



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**  
**GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**BIANCA AZULAY MARTINS GONDIM**

**INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA E SEUS EFEITOS NO CORPO  
HUMANO**

**FORTALEZA**

**2016**

BIANCA AZULAY MARTINS GONDIM

INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA E SEUS EFEITOS NO CORPO  
HUMANO

Monografia de Bacharelado apresentada à Coordenação da Graduação do Curso de Física, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nogueira da Costa Filho.

FORTALEZA  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca do Curso de Física

- 
- G635i      Gondim, Bianca Azulay Martins  
              Interação da radiação ionizante com a matéria e seus efeitos no corpo humano / Bianca Azulay  
Martins Gondim. – 2016.  
              54 f. : il.
- Monografia (Graduação em Física) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,  
Departamento de Física, Curso de Bacharelado em Física, Fortaleza, 2016.  
              Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nogueira da Costa Filho.  
              Coorientação: Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona.  
              Inclui bibliografia.
1. Física de Radiações. 2. Física Médica. 3. Radiação ionizante - interação com a matéria.  
4. Radiação ionizante - efeitos biológicos. 5. Poder de freamento. I. Costa Filho, Raimundo  
Nogueira da. II. Carmona, Humberto de Andrade. III. Título.

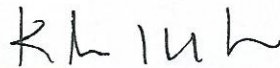
BIANCA AZULAY MARTINS GONDIM

INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA E SEUS EFEITOS NO CORPO  
HUMANO

Monografia de Bacharelado apresentada à Co-  
ordenação da Graduação do Curso de Física,  
da Universidade Federal do Ceará, como re-  
quisito parcial para a obtenção do Título de  
Bacharel em Física.

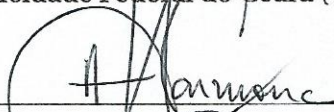
Aprovada em 02/02/2016.

BANCA EXAMINADORA



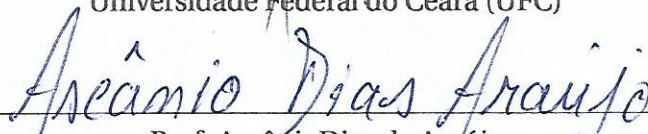
---

Prof. Dr. Raimundo Nogueira da Costa Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



---

Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



---

Prof. Ascânio Dias de Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*À Deus  
e  
à minha família*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à Deus pelas inspirações sem as quais esse trabalho não se realizaria.

Aos meus pais Francisco Jair Lima Gondim e Conceição Suelen Azulay Martins Gondim e minha irmã Rebecca Azulay Martins Gondim, pelo encorajamento diário e pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos meus avós por me ensinarem a ser mais humilde, gentil e compreensiva.

A minha gatinha, Ísis, pelas brincadeiras fora de hora e por conseguir me acalmar quando eu mais precisava.

Ao meu supervisor James Drummond durante o Summer Research na Dalhousie University por me mostrar o valor de um trabalho bem feito e da auto confiança.

Aos amigos da minha turma Jonathan Sales, Matheus Falcão, Pedro Henrique Lima, Daniel Linhares, Wagner Sena, Laura Barth, Lucas Miranda e Daniel Brito que me acompanharam e ajudaram durante o curso de Física.

Aos amigos que tão bem me receberam após meu intercâmbio: Sofia Magalhães Cunha, Michel Rodrigues, Pablo Ramon, Ken Aikawa, Emanuel Fonteles, Wendel Oliveira, Raul Peixoto e Mateus Andrade.

Ao professor Raimundo pela orientação e pela paciência essenciais para o sucesso deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Física pelos seus ensinamentos e aos funcionários do curso, que durante esses anos, contribuíram de algum modo para o nosso enriquecimento pessoal e profissional.

*Que tua vida não seja uma vida estéril.  
Sê útil deixa rastro. - St. Josemaria Escrivà*

## RESUMO

Após a descoberta da radiação ionizante por Wilhem Conrad Roentgen em 1895, ficou claro que era possível utilizar deste novo fenômeno para revelação e tratamento de disfunções no corpo humano, entre elas o câncer. Como resultado, a mídia passou a atribuir aos seus efeitos um aspeto "milagroso" alegando que o tratamento com radionuclídeos poderia rejuvenescer, curar cegueira e até mesmo transformar negros em brancos. A manipulação de produtos altamente radioativos tornou-se banal e passou a ser componente de maquiagens, pastas de dente, chocolates entre outros (LIMA, 2015; OKUNO, 2010). Os efeitos dessa manipulação precária causou várias mortes de garotas que trabalhavam em uma empresa americana de relógios de nome *Undark*. Elas cobriam os números dos relógios com uma tinta que continha Rádio e toda vez que afilem o pincel, o levava para a boca afim de que pudessem cobrir precisamente os números com o material fosforescente. Notou-se que após um tempo as garotas desenvolviam doenças estranhas que provocavam vômitos, enjoos, anemias, fraturas nos ossos, tumores no queixo e que culminaram na morte das trabalhadoras (LIMA, 2015). Apesar dos esforços da empresa de esconder os casos, notou-se que havia uma relação entre os materiais radioativos e os sintomas apresentados pelas garotas. Foi preciso um aprofundamento maior sobre os efeitos desses compostos no ser humano, mas antes disso precisava-se descobrir como a radiação ionizante interagia com a matéria. A radiação mostrou-se eficiente na quebra de ligações químicas através da transferência de energia para o meio. Dessa forma, moléculas importantes do corpo humano (como o DNA) eram danificadas e poderiam resultar na morte celular, causando assim diversos efeitos no corpo humano (DUGGAR, 1936). O objetivo desse trabalho é analisar como cada tipo de radiação ionizante interage com a matéria e como essas interações afetam nosso corpo.

**Palavras-chave:** Radiação ionizante. Poder de freamento. Radiação ionizante-interação com a matéria. Radiação ionizante-efeitos biológicos.



## ABSTRACT

After the discovery of ionizing radiation by Wilhelm Conrad Roentgen in 1895, the possibility of using this new phenomenon for the treatment of human body dysfunctions such as cancer was immediately noticed. As a result, the media started to develop theories regarding the "miraculous" aspect of radioactivity. Treatments using radionuclides gained popularity because they promised to rejuvenate people, make the blind see and even turn black people into white. The manipulation of radioactive products became hackneyed and started to be a component of make ups, toothpaste, chocolate, etc. As a result, deaths regarding the banality of radioactive products increased. One case occurred with girls that worked for a company of name *Undark*. They covered the numbers of the clock with a paint that had Radium as a component and every time they wanted to taper the brush the girls would bring the brush into their mouths and lick it. After a period of time, the girls would develop a sickness with uncommon symptoms such as vomit, nausea, anemia, bone fracture, chin tumors that could end up in death. Although the company tried to hide the cases, it was clear that there was a relationship between the radiation and the symptoms displayed by the girls. It was necessary a profound study in the area of the effects of ionizing radiation with matter but prior to that, how the interaction of radiation with matter happens should be discovered. The radiation revealed to be efficient in breaking chemical bonds through the transfer of energy to the medium. This way, important human body molecules (such as the DNA) could be damaged and result in cell death. Thus, causing copious effects in the human body. The objective of this work is to analyze how every kind of radiation interacts with matter and how those interactions affects our body.

**Keywords:** Ionizing radiation. Stopping Power. Ionizing radiation-interaction with matter. Ionizing radiation-biological effects.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa dos limiares de dose para reações teciduais para testículos, ovários, cristalino e medula óssea de adultos humanos . . . . .	46
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Hand mit Ringen</i> (Mão com anél):Fotografia de Wilhelm Röntgen. Primeiro raio X "médico", tirada no dia 22 de Dezembro de 1895. . . . .	15
Figura 2 – Registro obtido por Becquerel em chapa fotográfica de radiações emitidas naturalmente . . . . .	15
Figura 3 – Espectro da radiação eletromagnética.A Radiação não ionizante compreende as ondas de rádio,microondas,infravermelho indo da frequência 50Hz até aproximadamente 10 GHz. A Radiação ionizante começa em aproximadamente 3Phz e abrange radiações ultravioleta de alta frequência, Raios X e Raios gama . . . . .	16
Figura 4 – Interações possíveis de ocorrer para partículas rápidas e consequência das interações . . . . .	22
Figura 5 – Poder de freamento mássico para prótons incidentes ( $H^+$ ) em água, carbono, chumbo, osso e oxigênio em função da energia em KeV do íon. . . . .	24
Figura 6 – Representação do pico de Bragg para prótons incidentes em polietileno de alta densidade (HDPE). Esse princípio é o que torna possível a <b>protonterapia</b> . 25	25
Figura 7 – Poder de freamento por colisão para elétrons incidentes em água, carbono, chumbo, osso e oxigênio em função da energia cinética do próton em KeV. . . . .	26
Figura 8 – Poder de freamento por radiação (pontos) e total(linhas) para elétrons incidentes em água, carbono, chumbo, osso e oxigênio em função da energia da partícula. A linha pontilhada na região inferior do lado direito representa a dependência linear com relação à energia. . . . .	27
Figura 9 – Poder de freamento por colisão e por radiação de elétrons incidentes em diferentes elementos químicos. Os quadrados representam energias de 1 MeV e os triângulos 100 MeV (as linhas servem como guia para os olhos) . . . . .	28
Figura 10 –Faixas de energia e número atômico representando a predominância da perda de energia por colisão e radiação. A linha divisória entre as duas regiões é $s_C = s_R$ . . . . .	28
Figura 11 –Representação do efeito fotoelétrico no átomo. . . . .	30
Figura 12 –Representação do efeito Compton no átomo. . . . .	31
Figura 13 –Representação da produção de pares no átomo. . . . .	33
Figura 14 –Gráfico que apresenta os valores do número atômico e da energia em que há predominância dos três tipos de interação de fótons com a matéria. . . . .	34

Figura 15 – Ilustração do resultado da ionização dos átomos pela radiação no corpo humano . . . . .	39
Figura 16 – Esquema da quebra de uma molécula de DNA através da ação direta e indireta	41
Figura 17 – Radiossensibilidade dos órgãos do corpo humano começando indo do mais ao menos sensível . . . . .	48
Figura 18 – Efeitos de uma dada dose de radiação no feto. . . . .	50

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	Coeficiente de atenuação linear
$h$	Constante de Planck
$\nu$	Frequência da radiação
$c$	Velocidade da luz

## LISTA DE SIGLAS

ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica ( <i>International Commission on Radiological Protection</i> )
LET	Transferência Linear de Energia ( <i>Linear Energy Transfer</i> )
LNT	Modelo Linear Sem Limiar ( <i>Linear No-Threshold Model</i> )
PCP	Partículas Carregadas Rápidas
REM	Radiação Eletromagnética

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>A radiação ionizante</b>	<b>17</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Radiação diretamente ionizante</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Radiação indiretamente ionizante</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Interação de partículas carregadas com a matéria</b>	<b>21</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Poder de freamento para partículas carregadas</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Transferência de energia para o meio</b>	<b>28</b>
<b>2.2</b>	<b>Interação de raios X e gama (<math>\gamma</math>) com a matéria</b>	<b>29</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Atenuação do feixe de REM</b>	<b>34</b>
<b>2.2.2</b>	<b>A transferência de energia para o meio</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE NO CORPO HUMANO</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Estágios da ação da radiação no corpo humano</b>	<b>40</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Primeiro e segundo estágio: O efeito físico e o físico-químico</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Terceiro estágio: O efeito químico</b>	<b>40</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Quarto e último estágio: O efeito biológico</b>	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Natureza dos efeitos biológicos</b>	<b>44</b>
<b>3.2.1</b>	<b>As reações teciduais (agudas)</b>	<b>44</b>
<b>3.2.2</b>	<b>As reações estocásticas (crônicas)</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação foi primeiramente observada pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen, em 1895, na forma de raios X enquanto fazia experimentos com o tubo de raios catódicos. Ao mostrar a fotografia em raios X da mão de sua esposa, a comunidade científica rapidamente procurou usar da descoberta como forma de tratamento médico. Desde o princípio, a radiação já se mostrava útil ao ser humano. (CAMERON, 1978)

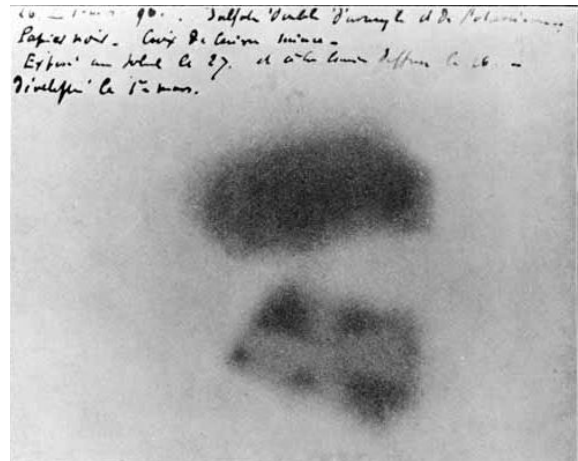
Logo depois, em 1896, Antoine Henri Becquerel, constatou que um sal de urânio produzia manchas numa chapa fotográfica mesmo isolado em uma sala escura e embrulhado em um papel preto.

**Figura 1** *Hand mit Ringen* (Mão com anél):Fotografia de Wilhelm Röntgen. Primeiro raio X "médico", tirada no dia 22 de Dezembro de 1895.



[Fonte: (RAIO-X, 2015)]

**Figura 2** Registro obtido por Becquerel em chapa fotográfica de radiações emitidas naturalmente



[Fonte: (BEQUEREL, 2015)]

Apesar de muitos estudos de Becquerel com relação à radiação, foi Marie Sklodowska Curie ou simplesmente Marie Curie, que batizou a então chamada *hiperfosforescência* de **radioatividade**. A contribuição do casal Curie para o estudo de materiais radioativos foi bastante rica, rendendo ao casal e ao físico Becquerel o Nobel de Física em 1903. Marie Curie, juntamente com seu esposo Pierre Curie, descobriu os novos elementos radioativos: Polônio e Rádio. O primeiro nomeado em homenagem à terra natal da cientista e o segundo devido a sua radioatividade parecer mais elevada que a dos outros elementos conhecidos. Essa descoberta rendeu à Marie Curie o Nobel de Química em 1911.

Marie Curie também investigou os efeitos da radiação no corpo humano usando uma cápsula de rádio que ficava em contato com o braço de seu esposo por várias horas. O



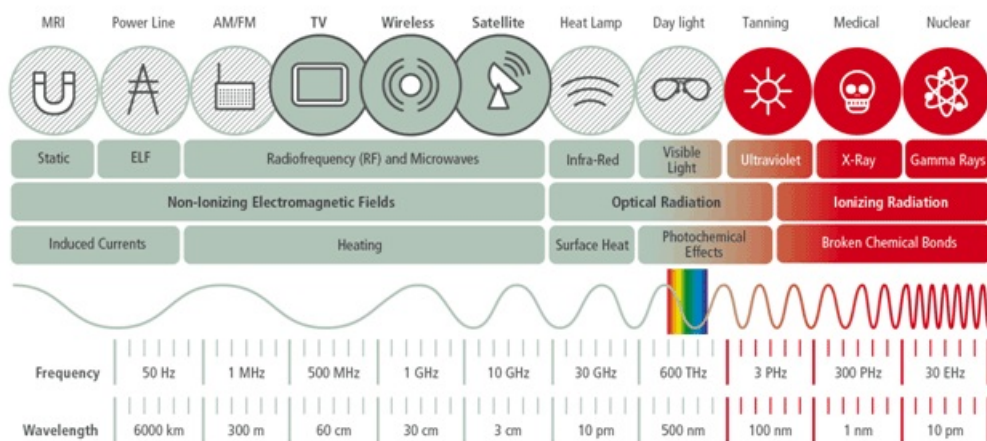
resultado era uma ferida profunda que demorava um mês para sarar. Ficou claro que esse tipo de método seria útil para o tratamento do câncer, sendo até hoje utilizado com o nome de **braquiterapia** ou **curieterapia**.

As utilidades médicas e os novos tratamentos que eram descobertos na época, tornaram a radiação uma "solução para todos os males" (LIMA, 2015) e seu uso foi extremamente banalizado. Surgiram cremes de beleza, chocolates, cremes dentais e até supositórios contendo radionuclídeos (OKUNO, 2010). Sua propriedade "milagrosa" não parava aí, manchetes de revistas da época afirmavam que o Rádio podia fazer uma garota cega enxergar novamente e que podia transformar um homem negro em branco.

Essa banalidade causou inúmeras mortes de garotas que trabalhavam em uma fábrica de relógios dos Estados Unidos. A fábrica, de marca *Undark*, usava pó de rádio para pintar os números e assim deixá-los brilhando no escuro. Elas lambiam a ponta do pincel que possuía doses letais de rádio para cobrir os números com o material fosforescente. Após alguns anos, as garotas começaram a ter sintomas estranhos. Necrose no queixo (queixo de rádio), anemia e fraturas nos ossos são alguns exemplos. Vários desses sintomas culminaram na morte daquelas que são agora chamadas de *as garotas do rádio*. (LIMA, 2015)

Existem dois tipos de radiação: A ionizante e a não-ionizante. Na primeira ocorre a ionização do meio, ou seja, a retirada de elétrons dos átomos que se encontram na matéria irradiada. A radiação não-ionizante, por sua vez, atravessa o meio sem provocar ionizações ao longo do percurso. A radiação ionizante pode ser partículas carregadas rápidas como a radiação alfa ( $\alpha$ ) e a beta ( $\beta$ ), neutrôns ou eletromagnética que são os raios X e raios gama ( $\gamma$ ).

**Figura 3** Espectro da radiação eletromagnética. A Radiação não ionizante compreende as ondas de rádio, microondas, infravermelho indo da frequência 50Hz até aproximadamente 10 GHz. A Radiação ionizante começa em aproximadamente 3Phz e abrange radiações ultravioleta de alta frequência, Raios X e Raios gama



[Fonte: Serviço digital da GSMA]<sup>1</sup>

A ionização e excitação do átomo ocorrem durante o processo de deposição de energia.

As interações da radiação com a matéria dependem do tipo da própria radiação e dos átomos irradiados. Podemos classificar dois tipos de radiação. Uma é chamada *radiação diretamente ionizante* e a outra *radiação indiretamente ionizante*. Onde a primeira são partículas carregadas rápidas pesadas e leves. A interação nesse caso ocorre por meio de forças coulombianas, que são de longo alcance, entre a carga da radiação e as cargas do meio. Mais tarde veremos que é esse tipo de radiação ionizante que danifica diretamente o DNA. Já a indiretamente ionizante é constituída por fótons e neutrões e por isso não tem carga elétrica. Sua interação com a matéria é promovida pela força nuclear forte no caso de interação de neutrões com prótons e neutrões que compõem a matéria irradiada, porém os fótons interagem através de campos eletromagnéticos que atuam sobre as partículas carregadas do meio.

Vale ressaltar que a passagem da radiação no meio provoca *mais radiação*, chamada **radiação secundária** por esse motivo não é possível obter equações analíticas que descrevam totalmente a interação da radiação na matéria. (KALINOVSKII, 1989)

Trataremos aqui das radiações ionizantes.

## 1.1 A radiação ionizante

Compõem a radiação ionizante as partículas alfa e beta (elétron e pósitron), os raios X e gama e neutrões. Cada um possui uma profundidade de penetração diferente e age diferentemente na matéria. Exploraremos essas interações mais à frente.

### 1.1.1 Radiação diretamente ionizante

Segundo (OKUNO,2010) pode-se observar a interação desse tipo de radiação com a matéria em suas duas formas. A primeira é a radiação como partículas rápidas pesadas e a segunda como partículas rápidas leves.

#### 1. Partículas carregadas rápidas pesadas:

São partículas que possuem a energia cinética maior que a energia de ligação dos elétrons e a massa de repouso superior à do elétron que é cerca de  $m_e c^2 = 511 \text{ KeV}$ . Estão incluídos nessa classificação as partículas alfa emitidas por radionuclídeos, prótons da radiação cósmica ou de aceleradores de partículas. A interação dessas partículas com os átomos acontece, na maioria das vezes, com a nuvem eletrônica das partículas

---

<sup>1</sup>Disponível em: <<http://www.gsma.com/publicpolicy/faq/electromagnetic-spectrum>>. Acesso em Dez 2015

do meio pois além do núcleo ser bem menor que o átomo como um todo, há ainda a blindagem da carga do núcleo pela nuvem eletrônica.

Por causa do longo alcance da força de Coloumb e também da existência de uma grande quantidade de elétrons na matéria, há uma sucessão de interações tais como *choques* e *colisões* que transferem a energia cinética quase que continuamente para os átomos do meio até que a energia da partícula esteja próxima à energia térmica (ou seja, por volta de 0.025 eV). Além disso, se a energia for muito elevada, há a probabilidade de ocorrer reações nucleares.

Vale aqui todas os conceitos de conservação da energia e momento. Em geral, as trajetórias dessas partículas são retilíneas no meio pois elas possuem massa muito maior que a do elétron que colidem. Dessa forma, a partícula vai perdendo energia a cada colisão e por isso possui um alcance máximo dependendo do tipo de material irradiado. Uma das consequências desse fato é que, em princípio, podemos produzir certos tipos de **blindagem** que possuem espessura maior que o alcance das partículas no meio. Ou seja, que contenha a radiação emitida. A radiação secundária consiste em ionizações por parte das partículas pesadas que fornece a energia cinética necessária para liberar os elétrons dos átomos os quais estão ligados.

## 2. *Partículas carregadas rápidas leves:*

Nesta categoria encontram-se os elétrons e pósitrons com energia cinética *maior* que a energia de ligação do elétrons aos átomos do meio. Sendo esses: desintegração  $\beta$ , feixes resultantes de aceleradores, ou criação de pares. No estudo da interação da radiação com o meio, vale chamar as partículas genericamente de elétrons uma vez que o comportamento é comum. Com exceção apenas da aniquilação do pósitron. (OKUNO, 2010)

Assim como para as partículas pesadas, as interações com os elétrons do meio com partículas rápidas e leves se dá por meio de forças coloumbianas. Contudo, há duas diferenças básicas ocasionadas pela diminuição do tamanho das partículas: (i) Como a massa delas são similares a massa dos elétrons do meio, pode ocorrer uma grande perda de energia e a trajetória sofrer desvios acentuados. (ii) Devida a alta velocidade, é preciso dar um tratamento relativístico ao seu movimento. Devido aos movimentos tortuosos e mudanças de direções que podem ocorrer no meio irradiado, a penetração das partículas varia bastante. No entanto, em geral o alcance dessas partículas é maior que o alcance das partículas rápidas e pesadas.

Além das interações com o elétron, há também com o núcleo atômico. Nesse caso a radiação eletromagnética (como raios X, por exemplo) é emitida no processo de *Brems-*

*strahlung*<sup>2</sup>. A radiação secundária aqui proveniente dos elétrons rápidos é também ionizações dos átomos que constituem o meio, bem como raios X de freamento.

### 1.1.2 Radiação indiretamente ionizante

Nesta categoria encontram-se as partículas que não possuem carga, ou seja, fótons e neutrôns. Interagem pouco ou nenhuma vez com a matéria.

#### 1. Fótons:

Nesta categoria de radiação notamos que há pouca ou nenhuma interação da radiação com o meio. Estão contidos aqui fótons de raios X ou gama. Destacam-se três processos principais de deposição de energia e ionização: efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares elétron-pósitron. Os quais veremos com mais detalhes no próximo capítulo.

Como os fótons raramente interagem com a matéria ou simplesmente não interagem, não há modificação considerável nem no meio onde penetra nem na própria REM, dessa forma não existe um material que possa efetivamente blindar a radiação. Por esse motivo, não há sentido em falar algo como *alcance* da partícula como vimos para radiação diretamente ionizante, em vez disso usamos o termo *profundidade de penetração* no meio.

#### 2. Neutrôns:

Essas partículas possuem massas ligeiramente maior que a do próton e são localizadas no núcleo atômico. Não há emissão espontânea de neutrôns pelo núcleo. Logo, as principais fontes de neutrôns são de interações de radiação cósmica em alta atmosfera e em diversas reações nucleares (fissão nuclear, por exemplo).

Independentemente de sua energia, eles são *sempre* radioativos. Existem os chamados **neutrôns térmicos** que tem a energia cinética próxima à energia térmica a temperatura ambiente.

Por não terem campo eletromagnético (já que são eletricamente neutros), a partícula não atua sobre elétrons nem é influenciado por eles. Dessa forma, os meios materiais são transparentes ao nêutron e estes não perdem energia cinética durante as interações com a matéria irradiada, assim como os fótons.

---

<sup>2</sup>Do alemão *Bremsen* = frear *Strahlung* = radiação

## 2 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Existem quatro tipos de interação entre partículas elementares, são essas, em ordem de força: *Gravitacional, fraca, eletromagnética e forte*. Onde as forças gravitacionais e fracas interagem com partículas de todas as espécies. Forças eletromagnéticas interagem com partículas que carregam carga elétrica e fótons, enquanto a força forte age entre hádrons e quarks que constituem as partículas.

A interação eletromagnética possui um papel importante na passagem de partículas carregadas e fótons na matéria. Quando uma partícula carregada se move em algum meio, há um desvio da partícula causada pela interação com o campo elétrico do átomo. Geralmente esses desvios são pequenos, porém, como a frequência das colisões é muito alta, a direção do movimento da partícula muda bastante. Este processo é chamado de espalhamento múltiplo de Coulomb ou ainda, como é mais conhecido, *espalhamento de Rutherford*. A partícula perde energia conforme ioniza e excita os átomos do meio, por *bremsstrahlung* (que abordaremos mais tarde neste capítulo) e por produção de pares elétron-pósitron.

Em média, a energia perdida por radiação e produção direta de pares aumenta linearmente com o aumento da energia, porém a perda de ionização de partículas relativísticas depende pouco do aumento da energia.

A interação de fótons com a matéria difere da ionização causada por partículas carregadas pois toda vez que o fóton interage ele é ou absorvido ou espalhado num ângulo muito aberto. Para baixas energias, ou seja, para energias abaixo da energia de ionização, o *espalhamento Rayleigh* domina. Ao aumentarmos a energia, outros processos se tornam dominantes. Sendo esses, em ordem crescente de energia: *Efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton* e por fim a *produção de pares elétron-pósitron*.

A energia dos elétrons produzidos pelo último processo é comparável com a energia do fóton primário. Se a energia do fóton primário for grande, os elétrons resultantes desse processo produzem uma nova geração de "fótons". Essa cadeia continua até a energia cair para um nível onde a formação de novas partículas torna-se ineficiente. Durante esse processo, aumenta a quantidade de elétrons que entram na faixa de energia onde a perda de radiação não compete com a perda de ionização. Até a energia total do fóton primário ser completamente usada para a ionização e excitação dos átomos do meio num fenômeno conhecido como *chuva de elétron-fóton*. (KALINOVSKII, 1989)

Como o nêutron interage através de força nuclear forte, o alcance é curto. Eles podem também ser capturados pelos núcleos atômicos do meio e participar de diversas reações nucleares.

Quando há velocidade o suficiente e o átomo é ionizado, radiação secundária aqui constitui no **núcleo de recuo** que ocorre quando há choques elásticos da partícula com núcleos e cede parte da energia para o núcleo.

## 2.1 Interação de partículas carregadas com a matéria

Em (OKUNO, 2010) diversas formas de interação de partículas carregadas com a matéria são citadas. Descrevemos aqui seis formas de interação:

### 1. *Colisão inelástica com o átomo* (colisão suave);

Essa interação é a mais comum para partículas pesadas. Consiste quando a partícula incidente interage com o átomo como um todo ou com as camadas mais externas do elétron. Como consequência, a partícula sofre pequena perda de energia e momento. Além disso, nesse tipo de interação, a excitação dos elétrons é bem mais frequente que a ionização (rara). Um exemplo comum de um tipo de radiação em que ocorrem colisões suaves é no caso da **radiação de Cherenkov**<sup>1</sup>

### 2. *Colisão inelástica com elétron fortemente ligado* (colisão dura);

Nesta colisão há uma grande perda de energia. É uma colisão frontal onde existe uma grande chance de haver ionização do átomo. O elétron ejetado pode adquirir uma energia cinética suficiente para desviar significativamente da trajetória da partícula inicial e assim criar um caminho de ionizações fora da região do feixe incidente. A esses elétrons, damos o nome de **raio delta**

### 3. *Colisão elástica com o núcleo*;

A partícula primária aproxima-se do núcleo e sofre um grande desvio da trajetória inicial, sendo a compensação de momento dado pelo recuo do núcleo do átomo.

### 4. *Colisão inelástica com o núcleo*;

Quando a partícula incidente se aproxima do núcleo e sofre com a perda de uma parcela significativa de energia, chegando a ser até mesmo toda ela, na forma de um fóton de raio X num processo chamado de **Bremsstrahlung** que trataremos com mais detalhes mais a frente.

---

<sup>1</sup>A radiação de Cherenkov é a emissão de radiação eletromagnética (na faixa azul do espectro) emitida por uma partícula carregada (como o elétron) que atravessa um meio dielétrico com velocidade maior que a da luz naquele meio

### 5. Aniquilação do pósitron;

Ocorre quando o pósitron caminha com uma velocidade muito baixa e choca-se com um elétron praticamente em repouso no meio. Como resultado, o par desaparece e há emissão de dois fótons. No entanto, pode ocorrer também quando o pósitron está em alta velocidade. Nesse caso, a energia cinética é também convertida em energia dos fótons. Chamamos esse tipo de colisão de *aniquilação em voo*

### 6. Reações nucleares.

Para energias na ordem de GeV, podemos observar a ocorrência de reações nucleares. Isto é, reações com o núcleo como um todo ou com os núcleons individualmente onde há união de dois ou mais átomos ou fissão de um átomo. Essas interações não são consideradas em *Física Médica* uma vez que são pouco prováveis para a faixa de energia trabalhada por esse setor (que é na ordem de MeV). No entanto, é necessário levar em conta a probabilidade de ocorrer reações nucleares quando íons são usados para irradiar seres humano uma vez que partículas densamente ionizantes podem ser liberadas do núcleo nesses eventos.

Vemos na tabela o que cada interação provoca no meio irradiado.

**Figura 4** Interações possíveis de ocorrer para partículas rápidas e consequência 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

[Fonte:(OKUNO, 2010)]

#### 2.1.1 Poder de freamento para partículas carregadas

Vimos até agora que quando a partícula incidente encontra o meio irradiado ocorre, dependendo da velocidade, massa e carga da partícula e do **parâmetro de impacto** da colisão (distância entre a trajetória da partícula com o centro de forças) os tipos de interação que mencionamos acima.

No entanto, essas interações resultam em perdas de energia cinética que chamaremos de  $\Delta K_j$ . Para colisões duras e suaves, a perda se dá por ionização e excitação do meio. Quando ponderamos essas perdas com a probabilidade delas ocorrerem resulta numa grandeza conhecida como **poder de freamento** ou em inglês *stopping power* (YOSHIMURA, 2009). Que representa a perda de energia por unidade de caminho. Simbolizamos o poder de freamento da seguinte maneira:

$$S = \frac{dE}{dx} . \quad (2.1)$$

A unidade é em MeV/cm. Vale ressaltar que  $S$  não é a derivada da energia. Estamos aqui considerando o limite da perda de energia de uma partícula para percursos muito pequenos  $dx$ .

Como cada partícula possui sua própria "história" e sua própria trajetória no meio, consideramos  $S$  como um conceito estatístico onde a média é entre um conjunto com muitas partículas de mesma energia.

Para partículas carregadas pesadas, encontramos um poder de freamento diferente daquele para partículas leves. Quando lidamos com partículas pesadas, levamos em consideração os tipos de colisão (se é suave ou dura) e não entramos na área relativística que é, para partículas leves, algo que deve ser adicionado para a melhor compreensão do poder de freamento.

Partículas carregadas pesadas (ou abreviadamente PCP) como um íon, quando atravessam um meio, podem perder e capturar elétrons. Mesmo o menor íon, que é uma partícula alfa, sofre cerca de 1000 ionizações quando atravessa o meio. Por esse motivo, existe uma **carga efetiva** que diminui a medida que o íon perde velocidade.

Não há uma expressão analítica que seja válida para todas as faixas de energia, porém podemos usar uma boa aproximação quando consideramos a carga fixa do íon e velocidade da partícula muito maior que a dos elétrons nos orbitais eletrônicos. Nela as variações com o meio da carga, da massa e da velocidade são analisadas. A expressão abaixo trata do poder de freamento por *colisão*

$$S_{PCP} = \frac{dE}{\rho dx_{PCP}} = 0.30701 \frac{Z}{A} (z/\beta)^2 [13,8373 + \ln(\beta^2/(1-\beta^2)) - \beta^2 - \ln I - C/Z] \quad (2.2)$$

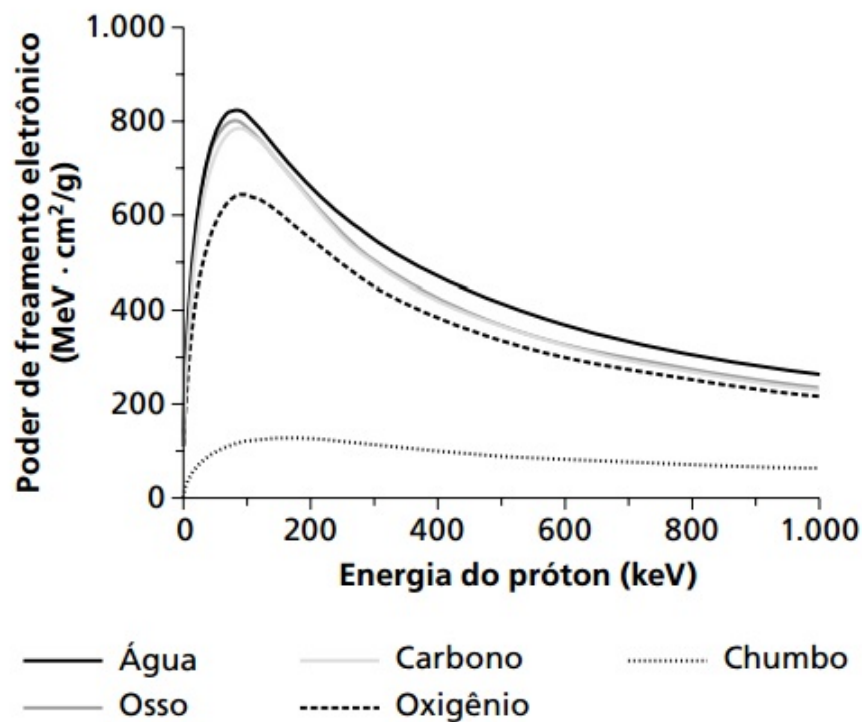
Onde  $Z$  é o número atômico,  $A$  é o número da massa e  $I$  é o potencial de excitação médio do átomo do meio que é atingido.  $Ze$  é a carga da partícula e  $\beta C$  a velocidade da mesma.  $C/Z$  é o termo de correção de camada que corrige a expressão caso a energia da partícula não ser muito maior que a dos elétrons nas camadas eletrônicas.



Através da expressão acima podemos inferir alguns resultados da interação de partículas carregadas com o meio. Primeiramente, notamos que **não há dependência em relação à massa da partícula**. Ou seja, íons com a mesma carga e velocidade possuem o mesmo poder de freamento.

As dependências em relação ao meio encontram-se em na forma de  $(Z/A)$  e do potencial de excitação médio  $I$ . Os dados que correspondem ao valor da energia média gasta para a ionização dos átomos do meio (ou seja,  $-lnI$ ) são obtidos semiempiricamente e correspondem grosseiramente a  $I = 10Z$  de forma que o poder de freamento decresce com o número atômico do material.

**Figura 5** Poder de freamento mássico para prótons incidentes ( $H^+$ ) em água, carbono, chumbo, osso e oxigênio em função da energia em KeV do íon.



[Fonte: (OKUNO, 2009)]

Quando tratamos de misturas e compostos, calcula-se o poder de freamento a partir da combinação dos elementos que o compõem.

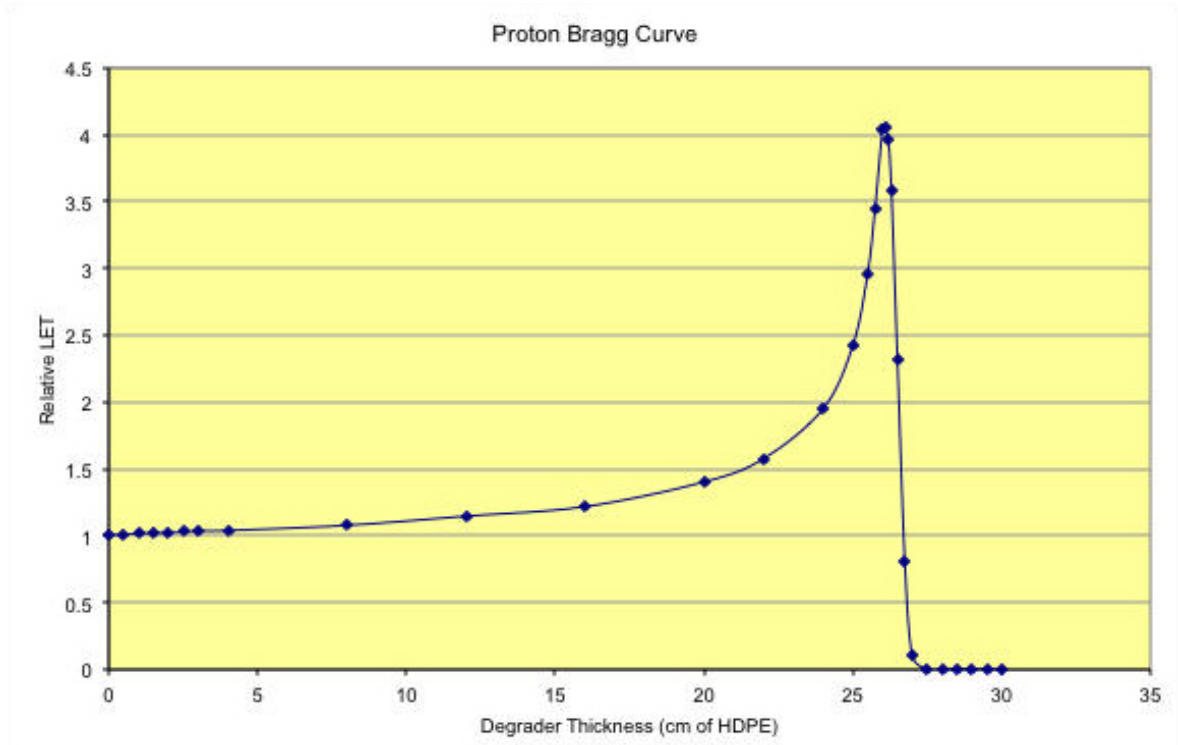
$$S_{mistura} = w_1 s_1 + w_2 s_2 + w_3 s_3 + \dots + w_i s_i + \dots \quad (2.3)$$

Onde  $w_i$  são as frações em massa de cada um dos elementos químicos que compõem a mistura. A Eq.2.3 é conhecida como *Regra de Bragg*.

Aqui também vale lembrar do conceito de *Pico de Bragg* largamente utilizado em processos de protonterapia. Nele, percebemos que há uma liberação muito alta de energia

em um pequeno espaço (um possível tumor, por exemplo).

**Figura 6** Representação do pico de Bragg para prótons incidentes em polietileno de alta densidade (HDPE). Esse princípio é o que torna possível a **protonterapia**.



[Fonte: (Bragg curves and peaks, 2016)]

No gráfico, temos a relação entre a Transferência Linear de Energia (LET), ou seja, a taxa de perda de energia ao incidir o HDPE, pela profundidade do material irradiado. O princípio por trás dos picos de Bragg está relacionado ao termo  $(z/\beta)^2$  da Eq. 2.2. Este é o responsável por dar ao gráfico esse formato pontiagudo. (Bragg curves and peaks, 2016)

Nota-se que Eq. 2.2 carga  $z$  exerce uma grande influência no poder de freamento uma vez que  $S_{PCP}$  cresce com o quadrado de  $z$ . Logo, uma partícula alfa perde quatro vezes mais energia que o próton por unidade de caminho. Sendo assim, o alcance do próton é aproximadamente quatro vezes maior que a da partícula alfa.

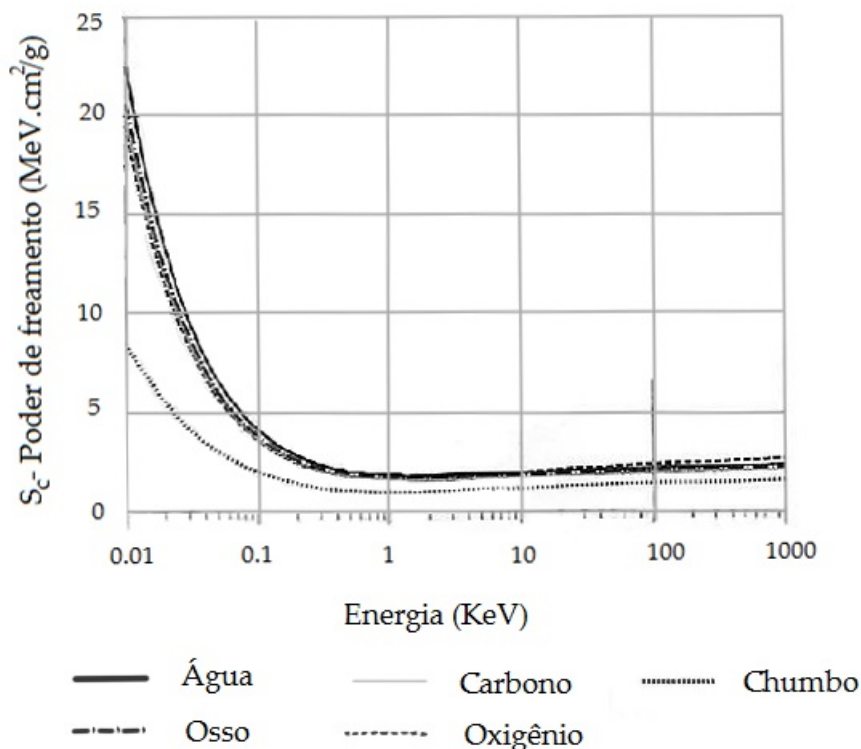
Para partículas leves como o elétron e o pósitron, o poder de freamento é bastante complexo e uma solução analítica torna-se muito complicada já que teríamos que levar em consideração efeitos relativísticos para descrever o movimento das partículas. No entanto, podemos tornar a expressão mais didática ao separarmos o poder de freamento em duas parcelas de forma que uma seja o poder de freamento com relação à colisão e o outro por radiação.

$$S_{tot} = S_C + S_R \quad (2.4)$$

O poder de freamento por colisão para elétrons e pósitrons é diferente daquele para partículas pesadas, isso porque há o chamado **efeito de troca** onde o elétron, numa colisão dura (ou seja, numa colisão inelástica), pode perder metade de sua energia cinética quando interagir com alguma partícula idêntica. Já o pósitron perde toda sua energia para uma partícula distinta mas de mesma massa. Diferenças como estas ocasionam uma alteração mínima no valor de  $S_C$ .

O poder de freamento para cargas leves apresenta um gráfico semelhante daquele para cargas pesadas, tanto para elétrons quanto para prótons o poder de freamento diminui com o aumento do número atômico do meio. Pode-se até mesmo notar que  $S_C$  é praticamente igual para PCP de carga  $e$  e elétrons.

**Figura 7** Poder de freamento por colisão para elétrons incidentes em água, carbono, chumbo, osso e oxigênio em função da energia cinética do próton em KeV.



[Fonte: (OKUNO, 2009)]

Para partículas leve, a deposição de energia no meio é mais homogênea, isso porque as trajetórias dos elétrons é bastante variada e a energia não é depositada, como para PCP, em locais profundos do meio.

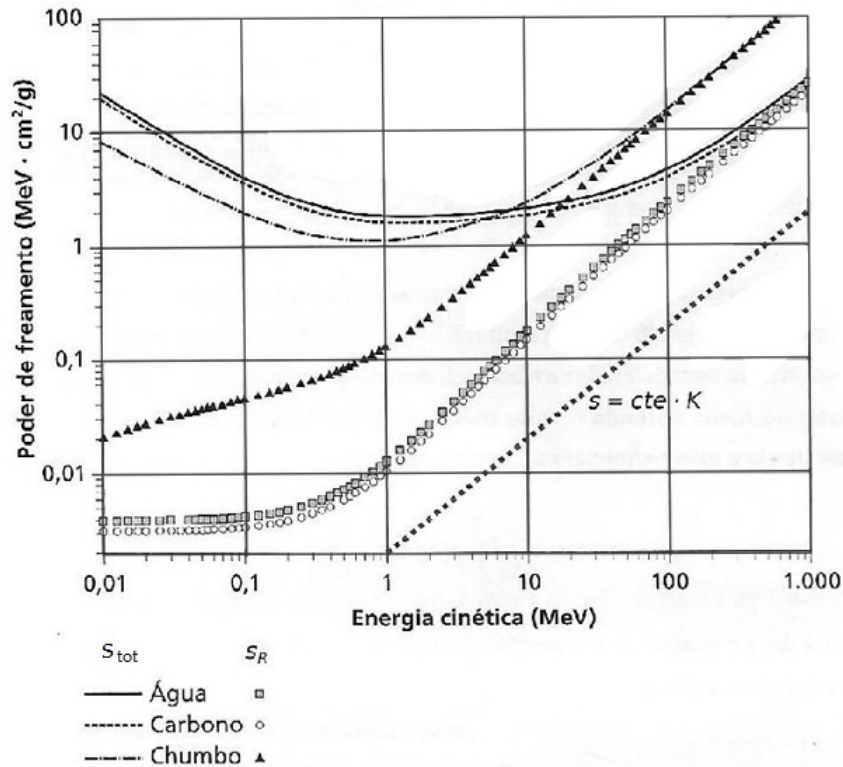
O poder de freamento por radiação ( $S_R$ ) está relacionada com o processo conhecido como *Bremsstrahlung*, que é a radiação liberada quando as cargas elétricas sofrem desaceleração. Considerando a energia cinética  $K$  do elétron ou pósitron, a expressão que

representa esse freamento é:

$$S_R = \frac{dE}{\rho dx} = 5.80 \times 10^{-28} \frac{N_A Z^2}{A} (K + m_e c^2) \bar{B}_R \quad (2.5)$$

Aqui  $A$  e  $Z$  possuem o mesmo significado daquele para a expressão que vimos para PCP,  $N_A$  é números de átomos,  $\bar{B}_R$  é uma função lentamente crescente de  $K$  e  $Z$ . A unidade de  $S_R$  é em  $MeV \cdot cm^2 \cdot g^{-1}$ . Vemos que a variação de  $S_R$  depende do termo  $Z^2/A$  e por isso cresce de forma quase que linear com o número atômico. O poder de freamento cresce de maneira quase constante quando a energia cinética da carga passa aproximadamente dos 1 MeV.

**Figura 8** Poder de freamento por radiação (pontos) e total (linhas) para elétrons incidentes em água, carbono, chumbo, osso e oxigênio em função da energia da partícula. A linha pontilhada na região inferior do lado direito representa a dependência linear com relação à energia.

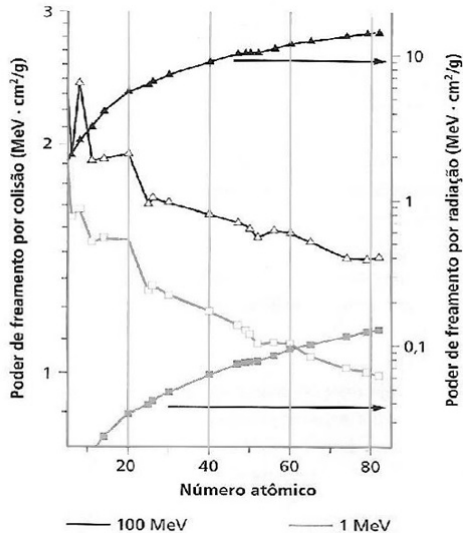


[Fonte: (OKUNO, 2009)]

Portanto, resumindo o comportamento de  $S_{TOT} = S_C + S_R$

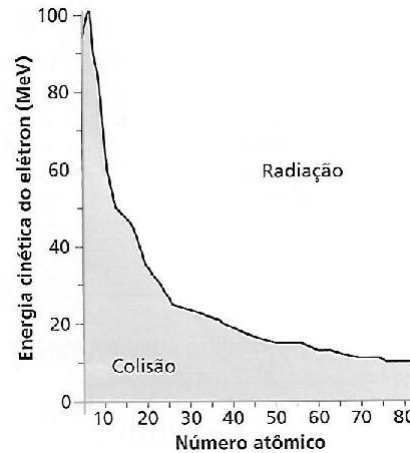
No primeiro gráfico, comparamos os poderes de freamento por colisão e radiação para partículas leves, notamos o aspecto crescente de  $S_R$  com o número atômico. Vemos também que a perda de energia por radiação ocorre quando o elétron possui uma grande energia cinética e número atômico do meio também é grande e que para energia e números atômicos menores, quem prevalece é o poder de freamento por colisão.

**Figura 9** Poder de freamento por colisão e por radiação de elétrons incidentes em diferentes elementos químicos. Os quadrados representam energias de 1 MeV e os triângulos 100 MeV (as linhas servem como guia para os olhos)



[Fonte:(YOSHIMURA, 2009)]

**Figura 10** Faixas de energia e número atômico representando a predominância da perda de energia por colisão e radiação. A linha divisória entre as duas regiões é  $s_C = s_R$



[Fonte:(YOSHIMURA, 2009)]

### 2.1.2 Transferência de energia para o meio

Considera-se que toda a energia perdida por partículas carregadas em processos de colisão, são absorvidas pelo meio. Podemos então transformar  $S_C$  para uma estimativa da energia transferida para o meio, em vez da perda de energia por colisões. Com isso, podemos definir o que chamamos de **transferência linear de energia** ou abreviadamente **LET** que mede a quantidade média de energia pelo meio por unidade de caminho da partícula ou também a densidade de ionizações do meio. Para fótons, a LET é refere-se aos elétrons liberados nos processos de interação (o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares, que veremos mais a frente).

Os efeitos biológicos são dependentes da LET da radiação, voltaremos a ela no próximo capítulo. Além da LET, há também da **dose absorvida** em um meio irradiado por partículas carregadas. Chamamos de dose absorvida a seguinte relação:

$$D = \left( \frac{dE}{\rho dx} \right) \frac{N}{S} \equiv \frac{dE_{ab}}{dm} \quad (2.6)$$

Onde  $N$  é o número de partículas e  $S$  a área de irradiação. O volume de massa de onde se quer obter a dose é  $dm$ . Em geral, deve-se converter as unidades para que o resultado seja em *Gray* (Gy). Nesse caso, consideramos  $dE_{ab}$  com sendo a seguinte expressão:

$$dE_{ab} = (E_{rad})_{entra} - (E_{rad})_{sai} + E_{m(E)} - E_{E(m)} \quad (2.7)$$

$(E_{rad})_{entra}$  é a energia que entra no volume dada pela soma das energias cinéticas dos fótons, das partículas carregadas e neutrôns incidentes,  $(E_{rad})_{sai}$  é a energia radiante que sai do volume,  $E_{m(E)}$  é a energia criada no volume por transformações de massa em energia e  $E_{E(m)}$  é a energia convertida em massa de repouso dentro do volume incidido.

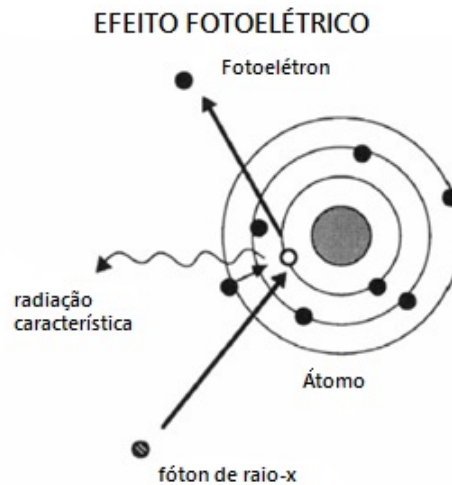
## 2.2 Interação de raios X e gama ( $\gamma$ ) com a matéria

As formas de interação da radiação com a matéria se dá por: (i) ionização por meio de interações coulombianas das partículas carregadas com os átomos do meio absorvente, (ii) excitação dos orbitais do elétron do meio que ocorre quando a energia transferida por meio das interações coulombianas não são o suficiente para ejetar o elétrons do átomo e (iii) a emissão radial de energia como bremsstrahlung que ocorre quando uma partícula carregada desacelera quando é defletida por um núcleo atômico. A liberação da energia da partícula por radiação de bresstrahlung fica cada vez mais significativa quando a energia da partícula carregada (por exemplo, uma partícula  $\beta$ ) e o número atômico do absorvente aumenta.

Já com relação ao resultado dessas interações com o meio, a radiação eletromagnética se dissipa através dos seguintes métodos: (i) o efeito fotoelétrico, (ii) o espalhamento Compton e (iii) produção de pares. (i) e (ii) geram pares iônicos dentro do meio absorvente, já (iii) resulta na criação de partículas carregadas (pósitrons e negatrons) que irão dissipar sua energia via ionização, excitação ou aniquilação (no caso dos pósitrons). No caso de neutrôns energéticos, pode ocorrer dissipação por meio de colisões elásticas com o núcleo atômico da matéria. Vamos agora explicar brevemente cada um dos efeitos causados pela REM ionizante na matéria:

## 1. Efeito fotoelétrico

**Figura 11** Representação do efeito fotoelétrico no átomo.



[Fonte: (Fontes de raios X, 2015)]<sup>2</sup>

No efeito fotoelétrico, toda a energia da REM é usada para retirar o elétron do átomo do meio incidente. Não há fóton espalhado como no efeito Compton descrito abaixo. Ou seja, a REM "desaparece". Dessa forma:

$$E_{\gamma} = E_e + B_e \quad (2.8)$$

Aqui  $B_e$  é a energia de ligação do elétron com o átomo.

Parte da energia do fóton é usada para retirar o elétron do átomo enquanto outra parte é convertida em energia cinética do elétron e do átomo ( $E_{at}$ ). Dessa forma, escrevemos também:

$$h\nu = E_e + E_{at} + B_e \quad (2.9)$$

Como  $E_{at}$  é pequeno, a equação se resume em Eq. (2.8)

Ocorre, portanto, a produção de íons excitados do meio e a transferência de toda a energia do fóton para o material irradiado. De modo geral, a desexcitação ocorre por meio da liberação de fótons de raio X.

Diferentemente do efeito fotoelétrico usual, ou seja, o efeito que é resultado pela ação da luz e radiação UV nos materiais (que rendeu o Nobel de 1921 para Einstein) onde os fótons de luz visível ou ultravioleta retiram elétrons *fracamente ligados* à superfície do

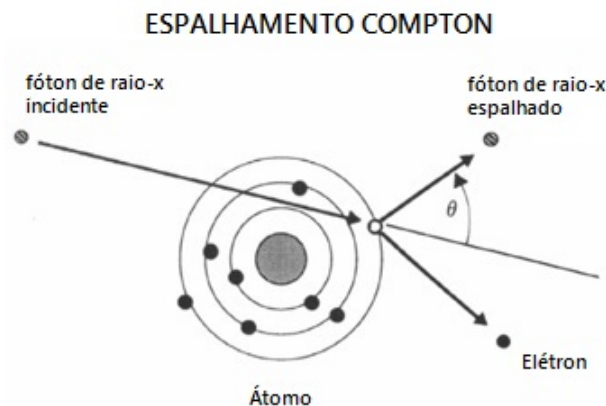
<sup>2</sup>Disponível em: <[http://www.jpi.co.kr/english/03\\_technical\\_information/book\\_crdr.htm](http://www.jpi.co.kr/english/03_technical_information/book_crdr.htm)> Acesso em Nov. 2015

meio, em geral metálico e gera uma energia cinética que depende apenas do material em questão e da frequência da luz. O efeito fotoelétrico provocado por raios X e gama possui um alto nível de penetração e por isso ionizam não só a superfície do material mas também seu interior, sendo este composto de qualquer elemento (não apenas metálico), além disso, afeta também os elétrons ligados pertencentes a camadas mais internas dos átomos que compõe o meio. Esses elétrons são radiação ionizante *também* e recebem o nome de *fotolétrons*. Isso pois a energia cinética  $K$  que recebem é  $K = h\nu - B$

## 2. Efeito Compton

O efeito Compton, introduzido por Arthur Holly Compton em 1923, trata-se do espalhamento provocado pela incidência da REM em um meio resultando em um fóton e um elétron onde ambos são radiação ionizante. Há também um recuo do átomo atingido. Esse espalhamento é tratado seguindo as leis de conservação de energia e de momento linear. Porém, como tratamos de partículas como elétron e fótons, é necessário levarmos a relatividade especial em conta.

**Figura 12** Representação do efeito Compton no átomo.



[Fonte: (Fontes de raios X, 2015)]<sup>3</sup>

A energia cinética  $K_e$  do elétron será:

$$K_e = E_\gamma - E_{\gamma'} = E_e - m_e c^2 \quad (2.10)$$

Onde  $E_\gamma$  é a energia da REM incidente,  $E_{\gamma'}$  é a energia do fóton espalhado,  $E_e$  é a energia do elétron espalhado e  $m_e c^2$  a energia de repouso do elétron.

<sup>3</sup>Disponível em: <[http://www.jpi.co.kr/english/03\\_technical\\_information/book\\_crdr.html](http://www.jpi.co.kr/english/03_technical_information/book_crdr.html)>; Acesso em: Nov. 2015



Analisando os momentos das partículas, notamos que é possível achar o momento do elétron espalhado usando lei dos cossenos:

Sendo assim:

$$(p_e c)^2 = E_\gamma^2 + E_{\gamma'}^2 - 2E_\gamma E_{\gamma'} \cos\theta = E_e^2 - (m_e c^2)^2 \quad (2.11)$$

Que nos leva a seguinte equação:

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + (E_\gamma / m_e c^2)(1 - \cos\theta)} \quad (2.12)$$

Ou seja, a energia do fóton espalhado depende também do ângulo  $\theta$ . Fazendo uma análise mais detalhada, podemos usar relações de conservação de energia e momento na colisão do fóton com o átomo.

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + E \quad \text{ou} \quad h\nu = h\nu' + K \quad (2.13)$$

$$\frac{h\nu'}{c} \sin\theta = p \sin\phi \quad (2.14)$$

$$\frac{h\nu}{c} = p \cos\phi + \frac{h\nu'}{c} \cos\theta \quad (2.15)$$

Lembrando que  $\theta$  é o ângulo de saída no fóton e  $\phi$  o ângulo de saída do elétron. Acrescenta-se a essas expressões as relações de energia e momento para o elétron relativístico:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_e^2 c^4 \quad \text{ou} \quad pc = \sqrt{K(K + 2m_e c^2)} \quad (2.16)$$

Assim eliminando o momento e um dos ângulos podemos chegar a expressões que possuem relações entre o ângulo e a energia. Usando  $\alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2}$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad \text{ou} \quad \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c^2}(1 - \cos\theta) \quad (2.17)$$

$$\cot\phi = (1 + \alpha) \operatorname{tg}(\theta/2) \quad (2.18)$$

Dessa forma, é possível, através do conhecimento de um par de variáveis do pro-

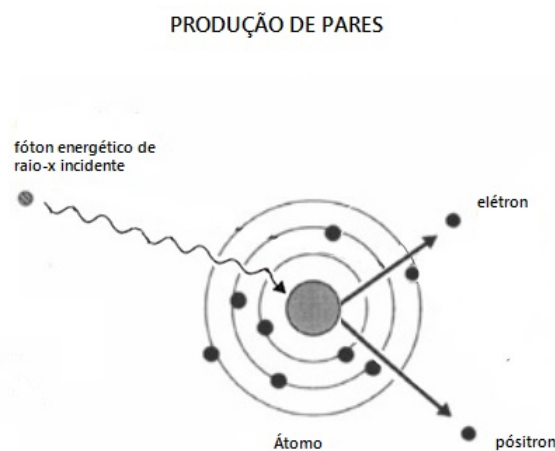
blema<sup>4</sup>, obter todo o conjunto de variáveis. Nota-se pela Eq. 2.16 que a energia do fóton não pode ser inteiramente transferida ao elétron. Mesmo para retroespalhamento ( $\theta=\pi$ ) ainda resta:

$$hv'_{min} = \frac{hv}{1 + 2\alpha} \quad (2.19)$$

que não é transferida para o elétron.

### 3. Criação de pares elétron-pósitron

**Figura 13** Representação da produção de pares no átomo.



[Fonte: Alterado pela autora de (Fontes de raios X, 2015)]<sup>5</sup>

Nesse caso, toda a energia da radiação incidente é convertida em massa como bem escrito na famosa equação de Einstein  $E = mc^2$ . No caso, em elétron e pósitron. Para que haja energia suficiente que leve a formação dessas partículas  $E_\gamma > 1.022\text{MeV}$ . Ou seja, duas vezes maior que a energia de repouso do elétron ( $2m_e c^2$ ). Ou seja, segundo a expressão relativística de Einstein:

$$E \equiv hv = 2m_e c^2 + K_1 + K_2 \quad (2.20)$$

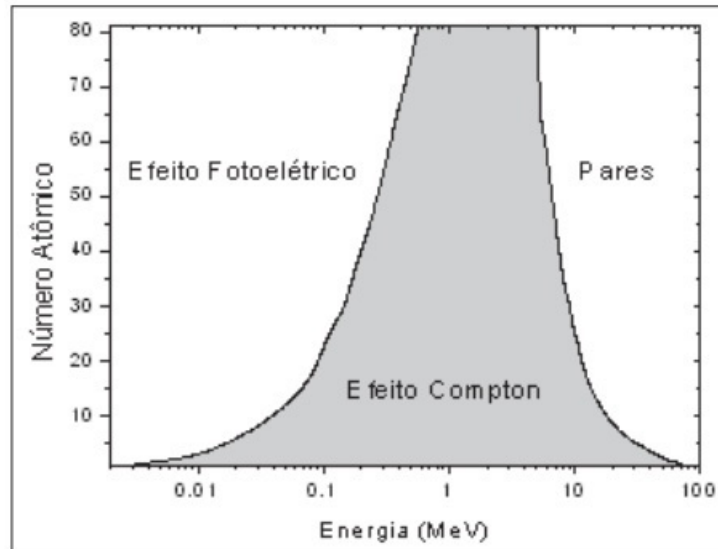
Onde  $K_1$  e  $K_2$  são as energias cinéticas das partículas resultantes.

Em todos esses processos a Radiação Eletromagnética (REM) ionizante se comporta como um feixe de partículas chamadas *fótons* e dependem de outras três condições: a energia do fóton, a densidade do meio e o número atômico.

<sup>4</sup>Seja  $hv, hv', K$  ou  $p, \theta, \phi$

<sup>5</sup>Disponível em: <<https://bmskksbsb.files.wordpress.com/2013/03/pair-production.jpg>>; Acesso em Nov. 2015

**Figura 14** Gráfico que apresenta os valores do número atômico e da energia em que há predominância dos três tipos de interação de fótons com a matéria.



[Fonte: (YOSHIMURA, 2009)]

Na imagem, notamos que há um intervalo de energia em que predomina um dos efeitos descritos. Esses efeitos são dependentes do número atômico. Vemos que para baixas energias o efeito fotoelétrico se sobrepõe aos efeitos Compton e a formação de pares. Já para energias intermediárias (entre 0,1 e 10 MeV) o efeito Compton se destaca e para altas energias notamos que há mais formação de pares.

Como consequência da interação de fótons com a matéria, pode haver produção de elétrons e pósitrons rápidos e de novos fótons de energia menor com relação aos incidentes como resultado do espalhamento Compton e desexcitação dos átomos. Essas partículas são radiação ionizante e produzem mais radiação em processos subsequentes.

### 2.2.1 Atenuação do feixe de REM

O "poder de freamento" para radiação eletromagnética é diferente daquele para partículas rápidas carregadas pois nesse caso não lidamos com choques entre partículas, nem temos a chance de barrar um tipo de radiação completamente (como comentamos quando falamos sobre *blindagem*). Por isso, falamos em **atenuação** do feixe de fótons. Quanto mais espesso o material, maior será a atenuação e menor o feixe de fótons que emerge após serem incididos do material.

Para chegarmos à Eq.2.23, consideramos uma variação pequena  $dN$  do número de fótons em uma espessura  $dx$ . Dizemos que a variação  $dN$  é proporcional à  $dx$ . Isto é,

quanto maior a variação, maior a espessura do material. De forma que:

$$dN \propto dx \quad (2.21)$$

Para estabelecermos a igualdade, precisamos achar uma constante  $C$  e então  $dN = Cdx$ . Nós esperamos que a variação  $dN$  seja por conta da atenuação do feixe durante a passagem no material. Chamamos o fator de atenuação linear  $\mu$  que depende do material e da energia da radiação e como este fator altera diretamente o número  $N$  de fótons, chegamos à conclusão que  $C = -\mu N$ . Onde o sinal negativo é devido a prova experimental que ao aumentarmos a espessura  $N$  diminui. Então:

$$\frac{dN}{N} = -\mu dx \quad (2.22)$$

Já que  $dN = -\mu N dx$ . Basta então integrarmos ambos os lados, e chegamos à equação de atenuação do feixe de fótons:

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (2.23)$$

Que obedece a lei exponencial. Na expressão acima  $N_0$  e  $N$  representam, respectivamente, o número de fótons antes e depois de atravessar o meio. Além disso, podemos escrever tbm  $I = I_0 e^{-\mu x}$ . Nesse caso,  $I_0$  e  $I$  são, respectivamente, intensidade do feixe antes e depois de atravessar o material de espessura  $x$  com o coeficiente  $\mu$ . Onde  $\mu$  representa a soma das seções de choque <sup>6</sup> do espalhamento coerente (espalhamento Rayleigh), do efeito fotoelétrico, do efeito Compton e da produção de pares.

No entanto, note que para que a atenuação barre completamente os fótons, seria necessário que  $x$  tendesse ao infinito. Por isso, não podemos blindar a radiação eletromagnética, diferentemente do que vimos no capítulo anterior.

## 2.2.2 A transferência de energia para o meio

Para compreendermos melhor os efeitos da radiação no corpo, precisaremos trabalhar com uma grandeza que denominaremos *dose absorvida* e através da **energia transferida**  $E_{tr}$  podemos chegar nesta dose. Para cada interação há uma energia transferida diferente:

- No *Efeito fotoelétrico*:  $(E_{tr})_{fe} = \bar{K} = h\nu - \bar{B} + \Sigma K_{Auger}$ . Onde  $K_{Auger}$  corresponde à energia cinética dos elétrons ejetados pelo efeito Auger<sup>7</sup>

<sup>6</sup>Em Física Nuclear, a seção de choque representa a probabilidade de uma determinada reação ou interação ocorrer (OKUNO, 2010)

<sup>7</sup>No efeito Auger, o elétron é ejetado do átomo e não há emissão de fóton na transição eletrônica

- No *Efeito Compton*:  $(E_{tr})_{Compton} = \bar{K} = h\nu - h\bar{\nu}'$
- No *Produção de pares*:  $(E_{tr})_{par} = \bar{K}_+ + \bar{K}_- = h\nu - 2m_e c^2$

Existem dois tipos principais de energia transferida: uma é a fração média da energia transferida ( $\bar{E}_{tr}$ ), ou seja, a soma de todas as energias transferidas por cada um dos efeitos acima (ponderados pela probabilidade de ocorrência de cada um). A outra é a energia absorvida ( $\bar{E}_{ab}$ ) que leva em conta as dissipações de energia que podem ocorrer no meio, tais como quando a energia é irradiada por *Bremsstrahlung* ou, no caso do pósitron, aniquilação em voo. Dessa forma,  $\bar{E}_{ab}$  costuma ser menor que  $\bar{E}_{tr}$

As expressões que representam essas duas energias são as seguintes:

Para a fração média transferida ( $\bar{E}_{tr}$ ):

$$\bar{E}_{tr} = \frac{1}{\mu/\rho} \left[ \frac{\sigma}{\rho} (E_{ft})_{Compton} + \frac{\tau}{\rho} (E_{tr})_{fe} + \frac{\kappa}{\rho} (E_{tr})_{par} \right] \quad (2.24)$$

Para a energia média absorvida ( $\bar{E}_{ab}$ ):

$$\bar{E}_{ab} = \frac{1}{\mu/\rho} \left[ \frac{\sigma}{\rho} (E_{ab})_{Compton} + \frac{\tau}{\rho} (E_{ab})_{fe} + \frac{\kappa}{\rho} (E_{ab})_{par} \right] \quad (2.25)$$

Onde  $\sigma$  é a seção de choque para o efeito Compton,  $\tau$  é a seção de choque para efeito fotoelétrico  $\kappa$  é a seção de choque para produção de pares. Cada uma das equações acima possui um coeficiente mássico diferente, sendo que o coeficiente para  $\bar{E}_{ab}$  relaciona-se com o de  $\bar{E}_{tr}$

Começamos com a fração média transferida definimos um coeficiente mássico de **transferência de energia**:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\bar{E}_{tr}}{h\nu} \quad (2.26)$$

Que representa a seção de choque de interação por unidade de massa. Lembrando que  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear e  $\rho$  é a massa do material irradiado.

Já para a energia absorvida, falamos do coeficiente mássico de **absorção de energia**:

$$\frac{\mu_{ab}}{\rho} = (1 - g) \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad (2.27)$$

Onde o fator  $g$  introduzido na expressão acima representa a fração de energia transferida que é irradiada. Para fótons pouco energéticos, esse fator aproxima-se de zero de forma que os coeficientes mássicos de energia transferida e absorvida se igualam.

**Aplicações das REM ionizantes:** A primeira e mais óbvia aplicação do uso desse tipo de radiação é na obtenção de fotografias de partes do corpo humano por raios x. Há uma atenuação significativa do feixe ao incidir em compostos que possuem grande quantidade de cálcio. Dessa forma, o osso aparece com maior contraste do que os outros órgãos. A ma-

mografia torna-se mais complicada uma vez que a mama é composta apenas de tecidos moles ou seja, com números atômicos e densidades semelhantes. Por isso há menos contraste nas imagens. Além disso, a distribuição equilibrada dos efeitos fotoelétrico e Compton nos tecidos provoca liberação de fótons espalhados em direções diferentes da original e causa uma imagem borrada. Esse é o motivo pelo qual recomenda-se comprimir a mama para atenuar o espalhamento (deixar a imagem mais nítida). Por fim, na tomografia por emissão de pósitrons (PET em inglês), utiliza-se de compostos chamados *radiofármacos*<sup>8</sup> que são inseridos no corpo do paciente. Como a meia-vida desses compostos é rápida, eles são eliminados pouco depois do exame. Os pósitrons aniquilam-se no corpo do paciente e emitem dois fótons de aniquilação que são detectados pelo aparelho de tomografia. (YOSHIMURA, 2009)

---

<sup>8</sup>substância química marcada com um radionuclídeo

### 3 EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE NO CORPO HUMANO

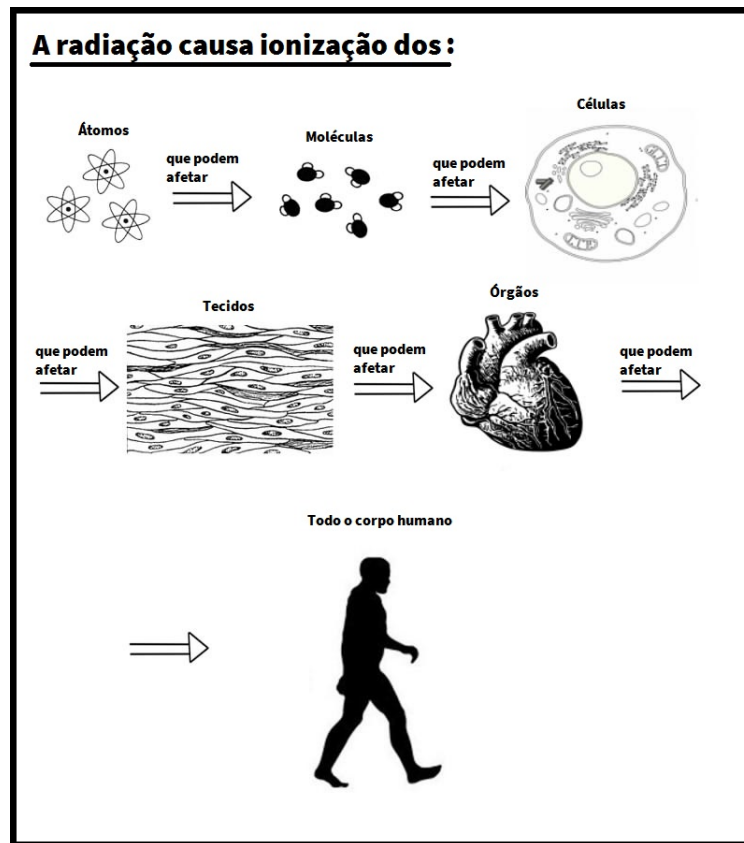
Depois da radiação ter sido descoberta, rapidamente o uso de produtos que continham urânio, ou rádio ou outros isótopos radioativos se tornaram componentes de produtos de uso cotidiano das pessoas.

No entanto, percebeu-se que a exposição contínua a esses elementos provocava danos ao corpo daqueles que utilizavam os produtos radioativo. As consequências da exposição contínua iam desde queimaduras dolorosas na pele até certos tipos de câncer. Ao ver que os isótopos podiam causar tais problemas, vários cientistas começaram a pesquisar sobre os efeitos da radiação no corpo humano.

Um deles foi Emil H. Grubbé que impressionado com o dano causado pela radiação decidiu fazer o primeiro tratamento radioterápico que se tem registro em uma paciente com câncer de mama. Outros como o próprio Bequerel detectou uma queimadura atrás do bolso da camisa onde levava amostras de rádio.

Dessa maneira ficou evidente que a exposição à radiação provocava efeitos deletérios imediatos e tardios nos tecidos humanos. No esquema abaixo vemos o caminho da interação da radiação no corpo humano. Começando na ionização dos átomos (o estágio físico) até os efeitos biológicos.

**Figura 15** Ilustração do resultado da ionização dos átomos pela radiação no corpo humano



[Fonte: Elaborado pela autora]

Os efeitos biológicos das radiações ionizantes são classificados da seguinte forma:

- **Quanto ao mecanismo:** Direto ou indireto;
- **Quanto à natureza:** Reações teciduais ou efeitos estocásticos.

O *mecanismo direto* se refere à interação direta da radiação em algum componente crítico para a sobrevivência da célula, sendo assim alguns tipos de enzimas e, principalmente, o DNA. Em geral, o efeito direto pode afetar a habilidade da célula de se reproduzir e dessa forma, provoca a morte da mesma. Veremos com mais detalhes nos estágios da ação como esse mecanismo afeta a célula. Já o *mecanismo indireto* ou o efeito indireto, diferentemente do direto, não atua em uma parte vital da célula, em vez disso, a radiação atinge as moléculas de água e provoca a chamada **decomposição radiolítica da água** e como as células são em sua maior parte água, a probabilidade da radiação interagir com as moléculas de  $H_2O$  é muito alta. Por isso, os efeitos indiretos da radiação são responsáveis por 70% dos efeitos biológicos (Okuno e Yoshimura, 2009). Os efeitos quanto à natureza serão analisados quando detalharmos os efeitos biológicos da radiação.

O que acontece na decomposição é uma quebra da molécula de água (*hidrólise*) lançando na célula prótons em forma de Hidrogênio (H) e íons em forma de hidroxila ( $OH^-$ )



que por si mesmos não produzem nenhuma consequência, pois já existem em grande quantidade nos fluidos do corpo. Esses fragmentos podem se recombinar ou interagir com outros fragmentos e formar novos compostos. Dessa forma, podem voltar a virar água e não provocar dano à célula ou então formar um peróxido de hidrogênio  $H_2O_2$  que contribui para a destruição da mesma. Em geral, os peróxidos de hidrogênio são formados principalmente quando as moléculas de água são irradiadas por radiação de alta LET, como a partícula  $\alpha$  (DUGGAR, 1936).

### **3.1 Estágios da ação da radiação no corpo humano**

Os estágios da radiação ionizante, ou seja, a sequência de eventos que caracteriza a interação da radiação com o corpo humano são: físico, físico-químico, químico, biológico

#### **3.1.1 Primeiro e segundo estágio: O efeito físico e o físico-químico**

O efeito físico ocorre quando a radiação entra em contato com os átomos da pele e ocorre a ionização ou a excitação dos átomos que constituem as moléculas. A duração de tal efeito é de aproximadamente  $10^{-15}s$  e embora o efeito a nível atômico não nos seja perceptível, além de extremamente rápido, é o suficiente para provocar um desequilíbrio eletrostático nas moléculas. Assim sendo, passamos para o segundo estágio chamado de estágio físico-químico.

Esse estágio ocorre nas moléculas que compõem as células do corpo humano. Com duração de aproximadamente  $10^{-6}s$ , ocorrem quebras nas ligações químicas que mantêm a molécula estável. O equilíbrio pode ter sido rompido por causa de um único átomo ionizado.

Essas quebras de ligações químicas nos leva ao terceiro estágio.

#### **3.1.2 Terceiro estágio: O efeito químico**

Aqui, durante alguns segundos, ocorre uma recombinação dos fragmentos das moléculas que sofreram com a ionização de seus átomos. Estas podendo ser fundamentais para o funcionamento da célula, como proteínas ou enzimas. Uma vez danificada, a célula passa a responder aos estímulos do corpo de maneira diferenciada ou morre, assim passamos para o último estágio, o estágio biológico.

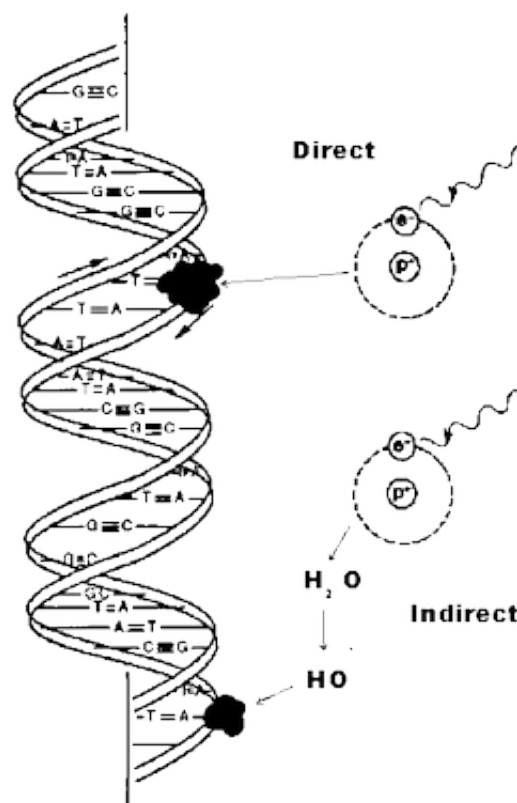
Durante a recombinação das moléculas, pode ser que moléculas de DNA que sofreram danos devido a radiação juntem-se com outras moléculas e dessa forma, sua a funcionalidade é prejudicada. Por isso, veremos a seguir os efeitos da radiação no DNA com mais detalhes.

### • O efeito da radiação no DNA

A molécula de DNA, segundo o modelo desenvolvido por Francis Harry e James Dewey Watson, é a portadora da informação genética e é apresentada como sendo duas hélices antiparalelas constituídas por sequências de grupos de açúcar (desoxirribose) e fosfato. Essas fitas de DNA são interconectadas por pares de grupos de bases nitrogenadas, que por sua vez são ligadas por pontes de hidrogênio sendo essas as ligações mais fracas na molécula de DNA. As bases nitrogenadas são as purinas (A - Adenina, G - Guanina) e as pirimidinas (T - Timina, C - Citosina). Os pares que formam as ligações entre as fitas do DNA são sempre constituídos de uma purina e outra pirimidina, mudando apenas o número de pontes de hidrogênio dependendo da ligação entre as bases (por exemplo, se tivermos um par T-A encontramos duas pontes, já se o par for C-G, temos três pontes de hidrogênio).

Lembramos que os causadores das falhas no DNA podem ser origem direta ou indireta

**Figura 16** Esquema da quebra de uma molécula de DNA através da ação direta e indireta



[Fonte:(UNIVERSITY OF LEUVEN, 2016)]

Para efeitos radiobiológicos, o alvo da radiação é o DNA e as diferenças no que chamamos de Fator de Qualidade da Radiação influenciam a natureza dos danos causados na molécula. Qualidade da Radiação ou do inglês, Quality Factor (QF) é um termo usado

em radiobiologia que caracteriza o risco à saúde quando há exposição à radiação. É expresso por fatores de qualidade QF e obtido multiplicando a dose absorvida e o fator de qualidade. Para fótons rápidos (radiação gama ou raio X) ou radiação beta  $QF = 1$ , já para radiação alfa  $QF = 20$  e para fragmentos de fissão nuclear  $QF > 20$ . Isso indica, por exemplo, que a radiação alfa é cerca de 20 vezes mais danosa que a gama/beta ou raio X.

No entanto, mesmo uma exposição prolongada ao sol pode causar uma ruptura na molécula de DNA e por sua vez, gerar vários problemas na divisão celular. Esse problema foi solucionado pela natureza que produziu formas de reparo da molécula. Porém, esse mecanismo não é infalível e após vários danos e recuperações, em um dado momento o mecanismo de reparo falha e os danos são passados para a próxima geração de células ou ocorre a morte celular.

Entre os danos à molécula de DNA citamos: mudança de uma base, perda de uma base, quebra das pontes de Hidrogênio, quebra de uma fita, quebra de duas fitas, ligação cruzada dentro da hélice da molécula de DNA, entre duas moléculas de DNA ou entre uma molécula de DNA e uma proteína.

Os danos que provocam ruptura nas bases de hidrogênio são reconstituídas por enzimas produzidas nas células em questão de dezenas de minutos. Porém, danos irreversíveis ocorrem quando surgem um grande número de falhas simultaneamente, ou se a quebra de uma fita não for reparada corretamente e uma das pontas ficar em estado reativo, podendo ocorrer peroxidação na presença do oxigênio na molécula de DNA. Uma vez que a molécula de  $O_2$  se liga ao DNA, nunca mais será possível o reparo.

Acredita-se que o erro no reparo, principalmente quando há a quebra de duas fitas de DNA, seja a principal causa de morte celular e de indução de efeitos mutagênicos ou cancerígenos. As quebras de uma ou duas fitas da molécula de DNA são funções lineares da dose de radiação. A maior parte dessas quebras ocorrem devido ao ataque de hidroxilas (radicais livres) originadas da dissociação da molécula de água pela radiação, o restante, cerca de 33%, ocorrem por ação direta da radiação no DNA.

Além do DNA, podemos também observar alguns efeitos da radiação nos cromossomos que são os principais responsáveis pela transmissão genética de uma geração para outra de características que vão desde a cor do cabelo até mutações provocadas por fatores externos.

- **O efeito da radiação nos cromossomos**

Os cromossomos nos núcleos células são longas moléculas de DNA que durante a pró-

fase sofreram um processo de espiralamento, encontramos nessa molécula proteínas associadas chamadas de histonas. Os cromossomos variam na forma e tamanho e são caracterizados pela posição do seu centrômero<sup>1</sup>. No total são 46 cromossomos que carregam a informação genética do ser humano.

Além do centrômero, os cromossomos também apresentam uma região denominada **telômero**. Este encontra-se na extremidade dos cromossomos e é caracterizado por consistirem de uma sequência genética de bases hidrogenadas TTAGGG repetidas cerca de 2000 vezes. A cada divisão celular perde-se de 10 a 20 segmentos, dessa forma é razoável considerar que os telômeros são mais curtos em idosos que em crianças. A cada divisão celular, os telômeros dos cromossomos ficam mais desprotegidos, chegando a um ponto que a replicação das células é danificada e não há mais como a célula se dividir. Uma curiosidade é que células malignas nunca perdem seus telômeros.

As radiações ionizantes produzem um efeito denominado *aberrações cromossômicas estruturais* que são modificações da forma natural estrutural do cromossomo. Dependendo de qual parte do cromossomo que está envolvida, temos diferentes resultados:

Primeiro, se a radiação quebrar um dos braços, os fragmentos podem unir-se de modos distintos. Sendo estes: acêntrico, anéis e inversões. Os anéis consistem de mutações estáveis e as inversões são instáveis. Outro efeito causado pela radiação ocorre quando dois cromossomos estão muito próximos um do outro e ambos tem um fragmento arrancado, quando isso ocorre, os dois cromossomos danificados se juntam e podem gerar aberrações dos seguintes tipos: dicêntrico, acêntrico ou translocação.

A translocação ocorre quando há uma troca de fragmentos entre os cromossomos que estavam próximos. Essa aberração está associada a neoplasias<sup>2</sup> de células tumorais já que são transmissíveis na geração celular.

### 3.1.3 Quarto e último estágio: O efeito biológico

Por fim, os efeitos nesse estágio tornam-se perceptíveis e podem durar de dias até anos. Como moléculas importantes foram atingidas, as células sofrem com esse problema o que acarreta danificação nos tecidos corporais e por sua vez, os órgãos compostos por esses tecidos.

Como vimos no início desse capítulo, os efeitos biológicos podem ser classificados de dois modos diferentes: o primeiro sendo os *efeitos teciduais* e o segundo os *efeitos estocásticos*. Os efeitos teciduais são danos nos tecidos ou órgão que resultam em **morte**

<sup>1</sup>Região de maior condensamento da molécula de DNA

<sup>2</sup>*neo* = novo e *plasis* = crescimento

**celular.** Geralmente essas reações são causadas por altas doses de radiação. Já os efeitos estocásticos são alterações aleatórias que surgem em células normais quando expostas a qualquer dose de radiação, seja alta ou baixa. Essas alterações podem ser cancerígenas ou hereditárias.

Na seção a seguir descreveremos com detalhes os efeitos teciduais e estocásticos da radiação.

### 3.2 Natureza dos efeitos biológicos

Os efeitos biológicos da radiação dependem das doses absorvidas e de onde a radiação é direcionada. Se a deposição de energia pela radiação ocorrer em uma parte estratégica do corpo, pode ser que mesmo com uma dosagem pequena, os efeitos sejam fatais. Isso ocorre pois as moléculas de DNA são essenciais para a sobrevivência da célula e são alvos dos efeitos diretos da radiação.

Podemos fazer a comparação grosseira de uma pessoa receber vários tiros e sobreviver. Em contrapartida, se essa mesma pessoa receber um só tiro no crânio a morte é praticamente certa. Da mesma forma, um único efeito causado por uma dose muito baixa (podendo ser até mesmo pela radiação de fundo) pode causar um dano genético e, no futuro, um câncer.

Mesmo a deposição de energia por radiação ser um processo aleatório podemos tratar os efeitos causados por altas doses doses de radiação como sendo "determinísticos". Embora esse termo não seja adequado já que, quantitativamente, os efeitos não são predefinidos. Nesse caso, tratamos das chamadas **reações teciduais**.

#### 3.2.1 As reações teciduais (agudas)

Como já foi dito, essas reações são danos causados pela radiação nos tecidos ou órgãos que compõe o corpo humano e consiste na morte celular de um número muito grande de células a ponto de prejudicar o funcionamento ou perder a função do órgão atingido. As reações teciduais mais importantes são:

- Alterações fibróticas;
- Perda da capacidade de reprodução da célula e;
- Morte celular.

A célula pode morrer de diversas formas, sendo elas: **falência reprodutiva, necrose e apoptose**.

A falência reprodutiva ocorre quando a função reprodutiva da célula é danificada. Por exemplo, quando o DNA perde a instrução para se dividir em cromossomos. Dessa forma a célula não consegue mais se multiplicar e morre. As células de divisão rápida são as mais atingidas por esse efeito devida a alta taxa de replicação do DNA, que necessita de informação correta para se dividir. Veremos mais a frente que esse fator gera o que chamamos de *radiossensibilidade*.

A necrose ocorre quando a célula sofre danos graves, em razão de agentes externos tóxicos, bactérias, vírus ou radiação ionizante. As mitocôndrias são as danificadas nesse processo, mas o núcleo da célula não sofre alterações significantes. A célula incha e rompe a membrana celular, seu conteúdo é liberado e atrai macrófagos que causam grande inflamação e dor na região afetada.

A apoptose (ou suicídio coletivo) é a morte espontânea da célula. Nela a célula encolhe, o núcleo é danificado e não ocorre inflamação. Ocorre naturalmente como as folhas do outono que caem e renascem na primavera. Ou seja, é uma morte benéfica e programada pelo próprio corpo. O gene p-53 controla a morte da célula e quando o mesmo é danificado, a célula não possui mais o comando para morrer e torna-se maligna, gerando um câncer com o tempo. A morte por apoptose está relacionada a baixas doses de radiação.

Quanto maior a dose, mais severo será o dano ao tecido. No caso de um tratamento radiológico, é necessário saber o limite onde não há efeitos teciduais visíveis, mas que a dose seja o suficiente para atingir o tumor. Chama-se esse valor de *limiar de dose*. Apresentamos o valor mínimo para o surgimento de reações teciduais:

**Tabela 1** Estimativa dos limiares de dose para reações teciduais para testículos, ovários, cristalino e medula óssea de adultos humanos

tecido e efeito	limiar de dose	
	Dose única aguda (Gy)	Taxa anual de dose fracionada (Gy/ano)
<i>testículos</i>		
esterilidade temporária	0.15	0.4
esterilidade permanente	3.5 - 6.0	2.0
<i>ovários</i>		
esterilidade	2.5 - 6.0	> 0.2
<i>cristalino</i>		
opacidade detectável	0.5 - 2.0	> 0.1
catarata	5.0	> 0.15
<i>medula óssea</i>		
depressão hematopoética	0.5	> 0.4

Fonte: (YOSHIMURA,2009 apud ICRP-103 (2007))

Classificamos também as reações teciduais de imediatas ou tardias:

- *Reações teciduais imediatas e tardias*

As reações teciduais imediatas são aquelas que provocam reações pouco tempo após a exposição. Em geral, são do tipo inflamatório resultado de uma alteração na permeabilidade celular e de liberação de histaminas. Dentre os efeitos imediatos, citamos:

- **eritema** na pele (queimaduras);
- **mucosite** que é a inflamação nas mucosas do sistema gastrointestinal (principalmente na boca);
- **escamação da epiderme**

As reações tardias surgem vários meses ou anos depois da exposição à radiação ionizante. O tempo de latência depende do tecido afetado e da dose da radiação. Um exemplo é a catarata.

- *Radiossensibilidade dos órgãos do corpo humano*

Nem todas as células do corpo humano são sensíveis à radiação. Como já comentamos, as células que possuem uma taxa de reprodução alta tendem a ser mais sensíveis

que aquelas que demoram para se multiplicar. Uma interação direta da radiação com o DNA numa célula ativa pode resultar na morte da célula ou na mutação da mesma, porém em células "dormentes" a alteração na estrutura do DNA não danifica tanto a célula.

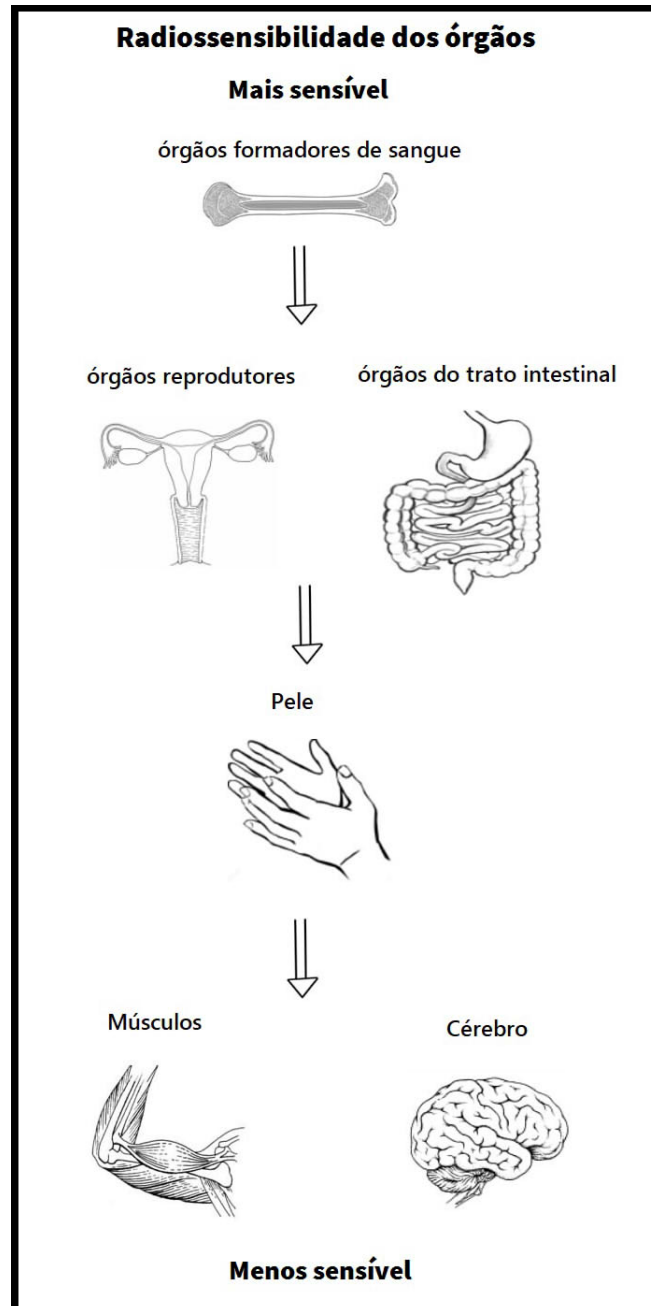
As células tumorais multiplicam-se rapidamente, por isso, dependendo de onde o tumor se encontra, a radiação é capaz de matar as células malignas diminuindo o tamanho do tumor. Isso mantém as células saudáveis (que se reproduzem mais lentamente) livre de efeitos severos.

Em questão de divisão acelerada, vale lembrar que as células embrionárias também se reproduzem em taxas altíssimas e por isso são bastante sensíveis à radiação semelhante aos tumores malignos. Porém as consequências são dramaticamente diferentes. O limiar da dose para provocar um severo retardo mental é de apenas 300mGy (irradiado no útero) no período mais sensível 8 -15 semanas após a concepção e para má formação o limiar da dose é apenas 100mGy.

Com relação ao sistemas do corpo humano podemos classificar as células conforme sua taxa de reprodução e, como consequência, conforme a sua sensibilidade à radiação. Observamos um esquema dos órgãos radiosensíveis:



**Figura 17** Radiossensibilidade dos órgãos do corpo humano começando indo do mais ao menos sensível



[Fonte: Elaborado pela autora]

Quando o corpo humano é exposto a uma dose alta aguda no corpo todo, isto é, em uma única irradiação ou em curtos intervalos de tempo, muitas células de muitos órgãos são danificados severamente. Isso gera uma resposta do corpo humano que chamamos de **síndrome aguda de radiação** que varia de sintomas semelhantes a de uma infecção viral (fadiga, vômitos, náuseas) e anemia para doses de 0.25 e 1 Gy, até inflamação nos pulmões para doses de 10 Gy. Acima disso, os efeitos passam para o sistema nervoso e cardiovascular levando o indivíduo à morte.

### 3.2.2 As reações estocásticas (crônicas)

São os efeitos que ocorrem naturalmente na células normais e, diferentemente das reações teciduais que necessitam de uma dose alta de radiação para ocorrer, podem ser causados por qualquer dose (alta ou baixa).

Como nome já diz, as reações são estocásticas, ou seja, aleatórias ou imprevisíveis. Por isso precisam de uma análise probabilística para descobrir os frutos dessas reações. De modo geral, diz-se que a probabilidade de ocorrência nas células é baixa para doses baixas e alta para doses altas. Porém, é de consenso geral que qualquer dose de radiação produz algum risco, seja ela alta ou baixa. Por isso os efeitos estocásticos não apresentam um limiar de dose, usamos então o modelo **Linear sem limiar** ou *Linear No-Threshold Model* (LNT)

Embora produza riscos, não significa que a exposição à radiação seja garantia de algum dano preocupante ao corpo.

Veremos a seguir os efeitos desse tipo de reação:

- *Efeitos cancerígenos*

Nesse tipo de efeito, consideramos que *não há limiar* para a indução de dano no DNA que resulte em câncer. Ou seja, até a radiação ambiental pode causar a formação de um tumor maligno. Além disso, não existe uma relação de gravidade entre dose e câncer, o que acontece é que quanto maior a dose maior será a *probabilidade* de ocorrência dos efeitos estocásticos.

Os efeitos estocásticos são sempre tardios, existe um **tempo de latência** até a manifestação do câncer. Esse tempo pode variar dependendo de qual órgão foi atingido. Para um câncer na medula óssea (leucemia) pode demorar cerca de 8 anos. Para tumores sólidos, como os de pulmão ou de mama, pode demorar 2 ou 3 vezes mais.

- *Efeitos hereditários*

No efeito hereditário, a mutação está nas células germinativas. Se tais células forem usadas na concepção, o feto carregará danos hereditariamente e não existem "novas mutações" como vemos nos filmes, apesar da radiação aumentar a taxa de mutações espontâneas. Vale ressaltar que os resultados das pesquisas realizadas nos sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki mostram que não há evidências que a exposição à radiação dos pais causa um aumento em doenças hereditárias nos descendentes. No entanto, como há uma forte evidência que radiação causa mutações hereditárias em experimentos com animais, a ICRP-103 julga prudente incluir esses riscos nas normas de proteção radiológica.

- *In-Utero*

Afeta o embrião em desenvolvimento produzindo sua mal formação. Pode ocorrer morte intrauterina, retardação no crescimento, anormalidades no desenvolvimento do feto ou câncer na infância. Esses efeitos dependem do tempo de gestação e da dose da radiação:

**Figura 18** Efeitos de uma dada dose de radiação no feto.

Dose aguda de radiação*	Desenvolvimento Fetal/Embrionário				
	Blastogênese (2 semanas pós concepção)	Organogênese (2 - 8 semanas)	Fetogênese		
			8 - 15 semanas	16 - 25 semanas	26 - 38 semanas
< 0,05 Gy (5 rad) †	Não são detectáveis efeitos teratogênicos				
0,05 - 0,50 Gy (5 - 50 rads)	Incidência no fracasso da implantação pode aumentar ligeiramente mas os embriões que sobrevivem provavelmente não sofrerão efeitos nefastos da radiação.	Incidência de malformações major pode aumentar ligeiramente. Possível atraso no crescimento.	Possível atraso no crescimento; Possível redução no QI (até um máximo de 15 pontos); Incidência de atraso mental severo até 20% dos casos.	Não são detectáveis efeitos teratogênicos	
> 0,50 Gy (50 rads) †	Incidência no fracasso da implantação é elevada‡; mas os embriões que sobrevivem provavelmente não sofrerão efeitos nefastos da radiação.	Incidência de aborto pode aumentar; Risco substancial de malformações major (SNC); Provável atraso no crescimento.	Incidência de aborto aumenta com a dose; Provável atraso no crescimento; Possível redução no QI (mais de 15 pontos); Incidência de atraso mental severo superior a 20%; Incidência aumentada de malformações major	Incidência de aborto aumenta com a dose; Possível atraso no crescimento, redução do QI, e atraso mental severo dependendo da dose; Incidência aumentada de malformações major	Incidência de aborto e morte neonatal aumenta com a dose.

\* - Dose aguda é administrada num período curto de tempo (normalmente minutos), enquanto a dose fracionada ou crônica é administrada ao longo do tempo. Os efeitos sobre o feto podem variar no caso das doses crônicas.  
† - Tanto Gy como rad são medidas de dose absorvida. Neste documento a dose absorvida é equivalente aquela recebida pelo feto.  
‡ - Efeito é dose dependente. Uma dose de 1 Gy (100 rads) vai provavelmente matar 50% dos embriões.  
¶ - Grávidas podem sofrer de envenenamento por radiação, dependendo da dose irradiada.  
Abreviaturas: SNC - Sistema Nervoso Central; QI - Quociente de Inteligência  
Adaptado do *Centers for Disease Control and Prevention. Radiation and pregnancy: a fact sheet for clinicians.*  
<http://www.bt.cdc.gov/radiation/prenatalphysician.asp>. Acedido em 15 de maio, 2013.

[Fonte:(DA CRUZ, 2013)]

Os efeitos hereditários não podem ser confundidos com efeitos *in-utero*. Isso porque a radiação no primeiro causa mutação das células reprodutivas (esperma e o óvulo) enquanto o segundo a mutação por conta da radiação ocorre diretamente no feto.

#### 4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho, procuramos descobrir quais eram os efeitos da radiação no corpo humano. Para isso, primeiro estudamos as propriedades da radiação ao passar por meios materiais variados. Notamos que cada tipo de radiação interage com o meio de forma distinta dependendo da energia da radiação e da composição molecular do material irradiado.

O primeiro fenômeno que acontece ao incidirmos radiação ionizante em um material é a ionização e excitação dos átomos que o constituem. Esse processo pode levar a um efeito cascata causando mais radiação (radiação secundária) até a energia da radiação secundária não ser mais o suficiente para expulsar elétrons de suas camadas mais externas.

Essa forma de deposição de energia é diferente para partículas carregadas (PCP) e para radiação eletromagnética (REM) no sentido em que as colisões das PCP nos átomos do material resultam uma força de parada muito maior que as interações dos fótons com os elétrons do material. Por isso, o alcance da radiação de partículas pesadas é limitado. Diferentemente daquele para radiação eletromagnética que não possui um alcance definido. Dessa forma, podemos introduzir para PCPs o conceito de blindagem. Ou seja, dependendo do material, é possível barrar certos tipos de radiação. Para REM falamos de atenuação de feixe de fótons, já que no processo de transferência de energia, alguns se perderam no material irradiado ao excitar ou ionizar o material.

Agora que sabemos o básico sobre as interações da radiação com a matéria, podemos avançar mais um passo para descobrir quais seriam os resultados dessas interações no corpo humano. Notamos que os principais motivos por trás das consequências biológicas da radiação está ligado à molécula de DNA. Esta, ao ser danificada, pode causar a morte celular ou mutações genéticas que podem levar a efeitos teciduais ou estocásticos.

Nos efeitos teciduais, a vítima entrou em contato com uma dose muito alta de radiação durante pouco tempo ou por períodos de tempo próximos. Por isso, a morte celular ocorre em vários tecidos do corpo humano ao mesmo tempo. Essa falha geral ocasiona uma resposta do corpo humano, gerando sintomas que variam de enjoô e vômitos até a parada do funcionamento de órgãos vitais.

Já nos efeitos estocásticos, qualquer dose de radiação pode resultar em algum efeito biológico posterior. Ou seja, qualquer radiação representa um risco e esse risco segue um modelo chamado Modelo Linear sem Limiar (LNT) que apresentamos nesse trabalho. Esses efeitos demoram para serem notados (como um câncer).

## REFERÊNCIAS

- [1] Bragg curves and peaks, *NASA Space Radiation Laboratory (NSRL)* . Disponível em:<<https://www.bnl.gov/nsrl/userguide/bragg-curves-and-peaks.php>> Acesso em: 29 jan. 2016
- [2] CAMERON, JOHN R. *Medical Physics*. John Wiley and Sons, Inc. 1978. p. 366-517.
- [3] CURTIS, ROBERT A. United States Department of Labor, *Introduction to ionizing radiation*, Disponível em:<<https://www.osha.gov/SLTC/radiationionizing/ionizinghandout.html>> Acesso em: 19 nov. 2015
- [4] DA CRUZ, GONÇALO P. R. *Radiação na gravidez: Abordagem da mulher grávida exposta a radiação ionizante*. 2013. 33 f. Tese (Mestrado Integrado em Medicina) - Instituto de ciências biomédicas Abel Salazar, Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [5] DUGGAR, B.M. Biological Effects of Radiation *Soil Science*. v. 42 n. 5, p. 399, 1936.
- [6] Entendendo a Radiação Médica: Uma fonte de conhecimento para pacientes e técnicos de saúde. *Radiação Ionizante*. Disponível em: <<http://www.radiacao-medica.com.br/dados-sobre-radiacao/o-que-e-radiacao/radiacao-ionizante/>> Acesso em: 19 nov. 2015
- [7] FEYNMAN, RICHARD P. *The Feynman lectures on Physics*. Volume 1, California Institute of Technology, 1997.
- [8] FICEL, MARCELO O. Tecnologias Radiológicas, *Unidades e grandezas das radiações*. Disponível em: <<http://www.tecnologiaradiologica.com/materiaunidadesgrandezas.htm>> Acesso em: 5 nov. 2015
- [9] GSMA, Frequent Asked Questions(FAQ) *Electromagnetic spectrum*. Disponível em: <<http://www.gsma.com/publicpolicy/faq/electromagnetic-spectrum>> Acesso em: 5 nov. 2015
- [10] JPI HEALTH CARE, *x-ray source and CR/DR*. Disponível em: <<http://www.jpi.co.kr/english/03technicalinformation/bookcrdr.html>> Acesso em: 19 nov. 2015
- [11] KALINOVSKII, A.N. *Passage of high-energy particles through matter*. New York: American Institute of Physics, 1989. p. 29-54.
- [12] LIMA, R., PIMENTEL, L., AFONSO, J. et al. *Artigo de Opinião Passando em revista a segurança e a radioatividade no início do século XX*. Rio de Janeiro: Instituto de Química da UFRJ, 2014.
- [13] OKUNO, E. *Física das Radiações*. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 296 p.
- [14] OKUNO. E. *Física para ciências biológicas e biomédicas*. São Paulo: Instituto de Física de São Paulo, 1982. p. 2-75.
- [15] OKUNO, E. *Radiação: Efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: Harbra, 1998. p. 96.

- [16] RAIOS-X, *Wikipedia*. Disponível em:<<https://pt.wikipedia.org/wiki/RaiosX>> Acesso em: 05 nov. 2015
- [17] UNIVERSITY OF LEUVEN, *Safety Aspects When Working With Ionizing Radiation*. Disponível em: <<http://chem.kuleuven.be/en/hse/info/liab4.htm>> Acesso em: 28 jan. 2016
- [18] URÂNIO, *Wikipedia* . Disponível em:<<https://pt.wikipedia.org/wiki/Urânio>> Acesso em: 05 nov. 2015
- [19] YOSHIMURA, E. *Física das Radiações: Interação da radiação com a matéria*. Revista Brasileira de Física Médica, v. 3 n. 1, p. 57-67, 2009.