UFPR- Setor de Exatas

Departamento de Física

Disciplina: Laboratório Especial

Módulo C

Experiência C2: - O elétron é uma onda: difração num cristal de grafite

INTRODUÇÃO

Apesar de todas as evidências de que o elétron é uma partícula, como foi visto diretamente ou indiretamente nas experiências de e/m, fotoelétrico e Franck-Hertz, pode-se mostrar clara e insofismavelmente que o elétron é uma onda!

Na experiência do efeito fotoelétrico havia sido mostrado que a luz, que é uma onda eletromagnética, tinha todas as características de uma partícula, sendo que esta partícula até foi chamada de fóton. Foi Louis de Broglie, em 1924, quem primeiro ousou imaginar o contrário, ou seja, que partículas tradicionalmente conhecidas como partículas também seriam ondas. Por essas e outras de Broglie ganhou o Nobel em 1929. Foram Davisson e Germer que, em 1927, demonstraram claramente que elétrons difratavam como luz, confirmando a ousadia de de Broglie. O experimento de Davisson e Germer foi realizado com elétrons de 54 eV incidindo num monocristal de Ni. E claro, pimba, Davisson e Germer receberam o Nobel devido em 1937! Naqueles tempos era assim: vira e mexe, saía o Prêmio Nobel para teorias e experimentos que hoje qualquer um pode realizar facilmente em sala de aula!

De Broglie postulou que partículas de massa "m" e velocidade "v" teriam um momentum:

$$p = h / \lambda = m \, . \, v$$

e uma energia cinética:

$$E_c = h \, . \, \nu = mv^2 / 2$$

Davisson e Germer subiram nos ombros de gigantes como von Laue e Bragg e fizeram incidir estas "ondas" sobre uma rede de difração que a natureza oferece de graça: os cristais de matéria condensada. O raciocínio era idêntico ao de Bragg: se fótons de raios-x de comprimento de onda λ incidem sobre um cristal de parâmetro de rede "d", então teremos máximos de interferência das ondas difratadas em um ângulo θ tal que:

$$2 \, d \, . \, \text{sen} \, \theta = n \, . \, \lambda \, ,$$

e, se elétrons de momentum "p" tem um comprimento de onda λ , então espera-se interferências construtivas em certos ângulos bem determinados, como na Lei de Bragg, acima.

Hoje, a difração de elétrons é uma ferramenta muito comum usada na caracterização de cristais. Você encontra esta técnica em microscópios eletrônicos

de transmissão e em câmaras de LEED (low energy electron diffraction) ou de RHEED (reflection high energy electron diffraction).

O tubo de difração de elétrons que você utilizará é composto de um canhão de elétrons, um cristal de grafite plano, e uma tela fluorescente para a visualização do fenômeno, tudo num bulbo de vidro em vácuo. Como em várias experiências anteriores que você já fez, os elétrons são produzidos pelo efeito termoiônico num filamento quente. Há uma série de grades e aberturas, as quais, se devidamente manejadas com potenciais adequados, geram um feixe de elétrons colimados. Este feixe incide numa lâmina plana muito fina (transparente para os elétrons) de grafite. O grafite é um cristal composto de monocamadas de carbono ligadas entre si por fracas forças de van der Waals. Dentro das monocamadas cada carbono está ligado a outro por orbitais híbridos sp^2 covalentes. Estas ligações sp^2 fazem entre si ângulos de 120º, o que leva a uma geometria hexagonal da rede cristalina. A rede do grafite é composta por planos principais de átomos de carbono afastados entre si de distâncias "d" bem características, as quais foram bem determinadas por difração de raios-x. Chamamos a atenção para duas distâncias interplanares principais e importantes de 0.213 nm e 0.123 nm que aparecem no cristal de grafite e que vão ser os principais planos de difração na sua experiência.

Um detalhe complicador, mas muitíssimo importante, é que a lâmina de grafite não é monocristalina! O que quer dizer isto? Imagine que você faça a seguinte experiência fictícia: Tome um pacote de bolachas hexagonais (eu já vi bolachas redondas, quadradas, retangulares, com recheio e de bichinhos; mas hexagonais?). Abra o pacote e jogue o conteúdo para cima. Antes disso verifique que as bolachas, ao caírem o façam sobre um piso macio como um carpete de 20 mm. Não queremos espatifar bolachas imaginárias hexagonais... queremos realizar uma experiência fictícia! Pronto: as bolachas hexagonais cairão em camadas planas sem compromisso de orientação dentro dos planos. Exatamente assim você deve imaginar um policristal de grafite: camadas planas de hexágonos sem compromisso de orientação com outras camadas planas. E assim os elétrons irão "ver" o cristal de grafite: uma porção de hexágonos com qualquer orientação dentro dos planos. Eles atravessam o cristal, difratam segundo a Lei de Bragg ($2d \cdot \operatorname{sen}\theta = n \cdot \lambda$) e geram círculos de difração sobre a tela fluorescente. A distância entre cristal e tela L é de 127 ± 3 mm e sendo R o raio do anel de difração temos que:

$$\operatorname{tg} 2\theta = R / L ,$$

ou, para ângulos pequenos:

$$2 \cdot \operatorname{sen}\theta = R / L .$$

Usando a Lei de Bragg (n = 1) teremos:

$$\lambda \cdot L = d \cdot R .$$

Esta relação é utilizada por especialistas que operam qualquer microscópio eletrônico de transmissão no modo difração. Guarde-a no cérebro pois algum dia você poderá usá-la novamente.

O QUE FAZER ?

1) Ligue os fios às fontes de tensão. Siga o esquema anexo. Chame o mestre para a conferência. Você sabe porque!

2) Ligue as fontes. Faça aparecer os anéis de difração dos elétrons na folha de grafite.

3) Para a medida do raio R sugerimos utilizar o paquímetro de plástico.

4) Primeiro veja se as velocidades eletrônicas neste experimento (V = 2.000 $\rightarrow$ 6.000 V) são relativísticas ou não. Se forem tem que cuidar nos cálculos que seguem!

5) Meça agora o raio dos dois anéis centrais para um bom número de voltagens de aceleração entre 2 e 6 kV. Anote R e V numa tabela. Um leve rearranjo das outras voltagens de controle do feixe de elétrons melhora a imagem para cada voltagem de aceleração.

6) Mostre que para mesmas voltagens de aceleração o produto $d_1 . R_1 = d_2 . R_2$

7) Mostre mais: que a relação $\lambda . L = d . R$ é válida.

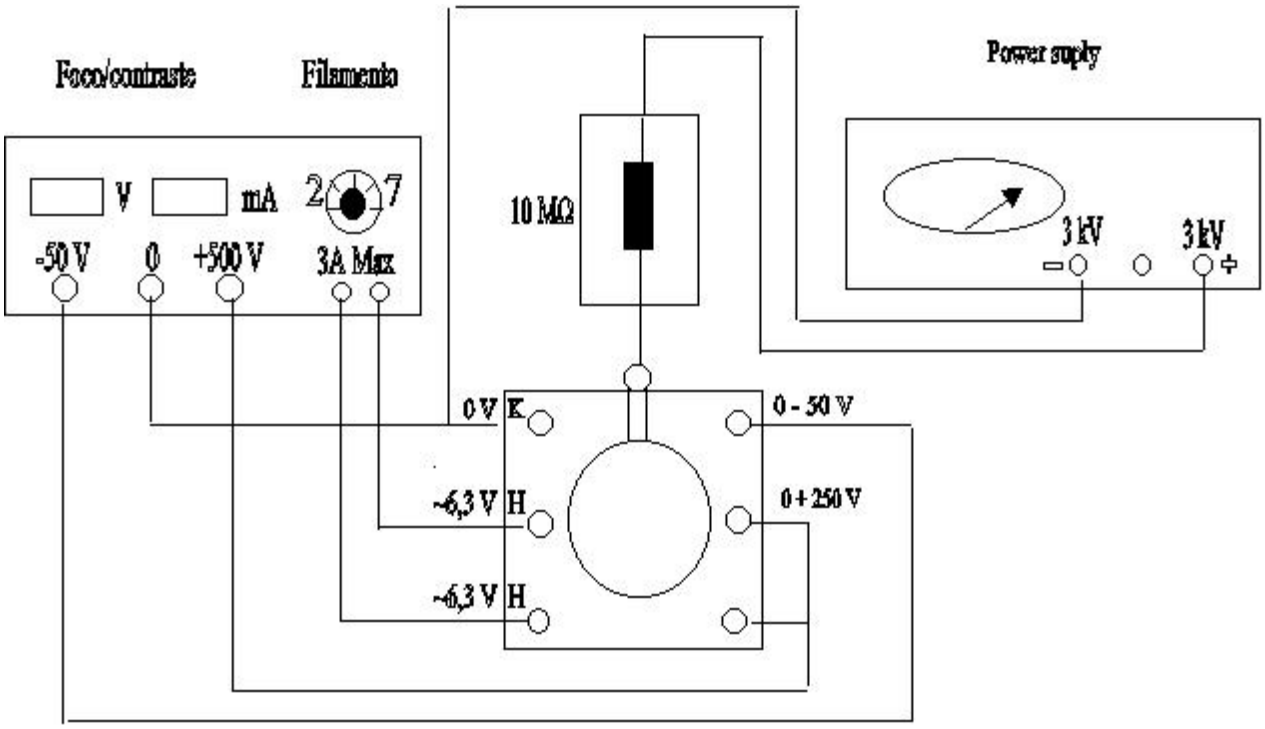
8) Coloque num gráfico, utilizando o programa Origin, R_1, R_2 x V(kV)

9) Transforme os dados que levaram ao gráfico anterior e plote θ (graus) x V (kV)

10) Finalmente recalcule os dados e plote λ / (2 . sen θ) contra V (kV). As linhas resultantes devem indicar as distâncias d_1 e d_2 do grafite. Confira!

11) Não esqueça do vapt-vupt!

Esquema de ligação do experimento de difração de elétrons


Foco/contraste
Filamento
Power supply
V
mA
2
7
-50 V
0
+500 V
3A Max
10 MΩ
3 kV
3 kV
0 V K
0 - 50 V
-6,3 V H
0 + 250 V
-6,3 V H

Relatório Vapt-Vup

Módulo C

Experiência C2: - O elétron é uma onda: Difração num cristal de grafite

Faça um cálculo rápido para ver se seus elétrons são relativísticos ou não.

Faça uma tabela com R_1, R_2 e V(KV)

R_1 (cm)	R_2 (cm)	V (KV)

Mostre que $d_1 . R_1 = d_2 . R_2$

Mostre que λ . L = d. R

Plote λ / (2 . sen θ) contra V (KV)

Calcule d_1 e d_2 a partir do gráfico.