

Laboratório de Física Moderna

INTRODUÇÃO A TÓPICOS DE DIFRAÇÃO DE ALTA ENERGIA

ESPECTROS CONTÍNUOS DE RAIOS X (Experiência B.5)

PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

Feixes de raios X são analisados através de difração por um monocristal, para diferentes valores da tensão de aceleração do tubo de raios X. A partir da variação do comprimento de onda mínimo dos raios X emitidos em função da tensão de aceleração é obtida a constante de Planck.

TÓPICOS RELACIONADOS

Radiação de “*Bremsstrahlung*” (“*Bremsen*” para frear e “*Strahlung*” para radiação – ou seja, radiação de frenagem ou radiação de desaceleração), espectros contínuos de raios X, lei de Duane-Hunt, lei de Bragg, produção e detecção de feixes de raios X, colimação de feixes de raios X, blindagem e proteção.

EQUIPAMENTO

Unidade de raios X, monocristal de fluoreto de lítio (LiF), detector de raios X, contador de pulsos (tipo Geiger), amplificador, interface Cobra3[®], computador, multímetros, cabos de conexão.

TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Registrar os espectros de emissão contínua de raios X de um alvo de cobre com diferentes valores da a tensão de aceleração (V_A), utilizando um monocristal de LiF na condição de Bragg.
2. Verificar a lei de Duane-Hunt.
3. Determinar a intensidade de raios X emitidos com diferentes comprimentos de onda em função da tensão de aceleração (V_A).
4. Obter graficamente o valor da constante de Planck.

PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

1. O arranjo experimental encontra-se esquematizado na Fig. 1. Coloque a fenda de 2 mm de abertura na saída do feixe de raios X, com o monocristal de LiF montado no porta-amostra de modo que a superfície do monocristal esteja inicialmente na horizontal. Pressione o botão “*Zero Key*” para que o detector e o porta-amostra sejam trazidos para a posição inicial.
2. Para realizar as medidas necessárias para registrar os espectros de raios-X será utilizado o programa Measure[®]. Então, com o computador ligado, inicie o programa.
3. A interface do programa é bem simples. Para iniciar o registro das medidas, escolha a opção “*File*” e depois “*New Measurement*”. Uma nova janela se abrirá e então escolha a opção “*Automatically*” na caixa “*Type of Measurement*”.

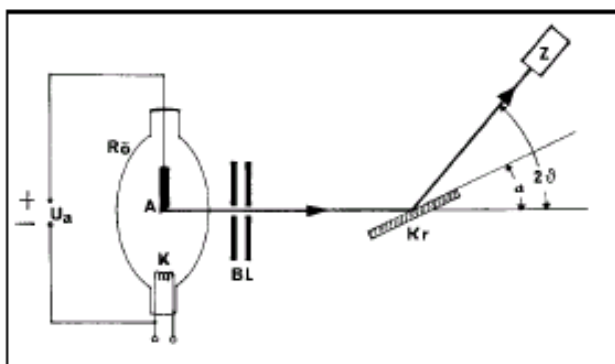


Fig. 1: Montagem para obtenção de espectros contínuos de raios X do alvo de cobre. U_a = tensão de anodo, R_0 = tubo de raios X, K = catodo, A = anodo de Cu, BL = sistema de colimação, K_r = cristal, Z = detector, θ = ângulo de Bragg.

- Nessa mesma caixa, escolha os ângulos inicial e final de varredura, atribuindo ao “*Start Angle:*” o valor 5 e ao “*Stop Angle*” o valor 20; por fim, marque todas as opções da caixa “*Display*”. Com essa configuração o cristal e o detector giram em movimento concatenado automaticamente registrando o espectro de raios X desde o ângulo de 5° até 20° . Ao final desses ajustes, a aparência da caixa de diálogo deve ser a mostrada na Fig. 2.

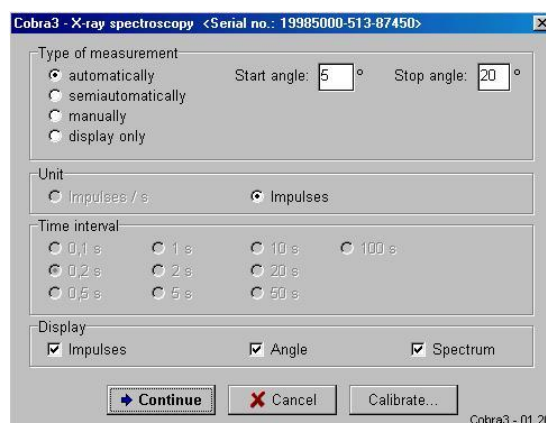


Fig. 2: Caixa de diálogo mostrando os ajustes iniciais para levantamento automático dos espectros de raios X.

- Os raios X difratados pelo monocristal na posição angular θ são registrados pelo detector na posição angular 2θ . Na própria unidade de raios X há uma saída de tensão proporcional ao ângulo de interesse (θ ou 2θ), à razão de 0,1 V/grau, sendo essa tensão medida com um voltímetro.
- Feche a porta deslizante da unidade, selecione a menor velocidade de varredura, ajuste os botões de controle da unidade para que os movimentos do cristal e do detector sejam concatenados e para que o ângulo registrado seja o correspondente ao do cristal (θ).
- Para que o programa registre corretamente os valores dos ângulos θ e 2θ , é necessário efetuar um procedimento de calibração prévia. Para isso, escolha a opção “*Calibrate...*” e uma pequena janela se abrirá, com a aparência mostrada na Fig. 3.
- Este procedimento de calibração deve ser realizado uma única vez no começo da prática. Ao longo das medidas, lembre-se de conferir se o valor do ângulo registrado pelo programa de controle está coerente com a medida indicada no voltímetro (ver item 9 abaixo). Se houver alguma discrepância apreciável será necessário repetir o procedimento de calibração.

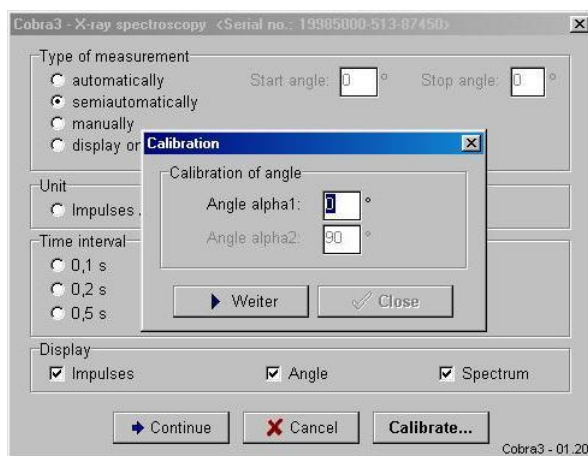


Fig. 3: Caixa de diálogo mostrando o procedimento de calibração das medidas de ângulos.

9. Para efetuar a calibração, posicione o cristal e detector na posição inicial pressionando o botão “Zero Key” na unidade de raios X. Observe a leitura no voltímetro, clique em “Calibrate”, digite o ângulo correspondente na janela “Angle alpha1” e clique a seguir em “Weiter”. Gire o cristal e o detector para o ângulo máximo. Lembre-se que o que está sendo marcado e registrado é o ângulo de giro do cristal (θ). Observe a nova leitura no voltímetro, digite o ângulo correspondente na janela “Angle alpha2” e clique novamente em “Weiter” para encerrar a calibração.
10. Retorne o conjunto cristal/detector para a posição inicial pressionando o botão “Zero Key” na unidade de raios X. Feche a janela de calibração e o programa estará apto a iniciar o registro do espectro através do botão “Continue”.
11. O programa, neste momento, mostrará uma nova janela contendo um gráfico com dois eixos cartesianos: um (eixo y) mostrando a intensidade do feixe (registrada por um contador acoplado ao detector de raios X) e o outro (eixo x) mostrando o ângulo θ em graus. Nessa janela o espectro de raios X será traçado em tempo real. São ainda disponíveis a serem mostradas três janelas menores: a primeira contém o ângulo de giro do cristal (que deve corresponder à leitura do voltímetro); a segunda mostra a intensidade atual registrada pelo contador. Há ainda uma terceira janela de comando que permite interromper a contagem automática.
12. Ajuste a tensão de aceleração V_A no seu valor máximo (25 kV). Posicione o cristal em um ângulo de aproximadamente 4° e pressione a seguir na unidade de raios X o botão “Auto”. A partir daí, o movimento do conjunto cristal/detector se inicia e então basta acompanhar na tela do computador o traçado do espectro de raios X emitidos pelo alvo de cobre e difratados pelo monocristal de LiF orientado na direção [1 0 0]. O ângulo θ se manterá entre os limites pré-definidos ($5 \leq \theta \leq 20^\circ$).
13. Com o objetivo de promediar os erros aleatórios (estatísticos) envolvidos no processo de contagem, é necessário repetir este processo várias vezes, de modo que o espectro final seja construído (no relatório) a partir das médias das várias medidas de intensidade efetuadas para cada ângulo. Para isso, repita o processo de aquisição descrito acima no mínimo outras quatro vezes.

14. Após a conclusão de cada espectro, lembre-se de salvar o arquivo de dados e também de exportá-lo em um formato que possa ser acessado em outros programas (.txt, por exemplo). Organize todos os arquivos em uma pasta previamente criada para o grupo e liste na Folha de Dados os nomes dos arquivos e a descrição do seu conteúdo.
15. Repita as medidas acima utilizando oito a dez diferentes valores para a tensão V_A (com o valor mínimo de 15 kV). Lembre-se de que para cada valor escolhido serão necessários pelo menos cinco espectros para que possa ser calculada a média dos valores obtidos.
16. Como a intensidade do feixe de raios X emitidos diminui com a redução da tensão V_A , recomenda-se, no caso de tensões mais baixas, coletar um número maior de espectros para posterior obtenção das médias, garantindo assim uma relação sinal/ruído razoável em todos os espectros construídos a partir das médias. Como critério para estimativa do número de espectros a serem registrados para cada valor de V_A , multiplique a contagem máxima obtida com a tensão máxima (25 kV) pelo número de espectros registrados com esta tensão. A seguir, observe a contagem máxima correspondente ao novo valor de V_A e calcule quantos espectros serão necessários para obtenção do mesmo valor (aproximadamente) acumulado obtido com tensão máxima.
17. O arranjo experimental para as próximas medidas está indicado na Fig. 4. Esse arranjo não conta mais com a interface, nem o computador. É mantido o colimador de 2 mm na saída do feixe de raios X, assim como o monocristal de LiF, o qual é montado no porta-amostra de modo que a superfície do monocristal esteja inicialmente na horizontal. Pressione o botão “Zero Key” para que o detector e o porta-amostra sejam trazidos para a posição inicial.
18. Ajuste o contador de pulsos para efetuar contagens tipicamente de 60 s a 100 s. A leitura indicada no contador é proporcional à intensidade de radiação detectada durante o tempo escolhido.



Fig. 4: Arranjo experimental para medida da intensidade de raios X espalhados para cada valor do ângulo θ .

19. Se a contagem durante o tempo escolhido ultrapassar o fundo de escala do contador (9.999), será necessário reduzir o tempo de contagem e somar manualmente as contagens para intervalos menores, mas tomando o cuidado de sempre manter o mesmo tempo total de contagem em todas as medidas efetuadas. Medidas anteriores podem ainda ser aproveitadas fazendo uma regra de três entre

o novo intervalo de tempo e o anterior.

20. Os raios X difratados pelo monocristal na posição angular θ são registrados pelo detector na posição angular 2θ . Na própria unidade de raios X há uma saída de tensão proporcional ao ângulo de interesse (θ ou 2θ), à razão de 0,1 V/grau, sendo essa tensão medida com um voltímetro.
21. Feche a porta deslizante da unidade, selecione a velocidade de varredura, ajuste os botões de controle da unidade para que os movimentos do cristal e do detector sejam concatenados e para que o ângulo registrado seja o correspondente ao do cristal (θ).
22. Ajuste o ângulo do monocristal (ângulo θ) em 9° . Registre a intensidade de radiação para um intervalo de tensão de aceleração V_A entre 12 e 22 kV (mínimo de 12 pontos) tomando o cuidado de registrar mais pontos na região em que a variação da contagem se torna mais apreciável.
23. Repita as medidas descritas acima, mas agora registrando os valores da intensidade de raios X para outros valores de ângulo do cristal. Faça as medidas para pelo menos 7 outros valores do ângulo θ , com esse ângulo variando na faixa de 9 a 15° .

CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. Qualquer equipamento de raios X produz radiação que pode oferecer riscos à saúde dos operadores. A unidade de raios X empregada nesse experimento é construída de maneira a proporcionar o mínimo perigo possível, só existindo radiação emitida quando a porta deslizante da unidade (a qual é blindada com uso de um plástico especial contendo chumbo) está hermeticamente fechada. De qualquer forma, devem ser tomadas as precauções usuais em ambientes contendo radiação ionizante, como não permanecer próximo à unidade inadvertidamente por longos períodos, não deixar o feixe ativo por mais tempo do que o necessário e em caso de percepção de qualquer problema técnico comunicar imediatamente ao professor ou responsável.
2. O tubo detector não deve nunca ser exposto a radiação frontal (não defletida) por longos períodos de tempo. Quaisquer estalos (“*glitch*”) que venham a ser ouvidos do equipamento, podem estar relacionado a fugas de alta tensão; nesse caso, comunicar imediatamente ao professor.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. Quando elétrons emitidos pelo catodo de um tubo de raios X são acelerados e, com alta energia cinética, colidem com um alvo metálico representado pelo anodo de Cu, raios X são emitidos com distribuição contínua de energia (efeito de Bremsstrahlung), sendo o mínimo comprimento de onda da radiação emitida diretamente proporcional à tensão de aceleração aplicada ao anodo:

$$e V_A = hc / \lambda_{\min} . \quad (1)$$

2. A chamada lei de Duane-Hunt, verificada experimentalmente em 1915, decorre imediatamente da Eq. 1:

$$V_A \lambda_{\min} \cong 1,25 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} . \quad (2)$$

3. A análise dessa radiação policromática pode ser feita com uso de um monocristal, com orientação dos seus planos cristalinos convenientemente ajustada. Os raios X incidindo sobre a superfície do monocristal orientado sofrem interferência construtiva apenas em direções bem definidas, determinadas pela lei de Bragg:

$$2d \sin \theta = n \lambda . \quad (3)$$

Nessa expressão, d é a distância interplanar característica do monocristal, θ é o ângulo de difração de Bragg (ângulo entre o feixe incidente e os planos atômicos cristalinos) e n é um número natural que indica a ordem de difração ($n = 1, 2, 3, \dots$). O valor de d para o cristal de LiF orientado na direção $[1\ 0\ 0]$ vale $d = 2,014 \text{ \AA}$.

4. Por tratar-se de um monocristal orientado, d é fixo, e a detecção de raios X para diferentes valores de θ fornece a distribuição em energia dos fótons do feixe, com os valores de energia dados por:

$$E = \frac{nhc}{2d \sin \theta} . \quad (4)$$

5. Para cada valor de θ ocorre portanto difração de raios X com um valor definido de comprimento de onda e frequência (para cada ordem). Como o mínimo valor do comprimento de onda (λ_{\min}) depende da tensão V_A (Eq. 1), a ocorrência de raios X difratados segundo um dado ângulo θ só é observada a partir de um valor mínimo da tensão de aceleração (V_A^{\min}) para o qual o valor de λ_{\min} fica abaixo do valor de λ correspondente ao ângulo θ em questão.

QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Discuta detalhadamente o efeito de Bremsstrahlung e deduza as Eqs. 1 e 2.
2. Calcule os valores teóricos de λ_{\min} e θ_{\min} para a tensão de aceleração máxima (25 kV).
3. Apresente uma dedução geométrica da lei de Bragg (Eq. 3).
4. Deduza a equação que fornece a energia dos fótons de raios X, Eq. 4.
5. Esboce um espectro contínuo de raios X típico de um alvo metálico qualquer (Cu, Mo, W, etc), indicando e discutindo como esse espectro é alterado com a variação na tensão de anodo.
6. Como a constante de Planck pode ser obtida a partir de uma série de medidas de V_A e λ_{\min} ?
7. Esboce como deve ser a curva de intensidade espalhada segundo um dado ângulo θ em função da variação da tensão de aceleração (V_A).

PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

Espectros com diferentes valores da tensão de aceleração:

1. Organize todos os espectros registrados em laboratório em tabelas (uma para cada valor de V_A), contendo em uma coluna o ângulo θ e nas outras as intensidades registradas em cada espectro. Apresente os dados de forma que ao longo de uma linha correspondendo a um dado valor de θ

- possam ser lidos os valores de intensidade registrados nas várias medidas efetuadas consecutivamente. (Eventualmente, podem ocorrer saltos em alguns ângulos; neste caso a coluna intensidade deverá ser deixada em branco no espaço correspondente aos correspondentes ângulos.)
2. Obtenha as médias dos valores de intensidade registrados para cada ângulo, utilizando todos os valores disponíveis de intensidade correspondendo àquele ângulo (para cada valor de V_A).
 3. Utilizando esses valores médios, trace os espectros de emissão do alvo de Cu obtidos com diferentes valores de V_A e usando o cristal de LiF. Coloque todos os espectros no mesmo gráfico, deslocando-os ao longo do eixo vertical (basta adicionar às contagens um valor constante conveniente para cada espectro).
 4. Discuta as variações dos comprimentos de onda mínimos λ_{\min} dos espectros em função de V_A .
 5. Obtenha, a partir desses espectros contínuos, os valores de λ_{\min} , estimando as incertezas envolvidas nesses valores.
 6. Determine os valores dos produtos $V_A \lambda_{\min}$ e compare com o valor dado na lei de Duane-Hunt.
 7. Calcule as energias dos fótons (em eV) correspondentes a esses valores λ_{\min} .
 8. Monte um gráfico de λ_{\min} em função do inverso de V_A e obtenha, a partir desse gráfico, um valor para a constante de Planck h , com incerteza. Faça as comparações e comentários pertinentes.

Curvas de intensidade em função da tensão de aceleração:

9. Trace os gráficos da intensidade da radiação detectada por unidade de tempo em função de V_A para os diferentes valores do ângulo θ . Coloque todas as curvas em um mesmo gráfico.
10. A partir dessas curvas, obtenha para cada valor de θ o valor correspondente de V_A^{\min} (tensão de aceleração mínima para surgimento do feixe de raios X difratados segundo o ângulo em questão). Para isso, pode ser conveniente traçar uma reta sobre a parte de cada curva onde a contagem se torna apreciável e com derivada aproximadamente constante, obtendo-se por extrapolação o valor da tensão para o qual essa reta corta o eixo horizontal (correspondente ao nível de intensidade anterior ao crescimento abrupto da contagem).
11. Utilizando a lei de Bragg, calcule os valores do comprimento de onda (e, a partir daí, as respectivas frequências) associados aos ângulos θ escolhidos. Organize os dados em uma tabela, juntamente com os valores de V_A^{\min} obtidos no item anterior.
12. Faça um gráfico de V_A^{\min} em função da frequência da radiação associada a cada ângulo escolhido. A partir de um ajuste linear apropriado, obtenha o valor da constante de Planck, com incerteza. Faça as comparações e comentários pertinentes.

DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. Explique detalhadamente como são produzidos os raios X em um tubo como o indicado na Fig. 1.
2. Explique com argumentos físicos, sem utilizar qualquer expressão matemática, por que raios X com comprimentos de onda menor que λ_{\min} não podem ser emitidos pelo alvo metálico. Existe alguma argumentação clássica que possa ser utilizada para justificar tal fato? Como é explicado esse fenômeno com o auxílio de argumentos quânticos?
3. Discuta de forma qualitativa as demais características do espectro contínuo. Por que existe um pico de máximo (ainda que alargado) em todos os espectros contínuos? Por que a contagem (para um dado tempo fixo de contagem) tende a aumentar com o aumento da tensão de aceleração?
4. Explique o significado da afirmação de que a radiação usada nessa experiência é policromática. Discuta pelo menos um método que poderia ser utilizado para extrair radiação monocromática desse tipo de aparato.
5. Discuta os aspectos históricos sobre a descoberta dos raios X e as experiências pioneiras realizadas com raios X.

BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4, LTC, 4^a ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.
3. M. Ferenca Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, Curso de Física – Eletrônica e Física Moderna, Edgrad Blücher Ltda.
4. J. Goldemberg, Física Geral e Experimental, 3^o Vol, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
5. Laboratory Experiments in Physics, 5.4.01 e 5.4.04, Phywe Systeme GmbH, Göttingen, 1999.
6. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 7^a ed., John Wiley & Sons, New York, 1996.
7. B. D. Cullity, Elements of X ray diffraction, Addison-Wesley, 1967.

Redação: Prof. Jair C. C. Freitas e Rogério N. Suave.

Colaboração: Monitores Danilo Oliveira de Souza e Alan Gomes Bossois.

