

Espectro de Raios-X. Difração de Bragg. Constante de Planck. Absorção.

I- Objetivos:

- Determinar o espectro de raios-X do Molibdênio.
- Estudar quantitativamente a difração de Bragg usando uma rede cristalina.
- Propriedades de absorção de raios-X em materiais.

Assuntos: Radiação contínua e característica de um espectro de raios-X, planos de um cristal, rede cristalina, comprimento de onda mínimo, e coeficiente de absorção do Alumínio

II- Introdução:

Esta série de experiências familiarizará o estudante com algumas experiências básicas da física moderna utilizando raios-X. Muitas relações da teoria quântica e atômica podem ser ilustradas de uma maneira mais simples com a ajuda dos raios-X do que usando com luz visível, e a interação dos raios-X com a matéria fica mais fácil de compreender, desde que consistem essencialmente de transições (fótons emitidos ou absorvidos) nas camadas eletrônicas internas dos átomos, depende portanto só do número atômico. Uma das grandes aplicações dos raios-X está na Física do Estado Sólido, dentre outras áreas, onde são usados para estudar estruturas cristalinas e o interior de objetos opacos.

Os raios-X, são radiações eletromagnéticas produzidas quando um feixe de elétrons colide contra um alvo, normalmente um ânodo maciço, sendo que a desaceleração dos elétrons traz como consequência a emissão de radiação.

Dentro de um tubo de raios-X, ver figura 1, os elétrons emitidos pelo cátodo quente possuem uma velocidade baixa, sendo acelerados por um potencial V mas atingem o ânodo com uma velocidade dada por (caso não-relativístico):

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (1)$$

Onde m é a massa, v é a velocidade e e a carga do elétron.

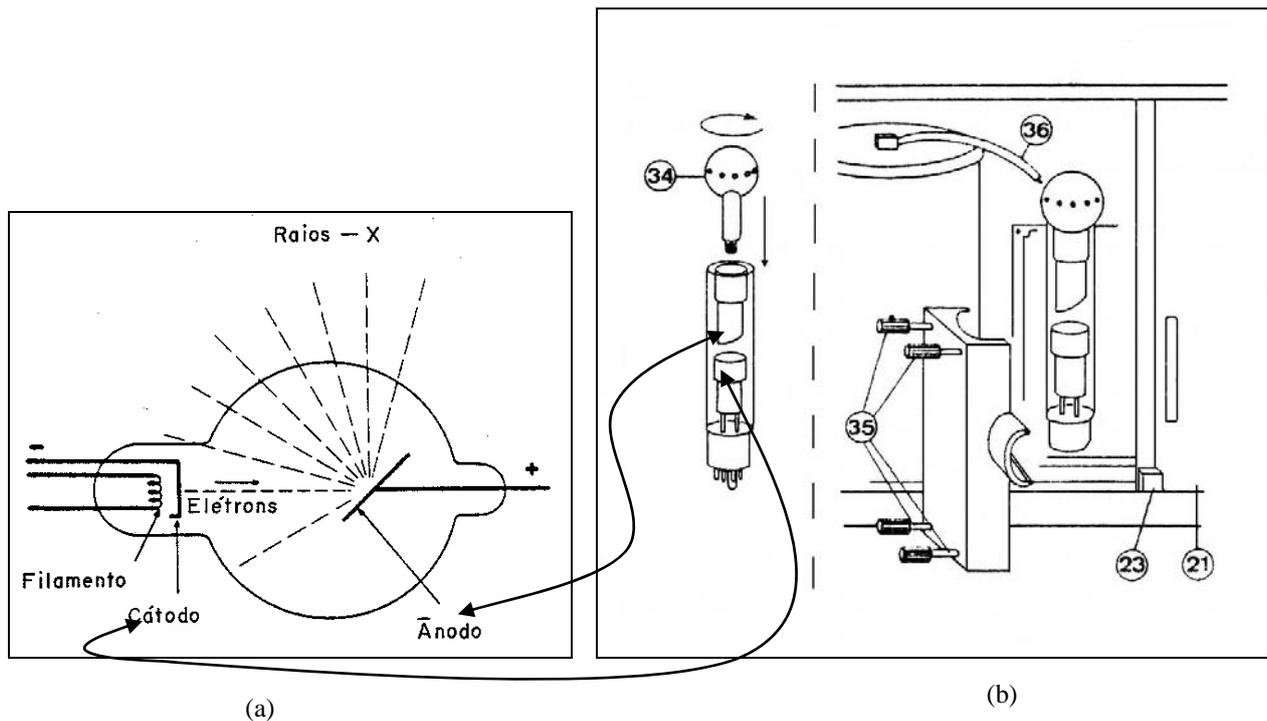
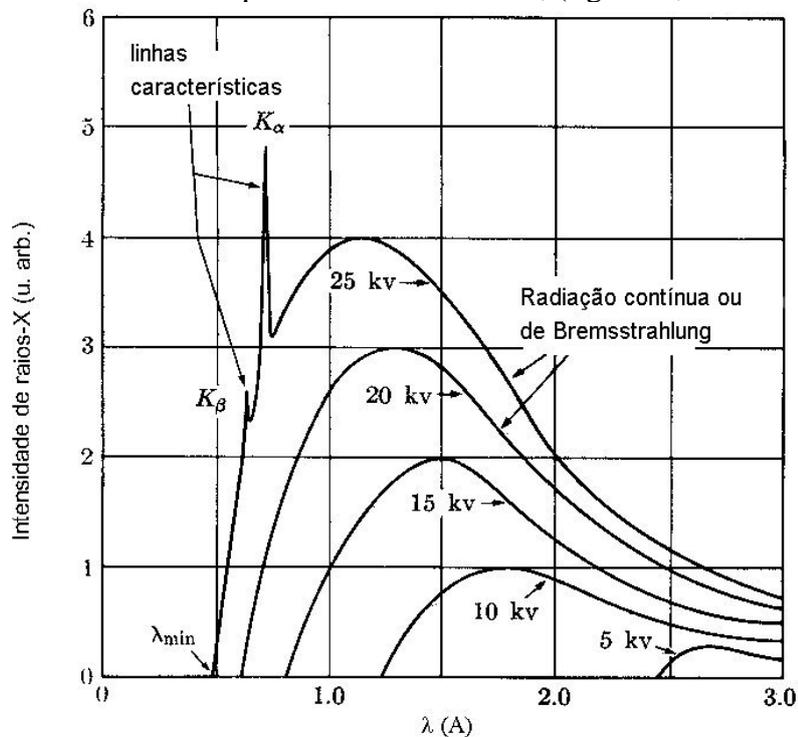


Figura 1: Tubo de Raios-X. (a) Esquemático. (b) Tubo a ser utilizado na prática.

O espectro eletromagnético emitido pelo ânodo é composto pela superposição de: (i) um espectro contínuo, denominado “Bremsstrahlung” atribuído à radiação de freiamento dos elétrons quando colidem com o alvo (ver figura 2, curvas até 20kV) e (ii) um espectro discreto de linhas ou de raios, característico dos átomos que constituem o ânodo, (figura 2, curva correspondente a 25kV).



Espectro de raios-X do Molibdênio em função da voltagem aplicada. O potencial de excitação da série K deste elemento é 20,1 kV.

Figura 2: Espectro de raios-X do Molibdênio.

As características do espectro contínuo são as seguintes:

- (i) Existe um limite inferior para o comprimento de onda quando toda a energia do elétron é convertida em radiação eletromagnética, i.e.

$$eV = h\nu_{\max}$$

ou

$$\lambda = \lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} \quad (\text{Lei de Duane-Hunt}) \quad (2)$$

- (ii) Este limite depende da voltagem aplicada, sendo inversamente proporcional à voltagem V aplicada. Na situação de menores comprimentos de onda, os raios-X ficam “duros” (mais penetrantes).
- (iii) A intensidade aumenta fortemente com a voltagem aplicada, bem como a corrente de filamento do mesmo.
- (iv) A forma da curva é uma característica de um ânodo massivo onde todos os elétrons perdem sua energia.

Para o espectro discreto:

1. Os níveis de energia E_n das camadas internas eletrônicas de um átomo são dados por:

$$E_n = -\frac{Rhc(z - \sigma)^2}{n^2} \quad (3)$$

onde R é a constante de Rydberg, h a constante de Planck, c a velocidade da luz, z o número atômico, σ uma constante de blindagem e o n o número quântico principal.

Os raios-X emitidos terão as seguintes frequências:

$$\nu = Rc \left[\frac{(Z - \sigma_1)^2}{n_1^2} - \frac{(Z - \sigma_2)^2}{n_2^2} \right] \quad (4)$$

E para a série característica K_α ($n_2 = 2$); ($n_1 = 1$); K_β ($n_2 = 3$); ($n_1 = 1$); $K_\gamma \dots$ etc. A figura 3 mostra o diagrama de níveis de energia onde são ilustradas as transições principais da emissão de raios-X. A colisão dos elétrons com o alvo, promove excitações das camadas mais internas, conseqüentemente o decaimento resulta em radiação de Raios-X.

2. A experiência mostra que para diferentes ânodos temos uma relação linear entre $\sqrt{\nu_{K_\alpha}}$ e Z (Lei de Moseley)

$$\sqrt{\nu_{K_\alpha}} = A(Z - B) \quad (5)$$

onde A e B são constantes. Existe uma lei similar para as linhas K_β .

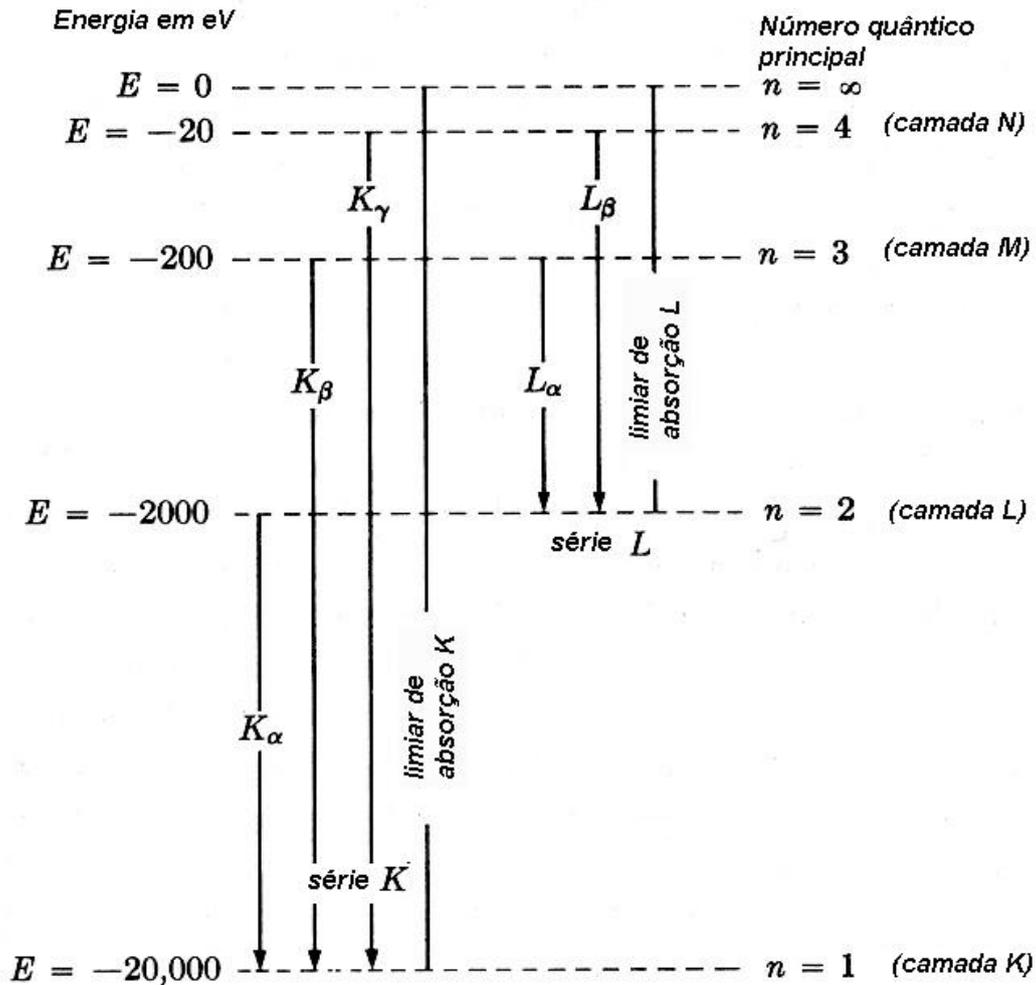


Figura 3. Diagrama de energias das transições principais de emissão de Raios-X

Características da unidade de raios-X Leybold 55490 com acessórios.

Esta unidade de raios-X foi especialmente desenvolvida para aplicações didáticas. Na figura 4, vemos do lado direito que o maior espaço do aparelho está dedicado para experimentos. O lado esquerdo contém o tubo de raios-X e a fonte de alimentação. O feixe de raios-X sai horizontalmente da esquerda e incide sobre um anteparo fluorescente.

A tampa transparente atua como proteção contra a radiação e se abre deslizando lateralmente.

O tubo de raios-X opera com uma voltagem retificada que pode ser variada de 21 a 42 kV_p em passos de 3 kV_p e a corrente de emissão estabilizada pode ser ajustada continuamente de 0,05 até 1 mA. Quando a tampa de PVC é aberta, automaticamente é desligada a alimentação do tubo. O ânodo do tubo é de Molibdênio (Mo, Z = 42), e o cátodo é um fio de tungstênio em espiral rodeado por um tubo de Wehnelt (emissor de elétrons) que focaliza os elétrons sobre o ânodo. Este tubo especialmente desenhado, permite a emissão das linhas K_α e K_β do Mo (veja figura 2(b)).

Antes de fazer qualquer experiência, deve-se ficar familiarizado com a física básica dos raios-X^(2,3).

Para operar o aparelho é importante compreender as funções dos diferentes controles e dos acessórios, acompanhe a descrição da figura 4.

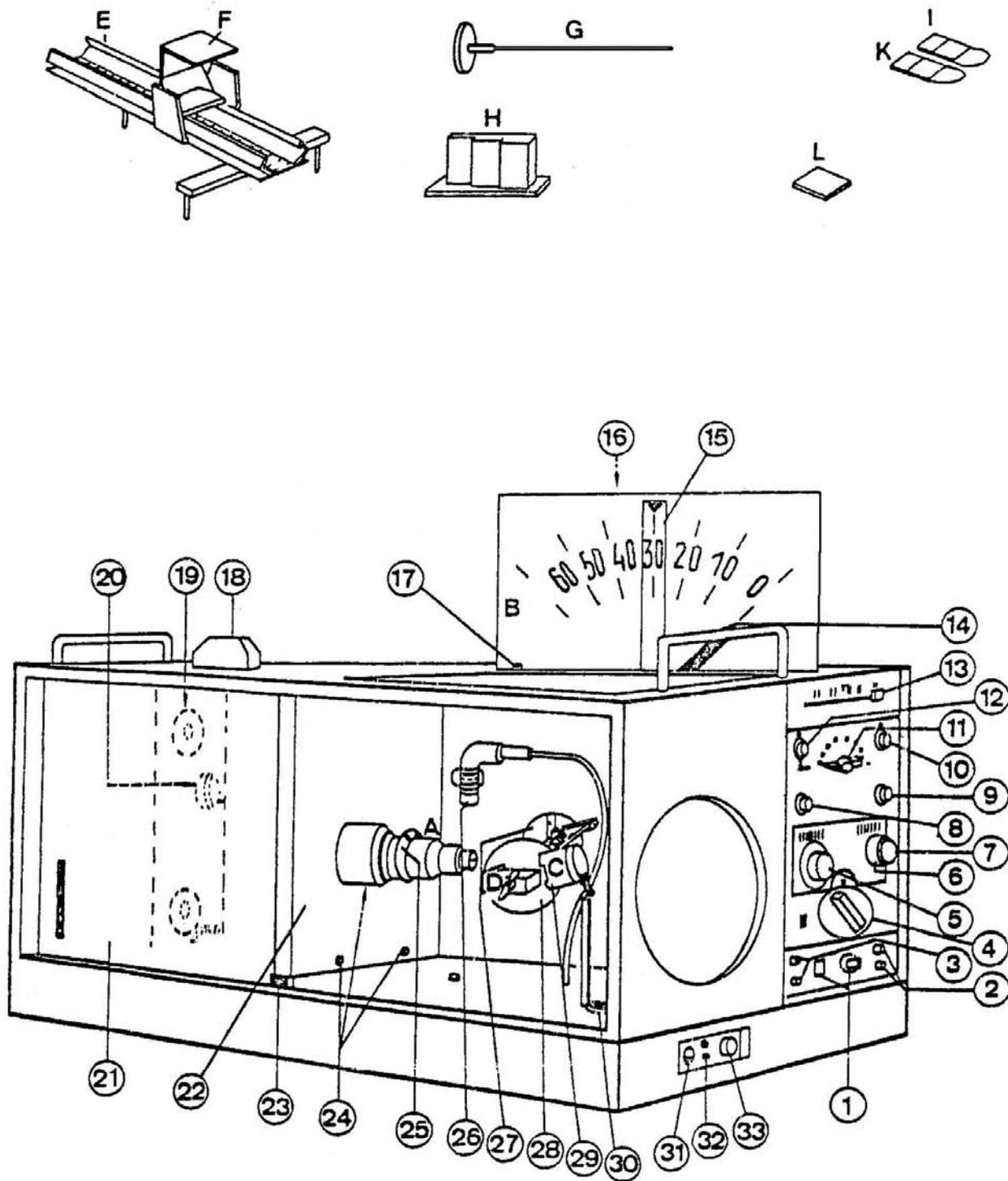


Figura 4: Unidade de raios-X Leybold 55490

- (1) Interruptor principal com lâmpada indicadora.
- (2) Tomada que serve para monitorar, com um voltímetro ac (30 V_{max}), a voltagem V selecionada com o botão (11) que alimenta o tubo de Raios-X. Por exemplo, a leitura do voltímetro de $30 V_{eff} \cong 30 KV_{eff} (\simeq 42 KV_p)$.
- (3) Tomada para monitorar a corrente de emissão I_{EM} com um miliamperímetro (escala 1 mA).
- (4) Cronômetro para selecionar o tempo da medida (max 2h).
- (5) Botão para ajustar o ângulo θ_2 entre o suporte do detector e o eixo ótico. O ângulo pode ser lido com o ponteiro (15)
- (6) Botão para ajustar o ângulo θ_1 entre a amostra (suporte giratório) e o eixo ótico, o ângulo pode ser lido com o ponteiro(14).
- (7) Botão axial (interno) para acoplamento 2θ ; para ser usado na experiência de difração de Bragg. Quando ele é apertado firmemente, o suporte (28) e o suporte do detector (C) estão acoplados de tal maneira que o ângulo θ_2 varia duas vezes mais rapidamente que o ângulo θ_1 de forma síncrona.
- (8) Fusível T 0.63A (alta voltagem V).
- (9) Lâmpada indicadora de alta voltagem indicando e conjunto com a lâmpada (18) que a voltagem está sendo aplicada e há emissão de raios-X.

Nota: Quando (9) não acende e a lâmpada piloto (18) está acesa, isto significa que o fusível (8) da alta voltagem está aberto.

- (10) Botão para desligar a alta voltagem. Ele pode ser desligado também por dispositivos associados a uma destas situações:
 - o tempo programado foi completado.
 - a porta de vidro-chumbo 922), está aberta.
 - a porta de aço (21), está aberta.
- (11) Seleccionador de alta voltagem: $20 KV_p$ até $42 KV_p$ em passos de $\sim 3 KV_p$.
- (12) Botão para ligar a alta voltagem V.

Importante: V, pode ser ligado somente se:

- As portas (21) e (22) estão fechadas.
 - O interruptor principal (1) está colocado em “I”.
 - O seccionador (11) da alta voltagem está na posição “1”.
 - O cronômetro (4) está ligado.
 - Quando a alta voltagem é aplicada, as lâmpadas (9), (18) e (1) ficam acesas,. (ver também (9) e (2)).
- (13) Seleccionador da corrente de emissão I_{EM} ajustável de 0,05 mA até 1 mA (ver (3)).
 - (14) Ponteiro curto para medir o ângulo θ_1 do suporte giratório (28) (ver (6)).
 - (15) Ponteiro maior para medir o ângulo θ_2 do suporte do detector (C) (ver (5) e (7)).
 - (16) Parafuso de fixação (através do aparelho) do eixo do goniômetro com o suporte da amostra (D).
 - (17) Parafuso para ajustar a altura do tubo de raios-X. Por favor não mexa.
 - (18) Lâmpada-piloto da alta voltagem (ver (8) e (9)).
 - (19) Entrada/saída de cabos

- (20) Seleccionador da voltagem (não tocar) com fusível 1,25A/220-240V ou 2A/110, 125, 150V.
- (21) Porta de aço, pode ser aberta se o interruptor (23) for pressionado.
- (22) Porta de vidro-chumbo, pode ser aberta se o interruptor (23) for pressionado.
- (23) Interruptor para abrir as portas (20) e (21).
- (24) Parafusos de fixação do suporte do tubo de raios-X (não toque).
- (25) Suporte do filtro de Zircônio (I) e do absorvedor de Cobre (K).
- (26) Tomada do detector com ligação interna com a tomada (33).
- (27) Fenda de guia para fixar o detector (C) na experiência do Espalhamento Compton.
- (28) Sistema giratório para fixar o suporte da amostra (D) (mono-cristal) ou o espalhador (L).
- (29) Fenda para o absorvedor de cobre (K).
- (30) Tomada para fixar o trilho (E) e o condensador de placas 55491 com conexões internas com as tomadas (31) e (32).
- (31) Tomada coaxial para ligar um amplificador ou um nanoamperímetro e medir a corrente de ionização entre as placas do condensador 55491.
- (32) Tomada de entrada de baixa voltagem 0-25 V ac. Quando o condensador plano 55491 é inserido, a tomada está ligada ao transformador que dá a voltagem às placas (0-250 V dc).
- (33) Tomada especial de saída do detector para ligar ao medidor de taxa Leybold 57552.
- (34) Acoplamento do ânodo à fonte de alta tensão através do cabo (36).
- (35) Parafusos para prender o isolador do tubo de raios-X.
- (36) Cabo de alta tensão.
- (A) Colimador.
- (B) Escala angular.
- (C) Detector.
- (D) Suporte de amostra.
- (E) Trilho.
- (F) Suporte para filme, experimentos de Laue e Debye-Scherrer.
- (G) Dispositivo magnético para amostras radioscópicas.
- (H) Suporte para pó de giz, experimento de absorção.
- (I) Filtro de Zircônio (espessura de 0,05mm) .
- (J) -
- (K) Absorvedor de Cobre (espessura de 0,07mm).
- (L) Meio espalhador de Al para experimento de Compton.

Como ligar o aparelho

Antes de ligar o aparelho, verifique a posição correta do seletor de voltagem (20) e se precisar, troque e ajuste o fusível: fusível de segurança com ação retardada de 2A para 110, 125, 150V; 1,25A para 220 e 240V.

Fechar as porta (21) e (22). Ligar o aparelho com o interruptor (1) (lâmpada indicador (1) fica acesa). Coloque o cronômetro (4) na posição requerida. Coloque o botão (11) da alta voltagem na posição "1". Depois ligar a alta voltagem V pressionando o botão (12), (as lâmpadas (9) e (18) acendem). Ajuste a alta voltagem com o botão (11) e a corrente de emissão I_{EM} com o cursor (13) nas posições requeridas para as experiências.

Importante: veja também as funções características dos botões (10) e (12).

Perguntas

1. Por que existe um limite inferior para $\lambda = \lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$?

Calcule λ_{\min} para a maior voltagem que seja possível conseguir com o aparelho.

2. Explique a forma do espectro contínuo, porque tem um pico de máximo?

3. Por que e como os elétrons são emitidos do cátodo?

EXPERIÊNCIA 1 - Reflexão de Bragg e espectro de raios-X

Aparelhagem

- 1 unidade de raios-X Leybold 55490
- 1 colimador (A) (com fenda horizontal)
- 1 tubo contador (C)
- 1 medidor de taxa Leybold 57552
- 1 contador GDC 225 ou equivalente
- 1 cristal de LiF (ou NaCl ou KCl ou KBr) com suporte
- 1 voltímetro ac (0-30V)
- 1 filtro de Zr (I)

Um feixe de raios-X incide sobre uma amostra, sendo difratado. Se a amostra for um cristal, podemos observar que quando o comprimento de onda dos raios-X satisfaz a relação de Bragg (veja a figura 5), a seguinte relação se cumpre:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (6)$$

onde n é um número inteiro que indica ordem de difração, d a distância interplanar e θ o ângulo da difração. O padrão de difração mostra a superposição de feixes difratados formando pontos ou faixas de interferências construtivas. Observando a figura 5 temos que os feixes 1 e 2 possuem uma diferença de fase $\Delta = 2d \sin \theta$ após a reflexão, i.e. correspondente à diferença de caminho abc . Teremos um máximo de intensidade quando esta diferença Δ for múltiplo de $n\lambda$ determinando-se a relação de Bragg^(2,3,6) (equação (6)).

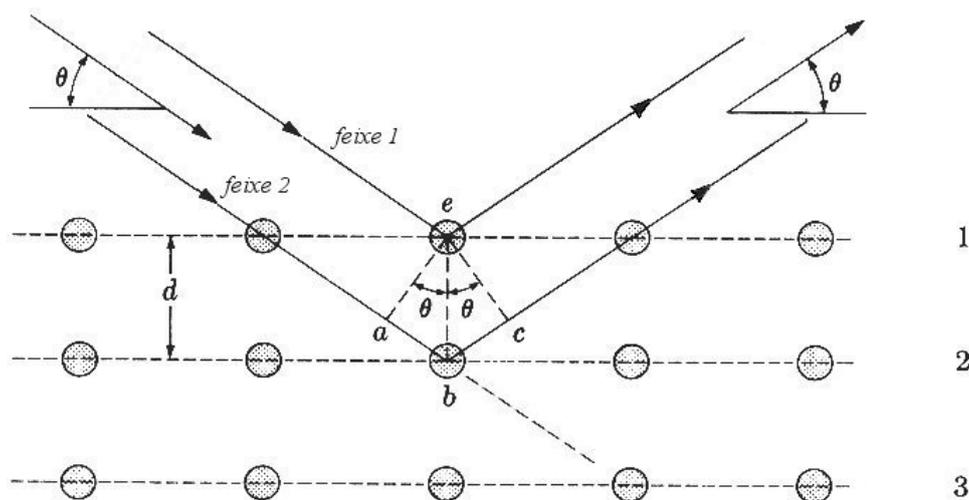


Figura 5: Difração de raios-X por um cristal, lei de Bragg.

A amostra que usaremos é um cristal de LiF (ou outro disponível) que possui uma rede de tipo cúbico de face centrada (estrutura do tipo NaCl) com uma base que consiste de um átomo de Li e um de F separados por uma distância correspondente a metade da diagonal do cubo (figura 6).

$$\begin{aligned}
 d_{\text{LiF}} &= 0,201 \text{ nm} \\
 d_{\text{NaCl}} &= 0,282 \text{ nm} \\
 d_{\text{KCl}} &= 0,315 \text{ nm} \\
 d_{\text{KBr}} &= 0,330 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

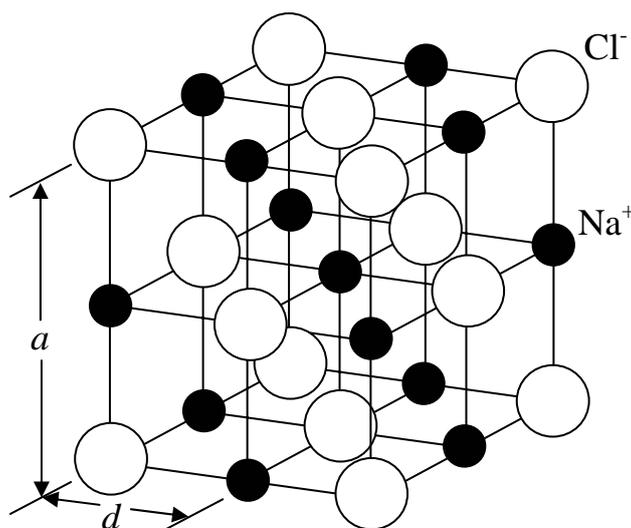


Figura 6: Modelo da célula unitária de NaCl. Parâmetro de rede $a = 2d$.

Procedimento (figura 7)

Coloque, com uma fita adesiva dupla face, o cristal no respectivo suporte (D) com o plano de clivagem (100) paralelo ao eixo do mecanismo de rotação do suporte da amostra. Instale o suporte sobre a placa giratória (28) e coloque a escala (16) na parte superior do aparelho. Nesta situação podemos rodar o cristal com respeito ao feixe de raios-X. Coloque o colimador (A) para obter um feixe de raios-X estreito (ângulo de abertura $0,5^\circ$) e o detector (C) sobre a placa (27). Faça a ligação do detector com o cabo blindado na tomada (26). O detector é ligado internamente com o cabo coaxial à tomada (33). Ligue o medidor de taxa Leybold 57552 e o contador de pulsos. Coloque o filtro de Zircônio (I) na fenda do suporte (25) a fim de obter a radiação monocromática (somente a linha K_α , $\lambda_{K\alpha}$ para ânodo de Mo = 0,071 nm). Feche a porta e ajuste a voltagem e a corrente do tubo

até os valores máximos com o botão (11) e o cursor (13). Ajuste a voltagem do tubo contador a ~450 V.

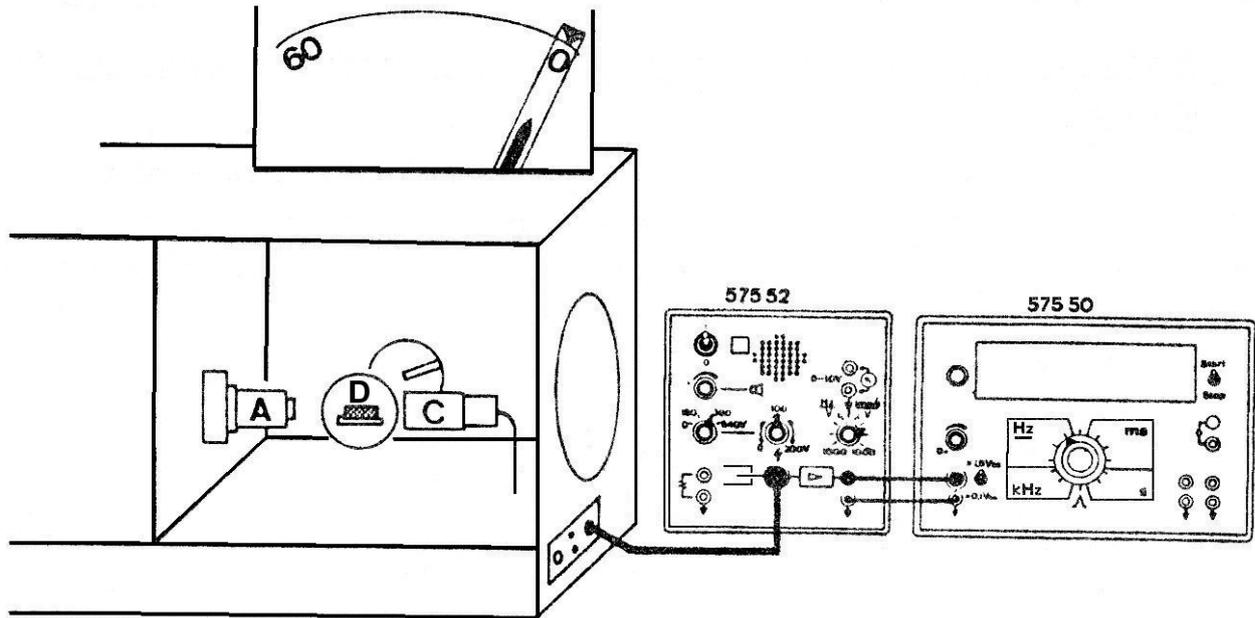


Figura 7: Esquema de montagem para lei de Bragg.

a) Verificação da Lei de Bragg

Calcule, através da relação (6), o ângulo de reflexão para o cristal tipo NaCl orientado na posição (100). Ajuste-o com o botão (6). Registre o número de pulsos em 100s variando o ângulo θ_2 do contador de 5° até 60° com intervalos de 1° (recomendável $0,5^\circ$ quando perto de um máximo). Faça um gráfico N vs θ . Qual é a sua conclusão?

b) Medida do ângulo de Bragg

Na primeira experiência você viu que se o cristal faz um ângulo θ_1 com o feixe de radiação existe um máximo de difração em $\theta_2 = 2\theta_1$. (Veja também a figura 5, onde o ângulo formado por ab e bc é 2θ).

Agora acople os dois mecanismos de rotação do cristal e do detector segurando o botão axial interno (7) para uma posição inicial em que os dois ponteiros indiquem 0° .

Registre o número de pulsos N em 100s variando o ângulo θ_2 de 5° até 60° , com intervalos de 1° ($0,5^\circ$ perto de um máximo) com o cristal de NaCl. Faça um gráfico N vs $2\theta_1$. Qual é a sua conclusão?

c) Medida do espectro de emissão e do comprimento de onda das linhas K_α e K_β do Mo

Retire o filtro de Zr (I) para ter uma radiação policromática. Repita a medida anterior com o cristal tipo NaCl. Registre N vs 2θ na região onde $n=1$ (eq. 6, i.e $0 < \theta < 30^\circ$ para os seguintes valores de voltagem:

- 1) $V = V_{\max}$
- 2) $V = 35 \text{ KV}_p$
- 3) $V = 29 \text{ KV}_p$
- 4) $V = 23 \text{ KV}_p$

Lembre que $1V_{\text{eff}}$ medido com o voltímetro ac na tomada (2) corresponde a 1.4 KV_p .

Como a radiação emitida não é monocromática e sabendo que a Lei de Bragg $\lambda = 2d \sin \theta$ é sempre satisfeita (fig. 5), a cada θ corresponde um comprimento de onda particular. Grafique sobre o mesmo papel milimetrado os quatro espectros em função de λ [nm]. Explique a forma do espectro (contínuo e discreto) e suas variações com a voltagem. Determine o comprimento de onda da linha K_α e K_β e compare com os valores das tabelas (2, 3). Faça um gráfico da intensidade das linhas K_α e K_β em função da voltagem e explique seus resultados.

d) Lei de Duane-Hunt.

Essa lei prediz que para uma voltagem determinada V do tubo de raios-X a energia máxima emitida é proporcional à voltagem; em outras palavras existe um comprimento de onda $\lambda_{\text{min}} \sim V^{-1}$.

Verifique essa lei, com seus resultados anteriores, (exp. 1c). Determine os λ_{min} por extrapolação das curvas do gráfico.

Perguntas

- 1) Pode observar o fenômeno de difração de raios-X com uma rede de difração ótica (e.g. 1000 ranhuras/nm)? Por quê?
- 2) Pode-se usar um fenômeno de dispersão para construir um espectrômetro de raios-X? Por quê? Descreva um instrumento, monocromador, que use tal fenômeno.
- 3) Descreva a função do filtro de Zircônio (I) que é utilizado com um tubo de raios-X com um ânodo de Mo.
- 4) Descreva como construir um interferômetro de raios-X e que aplicações podem ser feitas.

EXPERIÊNCIA 2 - Medida da constante de Planck

A montagem realizada na experiência nos permite determinar a constante de Planck h . Lembremos que quando os elétrons do tubo de raios-X são acelerados por um potencial V , a energia cinética dos elétrons ao atingir o ânodo é $E_c = eV$. Uma vez que os elétrons são parados pelo ânodo, emitem raios-X com quantum de energia $h\nu$, e desde que nem todos os elétrons cedem toda sua energia, a energia que sobra é dissipada no ânodo em forma de calor Ω . Conseqüentemente para cada elétron teremos:

$$E_c = eV = Q + h\nu \quad (7)$$

A energia máxima de um fóton de raios-X é portanto:

$$h\nu_{\text{max}} = eV$$

ou

$$h = \frac{eV\lambda_{\text{min}}}{c} \quad (8)$$

Determine h com o gráfico da experiência 1d e compare seu resultado com o valor admitido.

EXPERIÊNCIA 3 - Absorção de radiação monocromática

Quando colocamos um absorvedor (e.g. folha de alumínio de espessura d) no feixe de raios-X, parte da energia será absorvida. Isto é, a intensidade do feixe I_0 será reduzida a I , verificando-se

um decréscimo exponencial do tipo $I = I_0 e^{-\mu d}$ (onde μ é a constante de absorção e d a espessura do absorvedor). Podemos definir:

Transmissibilidade
$$T = \frac{I}{I_0} [\%] \quad (9)$$

Densidade óptica
$$D.O. = 1g_{10} \frac{I_0}{I} \quad (10)$$

Constante de absorção
$$\mu = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I} = \frac{2.303}{d} D.O. [cm^{-1}] \quad (11)$$

T e $D.O$ dependem de espessura d do absorvedor, da natureza do material e do comprimento de onda. Nas tabelas (ver referências 2 e 3) encontramos os valores mais úteis de μ/ρ onde ρ é a densidade do material.

Nesta experiência mediremos a transmissibilidade do alumínio por raios-X para o comprimento de onda da linha K_α do Mo em função da espessura da amostra. Também mediremos a transmissibilidade em função do número atômico z do absorvedor para espessura constante.

Aparelhagem

- 1 unidade de raios-X Leybold 55490
- 1 colimador (A)
- 1 tubo contador (C)
- 1 filtro de Zircônio (I)
- 1 medida de taxa Leybold 57552
- 1 contador IFSC 6AG225
- 1 suporte com placas de Al de diferentes espessuras: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 e 3 mm. ($Z = 13$)
- 1 suporte com placas de materiais diferentes mas de mesma espessura $d = 0,5$ mm
 - poliestireno PS ($Z = 6$) (Carbono)
 - alumínio ($Z = 13$)
 - ferro ($Z = 6$)
 - cobre ($Z = 29$)
 - Zircônio ($Z = 40$)
 - prata ($Z = 47$)
- fios

Faça a seguinte montagem:

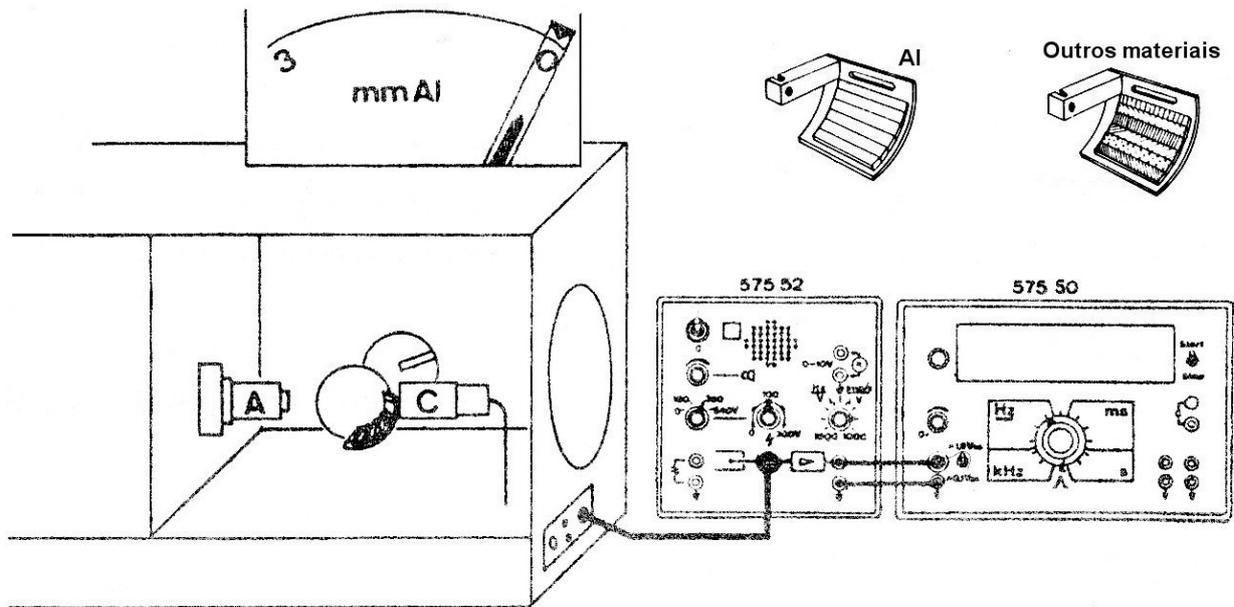


Figura 8: Esquema de montagem para absorção com amostras de Al e outros materiais.

- a) Inicialmente determinaremos a transmissibilidade do Al para o comprimento de onda da linha K_{α} em função da espessura. Para isto os raios-X devem estar limitados por um colimador (A) com o filtro de Zircônio (I). Ajuste o tubo contador horizontalmente e coloque o suporte com as amostras de Al sobre o suporte giratório (D) e meça várias vezes as taxas de diferentes contagens com as condições: $I_{EM} = 0,15\text{mA}$, $V = 25\text{KV}_p$ (botão (11) na posição "1"), tempo de contagem sugerido: 200". Não se esqueça de medir a situação sem amostra, que fornecerá o valor de I_0 . Faça um gráfico com seus resultados (T vs espessura d) em um papel mono-log. Deverá obter uma linha reta indicando que a intensidade I é uma função exponencial da espessura d .

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (12)$$

Determine μ e μ/ρ e compare com os valores da literatura (2, 3) ou as tabelas na pagina de Internet da disciplina.

- b) Para medir a transmissibilidade T em função do número atômico Z repita a experiência anterior, com o outro suporte de amostras, composta de vários elementos com a mesma espessura de 0,5mm. PS representa o Carbono. Faça com as seguintes condições operacionais:
- Para as seguintes posições: sem amostra, PS e Al: $I_{EM} = 0,02\text{mA}$, $V = 30\text{KV}_p$ (botão (11) na posição "5"), tempo de contagem sugerido: 30".
 - Para as seguintes posições: Fé, Cu, Zr e Ag: $I_{EM} = 1\text{mA}$, $V = 30\text{KV}_p$ (botão (11) na posição "5"), tempo de contagem sugerido: 300".
 - Meça a taxa de contagem de fundo, considerando corrente I_{EM} voltagem V igual a zero, para um intervalo de tempo de 300".
 - Faça um gráfico de $\frac{\mu}{\rho}$ vs Z . Discuta seus resultados.

Perguntas

1. Deduza a expressão (12) $I = I_0 e^{-\mu d}$.
2. Esta expressão se cumpre para todo tipo de radiação de raios-X? luz visível, radiação γ , partículas (p , μ , etc)?
3. Como varia μ em função de λ e Z ?

Alternativa

Esta prática possui uma outra versão, na qual é utilizado um sistema de aquisição de dados, cujos detalhes se encontram na pasta respectiva no próprio laboratório.

Referências:

- (1) X-ray experiments, Instruction manual – Leybold (arquivo do laboratório de ensino).
- (2) B.D. Cullity, Elements of X-ray diffraction, Addison-Wesley, New York, 2nd ed. 1978 (Biblioteca do IFSC 548.83 C 96762ez).
- (3) A.H. Compton e S.K. Allison, X-rays in Theory and Experiments, D. van Nostrand Co., Princeton, 2nd ed. 1970 (Biblioteca do IFSC 548.83 C 738x2).
- (4) C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, J. Willey Inc., (New York), cap. 1 e 2. 1978 (Biblioteca IFSC 580.41 K62 int).

Versão 2006/MSL
apraios-X-4.doc

02/2006