

Universidade Federal do ABC

Produção de raios X e aniquilação por pares

Disciplina: Mecânica Quântica (PEF-103)

Nome: Ederson Cesar Perucini



Cronograma:

1º ETAPA: Breve Histórico (Descoberta dos Raios X)

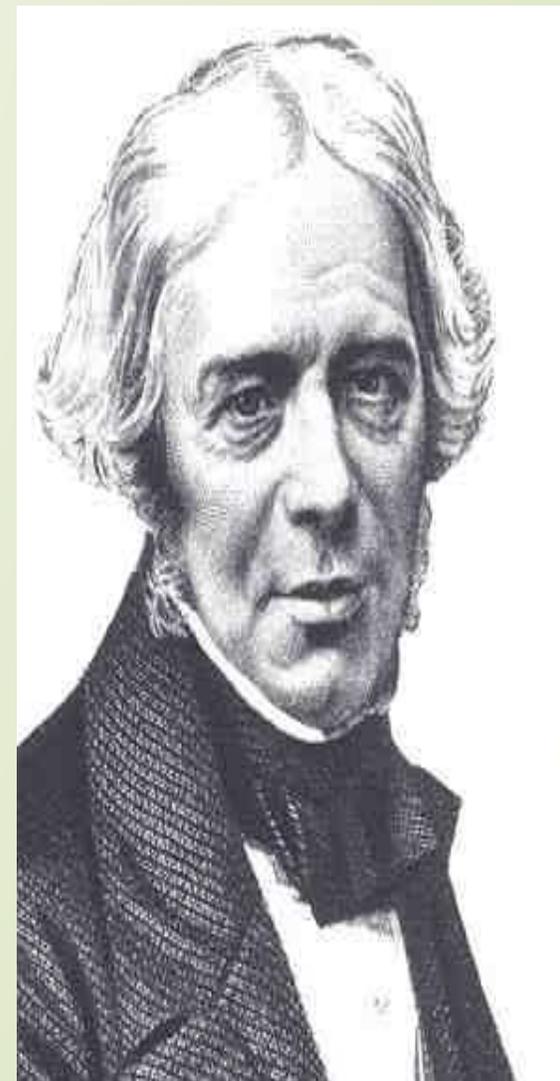
2º ETAPA: Produção de Raios X

3º ETAPA: Aniquilação por pares

4º ETAPA: Aplicações dos Raios X

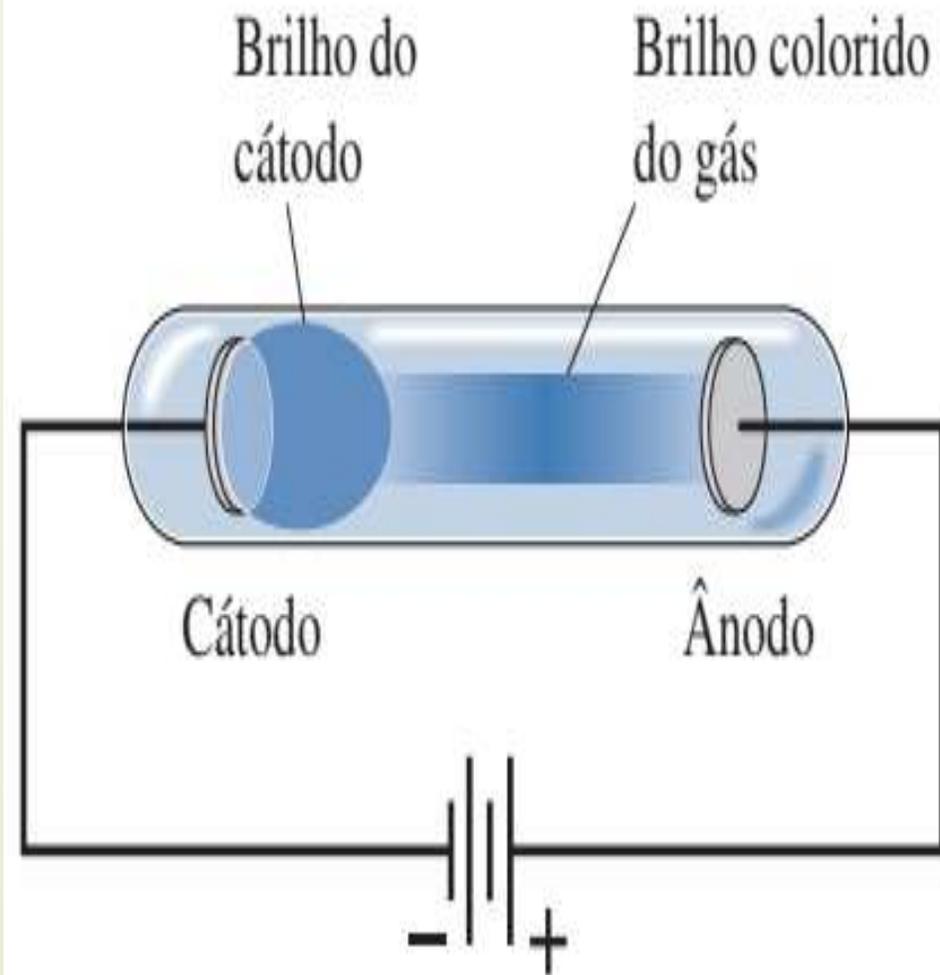
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ 1838: O físico inglês Michael Faraday (1791–1867), realizou uma série de experimentos com descargas elétricas em gases rarefeitos, ligando definitivamente seu nome à descoberta dos raios catódicos. Todavia, devido às dificuldades técnicas com a produção de vácuo de boa qualidade, esses trabalhos só tiveram novo impulso vinte anos depois.



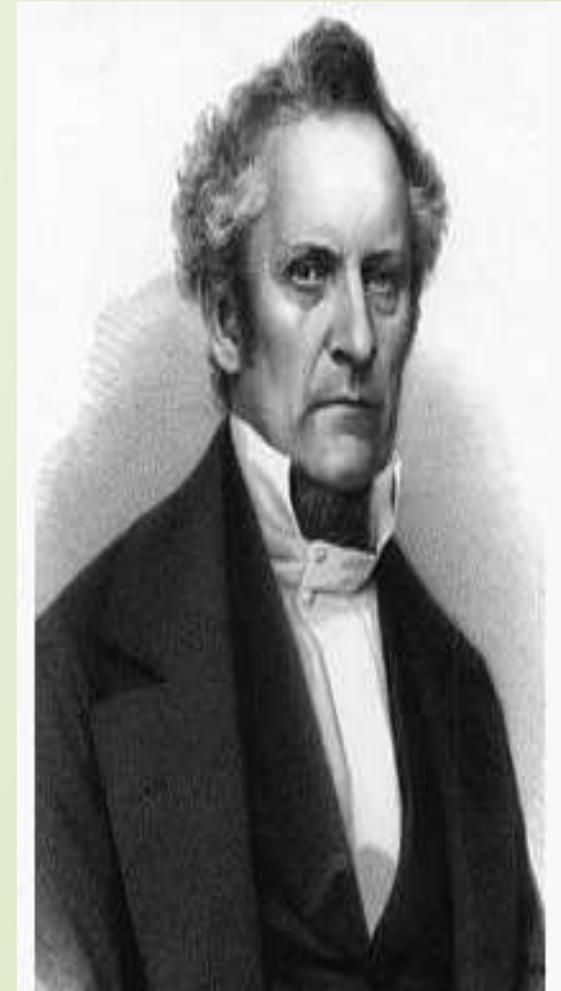
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1. A corrente flui através de um tubo de gás a baixa pressão, na forma de uma descarga elétrica.
2. A cor da luz emitida pela descarga depende do tipo de gás no tubo.
3. Independentemente do tipo de gás, existe um brilho constante em volta do eletrodo negativo (i.e., o cátodo), chamado de brilho catódico.



Contexto Histórico (Descoberta do Raios-X)

→ 1858: O cientista alemão Julius Plücker (1801–1868), começou a estudar os tubos de descarga de gás (Faraday), utilizando gases a baixas pressões.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

- 1. À medida que a pressão era reduzida, o brilho colorido do gás diminuía e o brilho catódico se tornava mais alongado.**
- 2. Se o brilho catódico se estendia até a parede de vidro do tubo, o vidro emitia um brilho esverdeado no local.**

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ 1869: O físico alemão Johann Wilhelm Hittorf (1824–1914), discípulo de Plücker, ao aproximar do “feixe luminoso” um ímã, notando que este sofreu desvio, havia concluído que os raios catódicos não podiam ser luz, pelo que não ter sido desviado por um campo magnético (Substituiu o catodo plano por uma superfície metálica côncava).



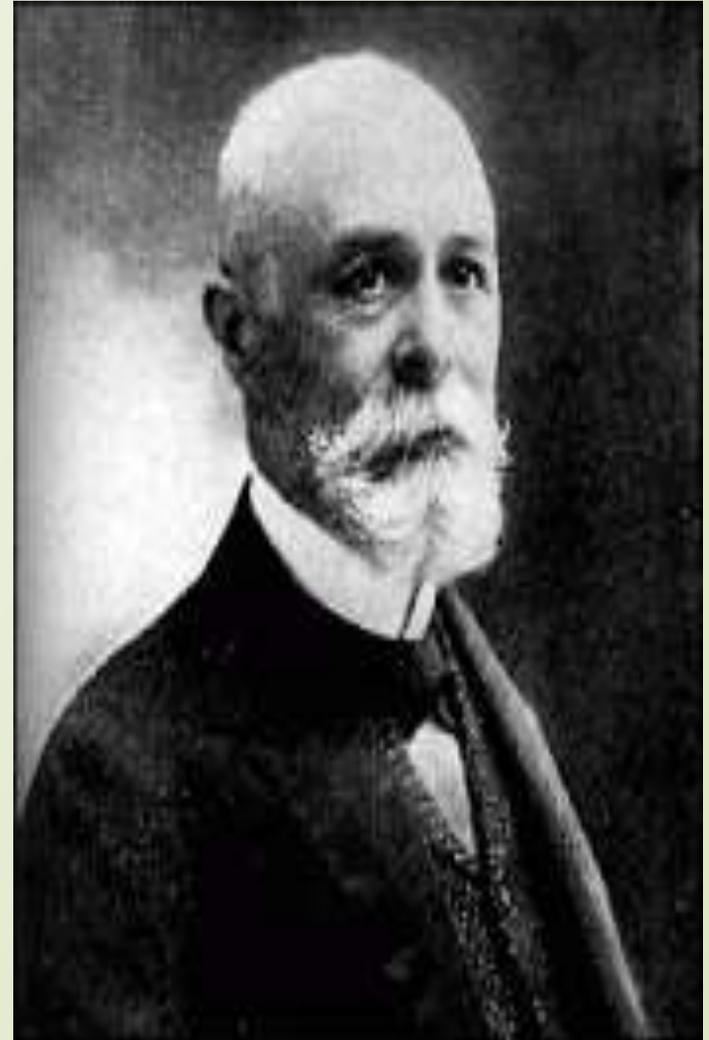
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Alguns anos mais tarde, o seu discípulo Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), descobriu que, quando um objeto sólido é colocado na região do brilho catódico produz uma sombra.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1876: O físico alemão Gotthilf-Eugen Goldstein (1850-1930), adicionou no interior do aparato cátodos côncavos com objetivo de acentuar a projeção da radiação. Como consequência dos estudos da radiação luminosa originada do eletrodo negativo, chamou a emissão catódica de raio catódico.



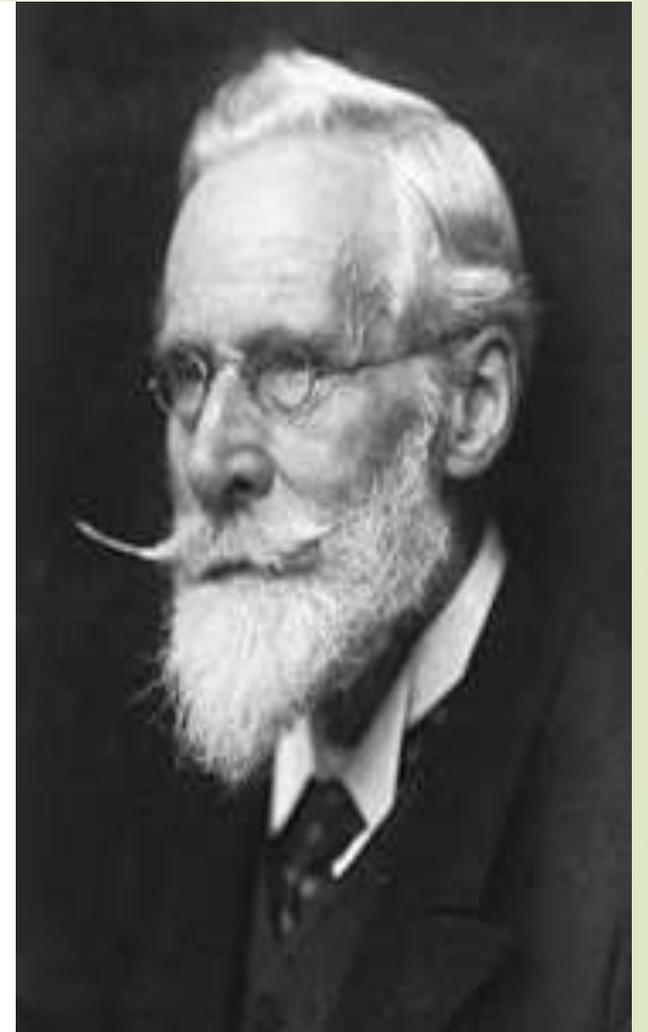
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Ela se movia do cátodo para o ânodo quando esses polos se encontravam afastados dentro de uma ampola de vidro preenchida por um gás rarefeito.

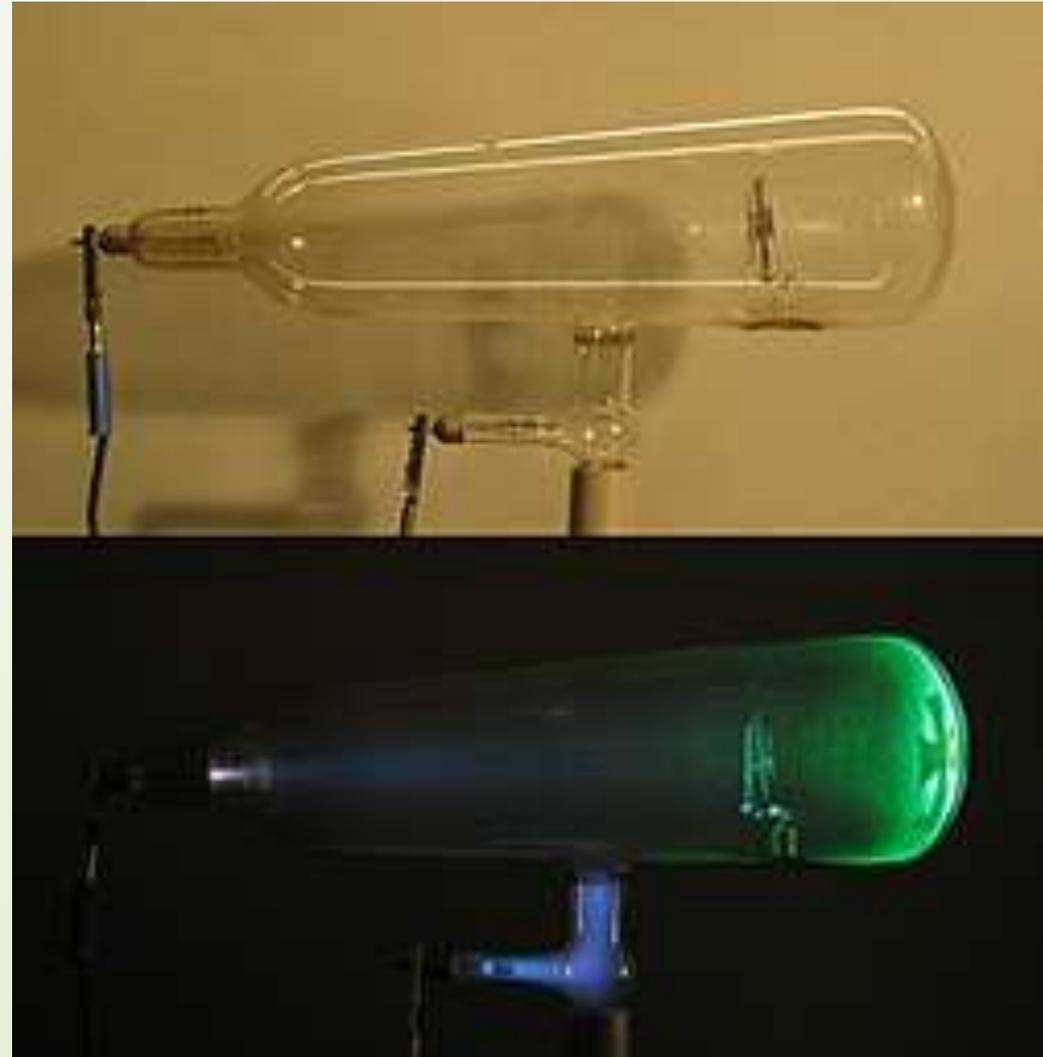
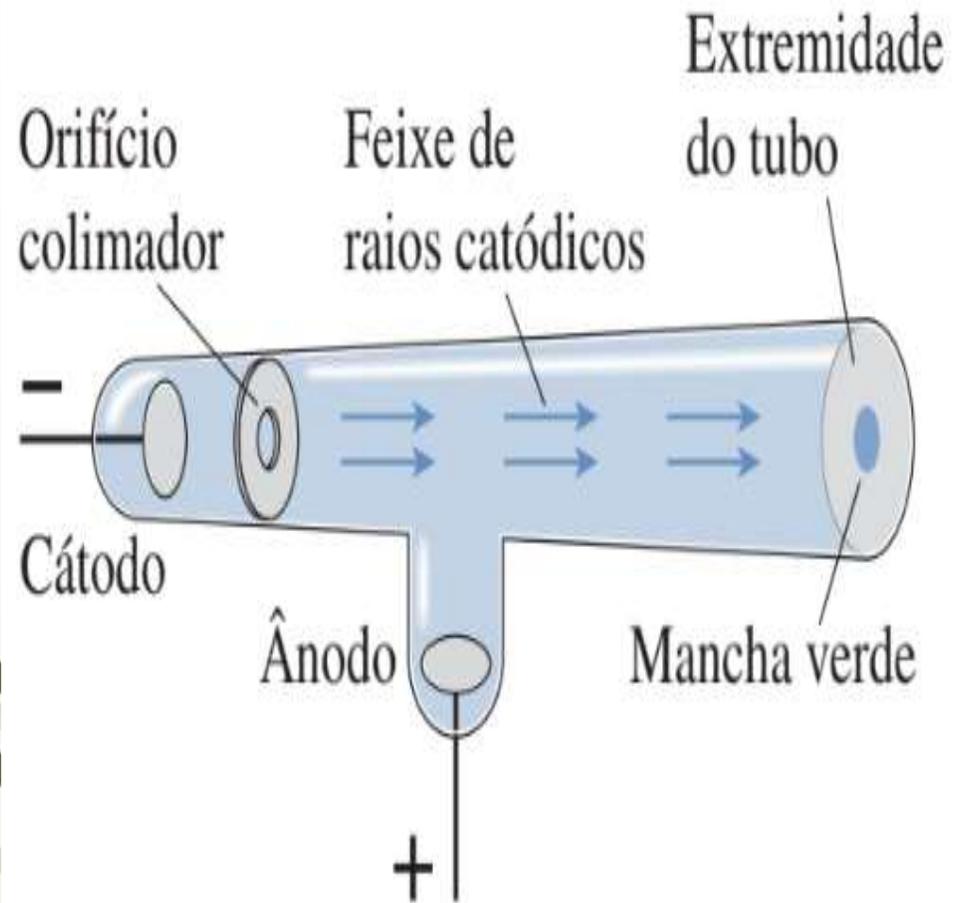


Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1879: O cientista inglês William Crookes (1832-1919), Ele desenvolveu um conjunto de tubos de vidro que podia ser utilizado para estudos minuciosos dos raios catódicos. O resultado obtido foi um feixe bem-definido de raios catódicos que formava um pequeno ponto brilhante no local onde o raio atingia a extremidade final do tubo.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ Crookes se dedicou a entender a origem da emissão dos raios catódicos, sua natureza material e sua carga, se positivamente carregado ou negativamente carregado (O experimento revelou que a natureza do raio emitido pelo cátodo é negativa e sofrem mudanças nas suas trajetórias quando expostos a campos magnéticos).

→ Observou que modificando a energia que alimentava a bobina (mantendo a pressão), o único efeito causado foi o aumento ou diminuição da intensidade luminosa ao redor do polo positivo.

→ A cor depende do tipo de vidro usado. O vidro alemão fornece uma luz fosforescente de cor esverdeado. O vidro inglês fornece uma luz fosforescente de cor azul; o vidro de urânio fica verde; um diamante se tornou azul brilhante.

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Parece, finalmente, que temos nas nossas mãos, e sob nosso controle, as pequenas partículas indivisíveis que, com boa margem de certeza, parecem constituir a base física do Universo.

William Crookes

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1884: O físico britânico Joseph John Thomson (1856-1940), iniciou seus estudos sobre a natureza dos raios catódicos. Thomson estabeleceu que, além de campos magnéticos, os raios eram desviados também por campos eletrostáticos.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1893: O cientista Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894), demonstrou interesse nos raios catódicos. No seu trabalho, Hertz evidenciou que o imã afetava o deslocamento dos raios catódicos, confirmando a produção de Crookes. Hertz buscou identificar as propriedades eletrostáticas dos raios catódicos e acreditou que não eram moléculas carregadas, mas alguma forma de luz. Porém ao considerar que os raios catódicos se assemelhavam a luz, presumimos que isso pode ter despertado a comunidade científica para uma maior atenção as propriedades relacionadas a fosforescência no tubo de vidro, após a colisão dos raios catódicos.



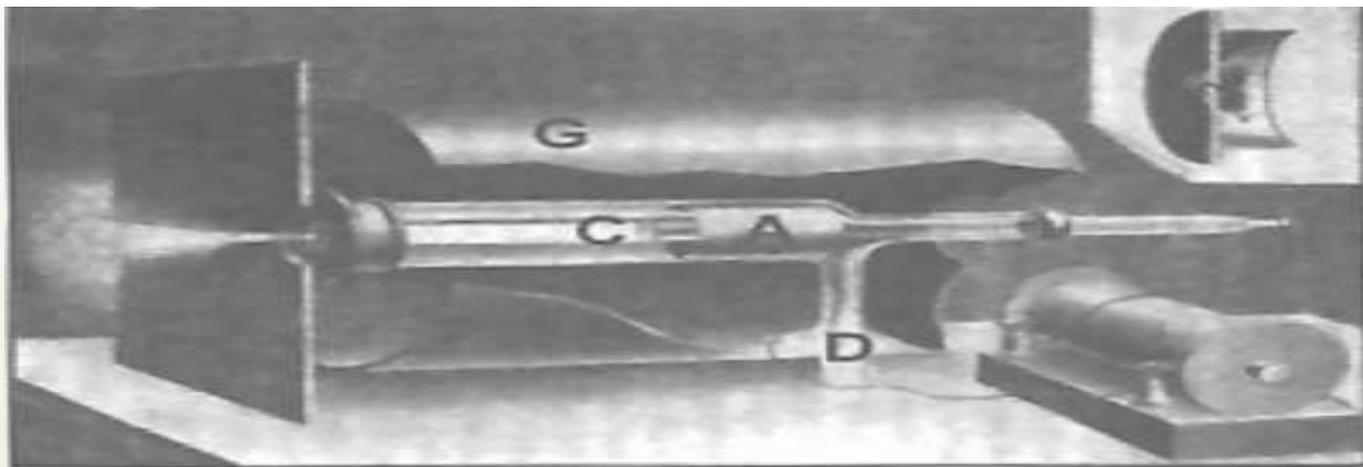
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1894: O físico alemão Philipp Lenard (1862–1947), foi assistente de Hertz e recebeu o Nobel em física por seus estudos com os raios catódicos publicando-os em 1894. Hertz, então, chamou Lenard e mostrou que quando o urânio foi coberto por uma lâmina de alumínio, brilhava quando era incidido os raios catódicos.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Lenard verificou que os raios catódicos após atravessarem a janela de alumínio se espalham em todas as direções “como um arbusto”. Afirmou que a janela de alumínio é mais vantajosa que o vidro, “porque o alumínio é opaco e muito mais leve”, o que direcionaria melhor os raios catódicos para verificar suas propriedades no meio externo. Com esse dispositivo, verificou que os raios eram capazes de impressionar chapas fotográficas e de tornar fluorescentes certos materiais (platino-cianeto de bário).



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1895: O físico e engenheiro alemão Wilhelm Röntgen (1845-1923), publicou um artigo, 50 dias depois de ter descoberto os raios X, através de experiências iniciais que se tratavam de ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda da ordem de 10^{-10} m.



Prêmio Nobel de Física (1901)

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Ao contrário dos raios catódicos, os raios X não são desviados por campos eletromagnéticos; entretanto, Röntgen, verificou, mais tarde, o poder de penetração desses raios e compreendeu que o seu centro de irradiação em todas as direções é o lugar da parede do tubo de raios catódicos onde a fluorescência é mais forte.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Outra diferença muito marcante entre o comportamento dos raios catódicos e os raios X reside no fato de (...) eu não ter obtido uma deflexão dos raios X por um imã, mesmo com campos magnéticos muitos intensos.

Wilhelm Röntgen

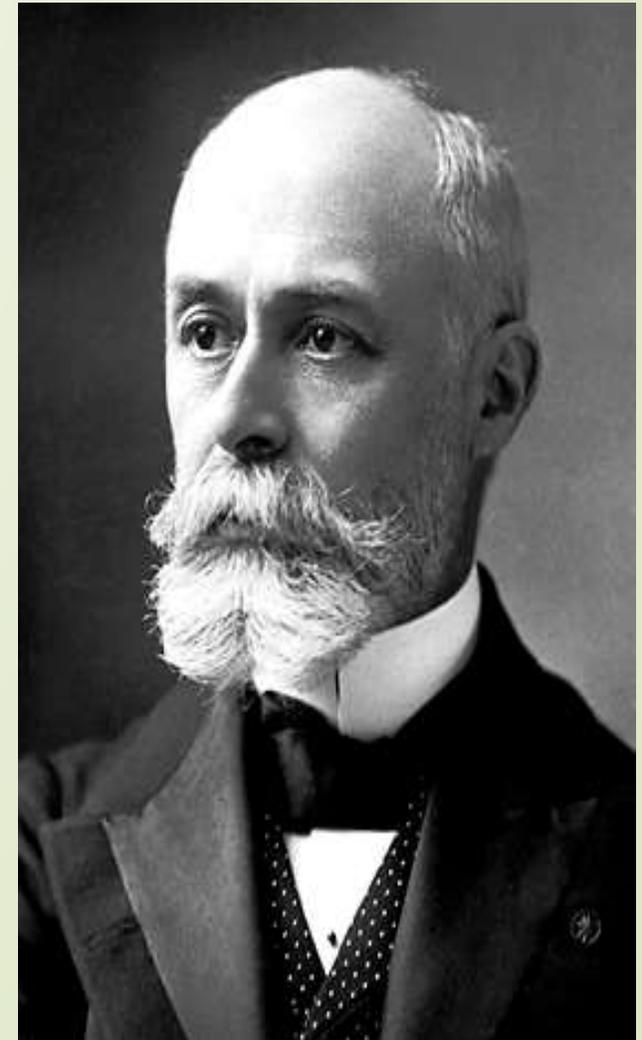
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ 1896: O físico inglês Sir George Stokes (1819–1903), demonstrou que os raios X são produzidos pela desaceleração de partículas carregadas, um fenômeno que ocorre quando, por exemplo, elétrons com alta energia penetram num material pesado! Ou, na linguagem da época, quando os raios catódicos penetram num material pesado!



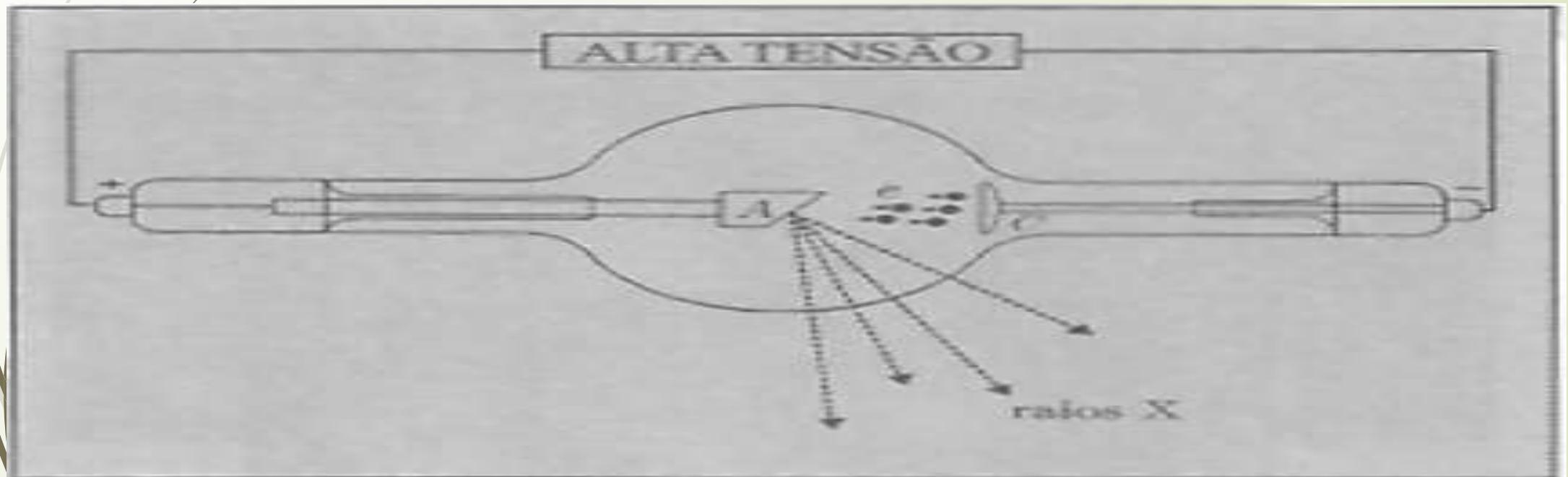
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ 1896: Após tomar conhecimento da descoberta de Röntgen, o cientista francês A. H. Becquerel (1852-1908), investigou se certos cristais minerais, conhecidos por ficarem fluorescentes após exposição ao Sol, emitiriam raios X.



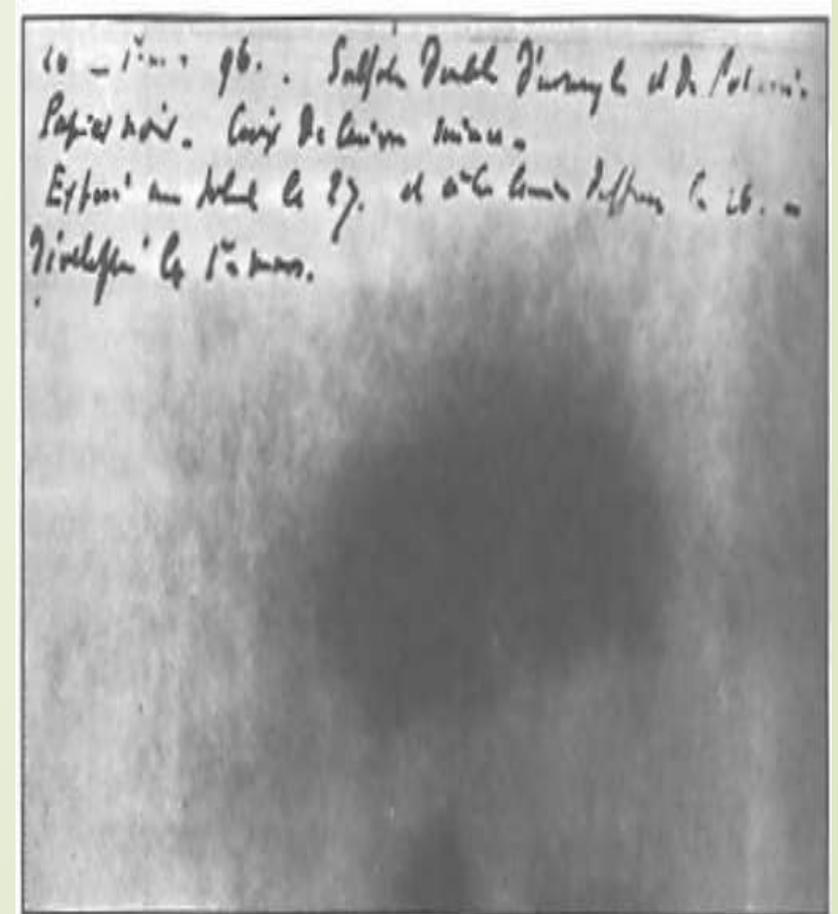
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ **1896: A descoberta do raio-X, contribuiu para a sua utilidade em diagnósticos médicos, nos principais hospitais da Europa.**



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ 1897: Os trabalhos de Becquerel foram refeitos pela polonesa Maria Sklodowska (1867-1934), conhecida como Madame Marie. Considerando os efeitos fotográficos e elétricos semelhantes ao raio-X, ela observou uma enorme diferença desses raios, quanto ao poder de penetração (Becquerel não descobriu o raio-X).



Raios de Becquerel

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ 1900: O físico inglês George Paget Thomson (1892-1975), desenvolveu uma teoria clássica de espalhamento de raios X por átomos (conhecido por espalhamento Thomson). Ele considerou que os raios X como sendo um feixe de ondas eletromagnéticas cujo o campo elétrico oscilante interage com as cargas dos elétrons do alvo.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Alguns raios X são espalhados ao passar pelo cristal e formam uma figura de interferência que impressiona o filme. (A maioria dos raios X passa em linha reta pelo cristal.)

Tubo de raio X

Tela de chumbo

Cristal fino

Feixe de raios X

Placa fotográfica

Os elétrons atômicos absorvem energia do feixe de raio X incidente e o espalha em todas as direções, sem modificar seu comprimento de onda.

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

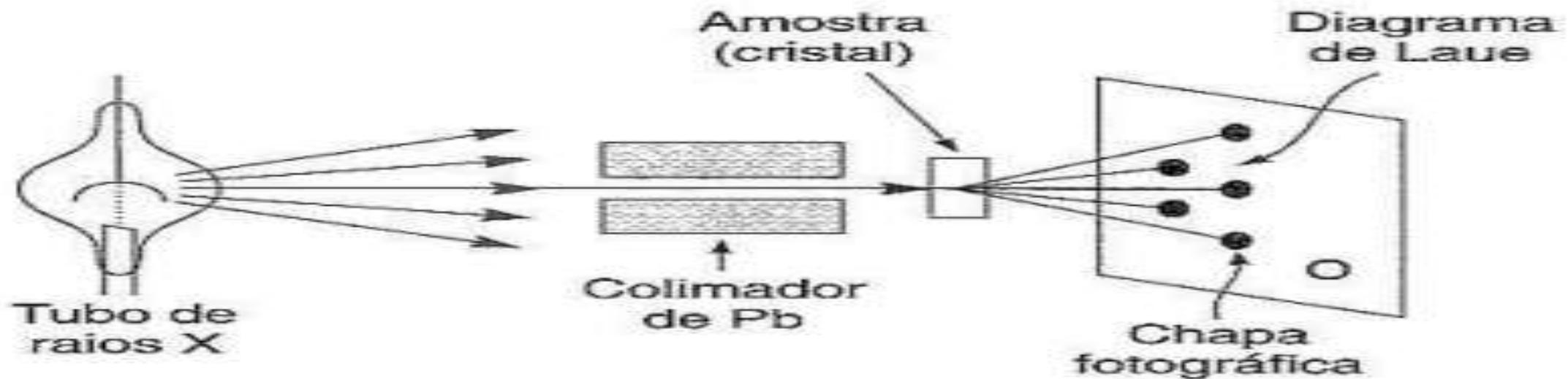
1912: O físico alemão Max von Laue (1879-1960), teve a brilhante raciocínio de usar um cristal que poderia servir como uma espécie de rede de difração tridimensional para raios X. Isto é, um feixe de raios X poderia ser espalhado (ou seja, absorvido e reemitido) pelos átomos individuais de um cristal e as ondas espalhadas poderiam interferir de modo análogo ao das ondas provenientes de uma rede de difração.



Prêmio Nobel em 1914

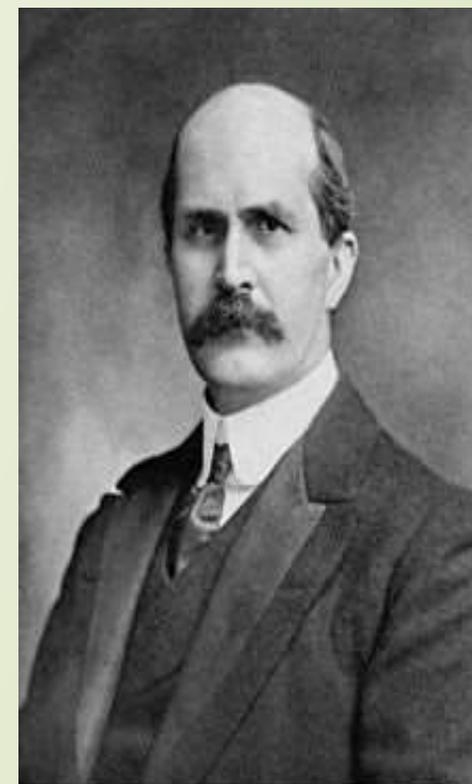
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

A concepção ondulatória dos raios X só foi reforçada em 1912, quando von Laue propôs o experimento da difração pela estrutura ordenada dos materiais cristalinos, realizado pelos físicos experimentais alemães, alunos de von Laue, Walther Friedrich e Paul Knipping.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

1913: O físico e químico britânico William Henry Bragg (1862-1942), em parceria com o seu filho, físico australiano William Lawrence Bragg (1890-1971), introduziram uma nova técnica de observação da difração dos raios X. Os Bragg empregaram radiação X monocromática, variando os ângulos de incidência (por rotação do cristal) até obter máximos principais.



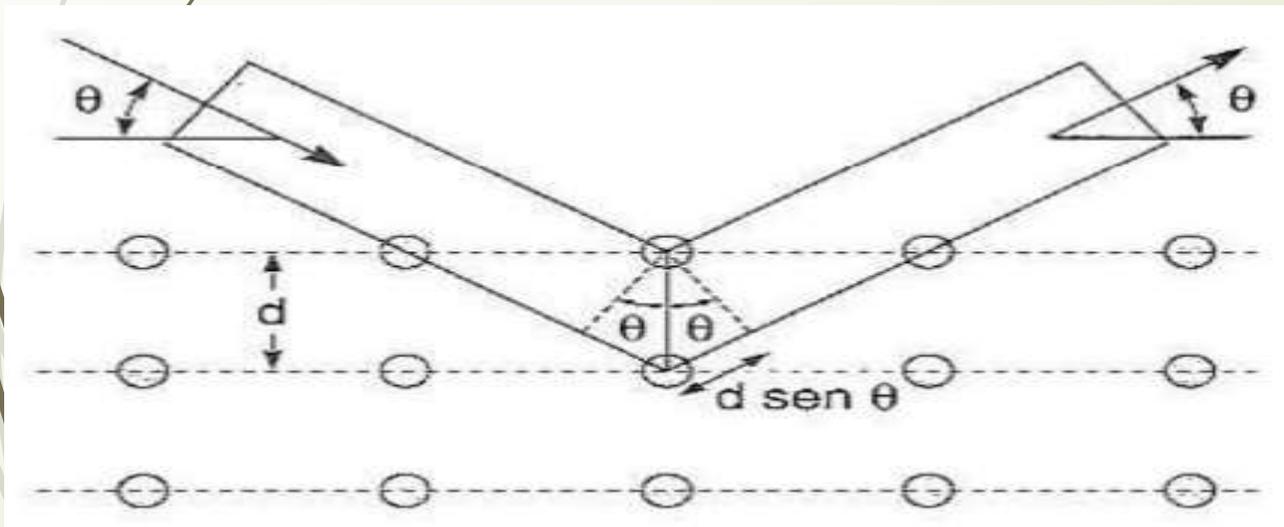
W.L.Bragg

Prêmio Nobel em 1915

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Existem duas condições para se ter interferência construtiva dos raios X espalhados:

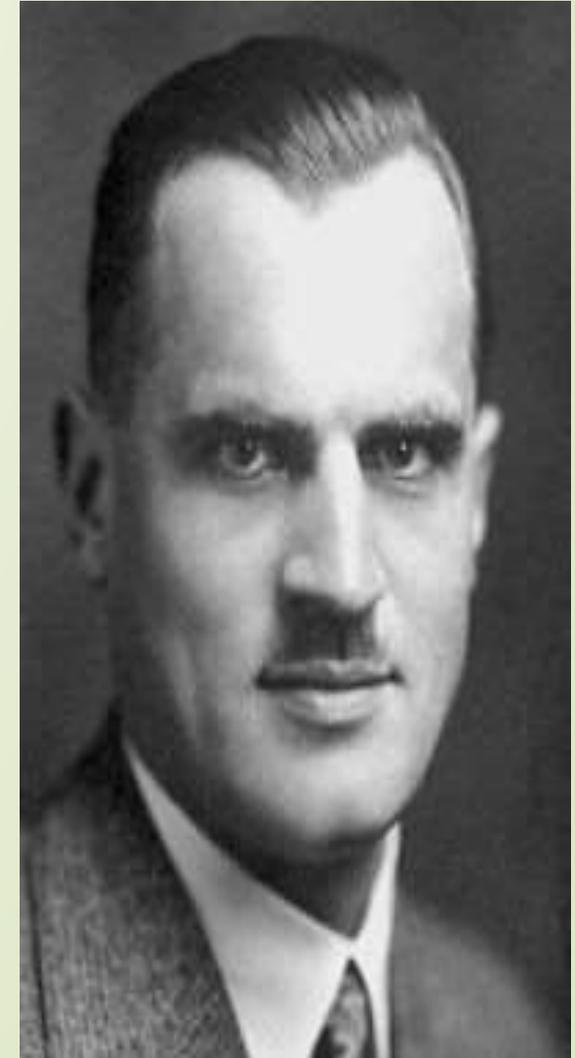
- 1. O ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo de “reflexão”.**
- 2. A diferença no percurso dos feixes deve ser igual a um número inteiro de comprimentos de onda.**



$$\text{Lei de Bragg : } n\lambda = 2d \sin \theta \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

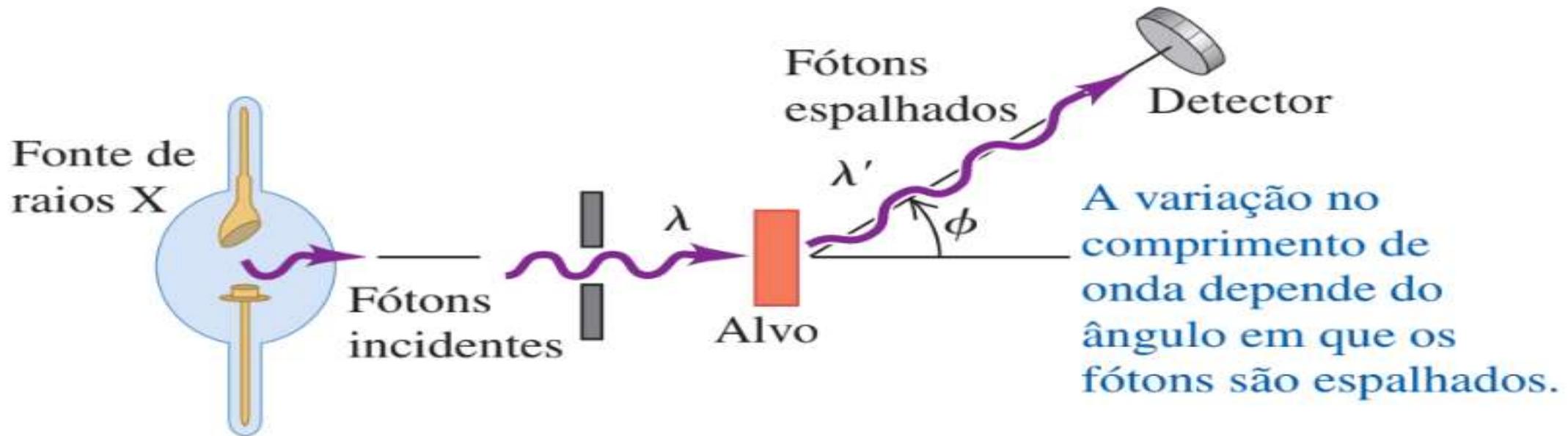
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

→ 1922: O físico americano Arthur Holly Compton (1892-1962), disparou um feixe de raios X em direção a um alvo sólido e mediu o comprimento de onda e a radiação espalhada a partir do alvo. Compton descobriu que uma parte da radiação espalhada possuía frequência menor (comprimento de onda maior) que a radiação incidente e que a diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

A natureza corpuscular da radiação foi confirmada em 1923 pelas experiências de Compton. Ele interpretou seus resultados experimentais postulando que o feixe de raios X incidente não era uma onda de frequência f , mas um conjunto de fótons, cada um com energia $E = h \cdot f$.



Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

Comprimento
de onda da
radiação espalhada

Comprimento
de onda da
radiação incidente

**Espalhamento
Compton:**

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi)$$

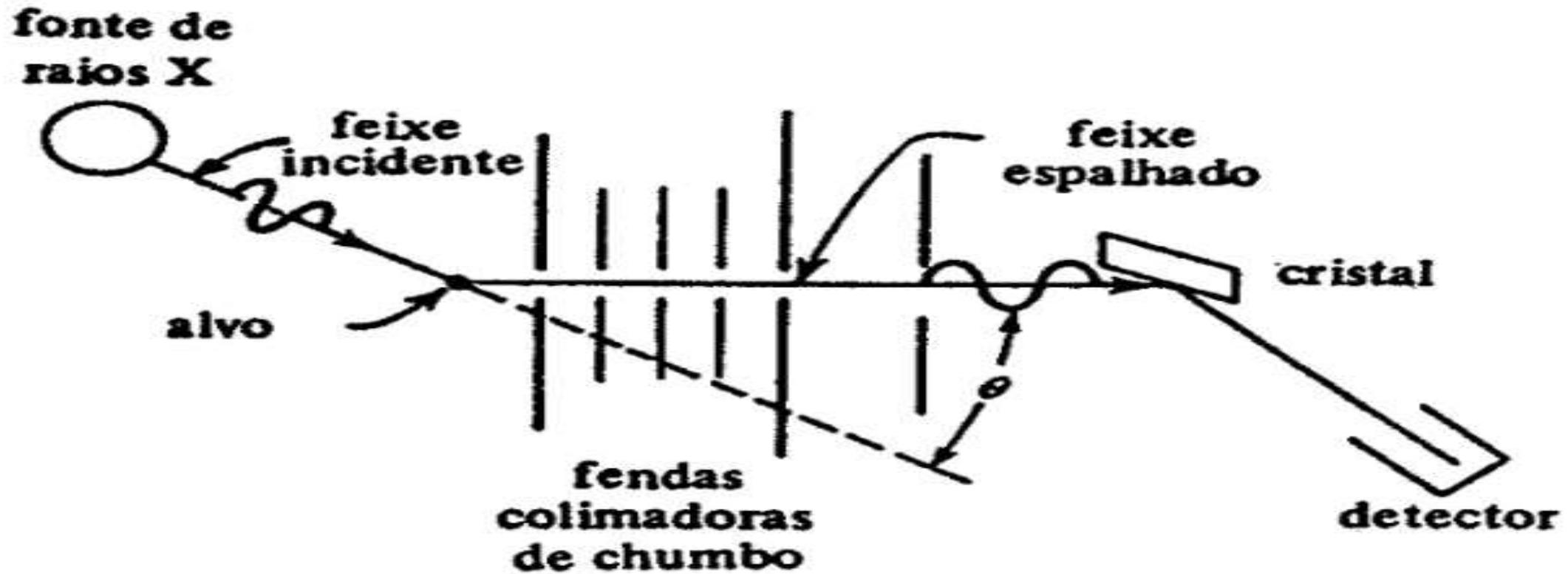
Constante de Planck

Ângulo de
espalhamento

Massa de repouso
do elétron

Velocidade da
luz no vácuo

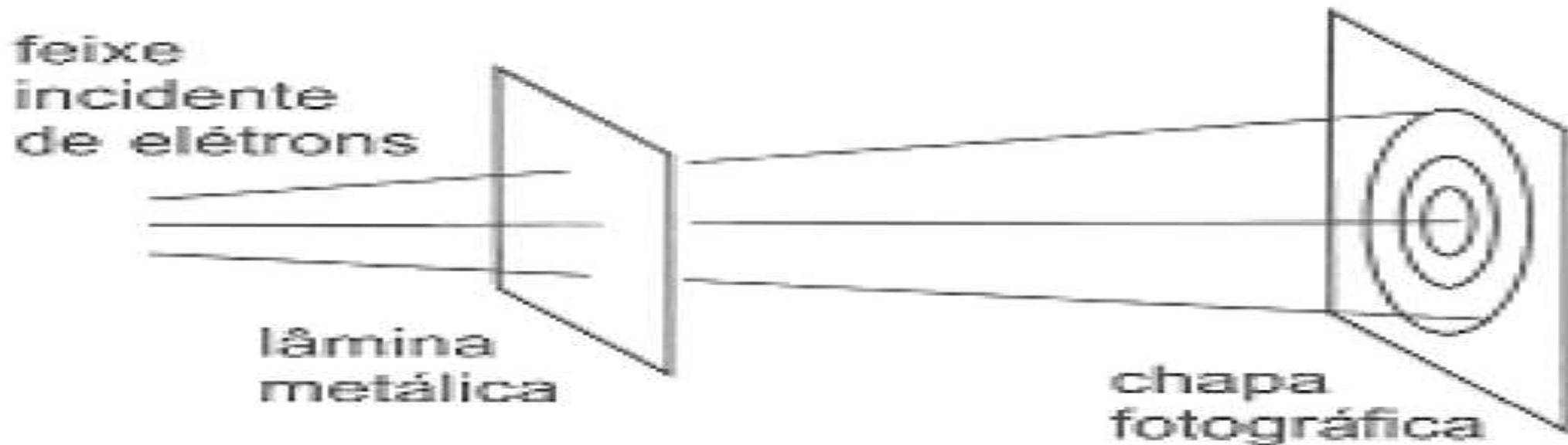
Contexto Histórico (Descoberta do raios X)



Raios X monocromáticos de comprimento de onda λ incidem sobre um alvo de grafite.

Contexto Histórico (Descoberta do raios X)

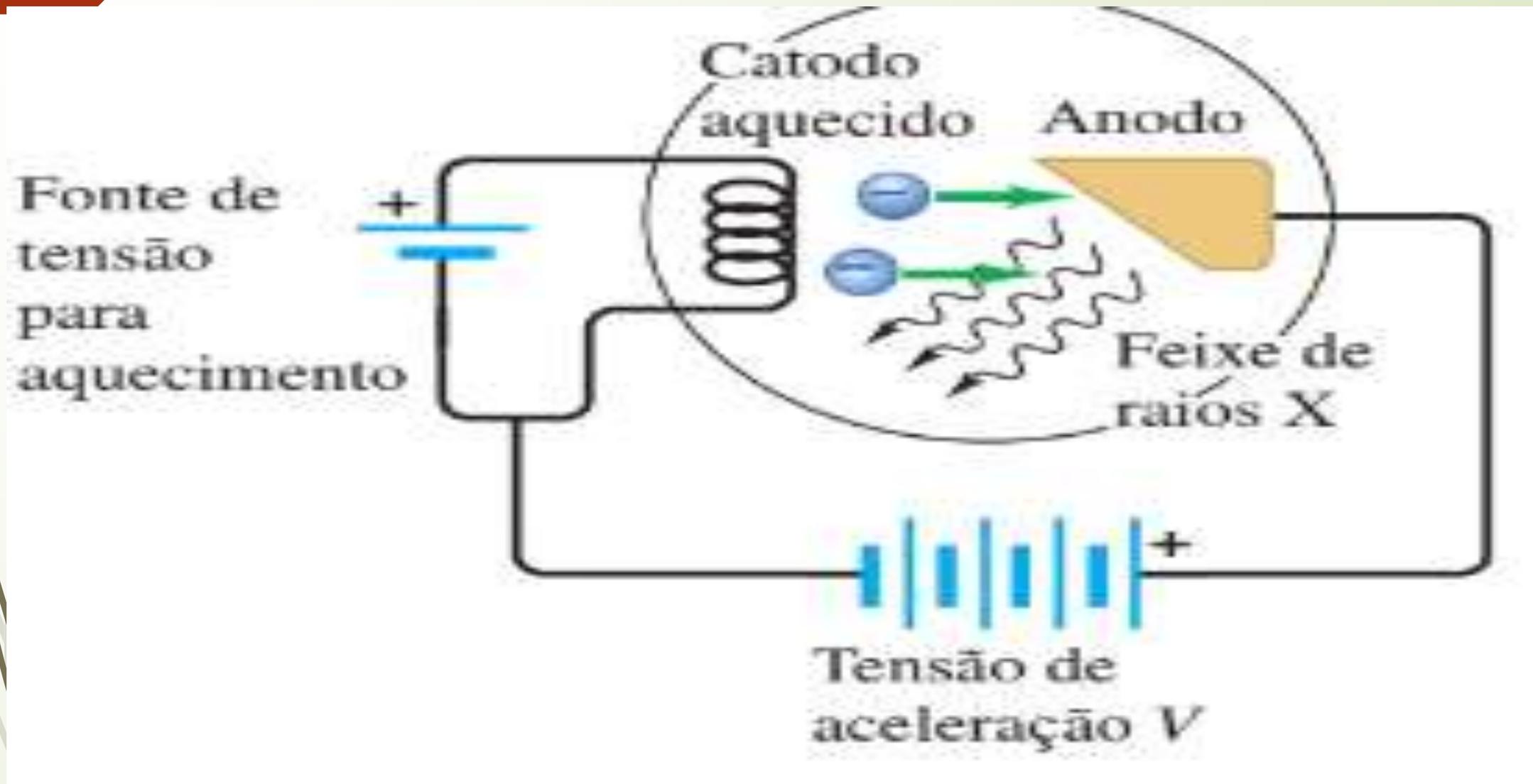
Thomson utilizou feixe de elétrons com energia na ordem de 10 a 60 keV. Ele conseguiu observar em 1927, padrões de intensidade similares aos obtidos com a difração de raios X por transmissão em cristais pulverizados.



Produção dos raios X

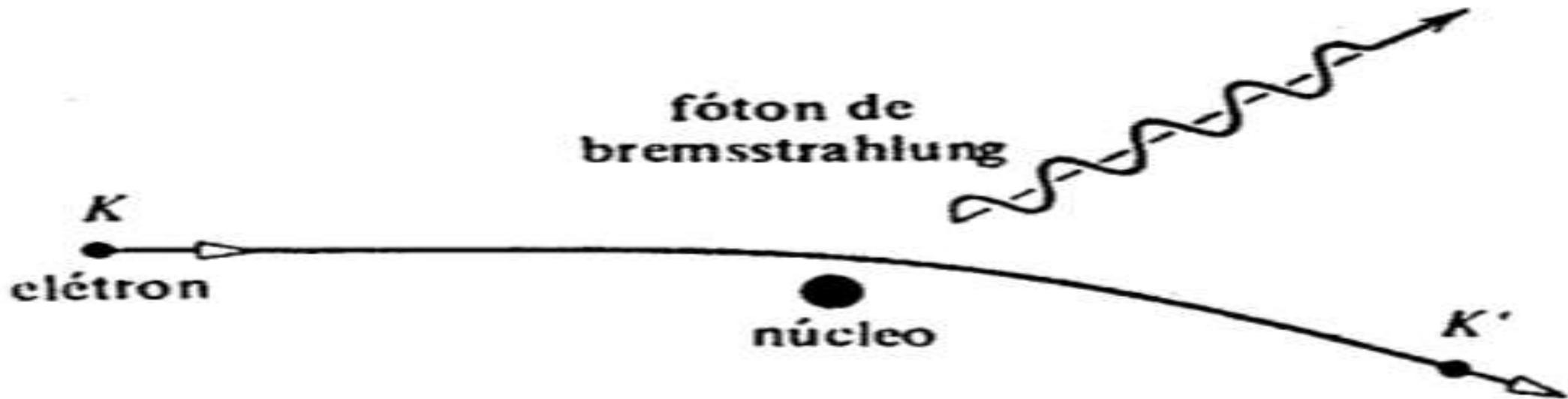
Quando o catodo é aquecido até uma temperatura muito elevada, ele libera elétrons em um processo chamado emissão termiônica (a energia fornecida aos elétrons pelo calor). Os elétrons são então acelerados no sentido do anodo pela diferença de potencial V_{AC} . Quando V_{AC} for maior que alguns milhares de volts, raios X são emitidos da superfície do anodo. Geralmente é usado Tungstênio, Molibdênio ou Ródio.

Produção dos raios X



Produção dos raios X

O anodo produz raios X em parte simplesmente pela freada abrupta dos elétrons que mostrava que cargas aceleradas emitem ondas eletromagnéticas. Esse processo é chamado de bremsstrahlung (palavra alemã que significa “freio da radiação”). Um elétron de energia cinética inicial K é desacelerado pela interação com um núcleo pesado do alvo, e a energia que ele perde aparece na forma de radiação como um fóton de raios X.

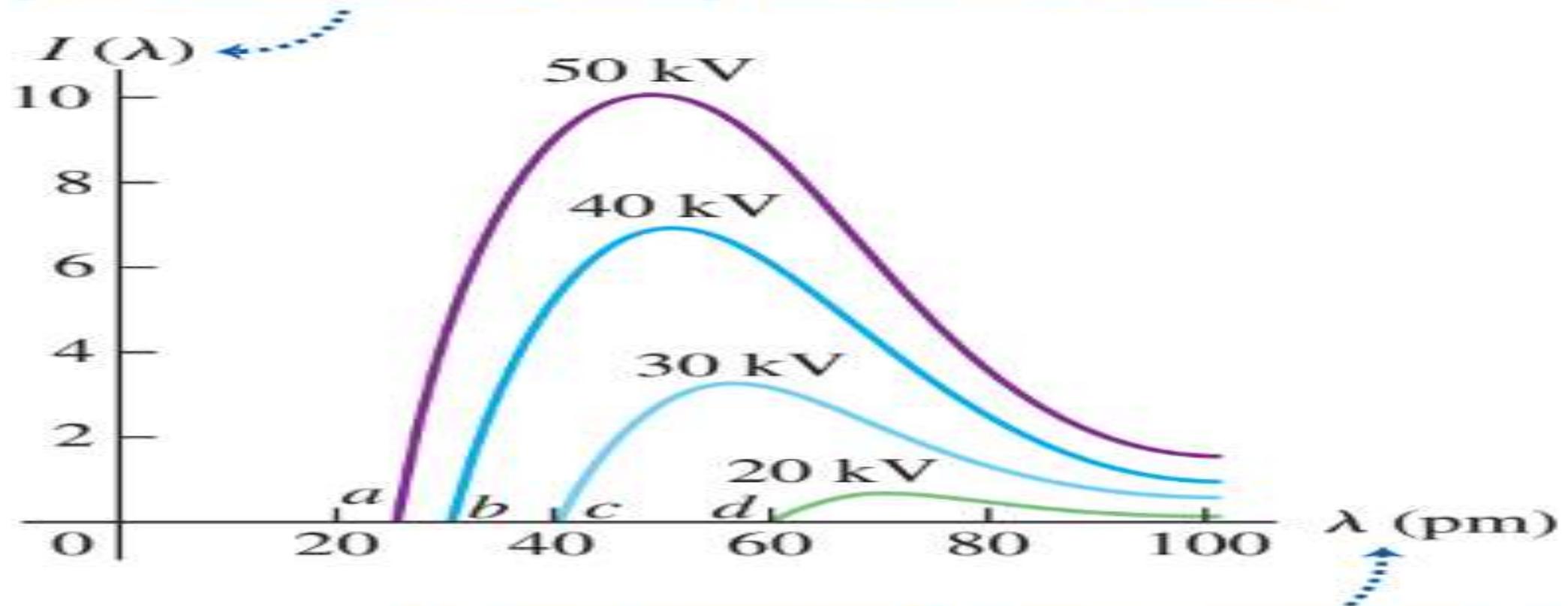


Produção dos raios X

A maior parte dos elétrons é freada por uma série de colisões e interações com átomos do anodo e, sendo assim, o bremsstrahlung produz um espectro contínuo de radiação eletromagnética. Os raios X produzidos por bremsstrahlung devem ter um espectro que inclua todas as frequências e, conseqüentemente, todos os comprimentos de onda. O Resultando experimental mostra os espectros bremsstrahlung obtidos quando o mesmo catodo e anodo são usados com quatro velocidades de aceleração diferentes V_{AC} .

Produção dos raios X (Alvo feito de Tungstênio)

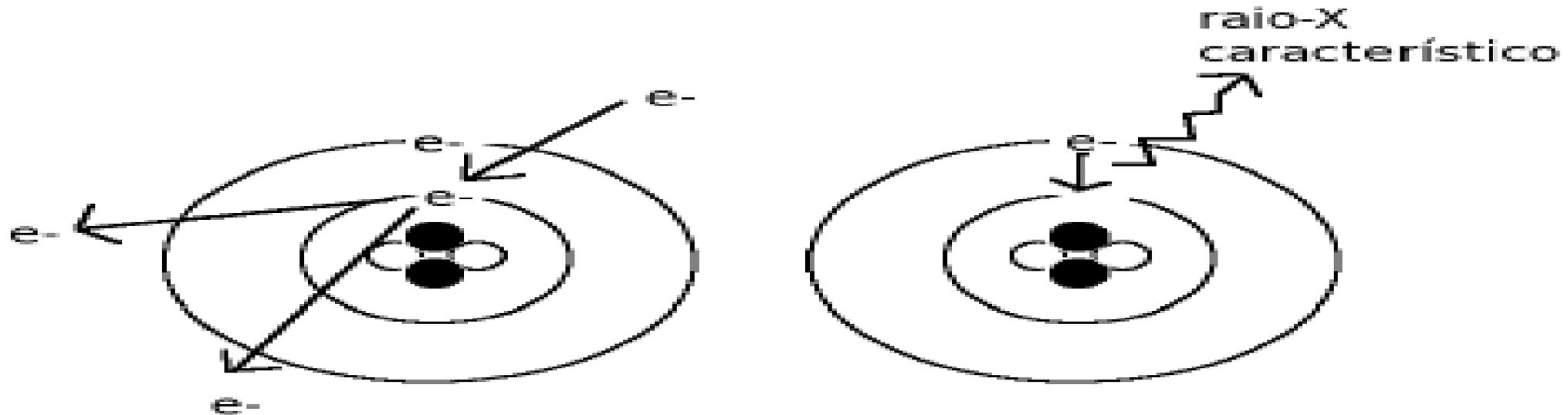
Eixo vertical: intensidade de raio X por unidade de comprimento de onda



Eixo horizontal: comprimento de onda do raio X em picômetros ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$)

Produção dos raios X

Um elétron externo pode arrancar um elétron do átomo, criando uma vacância. Esta vacância é preenchida por um elétron de uma camada externa, se emitindo um fóton de raio-X. A energia deste raio é igual à diferença entre as energias das camadas eletrônicas envolvidas.



Produção dos raios X

Bremsstrahlung:

Energia cinética
perdida pelo elétron

Energia máxima de
um fóton emitido

Constante de Planck

Velocidade da
luz no vácuo

Módulo da
carga do
elétron

Voltagem
acelerada

Frequência máxima
do fóton

Comprimento de
onda mínimo do fóton

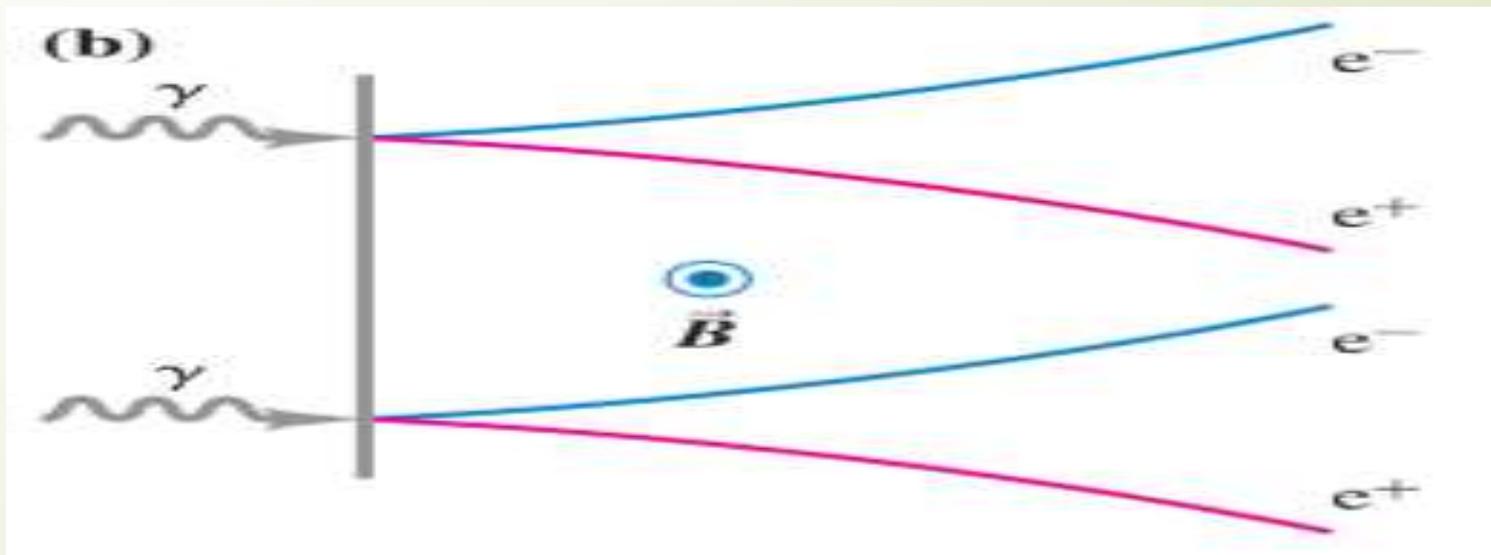
$$eV_{AC} = hf_{\text{máx}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{mín}}}$$

Propriedades dos raios X

- 1. São altamente penetrantes, invisíveis (radiação eletromagnética).**
- 2. São eletricamente neutros, e, portanto, não são afetados por campos elétricos e campos magnéticos.**
- 3. Podem ser produzidos com uma ampla variedade de energia e comprimento de onda.**
- 4. Propagam-se em linha reta.**
- 5. Propagam-se na velocidade da luz no vácuo (300.000 km/s).**
- 6. Causam fluorescência em certos materiais.**
- 7. Produzem mudanças químicas e biológicas na matéria através da ionização e excitação.**

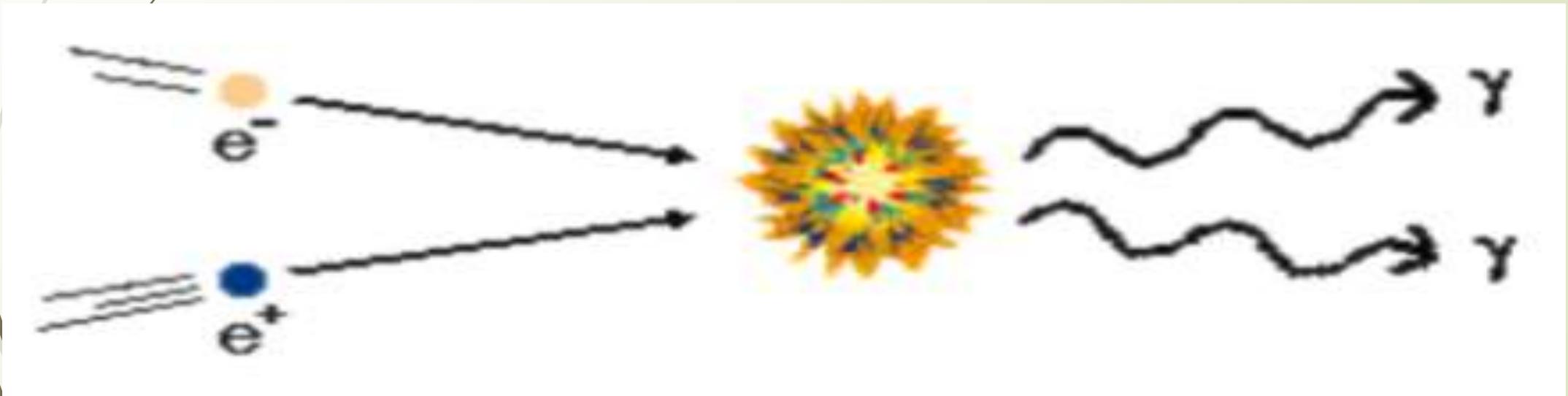
Aniquilação por pares

A produção de pares ocorre quando a radiação incidente tiver uma energia mínima de 1,022 MeV, ao passar nas proximidades do núcleo, essa radiação desaparece, surgindo um par de partículas (elétron e pósitron).



Aniquilação por pares

O fenômeno de aniquilação de pares ocorre quando um pósitron e um elétron, em repouso e próximos, colidem devido à suas cargas elétricas opostas, resultando na aniquilação mútua e na conversão completa de suas massas em energia em fótons (radiação eletromagnética).



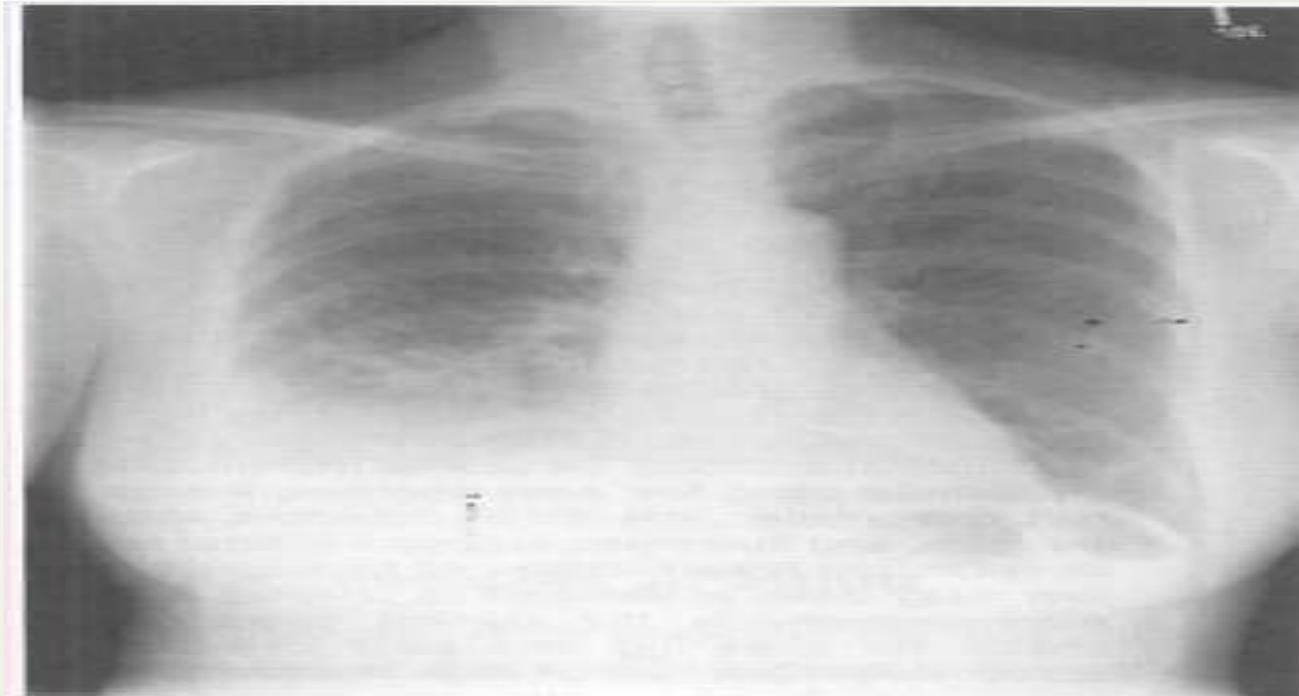
Aplicações dos raios X

→ Tomografia Computadorizada



Aplicações dos raios X

→ **Diagnóstico de Imagem (O contraste é devido à atenuação diferencial dos raios-X pelos diferentes tecidos → Radiografia do Tórax)**



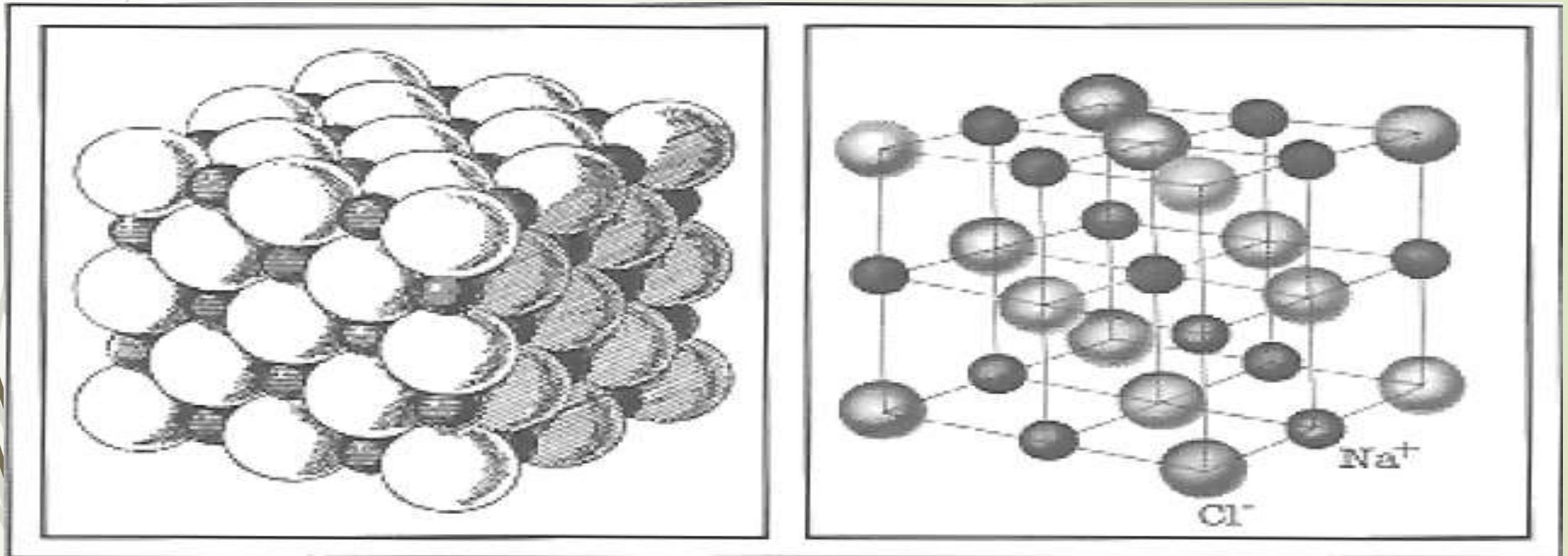
Aplicações dos raios X

→ **Fluoroscopia (produz imagens dinâmicas)**



Aplicações dos raios X

→ **Cristalografia (Investigação da estrutura cristalina dos sólidos)**



Aplicações dos raios X

→ **Determinação da estrutura helicoidal da molécula de DNA (Avanços da genética molecular)**



Aplicações dos raios X

→ **Mamografia de raios X característico de Mo e Rh (Úteis na otimização do contraste da imagem)**



Aplicação da aniquilação por pares

→ **PET (Tomografia por emissão de pósitron)**
Esse exame permite a obtenção de imagens detalhadas do metabolismo e da função dos órgãos internos, auxiliando no diagnóstico precoce e no acompanhamento de doenças como o câncer)

Aplicação da aniquilação por pares



Bibliografia

SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark Waldo; YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física IV: Ótica e Física Moderna. 14. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison Wesley, c2008-2009 vol. 4.

Nussezevig, H. Moyses. Curso de Física Básica vol.4 – Ótica Relatividade Física Quântica, ed. Blucher, 6ª reimpressão 2006.

Knight, Randall. Física: Uma abordagem estratégica – Relatividade Física Quântica, vol.4, 2ª edição, Porto Alegre : Bookman, 2009.

EISBERG, Robert Martin; RESNICK, Robert; CHAVES, Carlos Maurício. (coord.). Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

CARUSO, F., OGURO, V. Física Moderna, Rio de Janeiro, Campus/Elsevier 2007.

Bibliografia

SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark Waldo; YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física IV: Ótica e Física Moderna. 14. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison Wesley, c2008-2009 vol. 4.

Filho, A.T; Mizukochi, J.K. Mestrado Nacional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF) do polo da Universidade Federal do ABC (UFABC). Disponível em: <https://radiacoes-ionizantes.propg.ufabc.edu.br/>

Pacheco, L.L; Reis, I.F. Principais Contribuições responsáveis pela descoberta dos raios X: a estirpe coletiva da ciência. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. (2005). Disponível em:

< <https://www.scielo.br/j/rbef/a/LGnXVMWzqK5NtJpYkSMnWkj/?format=pdf&lang=pt> >

Publicado em 29/05/2023.