

Laboratório de Física Moderna

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS (Experiência B.1)

PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

A dualidade onda-partícula para o elétron agora será explorada via a apresentação do aspecto ondulatório. Nesta experiência, feixes eletrônicos de alta energia serão difratados por um alvo de grafite policristalino, dando origem a anéis de interferência visualizados em um bulbo recoberto com material fluorescente. Os espaçamentos interplanares característicos da estrutura cristalina do grafite serão, então, obtidos a partir da aplicação da lei de Bragg, tomando-se as medidas dos diâmetros dos anéis de difração e dos respectivos valores da tensão de aceleração dos feixes eletrônicos.

TÓPICOS RELACIONADOS

Dualidade onda-partícula, ondas de matéria, raios catódicos, relação de De Broglie, lei de Bragg, método de difração de Debye-Scherrer, planos atômicos, estrutura cristalina de um cristal de grafite.

EQUIPAMENTOS

Tubo para difração com alvo de grafite e bulbo fluorescente, com produção de feixe altamente colimado de elétrons de alta energia. Fonte de baixa tensão com 4 saídas independentes: 300 Vdc fixo; 0 a 300 Vdc; 0 a -50 Vdc (tensões de colimação do feixe); 6,3 Vac (alimentação do filamento emissor). Fonte de alta tensão (0 a 10,0 kV, em passos de 0,1 kV) para aceleração dos elétrons. Resistor de proteção de 10 MΩ. Paquímetro não metálico para medida dos diâmetros dos anéis de difração. Cabos de conexão. Kit para visualização da estrutura cristalina do grafite. Ponta de prova 1.000:1 para medida da alta tensão.

TAREFAS EXPERIMENTAIS PARA VERIFICAÇÃO DE DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS

1. Medir os diâmetros dos dois ou três anéis de interferência mais internos, correspondentes a menores ângulos dos cones de difração, em sua interseção com o bulbo semiesférico, para diferentes valores das tensões de aceleração.
2. Calcular os comprimentos de onda dos elétrons a partir das tensões de aceleração.
3. Determinar algumas das distâncias interplanares do 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 procure entender a montagem em detalhe. Observe que a alta tensão (até 10 kV) deve ser conectada ao anodo G3 através de um *resistor de proteção* de 10 M Ω . Esse resistor limitará a corrente a no máximo 1 mA.
2. Elétrons provenientes do catodo aquecido C são acelerados pelo campo elétrico gerado no sistema de eletrodos G1...G4. O eletrodo G1 (denominado cilindro de Wehnelt), com potencial negativo em relação ao catodo, permite a passagem de um fino feixe eletrônico o qual é submetido a uma pequena tensão de aceleração preliminar através da grade G2. Os elétrons são então fortemente acelerados pela alta tensão positiva em G3. O feixe eletrônico é finalmente focalizado por meio do ajuste dos potenciais em G3 e G4 e incide sobre um alvo de grafite policristalino, sendo difratado em determinadas direções. A partir daí os feixes difratados penetram no bulbo esférico de vidro (veja a Fig. 2), dando origem a uma série de anéis (conhecidos como *anéis de Debye-Scherrer*) na parte do bulbo coberta internamente com um material fluorescente.
3. Ajuste as tensões nos eletrodos G1, G3 e G4 de forma que os anéis de interferência possam se observados com nitidez (com a sala escurecida). Inicie com os seguintes valores de referência: tensão em G1 ≈ -25 V; tensão em G2 = 300 V (fixa); tensão em G4 ≈ 250 V; tensão de aceleração em G3 (V_A) ≈ 4 kV (lido diretamente em multímetro através da ponta de prova de alta tensão).



Fig. 1: Ilustração da montagem experimental.

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. Efetue o conjunto de medidas acima três vezes, alternando a pessoa que lê os diâmetros com o paquímetro, de modo a minimizar erros acidentais.

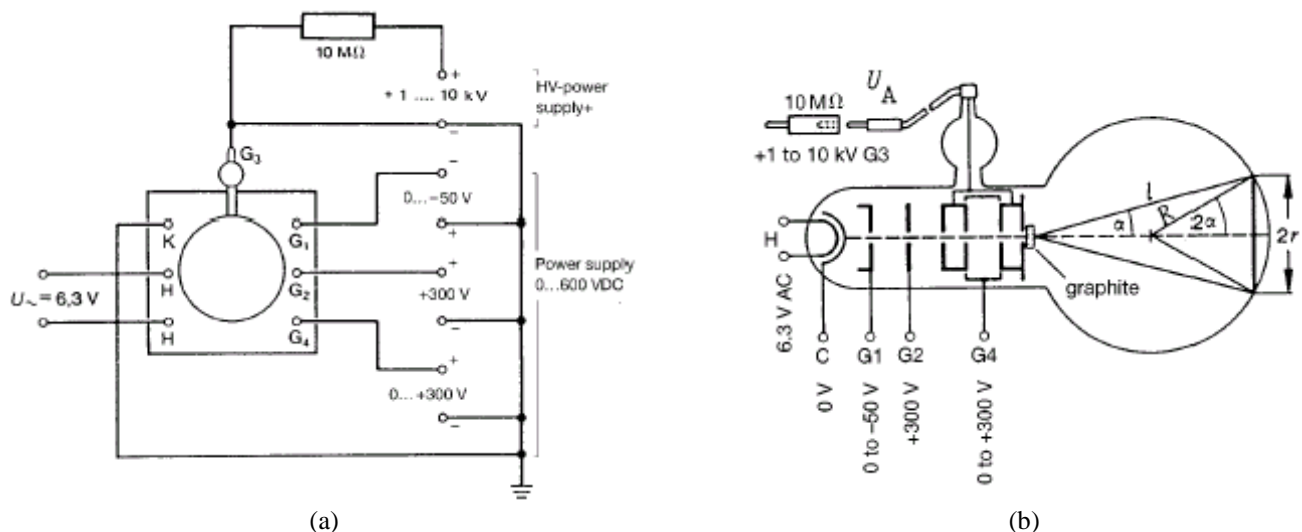


Fig. 2: Conexões elétricas com o tubo de difração de elétrons. (a) Conectores na parte traseira; (b) posições das grades.

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 ocorrer, 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 faísca 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.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. Sendo h a constante de Planck, o comprimento de onda λ dos elétrons de massa de repouso m_e e carga elétrica e , quando acelerados pela tensão V_A , é obtido a partir da relação de De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e e V_A}} = \sqrt{\frac{150}{V_A}} \text{ (Å)} . \quad (1)$$

2. A lei de Bragg é expressa como:

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

Aqui, d é a distância interplanar, θ é o ângulo de difração de Bragg (ângulo entre o feixe incidente e os planos cristalinos) e n é um número natural que indica a ordem de difração ($n = 1, 2, 3, \dots$).

3. Na Fig. 2(b) r é o raio do anel de interferência e R é o raio do bulbo do tubo de difração. Na montagem, o valor fornecido pelo fabricante para o diâmetro do bulbo é de $127 \text{ mm} \pm 2,5\%$. Pode-se, então, encontrar as seguintes relações:

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

$$\text{sen}(2\alpha) = \frac{r}{R} . \quad (4)$$

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

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

5. A estrutura cristalina do grafite pode ser entendida a partir do arranjo esquemático mostrado na Fig. 3(a). 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 $1,42 \text{ \AA}$ (142 pm).
6. As duas distâncias interplanares responsáveis pelos dois anéis mais internos de difração correspondem às famílias de planos indicadas na Fig. 3(b), sendo dadas por $d_1 = 2,13 \text{ \AA}$ (213 pm) e $d_2 = 1,23 \text{ \AA}$ (123 pm).

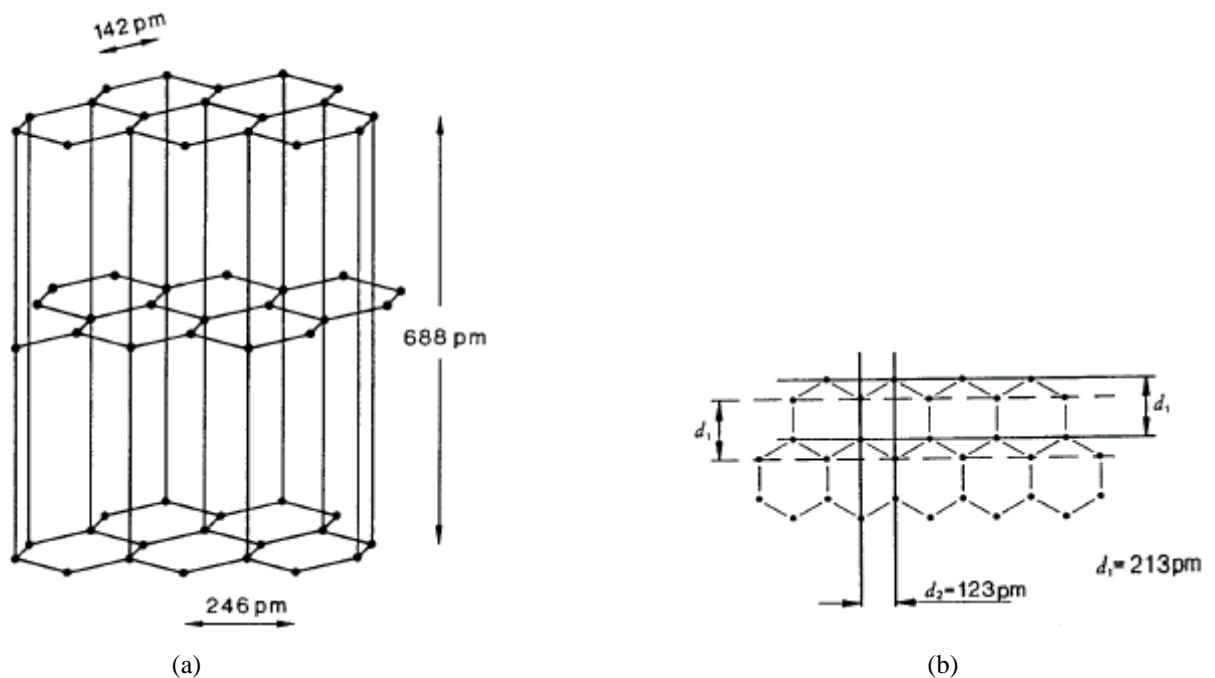


Fig. 3: (a) Estrutura cristalina do grafite hexagonal. (b) Distâncias interplanares responsáveis pelos dois anéis mais internos.

QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Deduza a Eq. 1, utilizando a relação de De Broglie.
2. Justifique geometricamente a Eq. 3 e deduza a Eq. 5.
3. Esquematize os gráficos de r em função de λ , e também os gráficos de λ em função de V_A , os quais você espera encontrar na experiência de difração de elétrons 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. Apresente os resultados das medidas dos diâmetros dos anéis de Debye-Scherrer, fornecendo todos os valores dos diâmetros interno e externo medidos para cada anel. Obtenha as médias dos valores obtidos nos três conjuntos de medidas e determine as incertezas nos valores de r .
3. Faça um gráfico de r em função de λ 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.
4. Tomando agora os valores *esperados* para d_1 e d_2 , fornecidos na Fig. 3(b), determine os comprimentos de onda a partir dos valores de r , de acordo com a Eq. 5.
5. Verifique graficamente a relação (descrita pela Eq. 1) entre esses valores de λ (obtidos no item anterior) e os valores de V_A (faça um gráfico de λ em função de $V_A^{-1/2}$, por exemplo).
6. A partir desse gráfico obtenha um valor para a constante de Planck, comparando-o percentualmente com o valor atualmente aceito para essa importante grandeza física.

DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. Discuta detalhadamente como os resultados dessa experiência servem para ilustrar a dualidade onda-partícula.
2. Descreva a experiência de Davisson-Germer e discuta sua importância histórica.
3. Explique por que são observados *anéis circulares* na experiência de difração de elétrons. Por que nos preocupamos com a observação de *dois* anéis na experiência realizada?
4. Verifique e justifique geometricamente a relação numérica entre a distância interatômica na estrutura do grafite e os valores *esperados* de d_1 e d_2 , utilizando o arranjo da Fig. 3.
5. Na dedução da Eq. 1 foram 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 de difração de elétrons.
6. Seria possível a observação de difração utilizando-se feixes de nêutrons ou de prótons (ao invés de elétrons)? O que seria alterado em termos de valores numéricos em comparação com a experiência realizada?

BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vols. 3 e 4, LTC, 4^a ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Christy, Fundamentos da Teoria Eletromagnética, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1982.
3. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.
4. Laboratory Experiments in Physics, 5.1.02 e 5.1.13, Phywe Systeme GmbH, Göttingen, 1999.
5. P. A. Tipler, Física, Vol. 2, LTC, 4^a ed., Rio de Janeiro, 1999.
6. M. Ference Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, Curso de Física – Eletrônica e Física Moderna, Edgrad Blücher Ltda.
7. P. H. Beeforth, H. J. Goldsmid, Physics of solid state devices, Pion Limited, London, 1970.

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

FOLHA DE DADOS

Série 1:

Tensão V_A (kV)	Diâmetro anel $n = 1$ (mm)		Diâmetro anel $n = 2$ (mm)	
	$\phi_{int}^{(1)}$	$\phi_{ext}^{(1)}$	$\phi_{int}^{(2)}$	$\phi_{ext}^{(2)}$

Série 2:

Tensão V_A (kV)	Diâmetro anel $n = 1$ (mm)		Diâmetro anel $n = 2$ (mm)	
	$\phi_{int}^{(1)}$	$\phi_{ext}^{(1)}$	$\phi_{int}^{(2)}$	$\phi_{ext}^{(2)}$

Série 3:

Tensão V_A (kV)	Diâmetro anel $n = 1$ (mm)		Diâmetro anel $n = 2$ (mm)	
	$\phi_{int}^{(1)}$	$\phi_{ext}^{(1)}$	$\phi_{int}^{(2)}$	$\phi_{ext}^{(2)}$