

## RADIOTERAPIA — BASES FÍSICAS \*

*Dr. Lucio dos Reis Piedade \*\**

*Wilhelm Conrad Roentgen*, professor de física na Universidade de Würzburg, em novembro de 1895, ao fazer experiências com os raios catódicos, observou um estranho fenômeno que até então passara despercebido. Verificou que quando a corrente elétrica passava num tubo de *Crookes - Hittorf*, coberto de papelão, alguns cristais de platina-cianureto de bário, colocados casualmente a certa distância, adquiriam fluorescência brilhante.

Reconheceu, imediatamente, que esse fenômeno abria as portas à exploração de um novo campo de ciência. Dedicou-se fervorosamente a pesquisas que o levaram a descobrir que a causa deste efeito era uma nova espécie de raios a que ele chamou de Raios X, pelo desconhecimento de sua causa. Um dos primeiros passos de Roentgen na experimentação da nova radiação foi a substituição do écran fluorescente por uma chapa fotográfica que observou ser escurecida pela ação dos raios. Um dos mais sensacionais resultados das experiências a que procedeu e que imedia-

tamente chamou a atenção do mundo científico foi a radiografia da mão de sua esposa. Outros Roentgenogramas que apresentou em seus primeiros trabalhos foram o de um compasso e a de pesos de metal contidos numa caixa de madeira.

Por meio do écran fluorescente e principalmente da chapa fotográfica, Roentgen fez inúmeras observações que publicou em 3 trabalhos clássicos: em dezembro de 1895, março de 1896 e maio de 1897. Nessas suas primeiras comunicações ao mundo científico, Roentgen provava que os novos raios eram invisíveis mas causavam a fluorescência de certas substâncias e escureciam a chapa fotográfica; que se propagavam em linha reta; que não eram refletidos nem refratados pelos métodos experimentais então conhecidos e que não eram desviados pela influência dos campos elétrico e magnético. Quase mil trabalhos foram publicados no ano que se seguiu à descoberta de Roentgen e já em fevereiro de 1896 o "*Journal of the American Medical Association*", em

\* Palestra realizada no Centro de Estudos do Hospital Central do Exército no 1.º Curso de Atualização em Cancerologia.

\*\* Chefe do Setor de Física da Seção de Radioterapia do I.N.C.

editorial expressava a possibilidade da utilização dos novos raios em aplicações terapêuticas.

Infelizmente os primeiros efeitos fisiológicos dos Raios X foram surpreendentes e marcaram o início de um capítulo de angústia e sofrimento para muitos dos pioneiros da roentgenerapia.

Por volta de 1896 começaram a chegar notícias de várias fontes de que os Raios X (também chamados de raios Roentgen, em homenagem ao seu descobridor) produziam mudanças na pele, que eram semelhantes às produzidas pelas queimaduras solares. Para bem se entender o fenômeno da produção dos Raios Roentgen e compreender seus efeitos, é necessário estar familiarizado com os componentes dos átomos — protons, eletrons e neutrons. O problema da constituição da matéria vinha preocupando físicos e químicos de todos os tempos.

Com a descoberta da radioatividade por *Becquerel* em 1896 e as pesquisas realizadas pelo casal *Curie*, com a consequência bem conhecida da obtenção do elemento *Radium*, em 1898, um novo campo de conhecimento humano surgia permitindo novas concepções sobre a estrutura atômica, concepções essas que se vêm aperfeiçoando e confirmando experimentalmente no decorrer de incalculável número de pesquisas que desde então vêm se realizando.

A primeira teoria foi apresentada em 1911, por *Rutherford*, e modificada em 1913 pelo cientista dinamarquês *Niels*

*Böhr*, seu discípulo, que aplicou ao conceito de *Rutherford* a teoria quântica de *Planck*, solucionando uma série de problemas que entravam em choque com a concepção original. Até hoje, as novas teorias vêm concordando com os resultados obtidos experimentalmente na confirmação do modelo de *Böhr*.

O átomo é constituído de uma central (núcleo — formado de protons e neutrons) relativamente de grande massa, ocupando um pequeno volume com carga positiva e de uma parte orbital (os eletrons), aproximadamente do mesmo diâmetro, muito leves e com carga negativa.

Temos, então, que todas as moléculas são constituídas de átomos que consistem de um núcleo e de eletrons planetários. O átomo é eletricamente neutro e tem número igual de protons e de eletrons (número atômico *Z*). O diâmetro do núcleo é da ordem de  $10^{-13}$  cms. aproximadamente e igual ao diâmetro do eletron, enquanto que o diâmetro do átomo é da ordem de  $10^{-8}$  cms. ou seja, cem mil vezes maior. Conclui-se, então, que o sistema atômico é praticamente tão vazio quanto o nosso sistema solar. O número de eletrons orbitais, determinado pelo número de protons do núcleo, define a posição do elemento na tabela de *Mendeleiev* e é responsável pelo seu comportamento químico-biológico.

Se um dos eletrons orbitais é removido de um átomo, devido, por exemplo, a energia radiante, a parte restante

do átomo fica com uma carga positiva em excesso e este átomo deficiente é chamado de *ion positivo*. Se estes eletrons removidos se juntam a outros átomos neutros, produzirão *ions negativos*, isto é, átomos com carga negativa em excesso.

Os átomos podem ser ionizados pela absorção dos raios X ou dos raios gama ou pela colisão com raios alfa e beta rápidos.

Estas radiações ionizantes são responsáveis pela formação de pares de ions na matéria. O número de pares de ions e sua distribuição depende do tipo e da energia da radiação.

As radiações são usualmente divididas em dois grupos principais: radiações corpusculares e radiações de ondas eletromagnéticas.

Se as partículas sub-atômicas, tais como, eletrons, protons, neutrons, etc., viajam em feixes de altas velocidades, elas são chamadas de radiações corpusculares. Por exemplo, os átomos de desintegração de elementos radioativos emitem raios alfa e beta. Os eletrons emitidos do eletrodo negativo no tubo de RX são acelerados por uma diferença de potencial entre os eletrodos e são conhecidos como raios catódicos ou beta. Todas estas irradiações pertencem ao grupo das radiações corpusculares.

A energia das radiações corpusculares pode ser facilmente calculada. Todas as partículas têm massas definidas e a

energia cinética de cada partícula pode ser expressa por

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad v = \text{vel. da partícula}$$

$$m = \text{massa em repouso}$$

Então, por exemplo, a energia de um eletron que se move sob a influência de uma diferença de potencial determinada, para a placa num tubo de raios roetgen tem a energia cinética de  $\frac{1}{2} m v^2$ . Esta energia pode ser expressa com  $(E \times e)$  — onde  $e$  representa carga elétrica do eletron em unidades eletrostáticas ( $4.803 \times 10^{-10}$ )

e  $E$  é a diferença de potencial

aplicada ao tubo medida em unidades eletrostáticas (isto é, volts divididos por 300).

$$\text{Então } \frac{1}{2} m v^2 = e \times E \quad \text{ergs}$$

Esta relação é de fundamental importância e muito usada no cálculo das energias dos raios catódicos em relação às energias dos raios Roetgen por eles produzidos.

A energia  $e \times v$  adquirida pelo eletron é chamada de eletron-volt. O eletron-volt representa então a energia cinética ganha por um eletron ao se projetar por uma diferença de potencial de 1 volt e é equivalente a . . . . .  $1.6 \times 10^{-12}$  ergs.

Para diferenças de potencial, mais elevadas, tais como as usadas em equipamentos de supervoltagem, usa-se uma unidade maior. É o MEV (milhões de eletron-volts).

As radiações de ondas eletromagnéticas, ao contrário das corpusculares não tem matéria associada com elas. Compreendem uma larga escala de radiações como ondas elétricas, raios infra-vermelhos, raios roentgen, raios gama e raios cósmicos. O grupo completo de tais radiações é conhecido como espectro-eletromagnético. Estes raios são oscilações rítmicas elétricas e magnéticas ou movimentos de ondas com a mesma velocidade e diferindo apenas pelos comprimentos de suas ondas.

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) representa a distância de um ponto de uma onda a ponto idêntico de outra onda. O espaço destas radiações eletromagnéticas se estende de comprimentos de ondas de  $10^{11}$  cm a  $10^{-11}$  cm.

Nos raios roentgen e raios gama com comprimentos de onda muito pequenos da ordem de  $10^{-8}$  cm usa-se uma unidade muito menor que o centímetro, que é o Angstrom (equivalente a  $10^{-8}$  cm).

A separação das radiações nos dois grupos citados não chega a ser completamente satisfatória. Enquanto muitos fenômenos de energia radiante, tais como: reflexão, difração, polarização e interferência podem ser satisfatoriamente interpretados pela clássica teoria das ondas eletromagnéticas, outros como a produção de RX ou sua absorção pela matéria podem ser melhor explicados, se os raios roentgen forem considerados como blocos, semelhantes a partículas.

Estimulados pelos trabalhos de PLANCK na teoria dos quanta em 1901, os físicos postularam que tais blocos ou quanta de energia eletromagnética radiante eram emitidos e propagados pelas fontes de radiação e chamadas de ftons.

A energia destes ftons não é constante mas é diretamente dependente da frequência da radiação.

A energia  $Q$  de um quanta é dada pelo produto

$$h \times \delta \quad \delta = \text{frequência de radiação}$$

$$h = \frac{\text{const.}}{\text{Planck}} = (6.62 \times 10^{-27} \text{ erg 1 seg})$$

$$\delta = \frac{C}{\lambda} \quad Q = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Assim a energia de um fton pode ser expressa por um número definido se a frequência ou o comprimento de onda da radiação for conhecido.

É óbvio que a energia do fton aumenta se aumentar a frequência (ou diminuir o comprimento de onda).

As radiações comumente usadas em radiologia são:

	Voltagem do tubo de RX	Comprimento de onda
Raios Grenz . . . . .	10 KW	2.0 A°
Contato-terapia . . .	50 KW	0.8 A°
RX diagnóstico . . .	75 KW	0.7 A°
Terapia superficial .	100 KW	0.5 A°
Terapia profunda .	200 KW	0.14A°
Supervoltagem . . . .	1.000 KW	0.03A°

## ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO

Ao estudarmos a interação da radiação beta ou gama com a matéria, considera-la-emos como ftons ou quanta e não como ondas eletromagnéticas. Um fton tem energia mas não tem massa e é elêtricamente neutro. Normalmente pode percorrer distâncias consideráveis antes de penetrar num átomo e vários fatos podem acontecer quando isto ocorre. Êle pode chocar o núcleo mas a menos que tenha uma energia enorme nenhum efeito produzirá nesta massa de protons e neutrons. Êle pode chocar um dos eletrons que giram numa das órbitas atômicas. Neste caso duas coisas podem acontecer :

- 1) O fton pode empregar sua energia total na remoção do eletron da sua órbita e comunicar-lhe uma alta energia cinética. Tal absorção de um fton é chamada *absorção fotoelétrica* ou absorção verdadeira e o eletron removido é chamado um fotoeletron;
- 2) O fton pode empregar só parte de sua energia para a remoção de um eletron da sua órbita atômica e acelerá-lo enquanto guarda parte da energia para proceder como um fton mas com a energia correspondente reduzida. Êste tipo de absorção é chamado absorção escaterada (ou talvez melhor, absorção por dispersão) e o eletron removido é chamado um eletron Compton.

Neste segundo processo o fton resultante usualmente percorre uma direção diferente da do fton original. Tanto os fotoeletrons como os eletrons Compton têm massa definida e carga elétrica negativa. Assim êles têm muito mais chances do que os ftons de interagir com outras partículas carregadas quando percorrem as órbitas atômicas. Produzem ao longo de suas trajetórias por colisão com os eletrons orbitais uma série de pares de ions cujo número e distribuição depende da energia original da partícula.

Um outro modo de perda de energia do eletron que pode errôneamente ser classificado como um tipo de absorção de rotina é devido a formação de pares. Quando ftons com energias superiores a 1.1 MEV se chocam com um átomo, sua energia pode se converter em matéria pela formação de um eletron e de um proton. Isto pode ocorrer se o fton primário passar muito próximo do núcleo. Parte de sua energia é usada para formar o par e o restante é usado para dar uma energia cinética às partículas.

A absorção da radiação no absorvente pode ser calculada pela fórmula :

$$I = I_0 \times e^{-\mu d}$$

$d$  = espessura do absorvente

$\mu$  = coeficiente linear de absorção

$I$  = intensidade do feixe a mesma distância com um absorvente.

$I_0$  = intensidade do feixe de roentgen medido a uma certa dist. do foco.

Em relação à interação da radiação com a matéria, o radiologista inicialmente fica interessado em saber a qualidade de radiação que deve usar para administrar o tratamento ideal no paciente. Se o tecido a ser irradiado está na superfície ou próximo da superfície, radiação "mole" ou radiação de longo comprimento de onda, produzido por voltagens relativamente baixas deve ser usada.

A absorção destes raios moles é considerável visto haver pouca dispersão e somente uma relativamente pequena quantidade de radiação penetrar nos tecidos mais profundos. Se todavia a área a ser tratada está situada mais profundamente, feixes penetrantes de raios roentgen ou radiações de mais curtos comprimentos de onda deve ser usado. Tais feixes são obtidos aumentando a voltagem no tubo e removendo-se alguns dos componentes mais moles por meio de filtração. Um filtro de roentgen remove, de acordo com a lei da absorção, uma certa proporção de todos os comprimentos de onda de um feixe heterogeneo. Todavia, naturalmente, uma maior proporção de raios de mais longo comprimento de onda é removido do feixe e conseqüentemente a penetração aumenta.

Filtros usados em radioterapia :

Celofane para raios grenz (acima de 20 KW).

Alumínio para terapia superficial e média (de 20 KW a 120 KW).

Cobre ou ligas de cobre e latão (thoralus) para terapia profunda (de 120 KW a 400 KW).

Latão e chumbo para supervoltagem.

Se a irradiação primária produzir em tais filtros irradiação característica mole, esta deve ser absorvida por um filtro secundário antes de atingir o paciente.

Se, por exemplo, em supervoltagem for usado chumbo como filtro primário, ele deve ser seguido por latão, cobre e alumínio, cada um deles absorvendo a irradiação característica do precedente, sendo a do alumínio absorvida pelo ar.

O grau de penetração da radiação X através das estruturas anatômicas de organismos vivos depende do número atômico da estrutura penetrada e do comprimento da onda de radiação exposta.

Os coeficientes de absorção de massa de um número de diferentes tecidos foi determinado experimentalmente por Spiers para cada particular comprimento de onda.

Para descrever a irradiação usada no tratamento por raios X dois fatores devem ser considerados. O primeiro é a quantidade de irradiação e o segundo é a qualidade da radiação. Nenhum destes fatores pode ser medido diretamente.

Exposição ou *Dose* é uma medida de uma propriedade de raios X num lugar particular. Este lugar pode estar situado no ar, no tecido ou em outro material ou até no vácuo. A exposição é expressa por um número de roentgens.

Exposição é uma propriedade somente da irradiação. Não diz o que acontece com a irradiação ou acerca dos efeitos que ela produz. Não indica se a irradiação é absorvida ou passa através da região sem absorção. Intensidade é obtida dividindo a exposição pelo tempo requerido em libertá-la. A intensidade é usualmente expressa em roentgens por minuto.

A exposição pode ser medida com um instrumento chamado Dosímetro.

A unidade aceita internacionalmente como a quantidade de radiação é determinada pela ionização produzida numa massa de ar fixa e definida como: "O roentgen é a quantidade de radiação X ou gama tal que a emissão corpuscular associada por 0.001293 gm de ar, produz no ar, ions carregando (1.e.s.u.) de quantidade de eletricidade do mesmo sinal".

Medidas de outras radiações que não raios X ou gama tem sido expressas em termos de uma unidade conhecida como "rep" (roentgen-equivalente physical). Representa a absorção de energia de aproximadamente 93 ergs por gm de tecido.

Um aparelho de RX está geralmente calibrado de forma que seu rendimento é dado em roentgens por minuto numa determinada posição. Se o corpo de um paciente ou um "fantom" é introduzido no feixe o número de r por minuto aumenta devido ao backscatter do material. O aumento do backscatter de-

pende da qualidade de irradiação, do tamanho do campo e da profundidade. Em pontos dentro do corpo a intensidade difere da de superfície devido a absorção e dispersão nos tecidos e ao aumento da distância da fonte.

De acôrdo com a convenção estabelecida pelo 5.º Congresso Internacional de Radiologia e confirmado no 6.º, as doses de irradiação liberadas em várias posições são expressas em termos de roentgens, como se segue:

$D = n.^{\circ}$  de roentgens no ar na posição do centro do campo empregado no tratamento (Dose-ar).

$Do = n.^{\circ}$  de roentgens na superfície da pele no centro do mesmo campo (Dose-superfície).

$Dn = n.^{\circ}$  de roentgens na profundidade no centro do mesmo campo (Dose-profundidade).

A Dose ar D pode ser medida por meio de uma câmara de ionização.

A Dose superfície Do é estabelecido ser = a soma do feixe primário com o backscatter. Varia com a qualidade da radiação e com o volume de material de scatter presente.

Dose profundidade é a mais importante parte da dosimetria do RX. Não é a dose-ar nem a dose na pele (exceto para lesões de pelo) que produz as mudanças desejadas no tecido e sim a dose

no tecido. A determinação da dose no tecido envolve medidas e cálculo de profundidade da lesão para cada entrada de irradiação empregada. É claro ser difícil obter isto rigorosamente.

Assim, um dos primeiros passos é saber exatamente a profundidade do tumor. Quando isto é conhecido são utilizadas tabelas dando para a profundidade o número de roentgens liberados por 100 r no ar. Estas tabelas são chamadas tabelas de % de profundidade.

Estas doses % de profundidade variam com a qualidade da irradiação, o volume do material escaterado e o arranjo geométrico da fonte e do paciente.

Vimos, assim, em linhas gerais a influência predominante e a importância de existência de um Setor de Física em todas as Seções de Radioterapia em face da complexidade dos problemas com que se defronta diariamente o radioterapeuta.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1 — JOHNS, H. E. — The Physics of Radiology 2<sup>nd</sup> edition — Charles C. Thomas-Publisher.
- 2 — QUIMBY, E. H. — Physical Foundations of Radiology, Glasser, Quimby, Taylor and Weatherwax by Paul Hoeber, New York 1952.
- 3 — SELMAN, JOSEPH — The basic Physics of Radiation Therapy — 1<sup>st</sup> edition — Charles C. Thomas-Publisher.