



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

FÁBIO PINHEIRO POVH

**A EVOLUÇÃO DOS RAIOS X E OS CUIDADOS PARA O USO COM
SEGURANÇA**

MARINGÁ-PR

Março/2024

FÁBIO PINHEIRO POVH

**A EVOLUÇÃO DOS RAIOS X E OS CUIDADOS PARA O USO COM
SEGURANÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso do
Departamento de Física da Universidade
Estadual de Maringá como requisito para
obtenção do diploma de Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Maia Santos

Coorientador: Prof. Dr. Klebson Lucenildo
da Silva

MARINGÁ/PR

Março/2024

FÁBIO PINHEIRO POVH

**A EVOLUÇÃO DOS RAIOS X E OS CUIDADOS PARA O USO COM
SEGURANÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso do
Departamento de Física da Universidade
Estadual de Maringá como requisito para
obtenção do diploma de Bacharel em Física.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Maia Santos

DFI/UEM

Prof. Dr. André Marino Gonçalves

DFI/UEM

Prof. Dr. Rafael Trautwein Santiago

Unifatecie Centro Universitário

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha querida família por todo apoio durante todos esses anos, sempre acreditando em mim e na importância dos estudos.

À minha amável esposa que sempre paciente me incentivou muito a continuar estudando.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Guilherme Maia Santos que aceitou prontamente a tarefa de me orientar.

Ao Prof. Dr. Klebson Lucenildo da Silva por ter aceitado ser o coorientador ajudando o Guilherme nesse projeto.

À Profa. Dra. Hatsumi Mukai pela paciência e sempre prestativa a ajudar.

Agradeço aos meus amigos que sempre estiveram do meu lado por todo esse tempo.

Finalmente agradeço aos professores da banca por disponibilizarem seu tempo.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar as aplicações da radiação, em especial dos raios X na área médica como exames e na área experimental como caracterização de materiais, começando com uma revisão histórica sobre as principais contribuições, analisando as precauções necessárias para garantir a segurança dos pesquisadores, médicos e pacientes envolvidos durante o uso. Discorrendo um pouco sobre os equipamentos e métodos, através da revisão bibliográfica e análise de casos, serão identificadas suas principais utilidades, os riscos associados à exposição prolongada e as medidas de proteção adotadas. Além disso será citado um acidente importante aqui no Brasil, suas causas e consequências envolvendo diversas vítimas. Também será comentado sobre os benefícios tanto na área da saúde, mas também na área de pesquisa como identificação e caracterização de materiais.

Palavras-chave: Raios X; Radiação; Proteção Radiológica.

ABSTRACT

This work has the goal of exploring the application of the radiation, in special the X rays in the medical área like exams and in the experimental área like materials characterization, begining with a historical review about the main contributions, analyzing the necessary precautions to ensure the safety of the researchers, doctors and pacientes involved in its use. Discoursing a little bit about the equipments and methods, through literature review and cases analysis, it will be identified your main utilities, the risks associated with prolonged exposure and the measure of protection adopted. Furthermore it will be quoted an important accident here in Brazil, your causes and consequences involving a lot of victims. It also will be commented about the benefits such as in health área, but also in the research area like materials characterizations.

Key words: X rays; Radiation; Radiological Protection.

SUMÁRIO

Introdução.....	08
1 Descobrimto e uso da radiação.....	10
1.1 Contribuição de Maxwell.....	10
1.2 Efeito fotoelétrico.....	11
1.3 Deslocamento Compton.....	12
1.4 Novo elemento de Curie.....	13
1.5 Raios X no Brasil.....	14
2 Geração e os tipos de raios X.....	15
2.1 Tipos de processo de criação.....	17
2.2 Raios X de freamento.....	17
2.3 Raios X característicos.....	18
2.4 Sobre algumas propriedades importantes.....	18
2.5 Transições de camadas alfa e beta.....	20
3 Os perigos no uso da radiação.....	21
4 Unidades, normas e grandezas físicas.....	23
5 Acidente no Brasil e suas conseqüências.....	25
6 Proteção radiológica em análises médicas.....	27
6.1 Limites de exposição à radiação.....	27
6.2 Radiografia.....	28
6.3 Fluoroscopia.....	29
6.4 Mamografia.....	30
6.5 Tomografia Computadorizada.....	31
7 Difração de raios X.....	32
Considerações Finais.....	34
Referências.....	35

INTRODUÇÃO

Os raios X representam uma das descobertas mais significativas na história da física e da medicina, revolucionando não apenas o campo científico, mas também trazendo profundas implicações práticas para diversas áreas, desde a medicina diagnóstica até a análise de materiais. Esta introdução visa explorar a natureza multifacetada dos raios X, abordando sua origem, características físicas, aplicações e as medidas de segurança essenciais para seu uso responsável. A compreensão dos fenômenos associados à radiação tem possibilitado inúmeras aplicações práticas, de exames médicos até pesquisas científicas. O presente trabalho tem como objetivo instigar o interesse na utilização dos raios X com segurança, citando normas a serem seguidas para evitar acidentes e desastres, e também sua utilidade como ferramenta de diagnóstico médico, que trouxeram diversos benefícios para a sociedade. Abordaremos medidas de proteção radiológica necessárias para mitigar os riscos de exposição à radiação ionizante nos ambientes de trabalho.

A descoberta dos raios X data de 1895, quando Wilhelm Conrad Röntgen observou uma nova forma de radiação capaz de atravessar objetos opacos e impressionar placas fotográficas. Este achado não apenas marcou o início de uma nova era na física, mas também abriu caminho para o desenvolvimento de técnicas diagnósticas revolucionárias na medicina.

As aplicações dos raios X são vastas e variadas, abrangendo campos como medicina diagnóstica (radiografias, tomografias computadorizadas), tratamento de câncer (radioterapia), além de usos na indústria e na pesquisa científica (cristalografia de raios X).

Entretanto, o potencial destrutivo da radiação também se fez presente em eventos trágicos como o desastre de Chernobyl, ocorrido em 1986. A explosão e o incêndio na usina nuclear ucraniana resultaram na liberação de grandes quantidades de material radioativo na atmosfera, causando inúmeros impactos na saúde humana e no meio ambiente. Esse acidente evidenciou os riscos associados ao uso inadequado da energia nuclear e reforçou a necessidade de medidas rigorosas de segurança e controle [2].

Apesar de ter sido evidenciado por causa dos eventos trágicos, hoje sabemos que não existe o uso totalmente seguro, tudo que envolve radiação terá riscos, mesmo que em

pequenas quantidades, o que acontece de fato é uma análise de riscos e benefícios em cada vez que a radiação é utilizada.

Apesar dos benefícios incontestáveis, a exposição aos raios X pode apresentar riscos à saúde, como danos ao DNA e aumento do risco de câncer. Portanto, é crucial adotar medidas rigorosas de segurança para proteger tanto os profissionais que trabalham com essas radiações quanto o público em geral. Esta parte discutirá as diretrizes de segurança, os princípios da radioproteção e as tecnologias desenvolvidas para minimizar os riscos associados ao uso dos raios X.

Os raios X são uma forma de radiação ionizante, capazes de penetrar nos tecidos pois possuem energia para ionizar o átomo e molécula criando íons eletricamente carregados podendo ser nocivo ao organismo vivo já que pode causar dano ao material genético como câncer e outras mutações além do dano ao tecido, e até problemas no sistema nervoso.

Ao longo deste trabalho, também serão apresentados estudos de casos e exemplos de incidentes relacionados à exposição inadequada aos raios X e os avanços na parte de segurança afim de evitar ocorrências futuras. Assim, contribuindo para uma melhor compreensão da segurança no uso dos raios X, levando informações relevantes para os profissionais da saúde entre outros setores onde é aplicada.

1 Descobrimto e uso da radiação

A luz como onda eletromagnética foi proposta pelo físico James Clerk Maxwell (Fig. 1.1), após desenvolver as ideias de Michael Faraday (Fig. 1.2), percebeu que uma onda eletromagnética viajava na mesma velocidade da luz, e que só foi provado a existência de tais ondas a partir 1883 por Heinrich Hertz construindo um circuito elétrico oscilador que produzia micro-ondas que se propagavam com a velocidade da luz, a partir daí outras frequências de ondas eletromagnéticas foram descobertas e passam a ter diversas aplicações. O espectro eletromagnético representa uma faixa de frequência e comprimento de onda, e para cada faixa há uma aplicação, no caso dos raios X, são aqueles com frequência muito alta, em torno 10^{19} Hz e comprimento de onda muito curto, aproximadamente 10^{-9} m, diferente da luz visível que possui uma frequência perto de 10^{14} Hz, e comprimento de onda perto de 10^{-6} m [1].

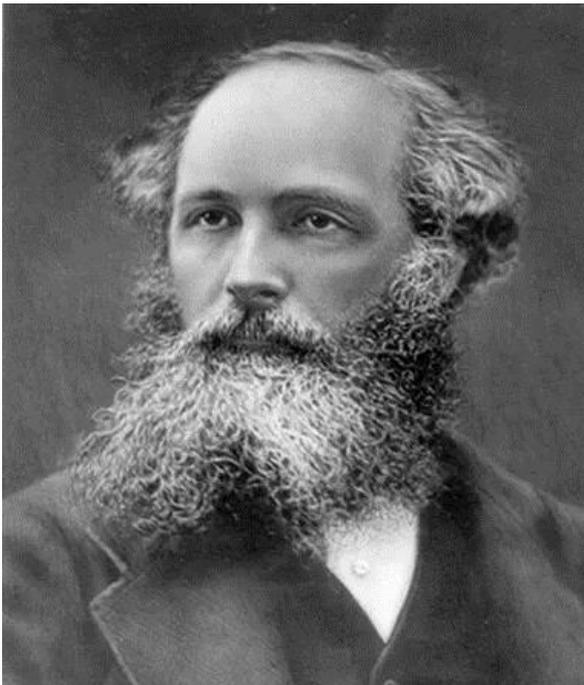


Fig. 1.1: James Clerk Maxwell [1];



Fig. 1.2: Michael Faraday [1].

1.1 Contribuição de Maxwell

Com base nos trabalhos de Faraday, Maxwell estabeleceu as famosas ‘equações de Maxwell’ (Tabela 1.1) e em 1865 concluiu que a ação eletromagnética viajava pelo espaço na forma de ondas transversais. Mais tarde o físico Max Planck usaria esses

conceitos para estudar radiação térmica, associando a energia a uma dada frequência da radiação de corpo negro à energia de um elétron na parede oscilando senoidalmente com a mesma frequência, e postulou apenas que a energia da partícula oscilante é quantizada. Somente mais tarde foi que Planck aceitou a ideia de que as próprias ondas eletromagnéticas eram quantizadas.

Nome	Forma diferencial	Forma integral
Lei de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q(V)}{\epsilon_0}$
Lei de Gauss para o magnetismo	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
Lei de Faraday da indução	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_{B,S}}{\partial t}$
Lei de Ampère (com a correção de Maxwell)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_{E,S}}{\partial t}$

Tabela 1.1: Equações de Maxwell

1.2 Efeito fotoelétrico

Na época, os cientistas perceberam que a incidência de luz sobre uma superfície causava a emissão de elétrons, e foi evidenciado que existem três principais aspectos do efeito fotoelétrico que não podem ser explicados pela teoria ondulatória clássica:

- A amplitude do campo elétrico oscilante \mathbf{E} da onda luminosa cresce se a intensidade da luz aumentar, já que a força aplicada ao elétron é ' $e\mathbf{E}$ ', sugerindo que a energia cinética dos fotoelétrons também deveria crescer ao aumentar a intensidade do feixe luminoso. Entretanto independe da intensidade da luz.
- O efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência da luz, desde que fosse intensa o bastante para dar energia necessária à ejeção dos elétrons, entretanto existe um limiar de frequência ν_0 característico. Para frequências menores que ν_0 o efeito fotoelétrico não ocorre, qualquer que seja a intensidade da iluminação.
- Se a energia adquirida por um fotoelétron é absorvida da onda incidente sobre a placa metálica, a 'área de alvo efetiva' para um elétron no metal é limitada, e provavelmente não é muito maior que a de um círculo de raio aproximadamente igual ao raio atômico.

Classicamente, a energia está uniformemente distribuída, logo, se a luz é suficientemente fraca, deveria haver um intervalo de tempo mensurável entre o momento em que a luz incide e o instante da ejeção do fotoelétron. No entanto, nenhum retardamento detectável foi jamais medido.

Por isso, Albert Einstein colocou em questão a teoria clássica, e propôs que a energia radiante está quantizada em pacotes concentrados $E = h\nu$, que mais tarde vieram a ser chamados de fótons, onde E é a energia do pacote, $h = 6,63 \times 10^{-34} J.s$ é a constante de Planck e ν é a frequência. Aprimorando a ideia de Max Planck que acreditava que a energia eletromagnética, uma vez irradiada, se espalhava pelo espaço da mesma forma que ondas se espalham na água.

1.3 Deslocamento Compton

A natureza corpuscular da radiação foi confirmada em 1923 por Arthur Compton, ao fazer um feixe de comprimento de onda λ incidir sobre um alvo de grafite Fig. 1.3, embora o feixe incidente consista em um único comprimento λ , os raios X espalhados têm máximos de intensidade em dois comprimentos de onda, um deles é o mesmo que o incidente λ e outro maior λ' . A quantidade $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ é chamado 'deslocamento Compton' e varia com o ângulo segundo o qual os raios X espalhados são observados.

Compton interpretou o resultado de seus experimentos (Fig. 1.4) postulando que o feixe de raios X não era uma onda de frequência ν , mas um conjunto de fótons, cada um com energia $E = h\nu$, e colidem com os elétrons livres do alvo assim como colide com duas bolas de bilhar.

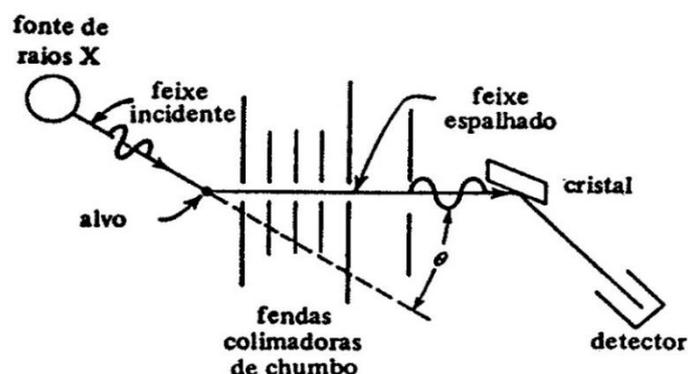


Fig. 1.3: Esquema simplificado do experimento de Compton com raios X [5].

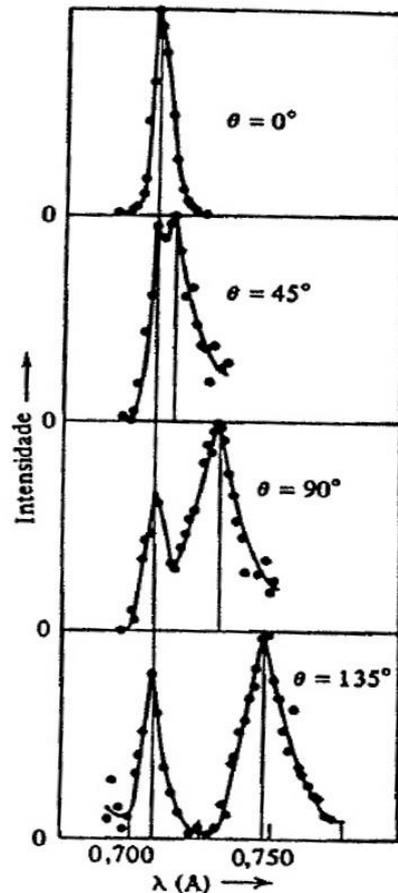


Fig. 1.4: Resultados experimentais, a linha sólida vertical à esquerda corresponde ao λ , e a que está à direita λ' . Os resultados mostrados são para quatro ângulos de espalhamento Θ diferentes [5].

Apesar de muitos físicos terem, a princípio, a dificuldade ao encarar essa ‘dupla personalidade’ da radiação eletromagnética, a ampliação de pontos de vista causada pelo desenvolvimento da mecânica quântica fez com que atualmente seja mais fácil de aceitar. A dualidade evidente na natureza onda-partícula da radiação não é mais considerada tão estranha, porque agora se sabe que isto é uma característica geral de todos entes físicos, incluindo prótons e elétrons [5].

1.4 Novo elemento de Curie

No ano de 1898 a física polonesa Marie Curie percebeu que além do urânio, o tório também emitia essas radiações chamadas na época de raios urânicos, e era mais ativo. O nome raios urânicos surgiu ao concluir que o composto de U emitia de modo constante um tipo de raio que atravessa papel e atua sobre uma chapa. Os raios emitidos pelo U e pelo Th eram semelhantes aos raios X, porém menos penetrantes, se propagam

apenas alguns centímetros no ar. Neste mesmo ano descobriu outro elemento batizado de polônio em homenagem a sua pátria, e meses depois outro elemento ainda mais ativo chamado rádio. A propriedade de emissão foi então denominada Radioatividade [1].

A partir de 1910 as principais aplicações da radiação ionizante em medicina como radiografia e radioterapia ambas usando raios X, já estavam bem estabelecidas.

1.5 Raios X no Brasil

No Brasil, o primeiro aparelho de raios X foi encomendado em 1898, três anos após a descoberta do mesmo, pelo médico José Carlos Ferreira Pires, que improvisou um gerador a gasolina pois na cidade não tinha eletricidade. A primeira chapa radiográfica feita por ele foi da mão com um objeto estranho do então ministro Lauro Muller. Nos últimos anos de sua vida, teve dermatite nasal persistente, provavelmente causada pela radiação. Em 1998, foi realizado uma homenagem a ele no XXVII Congresso Brasileiro de Radiologia em comemoração aos 100 anos da Radiologia Mineira.

Ainda no Brasil outro médico chamado Manuel Dias de Abreu inventou em 1936 a Abreugrafia, também conhecido como microrradiografia, fotofluorografia ou simplesmente fluorografia, que é uma pequena radiografia do pulmão, nasceu como uma tentativa de erradicar a tuberculose, nessa época os professores tinham que tirar abreugrafia todo começo de ano como exame trabalhista. O exame também era exigido para se poder usar piscinas, inclusive as públicas. Foi indicado ao Nobel em 1950, e no dia quatro de janeiro comemora-se o 'Dia Nacional Da Abreugrafia'. Este exame acabou entrando em desuso por recomendação da OMS por expor demais à radiação [1].

2 Geração e os tipos de raios X

Dado essa breve introdução geral, e agora voltando aos raios X, este foi descoberto por Wilhelm Röntgen em 1895, usando um tubo de raio catódico submetido à uma alta tensão produzida por uma bobina Ruhmkorff, ele percebeu que a 2 m do tubo, um cartão com sal de bário apresentava fluorescência, e pesquisando notou que essa nova radiação atravessava diversos materiais. Nesse mesmo ano, ele convenceu a esposa Anna Bertha a radiografar a própria mão permanecendo estática por 15 minutos [1].



Fig. 2.1: Wilhelm Röntgen; [1].



Fig. 2.2: Raios X da mão de Anna Bertha [1].

Embasado nessa experiência escreveu um artigo científico batizando de raios X. Tal trabalho o fez ganhar o primeiro prêmio Nobel de Física em 1901 [1].

A Fig. 1.7 mostra o esquema simplificado do tubo emissor de raios X, o filamento aquecido emite elétrons acelerados pelo potencial entre os eletrodos (cátodo e ânodo). Ao atingir o alvo feito de um metal com alto ponto de fusão como tungstênio, produz raios X.

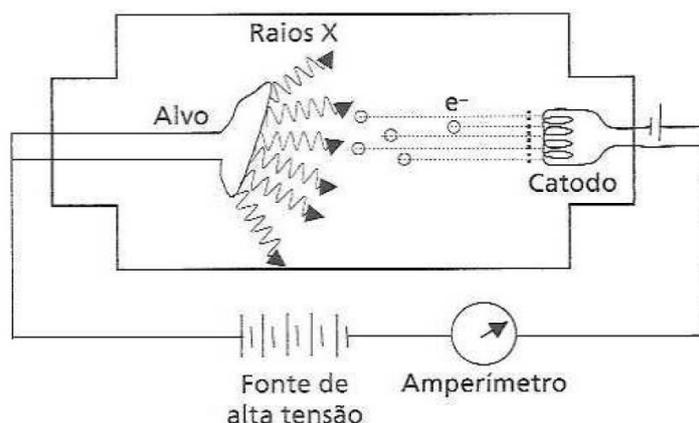


Fig. 2.3: Esquema simplificado do tubo de emissor de raios X [2].

Onde o cátodo é a fonte de elétrons no tubo, composto por um filamento de tungstênio (do sueco, *tung sten* = pedra pesada, com ponto de fusão de 3.695 K) que ao ser aquecido realiza um processo conhecido como emissão termiônica. Atingindo o alvo (ânodo) que também é feito de tungstênio ou uma liga de tungstênio-rênio, pois estes materiais resistem a altas temperaturas. Sendo depois necessário resfriar o tubo por meio de diversas técnicas, que incluem materiais com grande massa térmica, cujo calor é extraído com circuito fechado de óleo e água corrente [2].

O espectro total de radiação emitido por um tubo de raios X consiste num espectro discreto superposto a um *continuum*, que é devido ao processo de *bremsstrahlung* que ocorre quando os elétrons do feixe são desacelerados no espalhamento produzido pelos núcleos dos átomos no ânodo. A forma do *continuum* depende sobretudo da energia do feixe de elétrons. Como exemplificado na Fig. 2.2

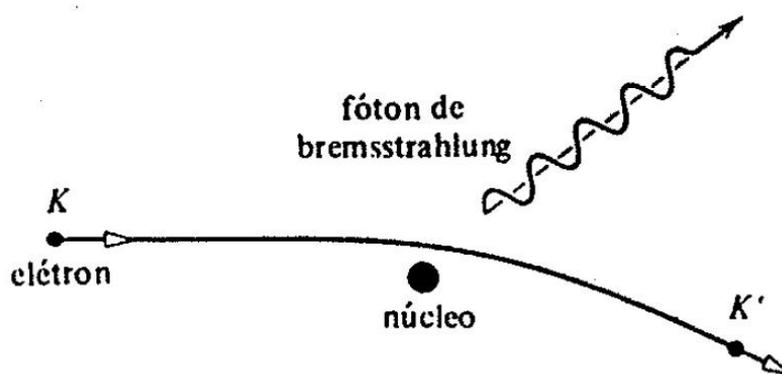


Fig. 2.4: O processo de *bremsstrahlung* responsável pela produção do espectro contínuo de raios X, onde K é a energia cinética inicial e K' a energia cinética após a colisão [5].

2.1 Tipos de processo de criação

Os dois processos fundamentais para produção de raios X são chamados de **raios X de freamento**, apresentando um espectro contínuo de energia e os **raios X característico** ou de fluorescência, apresentando um espectro discreto de linhas ou raios com energias bem definidas.

2.2 Raios X de freamento

No primeiro processo, apenas uma fração dos elétrons incidentes se aproxima do núcleo dos átomos do alvo, podendo perder uma energia considerável emitindo fóton de raios X, ou seja, esse fóton é criado quando o elétron sofre uma desaceleração brusca causada pela atração do campo coulombiano do núcleo. Por isso são chamados de raios X de freamento ou *bremsstrahlung* (*brems* = frenagem, *strahlung* = radiação), podendo ter qualquer energia, que depende da proximidade do núcleo e da energia cinética do elétron. Fazendo com que seu espectro seja contínuo, ou seja, os fótons de raios X podem ter energia variando de algo próximo de zero até um $E_{\text{máx}}$, que é toda energia cinética K do elétron ao atingir o alvo, dado por:

$$K(\text{elétron}) = eV = E_{\text{máx do fóton}} = h\nu_{\text{máx}} = hc/\lambda_{\text{mín}} \quad (2.1)$$

Onde e é a carga do elétron, V a diferença de potencial aplicada entre o cátodo e o ânodo, ν a frequência e λ o comprimento de onda da radiação. Essa relação é conhecida como Lei de Duante e Hunt [2].

A $E_{\text{máx}}$ do fóton independe do material de que é feito o alvo, mas apenas da diferença de potencial V .

A Fig. 1.8A é um gráfico de intensidade relativa (número relativo de fótons por comprimento de onda em unidades arbitrárias) em função do comprimento de onda da radiação de *bremsstrahlung*. Quanto maior a voltagem, maior a eficiência na produção de raios X, e o valor de $\lambda_{\text{mín}}$ é inversamente proporcional a V [2].

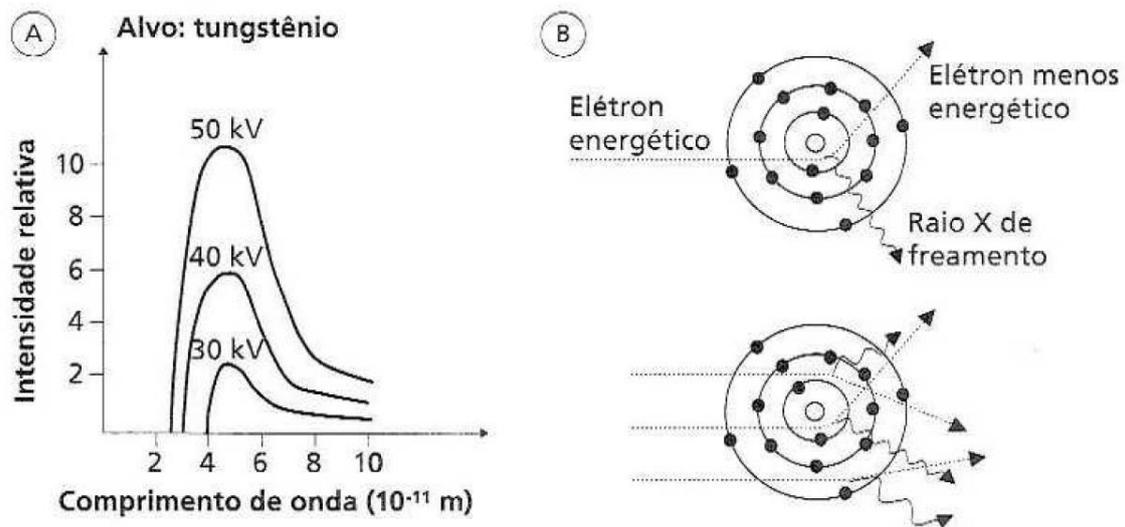


Fig. 2.5: (A) Espectro contínuo de raios X emitidos de um tubo com alvo de tungstênio, para três valores de potencial acelerador; (B) Processo de geração de um fóton de raios X de freamento, quanto mais perto do núcleo maior é o freamento e maior é a energia do fóton [2].

2.3 Raios X característicos

Discorrendo sobre o segundo processo, os raios X característico pode ser obtido no mesmo tubo dos raios X de freamento. Diferentemente do primeiro processo que independe do material de que é feito o alvo e pode ter qualquer energia com limite no valor máximo, os raios X característico mostra uma assinatura do material e possui um espectro de energia discreto. Descoberto por Charles Barkla, que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1917 [2].

No caso do discreto é, porém, característica dos átomos que compõem o ânodo. Estes casos têm interesse prático e teórico pois, além de serem utilizados em muitas aplicações tecnológicas e científicas também oferecem informações sobre as energias dos elétrons nas subcamadas internas dos átomos.

2.4 Sobre algumas propriedades importantes

Durante este período descobriu-se várias outras propriedades dos raios X:

- Há corpos mais opacos aos raios X e outros menos, por isso as imagens radiográficas ficam em tons de cinza.
- Produzem fluorescência em muitas substâncias como fósforo, compostos de cálcio, vidro de urânio, sal-rocha.

- Fazem impressão em chapas fotográficas.
- Descarregam eletroscópios carregados.
- Propagam-se em linha reta.
- Não são desviados por campos elétricos ou magnéticos.

Os feixes podem ser classificados em termos de tensão de aceleração dos elétrons que os produzem conforme indicado na Tabela 2.1.

Baixa energia ou raios X mole	0,1 – 20 kV
Diagnóstico	20 – 120 kV
Ortovoltagem	120 – 300 kV
Energia intermediária	300 – 1.000 kV
Megavoltagem	> 1 MV

Tabela 2.1: Classificação dos feixes de raios X segundo a tensão de aceleração dos elétrons que os produzem [2].

Os raios X são uma radiação eletromagnética ionizante cujo comprimento de onda é da ordem de 1Å (10^{-10} m) e frequência em torno 10^{19} Hz , diferente da luz visível que é uma radiação não ionizante, pois possui o comprimento de onda na faixa de 550 nm ($5,5$ a 10^{-7} m) e uma frequência perto de 10^{14} Hz , como detalhado na Fig. 2.2 [1].

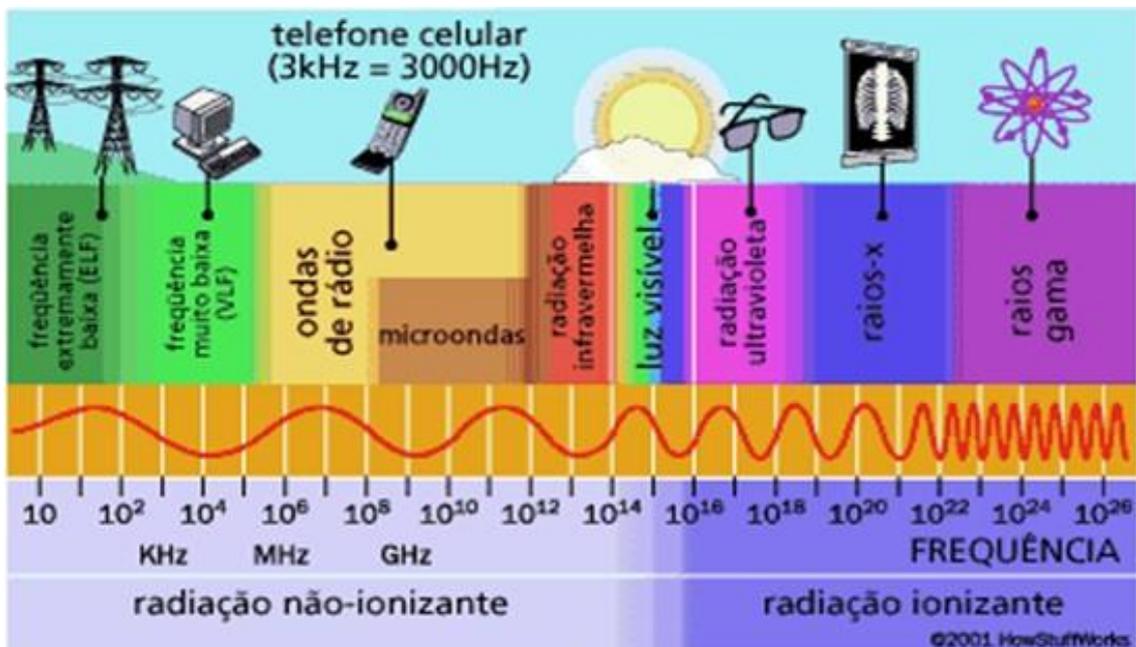


Fig. 2.6: Espectro Eletromagnético [1].

2.5 Transições de camadas alfa e beta

Supondo um elétron removido da subcamada 1s de um átomo no ânodo do tubo, na primeira etapa do processo de desexcitação, um elétron de uma das subcamadas de energia menos negativa cai no buraco da subcamada 1s; por exemplo, um elétron 2p. Isto produz um buraco na subcamada 2p, mas a energia de excitação do átomo será consideravelmente reduzida. A energia se conserva pela emissão de um fóton de energia igual a diminuição da energia de excitação do átomo, isto é, igual a diferença entre as energias associadas com a falta de um elétron nas subcamadas 1s e 2p. Tais transições são denominadas K-alfa, K-beta, L-alfa, L-beta, ou seja, A transição K-alfa ocorre quando o espaço na camada K é preenchido por um elétron da camada L imediatamente superior. A transição K-beta acontece quando o espaço é preenchido por um elétron da camada M, que está duas camadas acima da K, como mostra Fig. 2.7

Normalmente haverá várias etapas subsequentes no processo de desexcitação. O buraco na subcamada 2p poderá ser preenchido por um elétron da 3d, deixando o buraco na 3d que será preenchido por um elétron da 4p, e assim por diante. O efeito resultante de cada etapa é a passagem de um buraco para uma subcamada de energia menos negativa. Quando o buraco atinge a subcamada do átomo de menor energia negativa, normalmente a camada mais externa, ele é preenchido pelo elétron inicialmente ejetado da subcamada 1s ou, mais frequentemente, por outro elétron do ânodo, deixando o átomo novamente neutro e em seu estado fundamental [5].

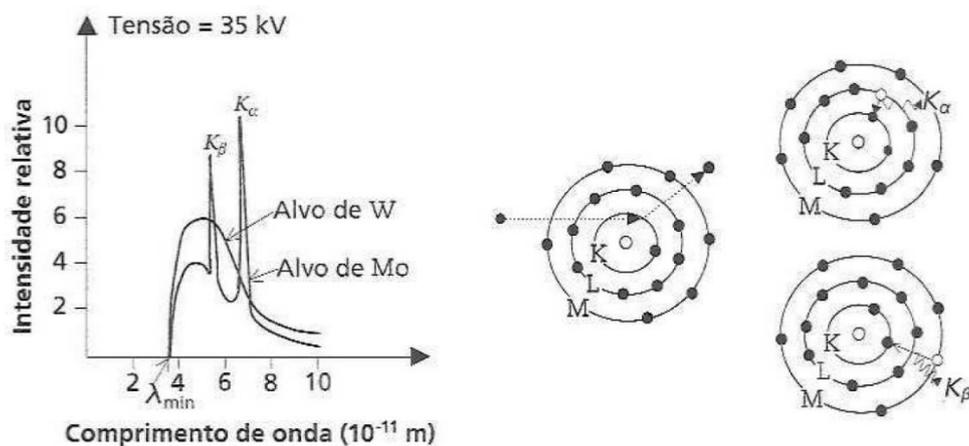


Fig. 2.7: Espectros de raios X emitidos por um tubo com alvo de Mo e por outro de W, quando elétrons são acelerados por uma diferença de potencial de 35 kV. A figura à direita mostra a ejeção de um elétron por um elétron incidente no alvo e a posterior emissão de um fóton de raios x característico K-alfa, K-beta [2].

3 Os perigos no uso da radiação

Um dos primeiros pesquisadores da época a enxergar o potencial comercial das aplicações da radiação foi o Thomas Edison que acabou percebendo os perigos ao perder seu assistente em 1904 para um câncer no mediastino. Muito embora já houvesse relatos desde 1896 de perda de cabelo e queimaduras da pele em diferentes graus de gravidade. Um engenheiro eletricitista Elihu Thomson passou a investigar irradiando a extremidade de seu dedo com raios X a uma distância de 4 cm por meia hora por dia, e em uma semana já notou seu dedo avermelhado, inchado, sensível e dolorido. Após algumas semanas ele relatou o agravamento de sua condição, e que graças a isso os radiologistas começaram a se preocupar mais com a proteção usando blombos de chumbo e filtros para limitar a intensidade e a área atingida. Foi também observado os efeitos cancerígenos, com 94 relatados já em 1911, sendo 50 deles médicos radiologistas, chegando a mais de 100 médicos radiologistas mortos em 1922 e além disso uma redução no tempo de vida dos mesmos. A pesquisa que rendeu o prêmio Nobel de Medicina em 1946 para o Hermann Muller, demonstrou que os raios X podem provocar mutações genéticas, e assim foi ficando cada vez mais evidente que a radiação provocava efeitos imediatos e tardios nos tecidos humanos [1].

Percebeu-se também que as extensões dos danos dependem basicamente:

- Do tipo de radiação, como raios X, gama, alfa, beta, etc...
- Da intensidade do feixe ou tempo de exposição.
- Da forma de exposição, ou seja, dose única ou fracionada, inteiro ou parcial, etc...
- Do órgão irradiado.
- Do intervalo entre as radiações.

A interação com a radiação ionizante segue uma sequência de eventos ou estágios, sendo:

- Estágio físico: para tempos até 10^{-14} s. Absorção e deposição de energia de radiação.
- Estágio físico-químico: para tempos de até 10^{-10} s. Nesta fase os radicais livres podem atacar moléculas importantes.
- Estágio químico: para tempos até 10^{-7} s. As reações dos radicais livres podem formar produtos tóxicos, podendo também ocorrer danos no RNA e DNA.
- Estágio químico e biológico: para tempos de 10^{-3} até 10 s. ocorre formação de radicais secundários e peróxidos orgânicos, reações bioquímicas são interrompidas.

- Estágio biológico: para tempos de 10 s até 10 h, a maioria das reações são completas, as reações bioquímicas são bloqueadas e ocorre rompimento de membrana celular.
- Estágio orgânico: as reações anteriores se tornam *sintomas*, doenças (radiodermite, câncer, catarata, leucemia, entre outras) e *efeitos genéticos*.

O efeito biológico não é necessariamente uma doença, as doenças são um desequilíbrio no organismo. Por exemplo, o câncer é o estágio final de um dano biológico ao longo de anos.

Quando a radiação atinge uma célula pode ocorrer os eventos:

- Passa através da célula sem interagir com as moléculas.
- Se atinge uma molécula, pode ou não produzir um dano.
- Se produz um dano, pode ou não ser reversível.
- O dano pode ou não levar a um efeito biológico.
- O efeito produzido pode ser morte celular, ou danos e consequências diversas na célula.

Desse modo, o efeito biológico pela interação com a radiação é de natureza probabilística.

4 Unidades, normas e grandezas físicas

O Primeiro congresso de radiologia aconteceu em Londres em 1925, partindo da comunidade médica de radiologia, e nela criou-se a *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU), cuja finalidade era estabelecer grandezas e unidades de Física das Radiações, isso possibilitaria a comparação feita em diferentes laboratórios, clínicas, institutos, etc... A primeira tarefa era encontrar uma unidade de radiação a ser usada na terapia de câncer. Três anos depois foi criada uma segunda comissão internacional, *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), em Estocolmo. Seu propósito era elaborar normas de proteção radiológica e estabelecer limites de exposição à radiação ionizante para indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE). Ambas comissões se reúnem até hoje publicando normas e novas atualizações [2].

Para estabelecer os princípios e sistemas de proteção radiológica, usa-se grandezas dosimétricas para quantificar a exposição interna e externa dos seres humanos à radiação. A externa vem de fontes de emissão de radiação de fora do corpo e a interna com radionuclídeos dentro do corpo via inalação, ingestão ou injeção. A radiação externa pode ser descrita por grandezas físicas, mas a interna depende de parâmetros biocinéticos, anatômicos e fisiológicos que são difíceis de estimar. As grandezas físicas são separadas em três principais categorias: **grandezas físicas, grandezas de proteção, grandezas operacionais**. As duas últimas foram melhor detalhadas pela ICRU e ICRP especificamente para proteção radiológica [2]. A Fig. 4.1 demonstra como estão relacionadas.

As grandezas de proteção são consideradas grandezas dosimétricas, especificadas no corpo humano, e estabelecem os limites de exposição à radiação, mas não podem ser medidas por equipamento. Nelas estão incluídas, **dose equivalente no tecido** ou **dose efetiva**, que apesar de não serem mensuráveis, podem ser avaliadas por meio de cálculo, e a unidade de ambas é o sievert que se tornou uma recomendação a partir de 1979, sendo a unidade no SI, que antes era o rem (*Röntgen equivalent man*):

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rem} \quad (4.1)$$

Para isso servem as grandezas operacionais, para monitoração de área e monitoração individual que podem ser usadas para estimar o limite superior dos valores das grandezas de proteção nos tecidos ou órgão ou no corpo como um todo exposto à radiação externa. As grandezas operacionais se relacionam com as repostas de instrumentos e de dosímetro usado na monitoração após calibração e cálculos. Entretanto,

nenhuma grandeza operacional foi definida em caso de dosimetria interna que se relaciona com as grandezas de proteção. Para relacionar as operacionais com proteção e ambas com as grandezas físicas, foram calculados coeficientes de conversão [2].

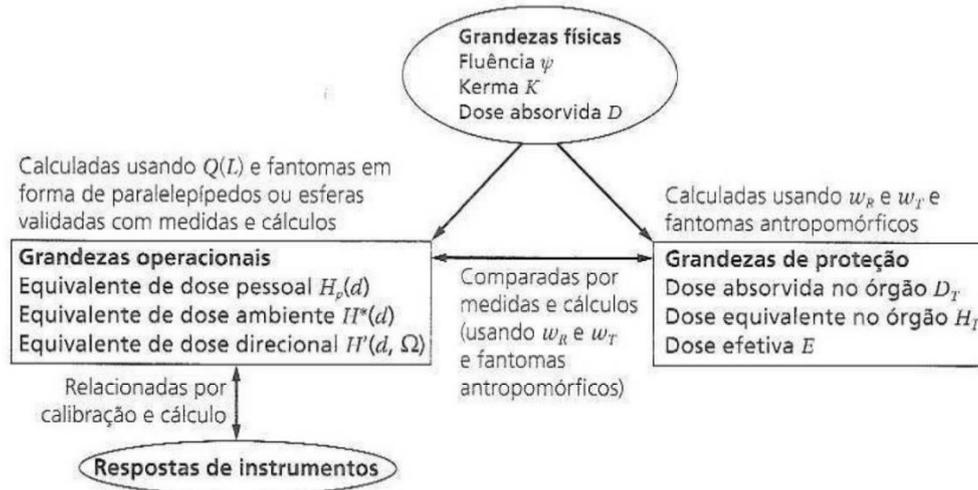


Fig. 4.1: Correlação entre grandezas físicas, de proteção e operacionais [2].

Sobre as grandezas físicas temos, Fluência refere-se à quantidade total de partículas nucleares (geralmente nêutrons) que atravessam uma unidade de área em um determinado período de tempo. É medida em partículas por centímetro quadrado (partículas/cm²).

Kerma é a abreviação de *Kinetic Energy Released per unit Mass* (Energia Cinética Liberada por Unidade de Massa). É uma medida da energia liberada no material irradiado por radiação ionizante, como raios X ou radiação gama, por unidade de massa. O kerma livre no ar é especialmente usado quando se considera a quantidade de energia liberada no ar devido à radiação ionizante. Como parte da energia transferida ao meio pode ser gasta com colisões e parte com radiação, costuma-se separar em **kerma de colisão** e **kerma de radiação**. Nas condições de equilíbrio eletrônico, o kerma de colisão coincide com a dose absorvida.

Dose absorvida é a grandeza física que mede a quantidade de energia absorvida por unidade de massa em um material irradiado. Introduzida em 1950 para ser usada principalmente em radioterapia. Sua unidade padrão no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Gray (Gy), que é equivalente a joules por quilograma (J/kg). Essa grandeza vale para qualquer meio, qualquer tipo de radiação e qualquer geometria de irradiação [2].

5 Acidente no Brasil e suas consequências

O acidente com o céσιο-137 em Goiânia, Brasil, ocorreu em 13 de setembro de 1987 e é considerado um dos piores acidentes radiológicos não relacionados a usinas nucleares na história, fazendo 4 vítimas fatais incluindo uma criança e em poucos meses outras 28 sofreram com queimaduras e 30 anos depois muitas outras morreram em decorrência do acidente. O evento ocorreu 17 meses após o acidente com reator nuclear de Chernobyl e envolveu a exposição não intencional a altas doses de céσιο-137, um isótopo radioativo altamente perigoso e o acidente foi classificado como nível 5 na escala Ines, inclusive médicos especialistas em transplante de medula óssea que tinham ido a Chernobyl também vieram a Goiânia para ajudar os acidentados. O acidente começou quando dois catadores de materiais recicláveis, que não tinham conhecimento do perigo, e levaram para casa um equipamento de radioterapia de um hospital desativado (antigo Instituto Goiano de Radioterapia). O equipamento continha o céσιο-137. Eles desmantelaram a marretadas o equipamento para separar o chumbo e acabaram atingindo a fonte radioativa. O equipamento de radioterapia era do modelo Cesapan F-3000, com fonte radioativa de céσιο-137 em forma de cloreto de céσιο, altamente solúvel. A atividade da fonte na época em que foi aberto era de 1.375 Ci, ou $5,09 \times 10^{13}$ Bq no SI, onde Bq é Becquerel e Ci é Curie, e ambos são unidades de medidas para descrever atividade radioativa. Sendo de 19,26 g a massa do cloreto de céσιο, que, misturado a um aglutinante para empastilhá-lo, totalizava 91,9 g. Tinha o formato de um cilindro metálico de 3,6 cm de diâmetro por 3,0 cm de altura. Como a meia-vida do céσιο-137 é de 30 anos, a atividade do rejeito coletado e colocado no depósito definitivo decaiu para metade em 2017.

O diretor do Departamento de Instalações Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) José de Júlio Rozental acionou o plano de emergência e ao chegar em 1 de outubro de 1987, encontrou o saco contendo parte da fonte deixado sobre uma cadeira. A taxa de dose a 1m era tal que, se uma pessoa permanecesse ali por 10 horas, receberia uma dose fatal. A primeira providência tomada por Rozental foi colocar essa fonte dentro de um recipiente com concreto. Esse é o rejeito mais radioativo dentre todos os coletados que estão hoje no depósito permanente de Abadia de Goiás.

Consequências do acidente:

- Exposição à radiação: Os catadores e pessoas próximas a eles foram expostos a doses letais de radiação ionizante. Eles experimentaram uma variedade de sintomas graves,

como queimaduras na pele, náuseas, vômitos, diarreia, queda de cabelo e danos às células sanguíneas.

- Evacuação e descontaminação: Uma vez que as autoridades perceberam a gravidade da situação, uma grande área ao redor da casa dos catadores foi evacuada. Equipes de emergência realizaram a descontaminação, retirando o material radioativo e limpando as áreas contaminadas.

- Tratamento médico: As vítimas foram submetidas a tratamento médico intensivo, incluindo transfusões de sangue e tratamento para minimizar a exposição à radiação. No entanto, algumas vítimas não sobreviveram às altas doses de radiação.

- Impacto na saúde a longo prazo: Algumas pessoas afetadas pelo acidente tiveram consequências de saúde a longo prazo, como câncer devido à exposição à radiação.

O acidente de Goiânia levou a uma conscientização significativa sobre a segurança e o manuseio de materiais radioativos no Brasil e em todo o mundo. Além disso, resultou em regulamentações mais rigorosas para a gestão de materiais radioativos e resíduos radioativos [6].

6 Proteção radiológica em análises médicas

O objetivo da proteção radiológica hoje é o mesmo de 50 anos atrás: proteger o homem contra os detrimientos das radiações ionizantes de fontes artificiais e naturais, modificadas tecnologicamente. Isso permite à sociedade gozar dos benefícios da aplicação da radiação ionizante ou de processos acompanhados pela emissão de tais radiações, com um mínimo de risco para o indivíduo e para a população.

Os efeitos biológicos podem ser divididos em duas categorias:

- Os efeitos somáticos, aqueles que aparecem no indivíduo exposto à radiação.
- Os efeitos genéticos, aqueles que aparecem nos descendentes dos indivíduos expostos.

Os efeitos somáticos surgem do dano nas células do corpo, e o dano aparece na própria pessoa irradiada. Dependem da dose total absorvida, da taxa de absorção da radiação, da região e área do corpo, e aparecem geralmente depois que a dose absorvida ultrapassa um valor limiar. Apresentam mais perigos à medida que a área exposta aumenta. Os efeitos hereditários ou genéticos surgem somente no descendente da pessoa irradiada, como um resultado do dano por radiação em células dos órgãos reprodutores, as gônadas. Tem caráter cumulativo, e independem da taxa de absorção da dose [7].

Posteriormente outro sistema de classificação de efeitos biológicos foi introduzido, estocásticos e não-estocásticos. As diferenças básicas entre eles são: Efeitos estocásticos, os quais são randômicos na natureza, são aquelas onde as probabilidades da ocorrência do efeito dependem da quantidade de dose de radiação. A probabilidade do efeito aumenta com o aumento da dose. Além disso, não há dose limiar para efeitos estocásticos. Os efeitos não-estocásticos, no entanto, são aqueles nos quais a severidade do efeito nos indivíduos expostos aumenta com o aumento da dose, e nos quais existe um limiar. Os efeitos não-estocásticos são definidos como efeitos determinísticos.

6.1 Limites de exposição à radiação

O primeiro sinal de que havia um limite para quanta exposição de radiação um indivíduo pode sustentar sem efeitos de doença surgiu nos anos de 1900. Naquele tempo, a limitação de dose foi rotulada por dose eritema pele por Mutscheller e Sievert. Esta foi definida como a dose de radiação forte bastante para produzir uma vermelhidão na pele 10 a 14 dias após a exposição. A dose eritema pele era pensada ser 6000 mSv (600 rem), e a limitação de dose para indivíduo ocupacionalmente exposto era 600 mSv (60 rem) por

ano. Desde então, o limite da dose de radiação tem sofrido várias reduções através dos anos. Em 1990, o Comitê BEIR (Comitê de Efeitos Biológicos das Radiações Ionizantes) revisou suas estimativas de riscos de radiação documentada previamente. O reporte mais recente do BEIR Reporte V (1990), estimou o risco de a radiação ser três ou quatro vezes maior do que fora estimado anteriormente. Este resultado é baseado sobre o novo modelo de risco, revisão de técnicas dosimétricas, e melhor acompanhamento daqueles indivíduos que foram expostos resultantes de explosão de bomba atômicas em Hiroshima e Nagasaki. Esta melhor revisão levou o ICRP de 1991 a mudar suas recomendações anteriores do limite de dose para indivíduo ocupacionalmente exposto, de 50 mSv (5 rem) por ano para 20 mSv por ano. O NCRP, por outro lado, não adotou este limite por enquanto, e recomendou 50 mSv/ano [8].

O termo tolerância dose foi usado para descrever um nível aceitável de exposição e parecia sugerir um limiar de dose abaixo do qual nenhum dano da radiação ocorrerá. Depois o termo tolerância dose foi substituído por outros termos, a dose máxima permissível (MPD), uma dose permissível maior que não é esperada resultar em um efeito de radiação significativa. Em outras palavras, embora doses abaixo da MPD produzisse nenhuma resposta nem somática e nem genética, doses no nível do MPD seria associado com um risco pequeno. Este risco pequeno é excedido em valor pelo benefício potencial a ser ganho. O MPD pode ser calculado usando a seguinte formula: $MPD = (N - 18) \text{ rem}$, onde N é a idade em anos. Atualmente, esta regra foi substituída por dose equivalente de 10 mSv x idade em anos (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP, 1987).

Das diversas modalidades de imagem em radiologia, os mais conhecidos são radiografia convencional, fluoroscopia, mamografia, tomografia computadorizada.

6.2 Radiografia

Sobre a radiografia Fig. 6.1, um dos maiores fatores que afetam a exposição do paciente é o da área do feixe incidente sobre o paciente. O técnico pode limitar esta área, pois o feixe de radiação que sai do tubo é largo, então depois de filtrado ele é colimado para a área de interesse do paciente, reduzindo assim a dose de radiação total. Durante a exposição, o feixe é fixado em uma posição, passa através do paciente e cai sobre o receptor de imagem (filme/écran) que depois são processados em uma processadora química. São os fatores técnicos, os quais determinam a densidade e o contraste da

imagem radiográfica. Esses fatores são a kilovoltagem (kV), a corrente em miliampère (mA), e o tempo de exposição, em segundos (s). Enquanto a corrente determina a densidade da radiografia, a kilovoltagem afeta em especial o contraste. É importante perceber que esses fatores também afetam a dose do paciente, pois a energia afeta a penetração do feixe de radiação, enquanto a corrente afeta a quantidade de radiação incidente sobre o paciente. Técnicas com alta energia e baixa corrente resultam em menos dose para o paciente (pois mais radiação é transmitida através do paciente do que absorvida pelos tecidos do mesmo) quando comparadas com técnicas de baixa energia e alta corrente, que resultam em mais dose para o paciente já que mais radiação é absorvida [7][8].

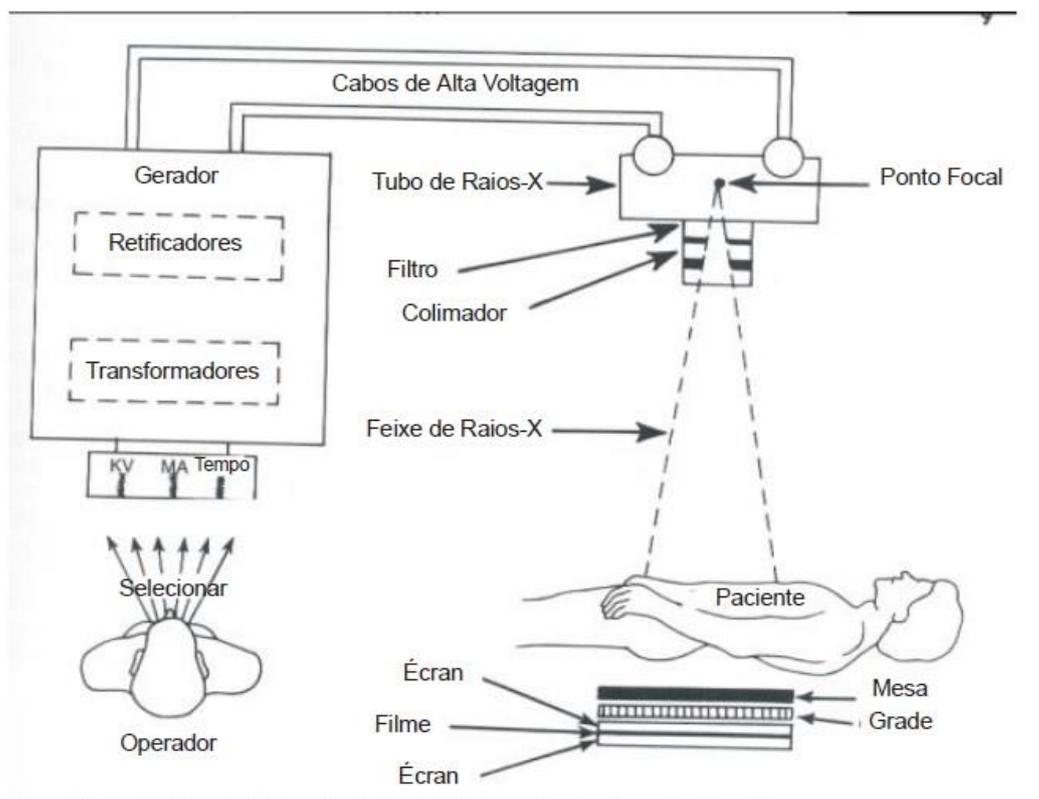


Fig. 6.1: Esquema básico para exposição de pacientes em radiografia convencional [7].

6.3 Fluoroscopia

A fluoroscopia Fig. 6.2, parecido com os fatores que afetam a exposição em radiografia, mas, com pequenas diferenças. Na fluoroscopia a exposição do paciente dura vários minutos, o radiologista grava as imagens em um filme, e nessa situação o equipamento é capaz de alternar entre os fatores de fluoroscopia e fatores técnicos de

radiografia. Enquanto o feixe na radiografia se mantém fixo e expõe uma pequena região do corpo, o feixe na fluoroscopia deve cobrir uma região maior do corpo, pois a natureza do exame indica que o feixe serve para escanear a anatomia em questão. As chaves de fatores técnicos fluoroscópicos são a baixa corrente e alta kilovoltagem. Podendo usar técnica de magnificação para aumentar os detalhes, após a conclusão do exame fluoroscópico é realizado um radiográfico. O receptor de imagem é um tubo intensificador de imagem cujos filmes também são processados no processador químico [7][8].

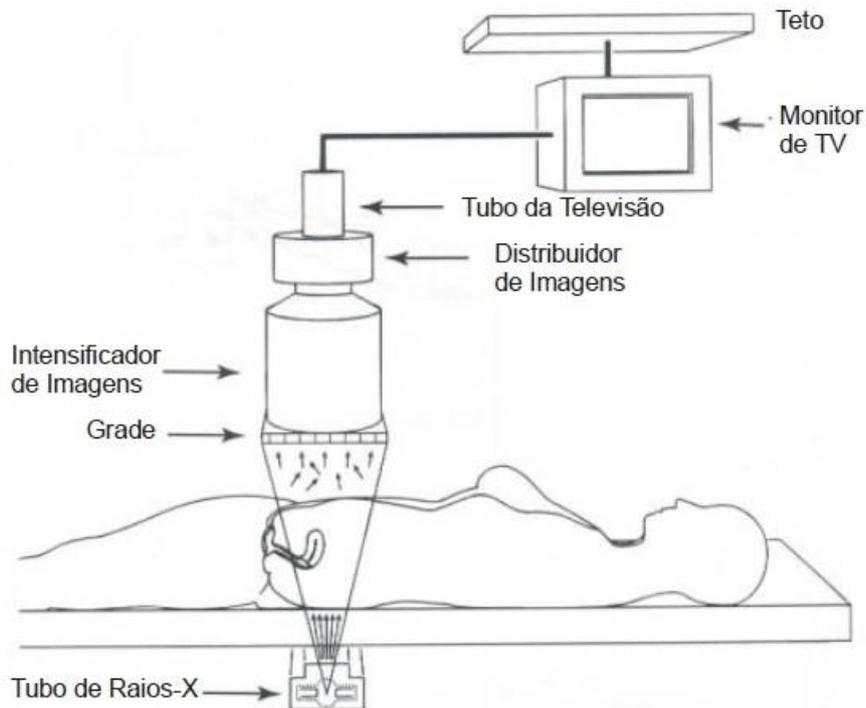


Fig. 6.2: Esquema geral para fluoroscopia. Exposição de paciente grávida em radiodiagnóstico [7].

6.4 Mamografia

A mamografia, devido o tecido mamário ser mole a mamografia é considerada uma radiografia de tecidos moles. A maior diferença com a radiografia convencional diz respeito ao espectro de raios X necessário para se obter imagens de tecidos moles. O espectro é obtido utilizando-se um alvo de molibdênio com técnicas de baixa kilovoltagem para se obter uma absorção diferencial pelos tecidos moles. Com as técnicas de baixa kilovoltagem, o número de miliampères necessários na mamografia é consideravelmente alto. A radioproteção em mamografia é de vital importância não só por causa das altas doses, mas também por causa da sensibilidade da mama à radiação. Os fatores que afetam a dose incluem os fatores técnicos de exposição (kV, mA), alvo do

tubo, filtração, ponto focal, tipo de receptor de imagem, processamento do filme, composição da mama e da lesão, espessura e forma bem como DFI (Distância fonte receptor de imagem ou distância do ponto focal do tubo de raios X para o chassi do filme).

6.5 Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada Fig. 6.3, se utiliza de um computador para reconstruir as imagens baseadas em transmissões quantificadas de raios X gravadas por um detector. A geometria do feixe é significativamente diferente da usada em radiografia e fluoroscopia, nela o feixe de radiação altamente colimado passa através de fatias muito finas do corpo. A anatomia pode ser escaneada fatia a fatia ou em grande volume. O tubo de raios X gira ao redor do paciente para criar imagens com cortes trans-seccionais do corpo. O feixe de radiação alcança os detectores que têm várias propriedades diferentes quando comparado com o filme, podendo ser registrada em uma fita magnética, disco rígido ou mesmo em filmes que vão para o processador químico [7][8].

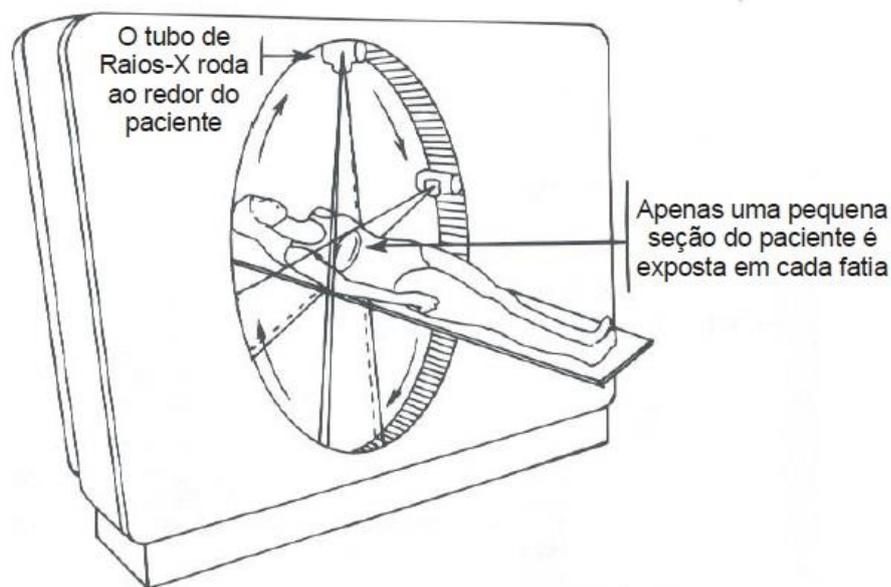


Fig. 6.3: Exposição do paciente em Tomografia Computadorizada. Um feixe de raios X altamente colimado passa através de uma seção transversal bem fina do paciente [7].

7 Difração de raios X

Um fenômeno físico quando uma onda encontra um obstáculo é chamado de difração, e utilizando-se de um difratômetro (Fig. 7.1) de raios X que bombardeia um material com o feixe enquanto gira, fazendo uma varredura, podemos determinar diversas propriedades do material. Com um método conhecido como Rietveld pode-se fazer uma análise quantitativa de fases e a determinação de estruturas cristalinas. Com a utilização de programas como FullProf, podemos fazer o refinamento e os picos desses gráficos irão determinar as características de cada material [9].

Dos métodos de difração, temos:

Método:	λ (comprimento de onda)	Θ (ângulo)
Laue	Variável	Fixo
Rotação do Cristal	Fixo	Variável
Pó	Fixo	Variável

Tabela 7.1: Métodos de Difração [9].



Fig. 7.1: Difratômetro de Raios X, XRD-6100 [9].

Com a difratometria é possível adquirir informações acerca do tamanho, parâmetros, orientação e até mesmo imperfeições dos cristais que compõem o material estudado. Se um feixe incidir sobre uma rede cristalina periodicamente espaçada, dependendo do ângulo de incidência será observado uma interferência construtiva ou destrutiva. A condição necessária para que os raios X seja refletido fazendo uma interferência construtiva é que a diferença de caminho ótico percorrido entre os feixes seja um múltiplo inteiro do comprimento de onda dos raios X [4].

Tem extrema importância no estudo de cristais já que não é possível por meio da microscopia óptica, a difração consiste em estudar a forma como a estrutura cristalina difrata ondas. A combinação da alta intensidade do feixe e coerência das ondas eletromagnéticas e um espectro contínuo possui um grande número de vantagens sobre as fontes de laboratório por sua precisão. Quanto maior a resolução, maior a nitidez e mais bem resolvidos são os picos de difração, e assim sendo, as posições destes picos podem ser determinadas com maior precisão. O que favorece na hora de indexar os padrões de interferência e atribuir corretamente o grupo espacial das fases iniciais na solução da estrutura. O controle da forma da linha é importante para o refinamento Rietveld [10].

Considerações finais

Concluindo, o objetivo deste trabalho é fazer uma revisão bibliográfica sobre a segurança na utilização de raios X para instigar as pessoas um maior interesse numa área tão importante no nosso dia a dia, e para isso foi feito um breve resumo histórico, do seu surgimento até atualidade, incluindo sua chegada no Brasil, as principais características e produção deste tipo de radiação afim de entender melhor, assim como se proteger, incluindo seu uso nos exames médicos. Atualmente esse assunto está bem estabelecido e inclusive comissões internacionais são regularmente atualizadas de modo a estabelecer normas cada vez mais seguras para os envolvidos, de médicos e pacientes até cientistas que trabalham principalmente usando os raios X para identificação de materiais. A literatura envolvida é vasta, e deixa claro que sempre haverá riscos envolvidos e o que é feito é basicamente uma análise de custo benefício. De fato, possui diversas vantagens e que com os devidos cuidados podemos fazer um ótimo uso da radiação ionizante e que esse trabalho desperte o interesse das pessoas nos raios X.

REFERÊNCIAS

- [1] Ricardo A. Terini, Ana Carolina B. Machado. “Uma Introdução à Física Médica” - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.
- [2] Emico Okuno, Elisabeth Matheus Yoshimura. “Física das Radiações” - São Paulo: Oficina de Texto, 2010.
- [3] Leyton, F , et. al. “Riscos da Radiação X e a Importância da Proteção Radiológica na Cardiologia Intervencionista: Uma Revisão Sistemática”. Rev. Brás Cardiol Invasiva. 2014; 22.
- [4] G. S. Dias, “Mecanossíntese e caracterização de cerâmicas de $\text{Bi}(1-x)\text{LaxFeO}_3$ obtidas por diferentes rotas de sinterização.” Tese (Doutorado em Física), Universidade Estadual de Maringá, 2010
- [5] Robert M. Eisberg & Robert Resnick. “Física Quântica”. - Campus-Elsevier, 1988.
- [6] Emico Okuno. “Radiação - efeitos, riscos e benefícios” - São Paulo: Oficina de Texto, 2018.
- [7] ASPR. “Proteção Radiológica - I” - Proteção Radiológica e Controle de Qualidade Ltda.
- [8] ASPR. “Proteção Radiológica - II” - Proteção Radiológica e Controle de Qualidade Ltda.
- [9] Aline A. Pereira, Glécilla C. de S. Nunes, Marlon I. V. Cuadros, Reginaldo Barco. “Difratometria de Raios X” - Universidade Estadual de Maringá, 2023
- [10] I. B. Catellani, "Estudo Experimental e Teórico de Propriedades Estruturais, Ferroicas e Multiferroicas de Compostos Baseados no BiFeO_3 ." Tese (Doutorado em Física), Universidade Estadual de Maringá, 2016