a trajetória da partícula e o centro do átomo mais próximo. As interações com o núcleo são mais raras, pois este ocupa uma área muito pequena do átomo. O choque mais frequente é com a eletrosfera, predominando as colisões suaves sobre as colisões duras. Para cada interação a energia cinética da partícula diminui de uma quantidade  $\Delta T_i$ , que depende do tipo de partícula, da sua energia cinética e do meio de interação. A composição dos possíveis valores de  $\Delta T_i$ , ponderados pela probabilidade de ocorrência de cada tipo de interação, dá como resultado uma grandeza conhecida como stopping-power, traduzido para o português como poder de freamento, que representa a perda média de energia por unidade de caminho em um determinado meio, considerando-se a média sobre um conjunto grande de partículas idênticas e com mesma energia. Para representar o poder de freamento, usam-se os símbolos:

$$\frac{dT}{dx} \equiv S, \text{ ou } \frac{dT}{\rho dx} \equiv S_m$$

As expressões e variações do poder de freamento com energia e meio são tratadas separadamente para elétrons e partículas carregadas, devido às diferenças entre interações já enfatizadas, e também porque as PCRs leves têm tratamento relativístico que não é necessário para as pesadas.

Outra característica importante das interações das PCRs é a existência de uma distância máxima percorrida: para qualquer meio sempre é possível encontrar, para qualquer material, uma espessura específica de que é suficiente para parar (reduzir a energia cinética a valores equivalentes à energia térmica) as partículas carregadas que nele incidiram. À espessura mínima que freia todas as partículas de um determinado tipo e energia, dá-se o nome de alcance. Se a partícula tem uma trajetória sem mudanças de direção, o alcance coincide com o comprimento da trajetória da partícula. Isso em geral não ocorre, principalmente para as partículas leves, que percorrem caminhos em geral mais longos que a espessura necessária para o seu freamento total devido a espalhamentos múltiplos. A definição de alcance requer então cálculos médios e medidas experimentais. Conhecida a variação de S com a energia cinética da partícula, pode-se calcular um comprimento médio de trajetória, para um número grande de partículas idênticas de energia cinética inicial  $T_0$  dado por

$$L = \int_{T_0}^0 \frac{1}{dT} dT dx$$

Cálculos desse tipo, com a aproximação CSDA, levam a valores disponíveis em tabelas na literatura. Experimentalmente, a determinação do alcance é feita pela interposição de espessuras crescentes de material homogêneo em frente a um feixe de partículas e a contagem do número de partículas que o atravessam. A Figura 5 mostra exemplos da variação do número de partículas com espessura: na situação ideal (representada pela linha tracejada) é simples identificar o alcance com a espessura  $L_{máx}$ ; nas situações reais, como as vistas na linha cheia e na linha mista, é possível definir o alcance médio ( $L_{50}$ ) como a espessura que reduz o número de partículas à metade, ou ainda definir, além de outros, o alcance extrapolado ( $L_{ext}$ ) pela intersecção entre a tangente à curva de penetração e o eixo x. As curvas de penetração de PCRs leves se assemelham à curva mista da Figura 5, enquanto para as PCRs pesadas, as curvas de penetração são mais bem definidas, como a curva em linha cheia. Isso porque desvios apreciáveis de trajetória dessas partículas em choques com elétrons do meio são muito improváveis, pela grande diferença de massas.

#### *Poder de freamento de partículas carregadas pesadas*

No cálculo do poder de freamento de partículas carregadas pesadas (PCPs), levam-se em conta as colisões suave e dura, não sendo computadas perdas de energia por radiação de Bremsstrahlung ou por reação nuclear, consideradas pouco prováveis para partículas com até centenas de MeV de energia cinética. O poder de freamento é chamado de eletrônico. No final da trajetória das PCPs ( $T \approx E_{térmica}$ ) também é importante o espalhamento elástico com o núcleo, cuja perda de energia é computada separadamente, no poder de freamento nuclear.

As dificuldades dos cálculos de perda de energia de íons na matéria são de variadas origens: a distribuição de elétrons no meio deve ser conhecida, sendo a estratégia o uso de cálculos aproximados, como os de Hartree-Fock; a carga do íon muda durante sua trajetória na matéria, sendo definida uma carga efetiva que diminui com a velocidade do íon de uma forma que depende do meio; há polarização da eletrosfera dos átomos à medida que o íon penetra no meio; os potenciais interatômicos devem ser bem conhecidos, considerada também a blindagem pela nuvem eletrônica. Há vários conjuntos de tabelas de dados e programas disponíveis para o cálculo dessa grandeza baseadas em compilações de dados experimentais e uso de códigos de simulação pelo método de Monte Carlo. Há também expressões analíticas para o cálculo das perdas de energia, mas o desconhecimento de parâmetros dos meios de interação (potencial médio de ionização e efeito de densidade) e a introdução de várias correções tornam seu uso muito limitado – muitas vezes a medição experimental de em uma determinada faixa de energia é efetuada para determinar experimentalmente algumas características do meio em estudo.

Dos valores conhecidos para o poder de freamento, algumas regularidades podem ser observadas. A Figura 6 mostra que, para energias cinéticas relativamente altas, o decréscimo de  $S_m$  é quase linear com a energia cinética. De fato, observando-se o gráfico à direita na Figura 6, em que T é dividido pelo número de nucleons (para íons não relativísticos com número de massa  $A \approx \frac{2T}{m} \times \frac{T}{A}$ ), nota-se que, para energias cinéticas acima de poucas centenas de keV por nucleon, há uma variação decrescente e quase linear de  $S_m$  com  $\sqrt{T}$ , independente da massa do íon. O comportamento da perda de energia com o inverso do quadrado da velocidade do íon foi previsto inicialmente por Bohr, e depois ratificada por cálculos de Bethe. Já o crescimento de  $S_m$  com a velocidade para energias baixas é, em boa parte, resultado da diminuição da carga efetiva do íon à medida que se torna mais lento. Apenas como exemplo, no gráfico à direita na Figura 6 é também colocado o poder de freamento nuclear de prótons em água, que só se torna importante para energias muito baixas do íon. No mesmo gráfico se observa a coincidência das curvas de  $(S_m/Z^2)$  para quase toda a faixa de energias, inferindo-se uma dependência de  $S_m$  com o quadrado da carga do íon: íons de mesma velocidade, percorrendo determinado meio, perdem energia por unidade de caminho mais rapidamente quanto maior for a sua carga e independente de sua massa. A consequência imediata do comportamento de  $S_m$  com T é que há uma grande perda de energia pelo íon pouco antes do final de sua trajetória – o que normalmente é chamado de pico de Bragg, pois foi W. H. Bragg, em 1905, quem primeiro observou o comportamento sistemático da absorção de energia de partículas alfa na matéria<sup>5</sup>. A Figura 7 mostra o comportamento esperado para a deposição de energia por um próton na água, para três energias distintas, e por um conjunto de prótons de 200 MeV (no destaque). Como nem todas as partículas do feixe seguem exatamente a mesma trajetória, há um alargamento da região de maior deposição de energia em relação a uma partícula isolada. Esta característica da deposição de energia localizada tem sido empregada para radioterapia nos últimos anos, principalmente na protonterapia.

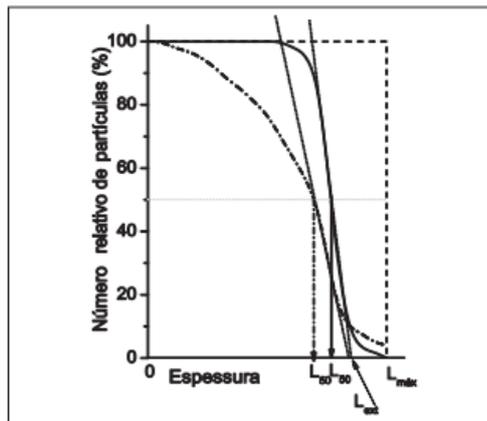


Figura 5. Exemplos de curvas de penetração de partículas carregadas e algumas possíveis definições de alcance.

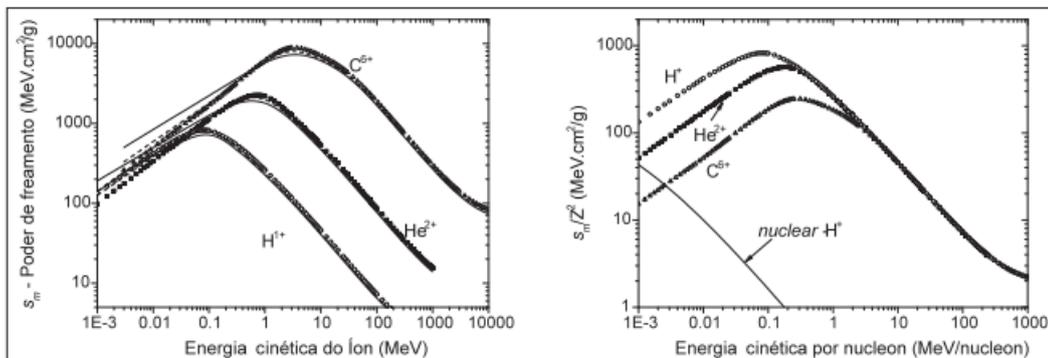


Figura 6. Esquerda: poder de freamento eletrônico, por unidade de massa, para três íons – próton ( $H^+$ ), partícula alfa ( ${}^4He^{2+}$ ) e carbono ( ${}^{12}C^{6+}$ ) - incidentes nos seguintes meios: água (pontos), carbono amórfio (linhas cheias), osso compacto (linhas tracejadas). À direita o gráfico para água é repetido com grandezas reduzidas:  $S_m/Z^2$  nas ordenadas e  $T/A$  nas abscissas. Valores obtidos com os programas PStar e AStar<sup>12</sup> e MStar<sup>16</sup>.