

Objectivos

- Verificar experimentalmente o comportamento ondulatório dos electrões.
- Interpretar qualitativamente o padrão de interferência observado, verificando que existe uma relação entre o padrão de difração e o potencial acelerador dos electrões.
- Verificar quantitativamente a relação entre o tamanho dos anéis e o potencial acelerador dos electrões, determinando os parâmetros de rede do material que provoca a difracção, a amostra policristalina de grafite.

Introdução

Em 1924 Louis De Broglie sugeriu que as partículas poderiam ter um comportamento ondulatório associado ao seu comportamento corpuscular, do mesmo modo que a radiação manifestava um comportamento corpuscular associado ao seu comportamento ondulatório. Os quanta da radiação de frequência ν , os fotões, têm energia $E = h\nu = hc/\lambda$ e momento linear

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

De Broglie postulou que a relação $p = h/\lambda$ deveria ser mais geral, aplicando-se quer à radiação quer à matéria, que veria assim associado um comprimento de onda ao seu movimento.

O comportamento ondulatório dos electrões foi demonstrado experimentalmente em 1927 por Clinton Joseph Davisson, L. H. Germer e George Paget Thomson, que ganharam o prémio Nobel da Física em 1937 pelas suas experiências de difração de electrões em cristais.

A difração e, conseqüentemente, a interferência, são características associadas ao comportamento ondulatório. O comportamento ondulatório da radiação electromagnética é conhecido, desde o início do século XIX, com as experiências de interferência de Thomas Young. A difração ocorre sempre que a fase ou a amplitude da frente de onda é perturbada, quando a onda sofre interação com obstáculos. Este efeito é facilmente observado quando os obstáculos têm dimensões da ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação que incide sobre eles.

Se estivermos a tratar de radiação visível podemos facilmente observar padrões de difracção quando a radiação passa por fendas ou orifícios muito estreitos (tipicamente da ordem dos décimos de μm) ou redes de difração em transmissão. Se estivermos a tratar de radiação com

comprimentos de onda muito mais pequenos, por exemplo raios-X, ($\lambda \approx 1 \text{ nm}$) a difração só se pode observar por interação com um sistema ordenado em que o espaçamento seja também muito mais pequeno e da ordem de grandeza do comprimento de onda dos raios-X, como por exemplo o espaçamento entre átomos numa rede cristalina, que funciona assim como uma rede de difração tridimensional.

Os padrões de difração observados neste trabalho são, tipicamente manchas luminosas envolvidas por anéis concêntricos alternadamente escuros e luminosos, que resultam de interferências construtivas (zonas luminosas) e destrutivas (zonas escuras). Tem-se uma interferência construtiva sempre que as ondas se “sobreponem” em fase e uma interferência destrutiva quando elas chegam a um dado ponto do alvo em oposição de fase.

Para duas ondas interferirem construtivamente num dado ponto do espaço é necessário que $\Delta = m\lambda$, em que Δ é a diferença de percurso óptico entre as duas ondas e m é um número inteiro conhecido por ordem de interferência.

Genericamente todos os processos de difração produzidos por radiação monocromática de comprimento de onda λ , obedecem a uma relação do tipo

$$x = k \frac{\lambda L}{d},$$

em que x é a dimensão característica do padrão de difracção observado num alvo que se encontra a uma distância L do obstáculo, que é caracterizado por uma dimensão característica d , como se mostra esquematicamente na figura 1.

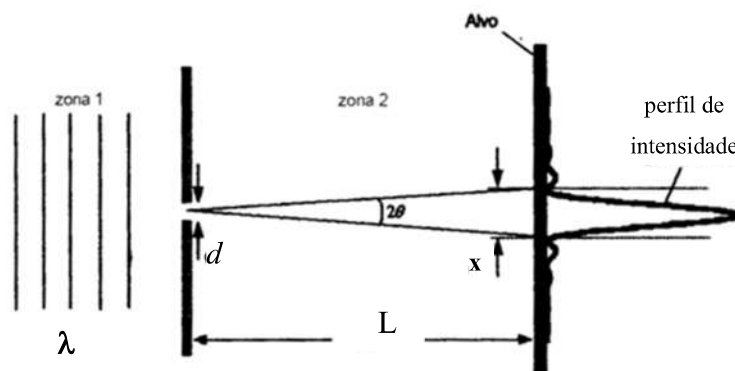


Figura 1

Verifica-se que as ondas são tanto mais difractadas (“espalhadas”) quanto mais pequeno for o obstáculo ou o espaçamento entre os obstáculos.

Considerem-se agora as duas seguintes situações, com mais aplicações práticas.

Primeiro uma rede de difração como a que se mostra na figura 2 em que o espaçamento entre as fendas é d e em que a radiação incidente tem comprimento de onda λ .

Pode-se deduzir a relação: $d (\sin \theta_i - \sin \theta_d) = m \lambda$, que dá a posição angular de todos os máximos de intensidade.

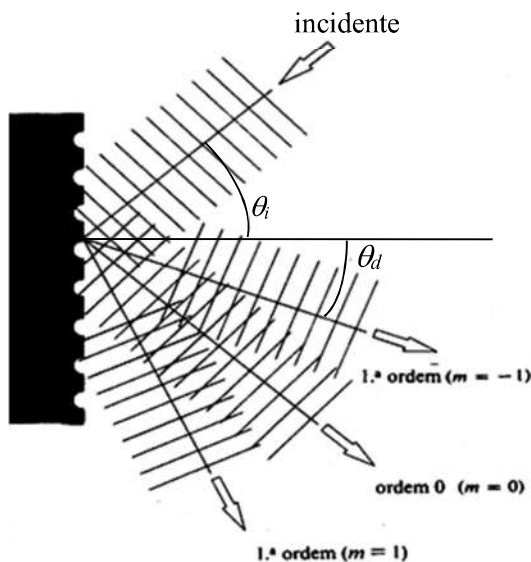


Figura 2

Considere-se agora uma rede de difração tridimensional, formada pelos átomos de um cristal. Foi Max von Laue, em 1912, quem primeiro teve a ideia de usar os átomos de um cristal como rede de difração para os raios-X. Ganhou, com este trabalho, o Prémio Nobel da Física em 1914.

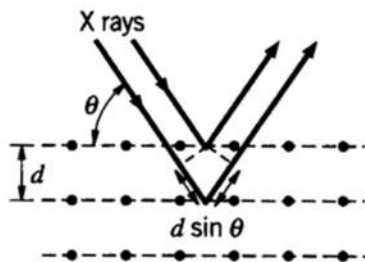


Figura 3

Neste caso as interferências resultam de a radiação reflectida (ou transmitida) num primeiro plano da rede cristalina poder interferir construtivamente com a que é reflectida num plano abaixo, separado do primeiro por uma distância d , como se mostra esquematicamente na figura junta. Para a difracção numa rede cristalina deste género verifica-se que se obtêm máximos de interferência quando:

$$2d \sin \theta = m \lambda$$

que é a conhecida lei de Bragg, onde d é uma dimensão característica da rede cristalina.

Tal como para os raios-X, a difração por redes cristalinas põe em evidência a natureza ondulatória dos electrões. O comprimento de onda associado a um electrão, de acordo com a relação de De Broglie, está relacionado com o seu momento linear. Se os electrões forem suficientemente acelerados, através de uma diferença de potencial V elevada, o comprimento de onda associado ao electrão pode ser da ordem de grandeza do nm tornando observável a sua difração numa rede cristalina.

Das relações

$$p = m_0 v$$

e
$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = eV,$$

em que m_0 é a massa em repouso do electrão e v é a sua velocidade após ser acelerado por uma diferença de potencial V , obtém-se, usando a relação de De Broglie,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV}}$$

Nota: As expressões acima assumem que podemos desprezar efeitos relativistas. Esta aproximação será justificada?

A ampola usada neste trabalho encontra-se esquematizada na figura 4. Junto ao cátodo existe um filamento que provoca emissão termoiónica de electrões. Estes passam por várias grelhas de pré aceleração apenas com uma função de colimação e focagem, sendo depois acelerados através da diferença de potencial V aplicada na grelha G3. Passam então através de uma lâmina de grafite que faz o papel de “rede” de difracção.

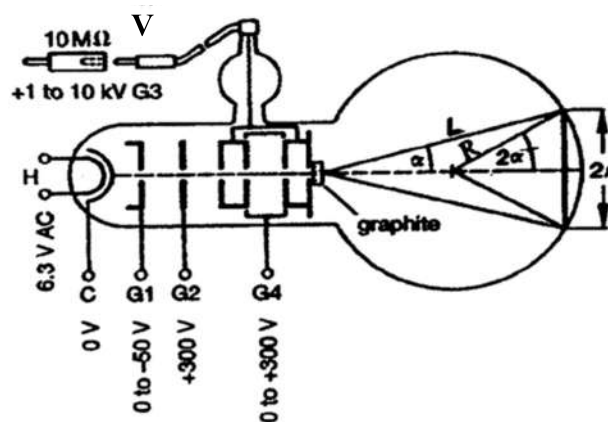


Figura 4

O cristal que provoca a difração é uma lâmina policristalina de grafite, com duas distâncias inter-planos características, d_A e d_B , como se mostra na figura 5. A existência destas duas distâncias inter-planos na rede cristalina da grafite faz aparecer no alvo (fundo da ampola revestido por um material fluorescente) um conjunto de anéis duplos em vez de um conjunto de anéis simples.

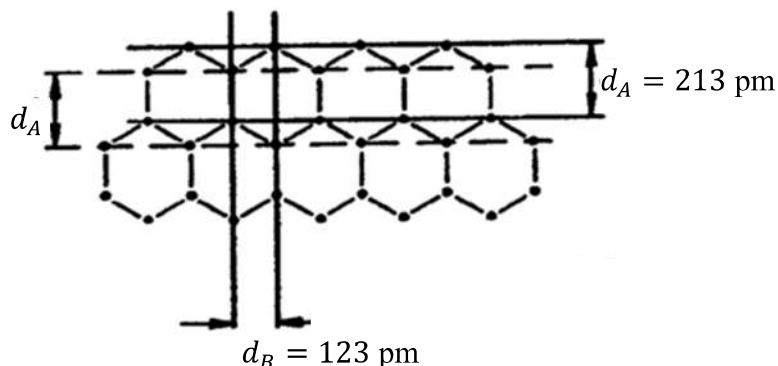


Figura 5

A existência destes anéis e a forma como o seu tamanho varia com o potencial acelerador aplicado aos electrões é uma prova irrefutável do carácter ondulatório do electrão. Relacionando o tamanho dos anéis com as características físicas da ampola é possível obter as distâncias d_A e d_B entre os planos cristalográficos na grafite, bem como distinguir entre uma rede cristalina cúbica e hexagonal.

Pela figura 4 tem-se $\sin \alpha = \frac{r}{L}$.

Observando (ver figura 3) que a deflexão do feixe de electrões é de 2θ , tem-se $\sin(2\theta) = r/L \approx 2 \sin \theta$ (sabendo que para θ pequenos, $\sin(2\theta) \approx 2 \sin \theta$).

Uma vez que $L \approx 2R$, obtém-se $\sin \theta \approx \frac{r}{4R}$. O raio R da ampola é R = 65mm.

Procedimento Experimental

Verifique se o circuito esquematizado na figura 4 se encontra bem montado.

Tenha em atenção que vai aplicar tensões que podem ir até 10 kV que é potencialmente letal. Verifique se o cabo de alimentação está bem ligado e bem isolado. Vão ter realizar as medidas numa sala escurecida - tenham o cuidado de não tocar nem deslocar os cabos de alta tensão!

Ligue as fontes de alimentação com o potencial acelerador num mínimo e deixar o canhão de electrões aquecer durante alguns minutos. Vá aumentando o potencial acelerador dos electrões até começar a visualizar o seu carácter ondulatório, i.e. ver os anéis fluorescentes no écran. Regule as tensões aplicadas nas outras grelhas de modo a obter anéis o mais bem definidos possível. Os anéis são mais fáceis de medir quando não é utilizada a luminosidade máxima. Os anéis também são mais difíceis de observar para potenciais aceleradores menores – uma boa prática é começar com potenciais de ordem de 5kV e ir aos potenciais menores apenas depois de ter ganho alguma experiência.

Observe como varia o padrão de difração com o potencial acelerador. Meça, o mais rigorosamente possível, os valores de r_A e de r_B , para $m = 1$ e para pelo menos 10 valores diferentes de V .

Tratamento dos Resultados

Por cada um dos anéis elabore um gráfico de $\sin(\theta)$ em função do comprimento de onda dos electrões previstos pela relação de De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV}}$$

onde V é o potencial acelerador aplicado, e verifique se há uma relação linear.

O declive do ajuste linear permite obter valores experimentais de d_A e de d_B . Quais os valores determinados para estas distâncias?

Estime, a partir da figura 5 a distância entre átomos vizinhos, na grafite.

Identifique as principais dificuldades sentidas na realização deste trabalho.

Desafio: Numa rede cristalina hexagonal a razão entre as distâncias d_A e d_B é $\sqrt{3}$. Consegue entender porquê? Para cada potencial acelerador aplicado determine a razão entre d_A e d_B e comente o resultado.