

# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

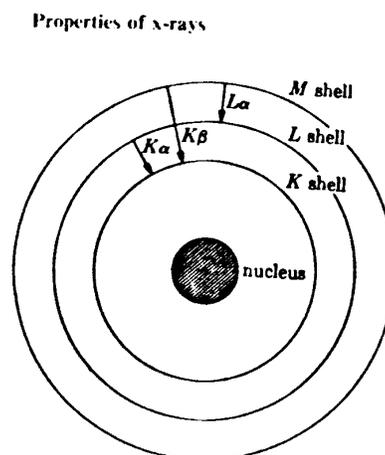
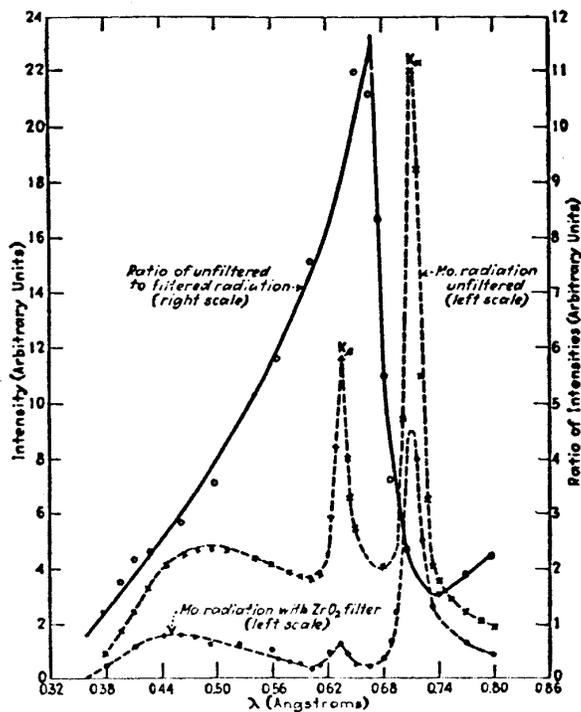


*Instituto de Física*

Laboratório de Estrutura da Matéria

Física 5 – FNC-313

## Raios-X



Raios-X I

## Emissão, Fluorescência e Absorção

### I-Introdução:

Nas experiências a serem realizadas, a emissão de raios-X é produzida por tubos em alto vácuo, no qual um filamento aquecido libera elétrons que são acelerados por um campo elétrico associado a uma diferença de potencial (da ordem de dezenas de kV) aplicada entre o filamento e o anodo (fig. 1). Os elétrons acelerados pelo campo elétrico penetram no anodo, perdem velocidade e transferem energia aos átomos com os quais interagem, provocando, em particular, ejeção de elétrons (ionização) das diversas camadas profundas (K, L, M) dos átomos. Como consequência disto observa-se a emissão de fótons de raios-X originados no volume irradiado do anodo, cujo espectro pode ser classificado em dois tipos: contínuo e característico.

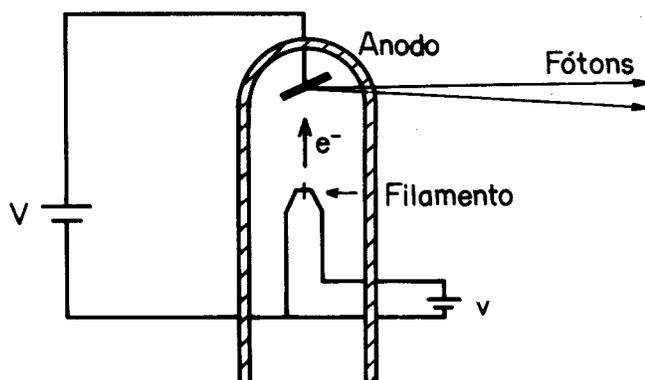


Fig. 1 – Esquema de um tubo emissor de raios-X.

Estas experiências devem ser realizadas em três sessões. Na primeira sessão haverá uma introdução teórica e devem realizar-se as experiências (a), na segunda as (b) e na terceira as (c) do Capítulo II. Os alunos devem trazer respondidas as questões do Apêndice I na segunda sessão e as do Apêndice II na terceira sessão. As respostas das questões do Apêndice I e II devem fazer parte do relatório, que deverá ser entregue duas semanas após terminada a experiência.

## Espectro contínuo de emissão

A perda de velocidade dos elétrons quando penetram no anodo faz eles emitirem fótons de raios-X com espectro contínuo de energia (ou comprimento de onda). A parte contínua do espectro de emissão é chamada “bremsstrahlung”. Nos diversos processos possíveis de geração de fótons, como consequência da variação da velocidade do elétron, tem-se o caso extremo no qual um elétron perde o total de sua energia, num único processo, e cria-se um só fóton. Em processos mais complexos a energia dos fótons produzidos é sempre menor à do elétron incidente no anodo.

A energia  $E_f$  de um fóton está relacionada com a sua frequência  $\nu$  e com o seu comprimento de onda  $\lambda$  associados, por

$$E_f = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

onde  $h$  é a constante de Planck e  $c$  a velocidade da luz no vácuo. A energia cinética  $E_c$ , que ganha um elétron quando é acelerado por uma diferença de potencial  $V$ , é dada por:

$$E_c = eV$$

Onde  $e$  é a carga do elétron.

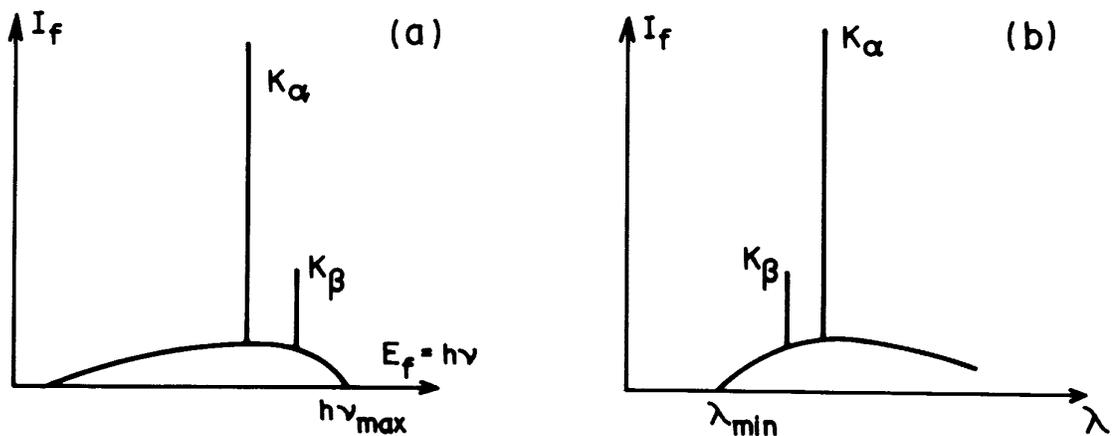


Fig.2 Intensidade de um espectro de emissão de raios-X em função da energia (a) e do comprimento de onda (b) dos fótons.

O valor máximo de energia de um fóton  $E_{f_{\max}} = h\nu_{\max}$  correspondente ao espectro de emissão contínua (Fig. 2), está associado ao processo de criação de um fóton com energia  $E_f$  igual a energia cinética  $E_c$  do elétron:

$$E_{f_{\max}} = E_c \rightarrow eV = h\nu_{\max} = h\frac{c}{\lambda_{\min}}$$

Estas equações relacionam a voltagem de aceleração dos elétrons no tubo de raios-X com a energia máxima, e o comprimento de onda mínimo dos fótons correspondentes ao espectro contínuo de emissão. Em consequência, o espectro contínuo depende da voltagem  $V$  aplicada ao tubo de raios-X.

Esta parte do espectro é contínuo porque fótons com qualquer energia  $E_f < E_{f_{\max}}$  (ou  $\lambda > \lambda_{\min}$ ) são também produzidos pelos elétrons desacelerados, nos numerosos possíveis processos elementares que envolvem a transformação parcial da energia dos elétrons em energia eletromagnética.

### Espectro característico de emissão

Os tubos de raios-X emitem também fótons de energia bem definida, que constituem o espectro de linhas ou característico, associado com as transições eletrônicas nos átomos ionizados pelas colisões dos elétrons incidentes no anodo. As energias dos fótons correspondentes ao espectro característico de raios-X, com picos estreitos, dependem exclusivamente da estrutura de níveis de energia eletrônicos profundos dos átomos ( ver Apêndice I ).

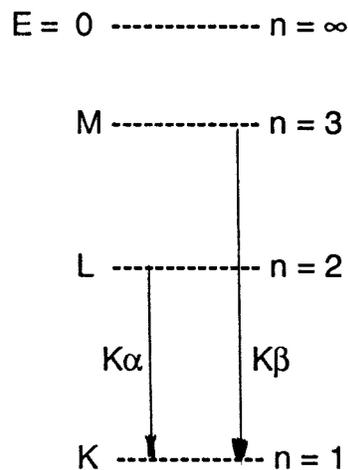


Fig.3 – Esquema dos níveis de energia dos elétrons nos átomos.

Na emissão dos tubos de raios-X convencionais, observa-se um espectro característico composto por picos associados às transições entre as camadas eletrônicas  $L \rightarrow K$  e  $M \rightarrow K$ , sendo a camada K a mais profunda dos átomos (fig. 3 ). Estas transições originam linhas de emissão chamadas  $K\alpha$  e  $K\beta$ , respectivamente. Estudos

espectroscópicos de alta resolução mostram que essas emissões estão compostas por várias linhas de comprimento de onda vizinhos. Estes picos complexos de emissão estão associados à estrutura fina dos níveis de energia eletrônicos.

### Difração de raios-X

A difração de raios-X se produz quando há interferência construtiva no processo de espalhamento dos fótons pelos átomos de uma estrutura cristalina.

Esquematisando a estrutura periódica dos cristais por planos cristalográficos, tem-se condições de difração, ou reflexão de Bragg, quando:

$$\theta_B = \theta_I = \theta_R$$

e

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

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda dos fótons,  $\theta_I$  e  $\theta_R$  os ângulos de incidência e de espalhamento, respectivamente, e  $d$  a distância interplanar dos planos cristalográficos. Os números  $n = 1, 2, \dots$  definem a ordem da reflexão ( 1ª ordem, 2ª ordem, etc.).

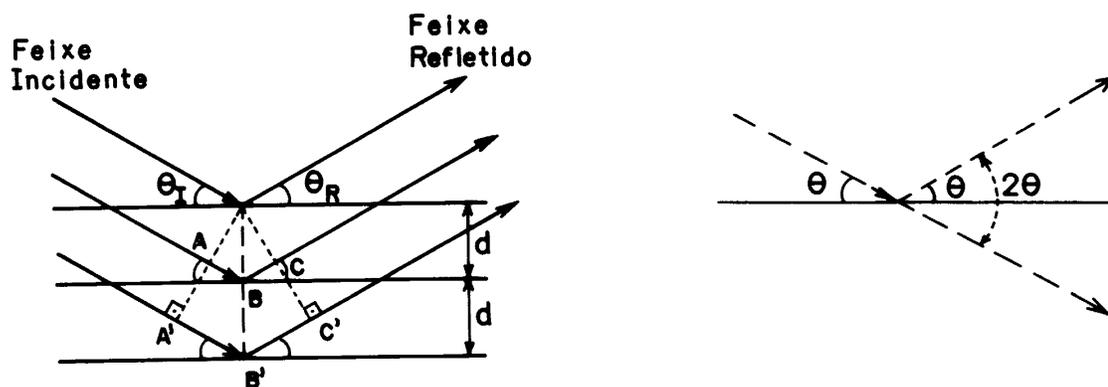


Fig. 4 – Esquema mostrando os raios incidentes e “refletidos” por planos cristalinos de espaçamento  $d$ .

A lei de Bragg implica, quando ela é satisfeita, que a diferença de caminho ótico entre os feixes espalhados pelos diversos planos cristalográficos é igual ao comprimento de onda  $\lambda$  ( A-B-C na figura 4 ) ou a um múltiplo dele (por exemplo A'-B'-C'). Nas direções tais que essa relação não se verifica ( $2 d \sin \theta \neq n \lambda$ ), a interferência entre as ondas espalhadas é destrutiva e não se observa intensidade de espalhamento significativa.

Um cristal, orientado de tal maneira a satisfazer  $\theta_I = \theta_R$ , pode ser usado como um analisador de um espectro de emissão de raios-X. Supondo como dominante a reflexão de primeira ordem, a lei de Bragg se escreve  $2 d \sin \theta = \lambda$ . Isto implica que numa varredura do ângulo  $\theta$  o cristal atua como um filtro que reflete apenas a radiação com comprimento de onda num entorno do valor de  $\lambda$  que satisfaz a lei de Bragg especificada acima.

No laboratório utiliza-se um conjunto tubo-goniômetro-detector. O goniômetro dispõe de duas rotações,  $\theta - 2\theta$ , que fazem o cristal manter o mesmo ângulo  $\theta$  i) com a direção do feixe incidente e ii) com a direção do feixe refletido e medido pelo detector (ver desenho na Seção IIb).

### Absorção de raios-X

Os fótons de raios-X são absorvidos pela matéria. No domínio de energia correspondente aos raios-X (5 a 30 keV nestas experiências), o principal processo de absorção dos átomos com Z na faixa de 23 a 30, utilizados neste trabalho prático, é o efeito fotoelétrico, pelo qual os fótons ionizam átomos transferindo a sua energia aos elétrons das diversas camadas de níveis atômicos. Para cada camada atômica (K, L, M) existe um limiar de energia do fóton incidente para que o efeito fotoelétrico seja possível. Essa energia é igual à energia de ligação ou de ionização correspondente à respectiva camada de elétrons. A probabilidade de um fóton ser absorvido e, conseqüentemente, o coeficiente mássico de absorção  $\mu$  dos fótons é função decrescente da energia dos fótons  $E_f$  e depende também do tipo de átomo que compõe o material. Esse coeficiente pode ser medido utilizando a relação:

$$I_T = I_o e^{-\mu(E) \rho x} \quad (\text{Lei de Lambert-Beer})$$

onde  $\rho$  é a densidade do material,  $I_o$  é a intensidade de fótons incidentes e  $I_T$  é a intensidade transmitida por uma lâmina de espessura  $x$  (Fig. 5a). O coeficiente mássico de absorção  $\mu$  é especificado em tabelas usualmente em  $\text{cm}^2/\text{g}$ . A absorptância  $A$  de um certo material é definida como:  $A = \frac{I_o}{I_T}$ . A absorptância  $A$  ( $E, \rho, x$ ) depende da natureza

dos átomos presentes e é função da energia do fóton incidente e da espessura e densidade da lâmina absorvedora.

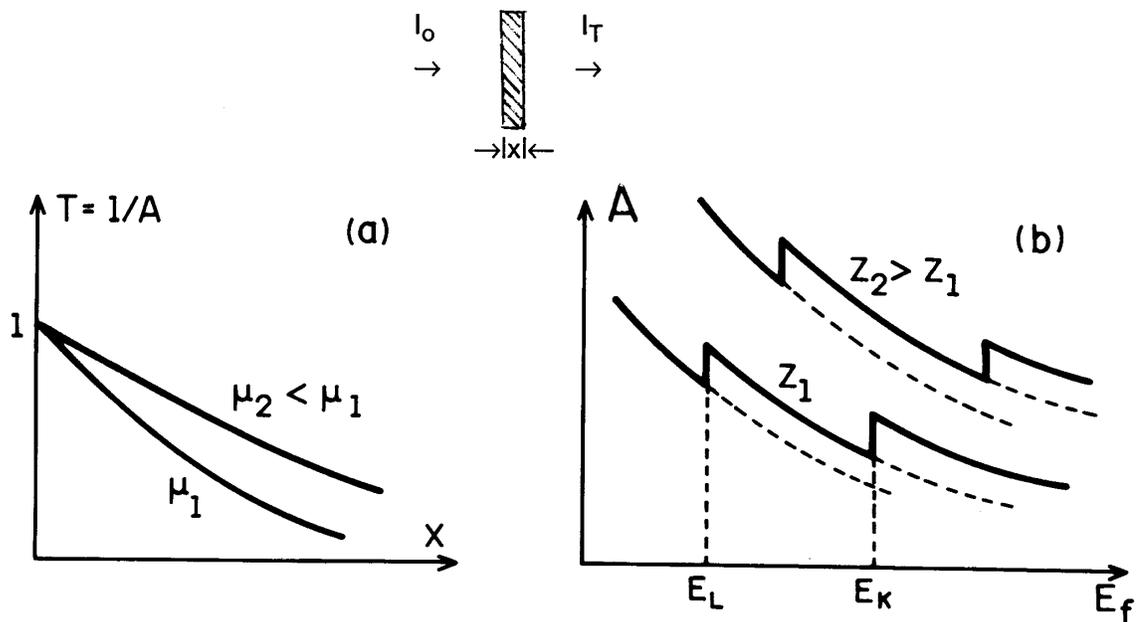


Fig. 5 – (a) Intensidade transmitida através de uma lâmina de espessura  $x$ . (b) Função absorptância para átomos com diferentes números atômicos em função da energia dos fótons incidentes.

Em geral o coeficiente de absorção e a absorptância diminuem para energias dos fótons crescentes. Existem porém, nos espectros de absorção, certas descontinuidades ou bordas associadas a um abrupto acréscimo na absorção para energias dos fótons crescentes (Fig. 5b). Estas descontinuidades se produzem quando a energia dos fótons tem um valor suficiente para conseguir ionizar camadas adicionais dos átomos absorvedores. Em conseqüência, as chamadas bordas K, L, M, etc. dos espectros de absorção correspondem às energias de ionização das respectivas camadas eletrônicas. Fótons com energia menor que a energia de ionização das diversas camadas podem eventualmente excitar átomos promovendo transições eletrônicas a níveis de energia superiores desocupados. Estas transições dão origem a picos de absorção em energias inferiores às das descontinuidades pode-se observar também, no caso de átomos em matéria condensada, a presença de oscilações associadas à estrutura geométrica dos átomos. Estes efeitos não serão considerados na análise dos resultados experimentais do trabalho prático.

### Fluorescência de raios-X

Após a ionização por efeito fotoelétrico, os átomos tendem a voltar a seu estado fundamental, de mínima energia, mediante vários processos. Aquele pelo qual a vacância eletrônica é simplesmente eliminada pela sua ocupação por um elétron de uma camada superior, com a conseqüente emissão de um fóton, denomina-se fluorescência. A emissão de fótons de raios-X por fluorescência, como conseqüência da ionização dos átomos pelos fótons incidentes, corresponde às mesmas linhas de emissão provocadas pelos elétrons incidindo no anodo do tubo de raios-X. As energias dos fótons de

fluorescência emitidos dependem exclusivamente da estrutura de energia eletrônica de cada átomo.

### Caracterização do detector de fótons Geiger e da estabilidade da fonte de Raios-X

Para a realização das experiências de emissão, difração, absorção e fluorescência de raios-X será utilizado um detector Geiger. Para o seu uso se deve conhecer o “plateau”, para fixar a voltagem de trabalho, e determinar o seu *tempo morto*. Um esquema de um gráfico típico de Taxa de Contagem de Fótons versus Voltagem é apresentado na Figura 6a. Sabendo que a intensidade de emissão de um tubo de raio-X é proporcional à corrente eletrônica, o *tempo morto* do detector pode ser determinado a partir de um gráfico de Taxa de Contagem de Fótons ( $R$ ) versus Corrente ( $I$ ) do tubo de raios-X, mantendo todos os outros parâmetros constantes. Se o *tempo morto*  $\tau$  do detector for nulo, a taxa de contagem  $R$  deveria ser proporcional à corrente  $I$ :

$$R = K I$$

Em caso de ser  $\tau \neq 0$  mede-se uma taxa aparente,  $R^*$ , relacionada com  $R$  por

$$R = \frac{R^*}{1 - R^* \tau}$$

Na Figura 6b estão esquematizadas funções típicas  $R(I)$  e  $R^*(I)$ .

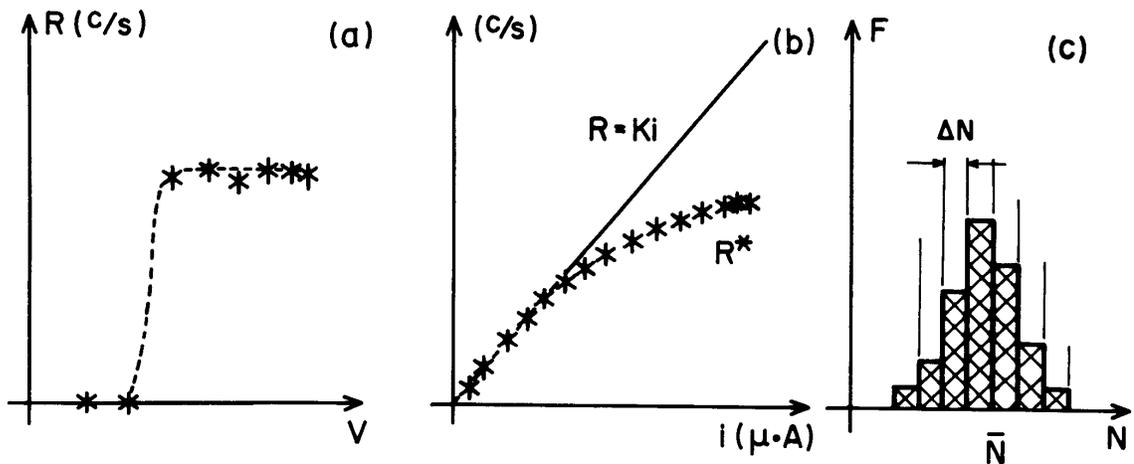


Fig. 6 – (a) “Plateau” do detector Geiger. (b) Taxas de contagem real e aparente em função da corrente eletrônica no tubo de raios-X. (c) Histograma de frequência do número de contagens.

A estabilidade de uma fonte pode ser estimada a partir de um estudo experimental do número de fótons  $N$  que se mede para um tempo fixo quando todos os parâmetros de controle são mantidos constantes. Deve-se medir  $N$  um número  $M$  elevado de vezes e fazer um histograma da função  $F$  que representa o número de vezes em que o número

de fótons contados corresponde aos diversos intervalos  $\Delta N$  do histograma (Fig. 6c). Do histograma experimental de F obtém-se a função  $P_e$  como

$$P_e(N) = \frac{F(N)}{\sum F_i(N) \Delta N}$$

no caso de ser  $\Delta N \ll \sqrt{\bar{N}}$ , no limite de  $M \rightarrow \infty$  a função  $P_e(N)$  tende à função de distribuição teórica  $P(N)$ . Esta função representa uma densidade de probabilidade.  $P(N)\Delta N$  é a probabilidade de medir um certo número de fótons compreendido entre  $N$  e  $N+\Delta N$ . Segundo a teoria estatística  $P(N)$ , quando  $\bar{N} \gg 0$ , deve satisfazer:

$$P(N) = \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) e^{-\frac{(N-\bar{N})^2}{2\sigma^2}} \quad \text{onde } \sigma = \sqrt{\bar{N}}$$

O valor de  $\sigma$  representa o desvio padrão associado a uma contagem  $\bar{N}$  de fótons. Um valor experimental de  $\sigma$  sensivelmente maior que  $\sqrt{\bar{N}}$  indica a presença de instabilidades elétricas ou mecânicas da montagem experimental afetando as medições.

### Condições de trabalho do tubo de raios-X

Somente uma pequena parte de potência eletrônica  $P$  do tubo de raios-X ( $P=VI$ , onde  $V$  é a voltagem e  $I$  é a corrente eletrônica do tubo de raios-X) é transformada em radiação (inferior a 1%). O resto se transforma em calor que aquece o anodo. A corrente eletrônica  $I$  no tubo de raios-X utilizado deve ser pequena para que o aquecimento do anodo não seja excessivo. Em geradores de raios-X de uso médico e científico, que precisam de altas correntes (dezenas ou centenas de  $mA$ ), é necessário esfriar, mediante circulação de água, o anodo para conseguir evacuar o calor produzido. O gerador utilizado na presente experiência não tem sistema de resfriamento, por isso a corrente eletrônica deve ser limitada até um máximo de  $80\mu A$

## II – Experiências

Para a realização das experiências é utilizado um aparelho gerador de raios-X com acessórios Tel-X-ometer. O anodo do tubo é de Cu. Duas voltagens podem ser escolhidas para a aceleração dos elétrons no tubo de raios-X: 20 ou 30 kV. Antes de ser ligado o aparelho deve-se conectar um microamperímetro para medir a corrente eletrônica e cuidar para que não ultrapasse o valor máximo de  $80\mu A$ . O Tel-X-ometer dispõe de um goniômetro no centro do qual se colocam os cristais. No braço do mesmo se posiciona o detector Geiger para medir a intensidade do feixe emitido, espalhado ou transmitido pelo material estudado. A rotação  $\theta$  do cristal e a rotação  $2\theta$  do detector

estão acopladas para assegurar, para todo ângulo, que o ângulo de incidência e de reflexão são iguais ( $\theta_I = \theta_R$ ). Esta igualdade representa uma condição necessária para a verificação da lei de Bragg ( $\lambda = 2 d \sin \theta$ ).

### a) Caracterização do detector de fótons

Para determinar a voltagem de trabalho do detector deve-se fazer incidir nele um feixe de raios-X e registrar o número de fótons em função da voltagem de alimentação. Escolhida e fixada a voltagem, deve-se medir a taxa de contagem para fluxos de fótons crescentes para analisar o efeito do *tempo morto* do detector. Medições repetidas em condições equivalentes permitirão estudar a estatística de contagem.

#### i) Determinação da voltagem de trabalho e do *tempo morto* do detector

Elementos necessários: Fenda de definição de 1mm, cristal de LiF, Fenda de resolução de 3mm, detector.

- Ligar o aparelho (30kV).
- Variando a posição angular do detector e utilizando o *Ratemeter*, buscar um dos máximos na intensidade de raios-X espalhada pelo cristal. Utilizar a fenda de resolução de 3mm de tal maneira de obter uma taxa de contagem de aproximadamente 300 c/s. Variar a corrente eletrônica do tubo de raios-X se necessário ( sem ultrapassar 80 $\mu$ A ).
- Medir durante 10s utilizando o *Counter* a taxa de fótons recebida pelo detector para voltagens crescentes a partir de  $V=300V$  até um máximo de 500V, com intervalos de 10V. Fazer gráfico da taxa  $R$  versus  $V$ .
- Escolher como voltagem de trabalho um valor de  $V$  que corresponda ao “plateau” (aproximadamente 40V acima do limiar inferior).
- Fixar inicialmente a corrente eletrônica no tubo em 80 $\mu$ A e, variando o ângulo do goniômetro, obter uma taxa entre 500 e 1000 c/s.
- Medir as taxas de fótons variando a corrente eletrônica no tubo de raios-X mantendo o resto do aparelho em condições constantes (variando a corrente entre 0 e 80 $\mu$ A). Graficar a taxa de contagem aparente  $R^*$  (c/s) versus a corrente  $I$  ( $\mu$ A).
- Considerando que, para baixas taxas de contagens de fótons ( $I \rightarrow 0$ ), a taxa real de fótons  $R$  é igual a taxa aparente  $R^*$ , e que as duas taxas são  $R = R^* = KI$  ( $K =$  constante, para taxas baixas), graficar a taxa  $R$  versus  $I$ , extrapolando a parte do gráfico correspondente a valores de  $I \rightarrow 0$ .
- A partir da expressão de  $R$  em função de  $R^*$ , citada na introdução teórica, deduzir o valor do *tempo morto*  $\tau$ .

#### ii) Estatística de contagens de fótons

Verificar-se-á a validade da teoria que conduz à determinação do erro estatístico  $\sigma = \sqrt{N}$ , utilizado nas experiências dos itens precedentes.

- Ajustar a corrente eletrônica para obter uma taxa de contagem de aproximadamente 100 c/s.
- Realizar como mínimo 100 medidas do número de fótons em 10s, em condições experimentais equivalentes.
- Fazer histograma da frequência das diversas contagens. Utilizar para o histograma um passo  $\Delta N \cong \sqrt{\frac{N}{3}}$ .
- Determinar e graficar a função normalizada  $P_e$  (Ver Introdução).
- Calcular o valor médio do número de fótons  $\bar{N}$  e representar no mesmo gráfico a curva da densidade de probabilidade  $P$  esperada utilizando  $\sigma = \sqrt{\bar{N}}$  (Ver Introdução).
- Comparar o histograma experimental com a curva teórica e discutir as eventuais discrepâncias.

### b) Determinação do espectro de emissão de raio-X do Cu

É determinado o espectro de emissão (incluindo as partes contínuas e características) do Cu, utilizando um cristal único de LiF, do qual se supõe conhecida a distância interplanar  $d = 2.015 \text{ \AA}$ . O cristal de LiF atua como monocromador ou analisador, selecionando para cada ângulo um comprimento de onda ou energia do fóton. O comprimento de onda do feixe espalhado pelo cristal de LiF, para cada ângulo  $\theta$ , é aquele que satisfaz a lei de Bragg  $\lambda = 2 d \text{ sen } \theta$ . A energia do fóton se deduz a partir da relação  $E_f = \frac{hc}{\lambda}$ .

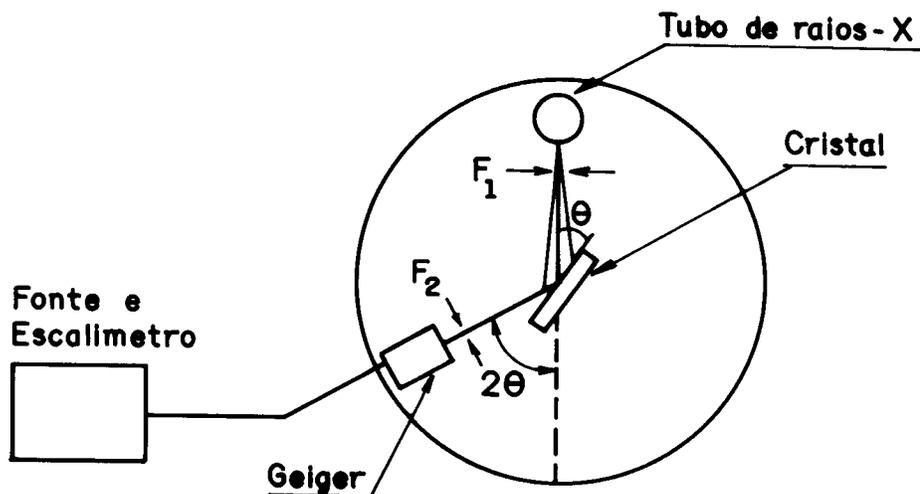


Fig.7 – Esquema da montagem experimental do analisador de raios-X.

Elementos necessários: fenda de definição de 1mm vertical, cristal de LiF, goniômetro  $\theta - 2\theta$ , fenda de resolução de 3mm vertical, detector Geiger, contador.

- Fazer uma varredura com o goniômetro  $\theta - 2\theta$  e, utilizando detector Geiger (Fig. 7), determinar a intensidade de difração por um cristal de LiF da radiação produzida por um tubo de Cu com  $I_1 \cong 80\mu\text{A}$ ,  $V_1 = 30\text{kV}$ , em função do ângulo de difração  $2\theta$ . Fazer a varredura a partir de  $2\theta_{\text{min}}$  até  $60^\circ$  com passo de  $0,50^\circ$  nos picos de emissão e de 1 entre eles.
- Fazer outra curva como a indicada no item precedente com  $V_2 = 20\text{kV}$  e  $I_2 \cong 80\mu\text{A}$ .
- Utilizando a lei de Bragg, supondo conhecido  $d = 2,015\text{\AA}$  para o LiF, determinar a energia dos fótons  $E_f$  para cada ângulo  $\theta$ . Graficar num mesmo diagrama as duas curvas  $I_f$  (fótons / segundo) versus  $E$  (kV) determinadas nos itens precedentes. Identificar os dois picos correspondentes às transições  $K\alpha$  e  $K\beta$  e determinar a energia e o comprimento de onda dos fótons emitidos. Comparar com os valores de tabela (ver Apêndice I).
- Comparar os espectros contínuo e característico obtidos a 20kV e 30kV, com correntes eletrônicas de  $80\mu\text{A}$ , e comentar as suas características.
- Medir com maior detalhe a parte do espectro contínuo correspondente a baixos ângulos (ou altas energias dos fótons) para  $V = 20\text{kV}$  e  $I = 80\mu\text{A}$ . A partir do valor experimental de  $2\theta_{\text{min}}$ , e supondo conhecidos  $d$ ,  $E$  e  $c$ , deduzir o valor da constante de Planck  $h$ .

### c) Fluorescência e absorção de raios-X

É determinada a absorvância de fótons de raios-X por lâminas (ou filtros) compostas por diversos elementos atômicos, para diferentes radiações de fluorescência geradas por várias fontes monoatômicas. Utilizar-se-á para isso a montagem experimental descrita na Fig. 8.

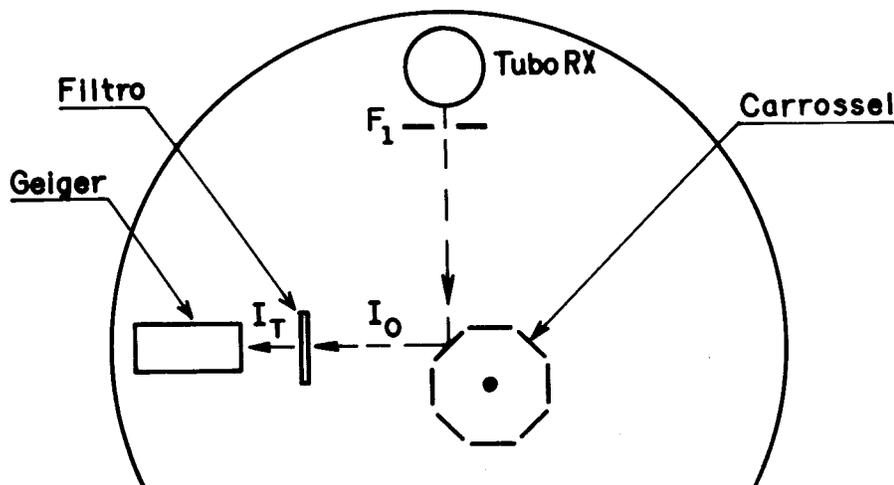


Fig. 8 – Montagem experimental para a experiência de fluorescência e absorção de raios-X.

Elementos necessários: fenda de definição de 1mm carrossel contendo elementos com  $23 < Z < 30$  , controle externo e suporte, filtros de V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu e Zn, detector Geiger situado em posição angular fixa  $2\theta \cong 90$  graus.

- Colocar o carrossel contendo as lâminas de V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu e Zn que produzirão a fluorescência, frente ao tubo de raios-X, no eixo do goniômetro (retirar previamente as peças que foram utilizadas nas experiências precedentes para fixar os cristais). Fixar o carrossel de tal maneira que os materiais fluorescentes estejam com as suas superfícies a 45 graus com respeito ao feixe incidente. O detector Geiger deve ser posicionado a 90 graus com respeito ao feixe incidente para receber os fótons produzidos pela fluorescência dos materiais situados no carrossel.
- Irradiar os diversos materiais colocados no carrossel, com o feixe produzido pelo tubo de raios-X de Cu, para excitar os átomos do alvo e eles produzirem os fótons característicos de fluorescência. Utilizar o dispositivo de controle externo para a mudança dos alvos.
- Medir com o detector Geiger, para cada elemento emissor situado no carrossel, a intensidade de fluorescência  $I_o$  emitida.
- Graficar a intensidade de fluorescência  $I_o$  produzidas pelos diferentes elementos emissores do carrossel ( sem absorvedor ou filtro ).
- Medir com o detector Geiger, para cada elemento emissor, a intensidade transmitida  $I_T$  através de uma lâmina de V.
- Determinar a absorptância  $I_o / I_T$  da lâmina de V para os fótons de fluorescência dos diversos elementos atômicos do carrossel ( $23 < Z < 30$ ).
- Realizar os mesmos procedimentos dos dois itens precedentes utilizando filtros de Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu e Zn.
- Graficar as funções absorptância,  $A = I_o / I_T$  , dos diversos filtros versus o número atômico  $Z$  dos elementos fluorescentes.
- Supondo que a fluorescência é composta essencialmente pelas emissões  $K\alpha$  dos diversos elementos, graficar, utilizando os valores de  $E_{K\alpha}$  da tabela (Apêndice I), a função  $A$  versus  $E_f$ , para todos os filtros estudados.
- Analisar os gráficos dos itens precedentes e verificar que as descontinuidades da função  $A$  se encontram nas posições esperadas (consultar tabela do Apêndice).

## Apêndice I

- Distâncias interplanares de cristais de estrutura cúbica:

$$\text{LiF} \quad d = 2,015 \text{ \AA}$$

$$\text{NaCl} \quad d = 2,820 \text{ \AA}$$

Comprimentos de onda associados às linhas de emissão  $K\alpha$  e  $K\beta$  de vários elementos e comprimento de onda associado à descontinuidade  $K$  ( $\lambda_K$ ). Este valor

está associado à energia de ligação ou de ionização correspondente aos elétrons da camada K:  $E_k = h \frac{c}{\lambda_k}$ .

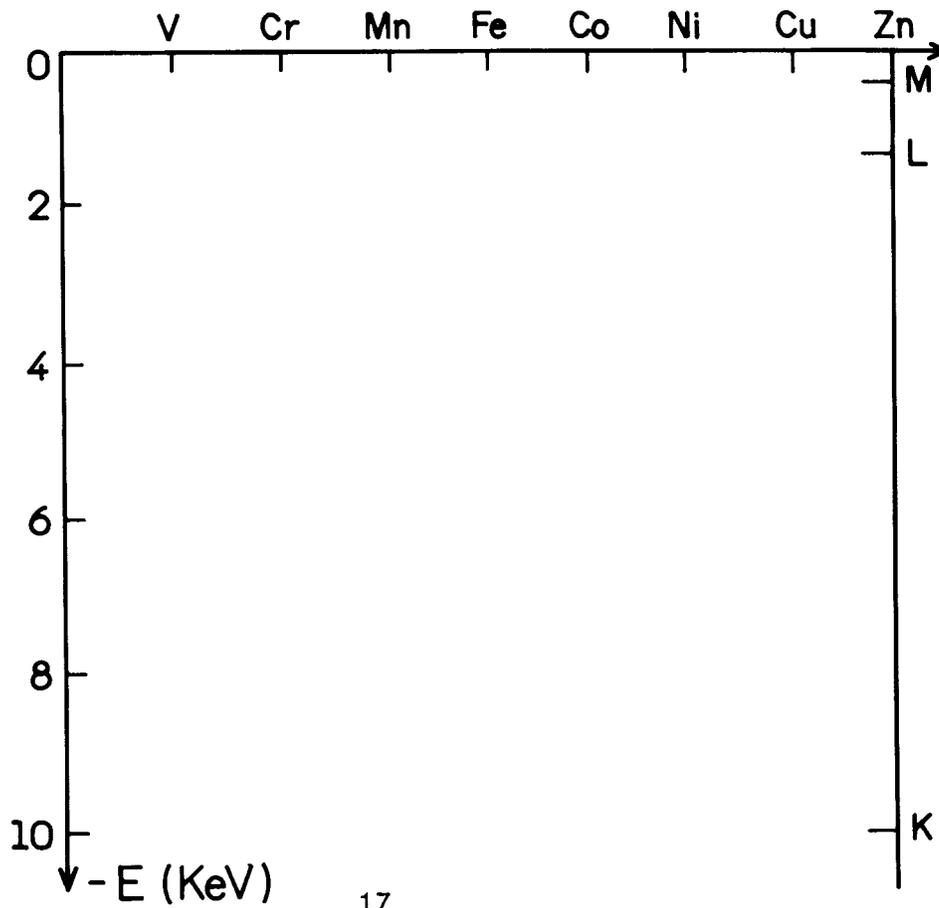
| Elemento |    | Emissão               |                      | Borda de absorção |
|----------|----|-----------------------|----------------------|-------------------|
| Símbolo  | Z  | $\lambda K\alpha$ (Å) | $\lambda K\beta$ (Å) | $\lambda K$ (Å)   |
| V        | 23 | 2,55                  | 2,28                 | 2,27              |
| Cr       | 24 | 2,29                  | 2,08                 | 2,07              |
| Mn       | 25 | 2,10                  | 1,91                 | 1,89              |
| Fe       | 26 | 1,94                  | 1,76                 | 1,74              |
| Co       | 27 | 1,79                  | 1,62                 | 1,61              |
| Ni       | 28 | 1,66                  | 1,49                 | 1,48              |
| Cu       | 29 | 1,54                  | 1,39                 | 1,38              |
| Zn       | 30 | 1,44                  | 1,29                 | 1,28              |

- Valores da energia dos fótons (espectro característico) emitidos pelos átomos com  $23 < Z < 30$  e esquema de níveis de energia eletrônica.

a) Completar o seguinte quadro:

| Elemento | Z  | $E_{K\alpha}$ (keV) | $E_{K\beta}$ (keV) | $E_K$ (keV) |
|----------|----|---------------------|--------------------|-------------|
| V        | 23 |                     |                    |             |
| Cr       | 24 |                     |                    |             |
| Mn       | 25 |                     |                    |             |
| Fe       | 26 |                     |                    |             |
| Co       | 27 |                     |                    |             |
| Ni       | 28 |                     |                    |             |
| Cu       | 29 |                     |                    |             |
| Zn       | 30 |                     |                    |             |

- b) Completar (em escala) os esquemas de níveis de energia eletrônica correspondentes às camadas profundas (K, L, M), sem considerar a estrutura fina das mesmas.



17

## Apêndice II

### Questões

- 1) Qual é a voltagem máxima que pode ser aplicada a um tubo de raios-X de Cu para ele produzir um espectro contínuo sem as linhas características  $K\alpha$  e  $K\beta$ ?
- 2) Discutir o fato de que, na determinação do espectro de emissão de um tubo de raios-X utilizando por exemplo um cristal de LiF e um detector Geiger, a parte do espectro experimental correspondente a energias  $E_{max}/2 < E < E_{max}$  não contém erros associados à existência de contribuições harmônicas.
- 3) A partir dos dados da Tabela, demonstrar graficamente a lei de Mosley ( $\sqrt{E_f} = C(Z - s)$ ,  $C$  e  $s$  constantes) para emissões  $K\alpha$  e  $K\beta$ . Determinar  $C$  e  $s$ .

- 4) Quais são as diferenças esperadas num espectro de emissão  $I$  versus  $\lambda$  (parte contínua e característica) correspondente a dois elementos A e B, tais que  $Z_A > Z_B$  para  $V = 20\text{kV}$ ?
- 5) Determinar a energia máxima dos fótons e o ângulo mínimo de difração associados ao espectro contínuo para  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ , quando se usa  $V_1 = 20\text{kV}$  e  $V_2 = 30\text{kV}$ , utilizando cristais de LiF e NaCl.
- 6) Explicar (experiência c) porque não se devem observar as descontinuidades de absorção do Cu e do Zn em experiências de absorção de raios-X nas quais se utiliza radiações incidentes  $K\alpha$  de elementos com  $23 \leq Z \leq 30$ .
- 7) Excitando a fluorescência atômica de elementos com  $23 \leq Z \leq 30$  com um tubo de raios-X com anodo de Cu, observa-se valores menores de intensidade emitida para emissões com  $Z \geq 28$ . Justificar esta observação.
- 8) Partindo do conhecimento independente da estrutura cúbica do NaCl e sabendo que a) a intensidade do cristal é  $\rho = 2,16 \text{ g/cm}^3$ , e b) a reflexão de Bragg com  $n = 1$ , utilizando um feixe de raios-X de  $\lambda$  desconhecido é observada para  $2\theta = 40,24^\circ$ , determinar o comprimento de onda do feixe de raios-X utilizado.

## Bibliografia

Os espectros de emissão estudados nestas experiências foram analisados associando-os a transições entre estados de simples ionização (linhas de emissão de primeira ordem). Utilizando espectrômetros mais sensíveis outras linhas de emissão mais fracas podem ser detectadas. Elas estão associadas a transições entre estados de ionização múltipla. Mais detalhes sobre Espectroscopia de Raios-X e, em particular, sobre as características dos espectros de emissão (contínuo e característico) de raios-X podem ser encontrados nos livros seguintes:

- Introduction to Modern Physics  
F. K. Richtmyer, E. H. Kennard, T. Lauritsen.
- Introduction to Atomic Physics  
O. Oldemberb
- Principles of Modern Physics  
R. Leighton

## Raios-X

### Tópicos da entrevista (Além das questões da apostila)

- 1) Tubos de Raios-X: Descrição, princípio de funcionamento.
- 2) Analisador de Raios-X: Função e descrição do cristal monocromador-analisador. Lei de Bragg (dedução). Goniômetro  $\theta - 2\theta$  (necessidade do seu uso, descrição, fendas de definição e resolução).
- 3) Detector de Raios-X (Geiger): Descrição. Princípio de funcionamento. “Plateau”. *tempo morto* (definição, determinação, correção de taxas de contagem de fótons por *tempo morto*). Estatística de contagem de fótons (Determinação de histograma de frequências).
- 4) Espectro de Emissão de Raios-X: Características (espectro de linhas ou característico e espectro contínuo). Origens do espectro de linhas. Conexão entre o espectro de linhas e a estrutura de níveis de energia eletrônicos. Origem do espectro contínuo. Determinação da constante de Planck a partir de  $(2\theta)_{\min}$  do espectro contínuo. Esquemas qualitativos de espectros de emissão  $I$  versus  $\lambda_f$  e versus  $E_f$  para diversos elementos atômicos e diversas voltagens do tubo de Raios-X.
- 5) Fluorescência e Absorção de Raios-X: Origem e características de um espectro de emissão de fluorescência de Raios-X. Descrição qualitativa da função Absortância versus Energia dos fótons incidentes (estes fótons gerados pela fluorescência de vários elementos:  $23 \leq Z \leq 30$ ), para vários elementos atômicos (V, Mn, etc.), supondo o espectro de emissão de fluorescência de Raios-X como monocromático ( $I(\lambda K\alpha) \gg I(\lambda K\beta)$ ).
- 6) Relação entre a Emissão e a Absorção de Raios-X com as Estruturas de Níveis de Energias Eletrônicas: Determinação das energias associadas às transições  $K\alpha$  e  $K\beta$  e à borda de absorção K, e os comprimentos de onda  $\lambda K\alpha$ ,  $\lambda K\beta$  e  $\lambda K$ , a partir do conhecimento das estruturas de níveis de energia eletrônicos dos átomos. Determinação das energias associadas às camadas eletrônicas K, L e M a partir das medições dos valores das energias dos fótons emitidos ( $E K\alpha$  e  $E K\beta$ ) e da energia da borda K ( $E K$ ) (ou  $\lambda K\alpha$ ,  $\lambda K\beta$  e  $\lambda K$ ).

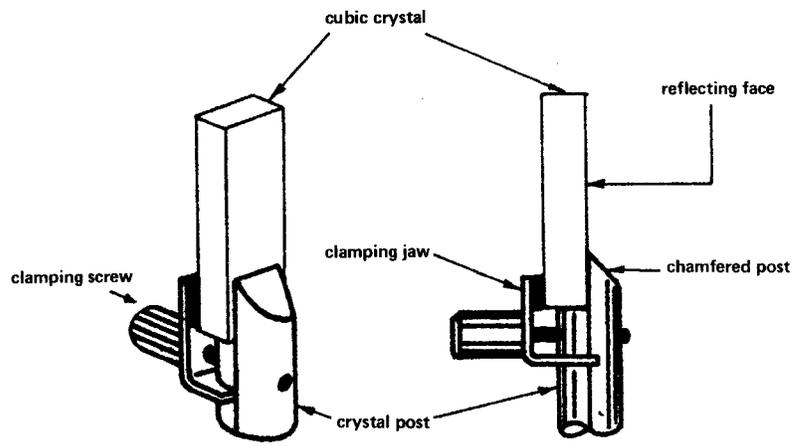


FIG. 2 MOUNTING OF CUBIC CRYSTALS