

## INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

### META

Nesta aula o aluno aprenderá os mecanismos envolvidos quando a radiação eletromagnética ou corpuscular interage com a matéria. Os conceitos contidos nesta aula serão importantes para a compreensão dos fenômenos biológicos induzidos pela radiação.

### OBJETIVOS

Ao final desta aula, o aluno deverá:

- apresentar os efeitos da interação da radiação  $\alpha$  com a matéria;
- apresentar os efeitos da interação das radiações  $\beta^+$  e  $\beta^-$  com a matéria; e
- apresentar os efeitos da interação das radiações  $\gamma$  ou X com a matéria.

### PRÉ-REQUISITOS

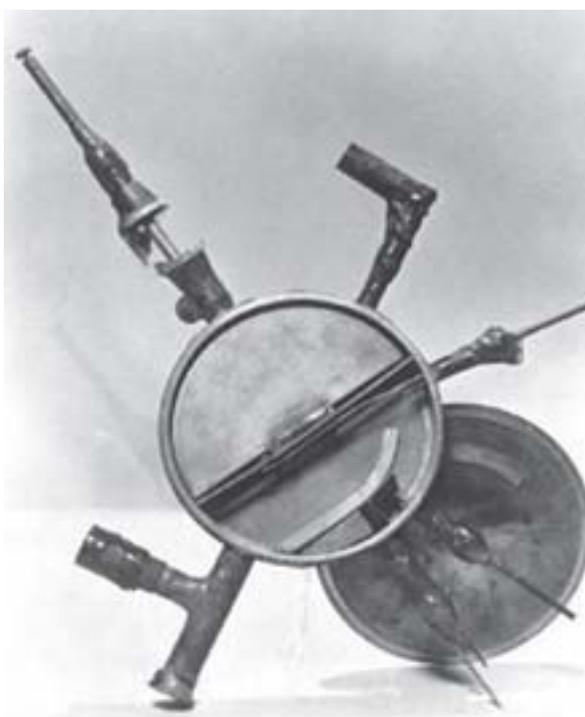
Para o entendimento desta aula é preciso dominar os conhecimentos contidos na aula de biofísica das radiações ionizantes (aula número 06).



O espaço possui uma grande quantidade de radiação. A Lua está exposta a tempestades solares que originam fluxo de partículas carregadas ionicamente. Em astronautas veteranos pode ser detectado algum dos sintomas a exposição à radiação como fadiga, alteração sanguínea e glaucoma (Fonte: <http://intra.cef.pt>).

### INTRODUÇÃO

Nesta aula abordaremos o que acontece, ao nível de átomo, quando a radiação interage com a matéria. A radiação tanto pode interagir com os elétrons do átomo, quanto com o seu núcleo. E o efeito que vai ser produzido dependerá do fato de a interação ter sido com o elétron ou com o núcleo do átomo. Dependerá também da quantidade de energia absorvida pela matéria e do tipo de radiação incidente (eletromagnética ou corpuscular). Os efeitos que abordaremos, neste capítulo, são físicos. Como consequência deles ocorrem os efeitos químicos, bioquímicos e, finalmente, os biológicos. Os efeitos biológicos serão discutidos no próximo capítulo.



O primeiro acelerador de partículas (ciclotron) desenvolvido por Ernest O. Lawrence, em 1929 (Fonte: [novastecnologiassaude.blogspot.com](http://novastecnologiassaude.blogspot.com)).

## EFEITOS DA RADIAÇÃO

Nós vimos no capítulo anterior que o núcleo dos átomos radioativos podem emitir radiação corpuscular e/ou eletromagnética e estas radiações podem interagir com a matéria produzindo dois fenômenos principais, a excitação e a ionização.

Os efeitos que a radiação produz no átomo-alvo depende basicamente de 3 fatores: do tipo de radiação ( $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$  ou  $\gamma$ ), da energia da radiação e do átomo-alvo que está absorvendo a energia da radiação. A radiação tanto pode interagir com o núcleo do átomo quanto com os elétrons. Entretanto, como os elétrons são mais numerosos, existe uma maior probabilidade de interação da radiação com eles (Knoche, 1991, p.79). Quando recebem energia das radiações incidentes, os elétrons podem ser arrancados do átomo (ionização) ou, simplesmente, podem mudar de orbital (excitação).

## INTERAÇÃO DAS RADIAÇÕES IONIZANTES COM A MATÉRIA

### INTERAÇÃO $\alpha$ -MATÉRIA

Na interação da partícula alfa com a matéria podem acontecer tanto ionização quanto a excitação dos átomos.

**Excitação** – A radiação  $\alpha$  é uma partícula de carga elétrica positiva. Então, quando ela se aproxima do elétron do átomo-alvo, a partícula  $\alpha$  exerce uma atração que desloca o elétron de seu orbital para um outro de energia maior. Ou seja, o elétron absorve a energia da radiação e passa de uma camada mais interna para outra mais externa. Esse fenômeno é conhecido como excitação. A cada interação da partícula  $\alpha$  com os elétrons ela perde parte de sua energia cinética. Após a interação, a partícula  $\alpha$  continua se propagando no meio com uma velocidade ligeiramente menor e irá interagir com outros elétrons até que toda a sua energia seja dissipada (Knoche, 1991, p.80).

**Ionização** – No processo de ionização, a radiação  $\alpha$  transfere uma quantidade maior de energia para o elétron que é, então, arrancado do átomo. Este elétron arrancado se move com uma velocidade baixa quando comparado a alta velocidade de propagação da partícula  $\alpha$ . Esta diferença de velocidade, entre o elétron e a partícula  $\alpha$ , impede que haja combinação entre eles. A energia cinética da partícula  $\alpha$  diminui por dois motivos: pela energia fornecida para romper a ligação entre o núcleo e o elétron e, pela energia fornecida ao próprio elétron para que ele seja ejetado.

O elétron ejetado (elétron primário) pode, por sua vez, causar uma ionização adicional em outros átomos pelos quais ele interage. O elétron arrancado pelo elétron primário é chamado de elétron secundário e a ionização promovida por ele é denominada de ionização secundária. A ionização primária é aquela promovida pela interação da radiação nuclear com a matéria. Para a partícula  $\alpha$ , cerca de 60-80 % da ionização induzida por ela se deve ao processo de ionização secundária (Knoche, 1991, p. 81).

### INTERAÇÃO $\beta$ -MATÉRIA

A partícula  $\beta$ , também chamada de nêgatron, causa ionização e excitação do átomo por um processo muito similar ao descrito para a partícula  $\alpha$ . Além destes dois processos, a radiação  $\beta$  pode ainda promover um fenômeno de *Bremsstrahlung*.

O nêgatron apresenta a mesma carga do elétron. Então, o fenômeno de atração eletrostática promovido pela partícula  $\alpha$  não se aplica à partícula  $\beta$ . O deslocamento de elétrons promovido pela partícula  $\beta$ , acontece por repulsão eletrostática. A quantidade de energia necessária para ejetar os elétrons é praticamente igual para as partículas  $\beta$  e  $\alpha$ . Entretanto, mais elétrons secundários são formados pela interação  $\beta$ -matéria quando comparado à partícula  $\alpha$ . Cerca de 70-80 % o total da ionização é devido aos elétrons secundários produzidos.

Existe uma grande diferença na energia transferida na colisão entre duas partículas de mesma massa (2 elétrons) e na colisão entre partículas de massa diferentes ( $\alpha$  e elétron). Como uma partícula  $\alpha$  é 7.000 vezes mais pesada do que o elétron, a interação entre elas não promove mudança na direção de propagação da partícula alfa. Entretanto, a colisão entre um elétron primário e um elétron do meio absorvedor (ambos com mesma massa) deve mudar, de forma significativa, a direção de propagação de ambos os elétrons. A cada interação, o elétron primário mudará a sua trajetória. A colisão de um elétron primário com um núcleo atômico, também pode promover grande desvio na trajetória do elétron ou mesmo a sua absorção pelo núcleo (Knoche, 1991, p. 84).

Como os elétrons (primário e o secundário) têm a mesma massa e mesma carga, algumas de suas colisões resultam em elétrons secundários com energia cinética maior do que a do elétron primário.

*Bremsstrahlung* é uma palavra alemã que significa “quebra da radiação” e se refere à emissão de radiação eletromagnética quando partículas carregadas e dotadas de alta velocidade sofrem desvio de trajetória devido à interação com núcleos de átomos pesados. A alta velocidade dos radiações corpusculares não favorece à interação delas com elétrons situados na eletrosfera de um átomo próximo. Isto porque o tempo de interação entre eles é pequeno. Assim, a grande velocidade é um fator que

dificulta a ionização ou a excitação da matéria pela qual passa a radiação primitiva. Partículas carregadas, tais como os elétrons, emitem radiação quando são submetidas a uma aceleração ou desaceleração. Os elétrons, em alta velocidade, podem ser atraídos para o núcleo do átomo-alvo. Estes elétrons (ou partícula  $\beta^-$ ), ao se aproximarem do núcleo sofrem um desvio da sua trajetória e, com isso, eles perdem energia emitindo radiações eletromagnéticas com variados comprimentos de onda, inclusive na faixa dos raios X (Fig. 73). Nas ampolas, os raios X são produzidos pelo bombardeio de um metal pesado, tal como o tungstênio, por feixe de elétrons que se propagam em alta velocidade. Esta produção se deve ao bremsstrahlung, bem como à desexcitação da eletrosfera, envolvendo os orbitais K e L.

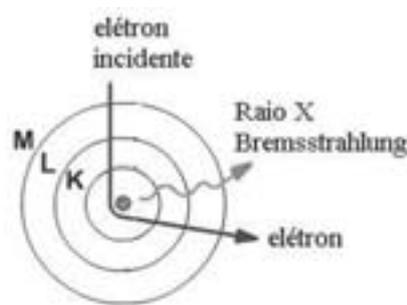


Figura 73. Emissão de raios X pelo processo de bremsstrahlung (Fonte: [www.ndt-ed.org](http://www.ndt-ed.org)).

## INTERAÇÃO $\beta^+$ -MATÉRIA

Em virtude das partículas  $\beta^+$  e  $\beta^-$  possuírem carga oposta pode ocorrer atração eletrostática entre elas. Quando isto se dá, ambas sofrem aniquilação. Na aniquilação as duas partículas são convertidas em dois fótons de radiação eletromagnética, cujo comprimento de onda é próximo aos raios X. Cada fóton gerado tem uma energia de 0,51 MeV.

## INTERAÇÃO DAS RADIAÇÕES X E $\gamma$ COM A MATÉRIA

As radiações gama e X são ondas eletromagnéticas. A primeira tem origem nuclear, enquanto que a segunda está relacionada com a eletrosfera. Ambas não possuem carga nem massa. Quando interagem com a matéria, podem ocorrer 5 fenômenos diferentes: espalhamento coerente, efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de par e fotodesintegração.

a) Espalhamento coerente – No espalhamento coerente o elétron absorve no todo ou em parte a energia da radiação X ou gama incidente e sofre

excitação, ou seja, passa para um orbital mais energético ou mais externo (Fig. 74). Logo em seguida, o elétron retorna ao seu orbital de origem, perdendo a energia recebida na forma de um fóton de raios X que se propaga numa nova trajetória (Conde-Garcia, 1998, p.282).

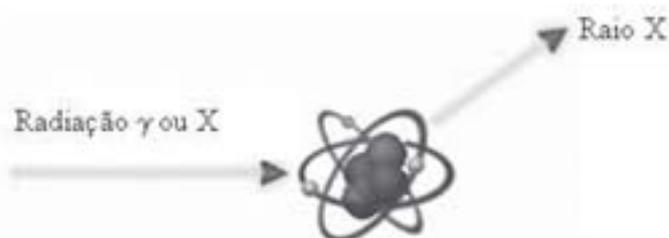


Figura 74. Fenômeno de espalhamento coerente (Fonte: <http://www.ndt-ed.org>).

b) Efeito fotoelétrico - Neste efeito, a radiação gama ou X é totalmente absorvida por um elétron orbital resultando em sua ejeção para fora do átomo e deixando o átomo ionizado (Fig. 75). Este elétron é chamado de fotoelétron e como possui grande energia cinética pode causar ionização secundária. Subsequentemente, outro elétron de uma camada mais externa ocupará a vacância deste elétron arrancado. Nesta passagem, o elétron pode perder energia na forma de raios X, se o preenchimento da vacância for nas camadas K ou L. Já o preenchimento de camadas superiores libera desde luz ultravioleta, visível, infravermelho ou calor. Este efeito acontece quando a radiação tem baixa energia, menor do que 1 MeV (Heneine, 2006, p.347, Okuno, 2007, p.18).

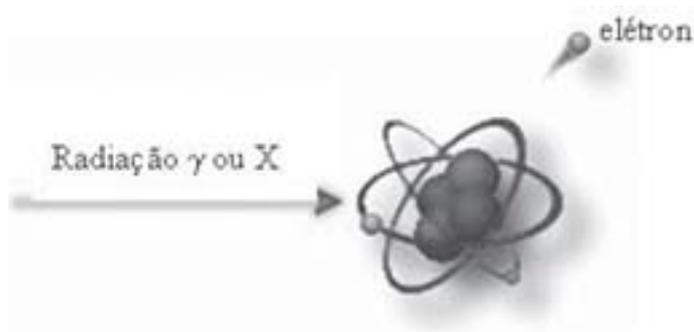


Figura 75. Efeito fotoelétrico promovido pela radiação  $\gamma$  ou X em um átomo absorvedor (Fonte: <http://www.ndt-ed.org>).

c) Efeito Compton - Neste efeito, a radiação gama ou X é parcialmente absorvida por um elétron orbital resultando também em sua ejeção do átomo (Fig. 76). Este elétron ejetado é chamado de elétron Compton. Como o elétron absorveu parte da energia incidente, a radiação continu-

ará se propagando só que com menor energia e com nova trajetória. Durante o seu percurso pela matéria a radiação poderá continuar produzindo novas ionizações. Geralmente, a radiação é absorvida por elétrons mais externos. Também os elétrons Compton podem produzir ionização e excitação de outros átomos. Este efeito acontece quando a radiação tem energia superior a 1 MeV (Knoche, 1991, p.90; Heneine, 2006, p.347, Okuno, 2007, p.18).

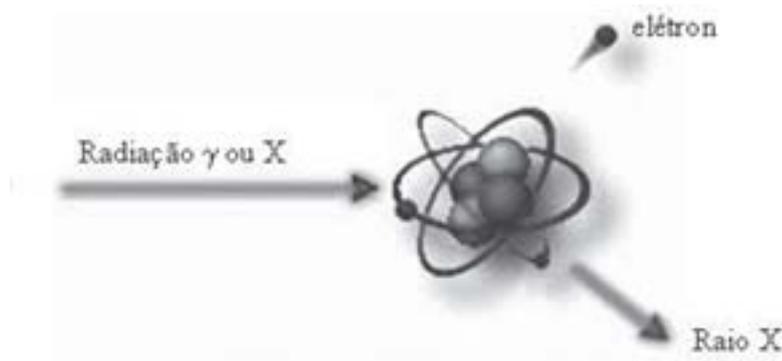


Figura 76. Efeito Compton promovido pela radiação  $\gamma$  ou X em um átomo absorvedor (Fonte: <http://www.ndt-ed.org>).

d) Produção de par – Neste fenômeno (Fig. 77), a radiação ao interagir com o núcleo nas vizinhanças deste átomo forma um par de partículas beta, sendo uma  $\beta^+$  e outra  $\beta^-$ . A radiação original desaparece e produz estas duas partículas gastando para gerar suas massas 0,51 MeV para cada uma delas. Além disto, ela terá que ter energia suficiente para, além de criar massa, dotar as partículas formadas de energia cinética de modo a que elas possam se afastar uma da outra. Assim, é necessário que a radiação original tenha energia superior a 1,02 MeV. As partículas beta geradas dissipam sua energia por ionização, excitação, bremsstrahlung ou por aniquilação ( $\beta^+$ ).

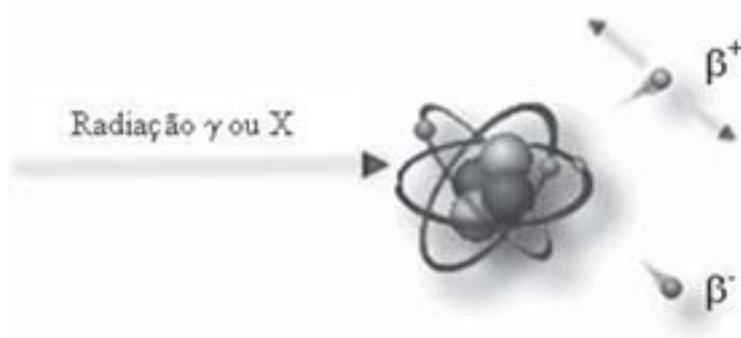


Figura 77. Produção de par (Fonte: <http://www.ndt-ed.org>).

e) Fotodesintegração – Neste fenômeno ocorre a captura da radiação pelo núcleo do átomo absorvedor (Fig. 78). O núcleo ao absorver uma grande quantidade de energia (entre 5 a 15 MeV) da radiação sofre desintegração, emitindo prótons, nêutrons, partícula  $\alpha$  (2 prótons e 2 nêutrons) ou até mesmo um grupo de partículas (Conde-Garcia, 1998, p.284).

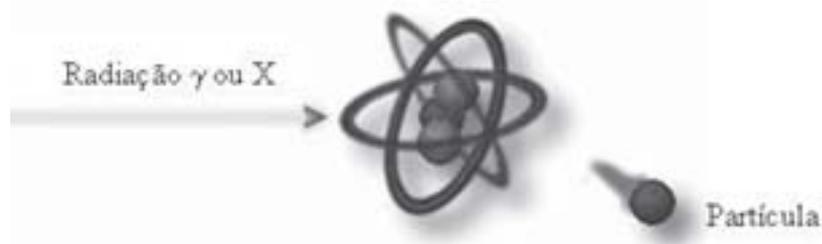


Figura 78. Fenômeno da fotodesintegração por interação da radiação com o núcleo do átomo (Fonte: <http://www.ndt-ed.org>).

## CONCLUSÃO

Podemos concluir que a radiação pode transferir parte ou toda a sua energia para o átomo-alvo podendo acontecer, excitação ou ionização do átomo, emissão de raios X (bremsstrahlung), aniquilação de partículas, espalhamento coerente, efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de par e fotodesintegração. A ocorrência de um efeito ou outro vai depender se radiação interagiu com o núcleo atômico ou com os elétrons, da energia da radiação incidente, do tipo de radiação e do átomo-alvo. Após a interação da radiação com a matéria pode ocorrer uma lesão que é, inicialmente, molecular e evolui para alterações químicas e bioquímicas. Destes eventos, aparecem os resultados biológicos que abordaremos no próximo capítulo.



## RESUMO

A radiação  $\alpha$ , ao interagir com o meio produz dois fenômenos principais, ionização e excitação. Na ionização, o elétron absorve energia da radiação e é arrancado do átomo. Na excitação, o elétron também absorve energia da radiação, só que em menor quantidade e é transferido para um orbital mais externo. O elétron ejetado pela radiação é chamado de elétron primário. O elétron primário pode interagir com outros elétrons podendo causar ejeção de outros elétrons que serão chamados de secun-

dários. A partícula  $\beta^+$  também pode produzir ionização ou excitação do átomo por processo similar. Além disso, esta partícula pode ser atraída para perto do núcleo do átomo e sofrer um desvio perdendo energia na forma de raios X (fenômeno de bremsstrahlung). Na interação  $\beta^+$  com a matéria além dos fenômenos de excitação e ionização pode ocorrer a aniquilação de partículas. Neste fenômeno, há o choque entre uma partícula  $\beta^+$  e  $\beta^-$  de cargas contrárias, elas são aniquiladas (desaparecem) e ocorre emissão de dois fótons de radiação eletromagnética com a energia igual a da partícula beta. Na interação da radiação eletromagnética com a matéria podem ocorrer 5 tipos de interações: espalhamento coerente, efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de par e fotodesintegração. Se vai acontecer um fenômeno ou outro depende se a radiação vai interagir com o elétron ou com o núcleo e da quantidade de energia da radiação.

### ATIVIDADES

1. Diferencie excitação e ionização do átomo.
2. Como são gerados dos raios X no fenômeno de bremsstrahlung?
3. Descreva a aniquilação de partículas.
4. Diferencie os efeitos fotoelétrico e Compton.
5. O que pode acontecer quando a radiação eletromagnética interage com o núcleo de átomo?



### COMENTÁRIO SOBRE AS ATIVIDADES

1. Estes efeitos ocorrem por interação da radiação com os elétrons do átomo-alvo. O elétron, ao absorver a energia da radiação pode ser excitado ou ionizado.
2. Neste fenômeno o raio X é produzido quando o elétron ou a partícula beta negativa passa próximo ao núcleo.
3. Ocorre quando duas partículas betas de cargas opostas se chocam.
4. Existem diferenças no que diz respeito à energia da radiação incidente se é alta ou baixa, se o elétron absorve toda ou parte da energia da radiação e se após a interação se a radiação acaba ou continua se propagando.
5. Você deve explicar os fenômenos de produção de par e a fotodesintegração.



## PRÓXIMA AULA

Na próxima aula estudaremos a sequência de eventos que levam aos efeitos biológicos das radiações ionizantes.

## REFERÊNCIAS

- CONDE-GARCIA, E. A. C. **Biofísica**. Ed. Savier, 1998.  
HENEINE, I. F. **Biofísica Básica**. Ed. Atheneu, 2006.  
KNOCHE, H. W. **Radioisotopic methods for biological and medical research**. Ed. Oxford University Press, 1991.  
OKUNO, E. Radiação. **Efeitos, riscos e benefícios**. Ed. Harbra, 2007.  
OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. Ed. Harbra, 1986.