

## Laboratório de Estrutura da Matéria II

### Difração de elétrons

#### PRINCÍPIO E OBJETIVOS

Feixes eletrônicos de alta energia são difratados por um alvo de grafite policristalino, dando origem a anéis de interferência visualizados em um tubo recoberto com material fluorescente. Os espaçamentos interplanares característicos da estrutura cristalina da grafite são então obtidos a partir da aplicação da lei de Bragg, tomando-se as medidas dos diâmetros dos anéis de interferência e da tensão de aceleração dos feixes eletrônicos.

#### TÓPICOS RELACIONADOS

Lei de Bragg, método de difração de Debye-Scherrer, planos atômicos, estrutura cristalina da grafite, ondas de matéria, relação de Broglie.

#### EQUIPAMENTO

Tubo de difração de elétrons, fonte de alta tensão (10 kV), resistor de 10 M $\Omega$ , fonte DC de 600 V, cabos de conexão, paquímetro, kit para simulação da estrutura cristalina da grafite.

#### TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Medir os diâmetros dos dois anéis de interferência mais internos para diferentes tensões de aceleração.
2. Calcular os comprimentos de onda dos elétrons a partir das tensões de aceleração.
3. Determinar algumas das distâncias interplanares da grafite.

#### PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

1. A montagem do experimento encontra-se indicada na Fig. 1 e a correta conexão dos fios de ligação está esquematizada na Fig. 2. Verifique atentamente esses esquemas e certifique-se de que entendeu a montagem em detalhe. Observe que a alta tensão (1 – 10 kV) deve ser conectada ao anodo G3 através de um *resistor de proteção* de 10 M $\Omega$ .
2. Ajuste as tensões em G1, G3 e G4 de forma que os anéis de interferência possam ser observados com nitidez (com a sala escurecida).
3. Mantenha a tensão de aceleração ( $V_A$ ) em torno de 4 kV, lendo seu valor diretamente na fonte de alta tensão.

4. Determine os diâmetros dos dois anéis de interferência mais internos com o paquímetro, tomando a média dos diâmetros interno e externo de cada anel.
5. Varie a tensão  $V_A$  de aproximadamente 0,5 em 0,5 kV, tomando sempre as medidas dos diâmetros dos dois anéis de interferência mais internos. Faça ao todo de 7 a 10 medições.
6. Monte a simulação da estrutura cristalina da grafite, verificando a relação entre a distância interatômica e as distâncias interplanares.

## CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. Procure compreender as conexões elétricas no sistema e verificar (e prevenir) a ocorrência de qualquer erro de montagem, conferindo sempre com os esquemas apresentados neste roteiro.
2. Durante todo o processo de medida, observe se há ocorrência de “efeito cascata”, quando o sistema entra em curto-circuito e um clarão é subitamente observado na ampola. Se isso acontecer reduza imediatamente a tensão aplicada na fonte de alta tensão e aguarde em torno de 20 minutos para reiniciar o experimento.
3. No caso de ocorrer faiscamento em qualquer das conexões elétricas reduza a tensão aplicada na fonte de alta tensão e chame o professor e/ou monitor.
4. O ponto fortemente luminoso no centro da do tubo pode danificar o material fluorescente nele depositado. Para evitar isso, reduza a intensidade do feixe luminoso após a tomada das medidas.



Fig. 1: Ilustração da montagem experimental.

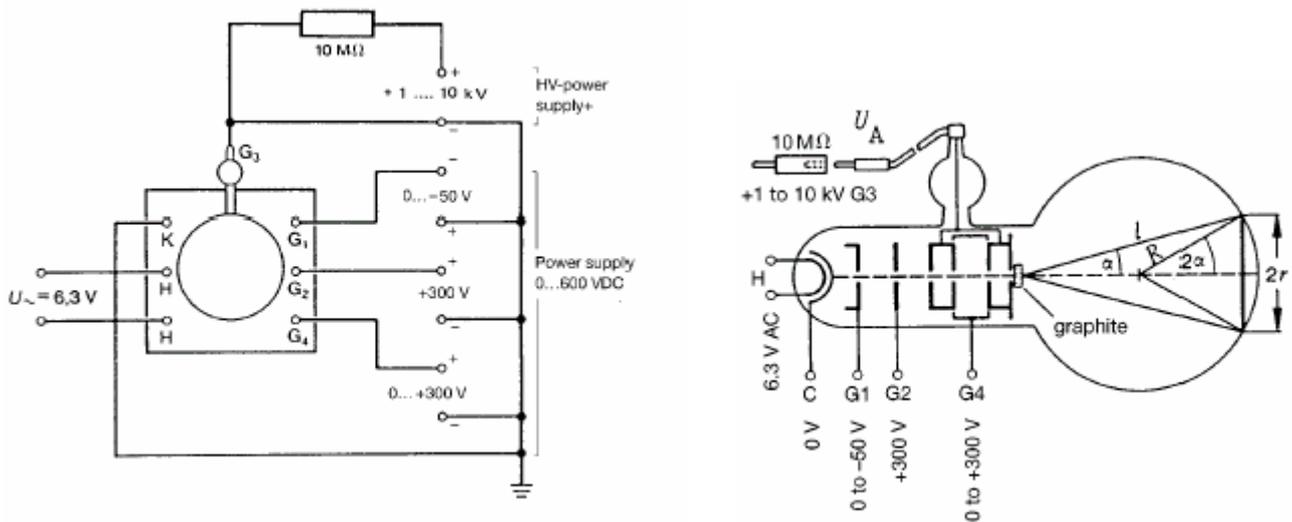


Fig. 2: Conexões elétricas para alimentação do tubo de difração de elétrons.

## EXPRESSÕES E RELAÇÕES NUMÉRICAS ENVOLVIDAS

1. O comprimento de onda  $\lambda$  dos elétrons acelerados pela tensão  $V_A$  pode ser obtido a partir da relação de Broglie, levando a:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV_A}} = \sqrt{\frac{150}{V_A}} \text{ \AA}, \quad (1)$$

sendo  $V_A$  dado em Volts,  $m$  e  $e$  a massa de repouso e a carga elétrica do elétron e  $h$  a constante de Planck.

2. A lei de Bragg é expressa como:

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

onde  $d$  é a distância interplanar,  $\theta$  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 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

3. A partir da Fig. 2, são encontradas as seguintes relações:

$$\alpha = 2\theta \quad (3)$$

$$\sin 2\alpha = \frac{r}{R}, \quad (4)$$

sendo  $r$  o raio do anel de interferência e  $R$  o raio do bulbo do tubo de difração. Na montagem empregada temos  $R = 65 \text{ mm}$  (verifique!).

4. A partir dessas expressões encontra-se, para pequenos ângulos, uma relação linear entre  $r$  e  $\lambda$ :

$$r = \frac{2R}{d} n\lambda, \quad (5)$$

5. A estrutura cristalina da grafite pode ser entendida a partir do arranjo esquemático mostrado na Fig. 3a. Cada átomo de carbono encontra-se ligado covalentemente a três outros átomos (hibridização  $sp^2$ ), numa estrutura hexagonal. A distância entre cada par de átomos de carbono é de  $1,42 \text{ \AA}$ . As duas distâncias interplanares responsáveis pelos dois anéis mais internos de difração correspondem às famílias de planos indicadas na Fig. 3b, sendo dadas por  $d_1 = 2,13$  e  $d_2 = 1,23 \text{ \AA}$ .

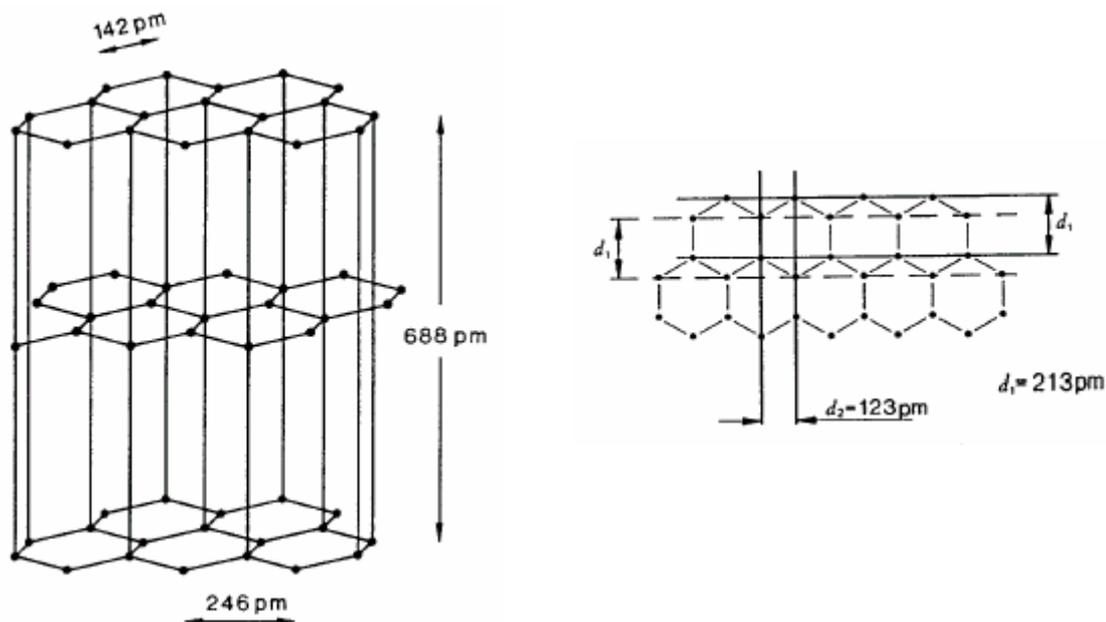


Fig. 3: (a) Estrutura cristalina da grafite hexagonal. (b) Distâncias interplanares responsáveis pelos dois anéis mais internos.

## QUESTÕES A SEREM RESPONDIDAS NO PRÉ-RELATÓRIO

1. Deduza a Eq. 1, utilizando a relação de Broglie.
2. Faça uma dedução geométrica da lei de Bragg (Eq. 2).
3. Justifique geometricamente a Eq. 3.
4. Deduza a Eq. 5.
5. Verifique e justifique geometricamente a relação numérica entre a distância interatômica na estrutura da grafite e os valores de  $d_1$  e  $d_2$ , utilizando o arranjo da Fig. 3.
6. Esquematize os gráficos de  $r$  em função de  $\lambda$  e de  $\lambda$  em função de  $V_A$  que você espera encontrar e explique o que pode ser obtido a partir da análise desses gráficos.

## PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

1. Utilize a Eq. 1 para determinar os comprimentos de onda dos feixes eletrônicos para cada tensão  $V_A$  aplicada. Organize esses dados numa tabela.
2. Monte um gráfico de  $r$  em função de  $\lambda$  para os dois anéis de interferência mais internos e determine por regressão linear os valores experimentais (com incertezas) das distâncias interplanares  $d_1$  e  $d_2$ . Compare com os valores esperados.

3. Tomando os valores esperados para  $d_1$  e  $d_2$ , determine os comprimentos de onda a partir dos valores de  $r$ , de acordo com a Eq. 5.
4. Verifique graficamente a relação (1) entre  $\lambda$  e  $V_A$ .
5. Obtenha a partir desse gráfico um valor para a constante de Planck.

## ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

1. Como os resultados deste experimento servem para ilustrar a dualidade onda-partícula?
2. Dê exemplos de outras experiências históricas onde a dualidade onda-partícula é evidenciada, tanto para a radiação quanto para a matéria.
3. Se fossem utilizados feixes de nêutrons ao invés de elétrons, seriam observados anéis de interferência (difração) no experimento realizado? E se fossem prótons? Em caso negativo, o que deveria ser modificado para que fosse possível tal observação?
4. Na dedução da Eq. 1 são usadas expressões não-relativísticas para a massa e o momentum do elétron. Isso é correto? Justifique com argumentos numéricos, levando em conta os valores de tensão empregados no experimento.

## BIBLIOGRAFIA

1. Halliday, Resnick & Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4.
2. Eisberg & Resnick, Física Quântica.
3. Laboratory Experiments in Physics, Phywe.
4. Kittel, Introdução à Física do Estado Sólido.