

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Licenciatura em Ciências Exatas

SLC-567 – Práticas de Ensino de Ciências do Primeiro Grau

Profº Euclides Marega Jr.

Difração de Elétrons

Carlos Alberto de Souza

Claudio Bonse Bretas

José Carlos Facchina

Outubro de 2001

Histórico

- Efeito foto-elétrico, corpo negro, espalhamento Compton:
Evidências de ondas se comportando como partículas.



- 1924: Hipótese de de Broglie:

“Não somente as ondas apresentam características de partículas, mas também, as partículas apresentam comportamento ondulatório”

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

λ = Comprimento de onda de de Broglie

h = Constante de Planck

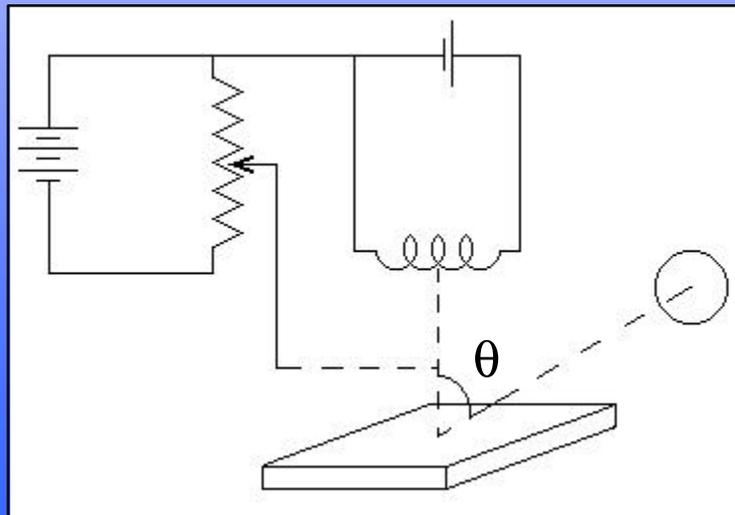
p = Momentum

Histórico

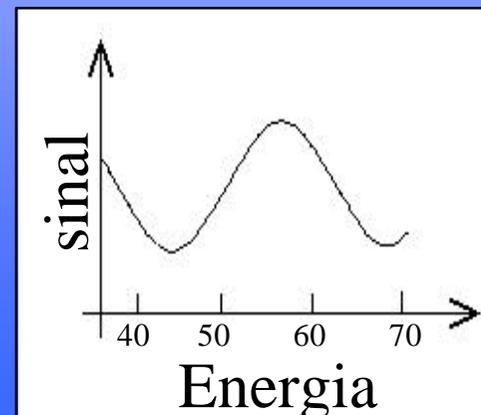
C.J. Davisson & L.H. Germer



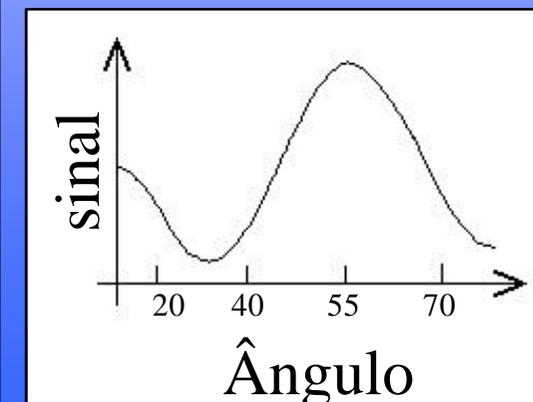
- 1927 Experimento de Davisson e Germer:
- Obtenção de uma amostra ultra limpa de um cristal de níquel
- Incidindo elétrons de alta energia observam resultados coerentes com fenômeno de difração



$$\theta = 50^\circ$$

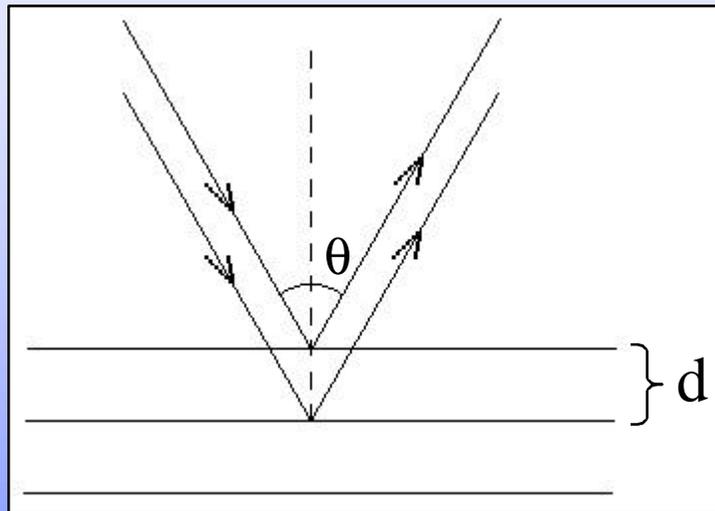


$$E = 54 \text{ eV}$$



Histórico

- Explicação: Espalhamento de Bragg



- Diferença de Caminho:

$$\Delta L = 2 d \sin \varphi$$

com $\varphi = 1/2 (180^\circ - \theta)$

- Interferência Construtiva:

$$\Delta L = n \lambda = 2 d \sin \varphi \quad \text{com } n \hat{=} Z$$

de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,62 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 4,4 \times 10^6} = 1,65 \text{ \AA}$$

Bragg

$$d = 0,91 \times 10^{-10} \text{ m};$$
$$n = 1; \quad \varphi = 65^\circ$$
$$\lambda = 2 \times 0,91 \times 10^{-10} \times \sin 65^\circ = 1,65 \text{ \AA}$$

Histórico

G. P. Thomson



- 1927: Experimentos com metais

Difração em folhas finas de metais revelaram definitivamente a natureza ondulatória do elétron.

- 1937: Prêmio Nobel para Thomson e Davisson

Demonstração da natureza ondulatória do elétron

“J. J. Thomson ganhou o Nobel por demonstrar que o elétron é uma partícula, G. P. Thomson, seu filho, ganhou por demonstrar que este é uma onda”

- Estermann, Stern e Frisch:

Todas as partículas materiais apresentam comportamento ondulatório; difração de feixes moleculares de H e He numa superfície de LiF

Aparato Experimental

- Tubo de difração de elétrons Phywe
- Fonte de alta tensão Phywe (até 10 kV)
- Fontes de tensão IFSC de 0...600 Vdc



Tubo de difração e fontes do laboratório.
Obs: Observar tela fluorescente (sulfato de zinco)

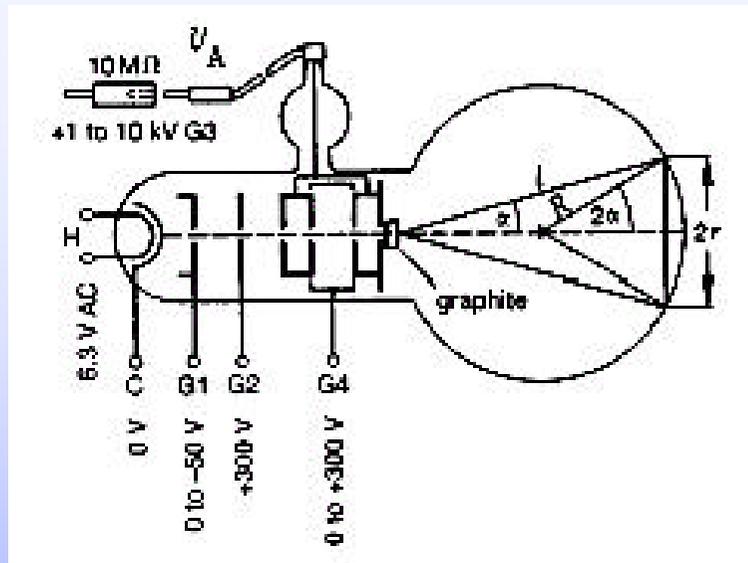


Montagem geral e voltímetro de alta tensão de maior precisão.



Detalhe do tubo (filamento, cátodo, ânodo e substância difratada (grafite))

Detalhes do Tubo de Difração



Substância: Grafite

Distância $l = 127\text{mm}$

Diâmetro do Anteparo fluorescente = 10cm

G₁= Tensão de ajuste de Brilho (0 a 50 V_{dc})

G₂= Tensão de pré-aceleração (+ 250 V_{dc})

G₃= Tensão de ânodo (2kV – 10 kV) ajustável

G₄= Tensão de ajuste de foco (0 a 250V_{dc})

H= Tensão de filamento (6,3 V_{ac}) max – 300mA

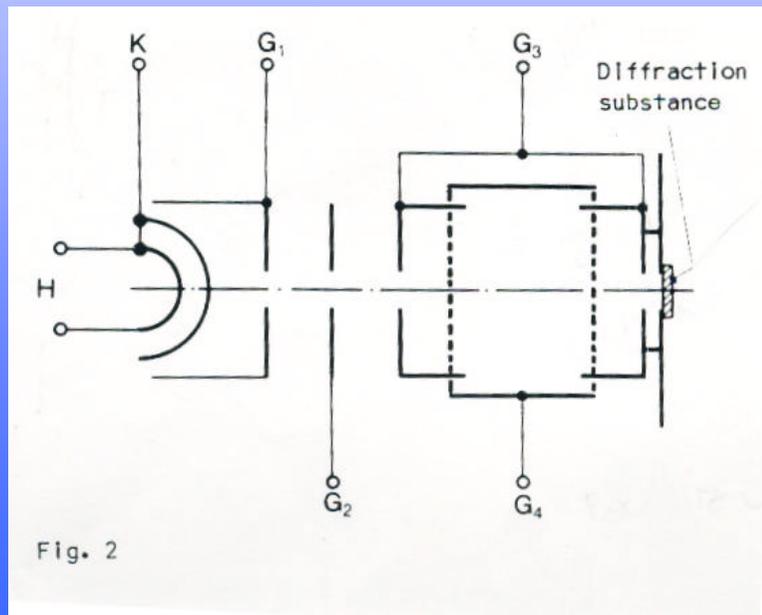
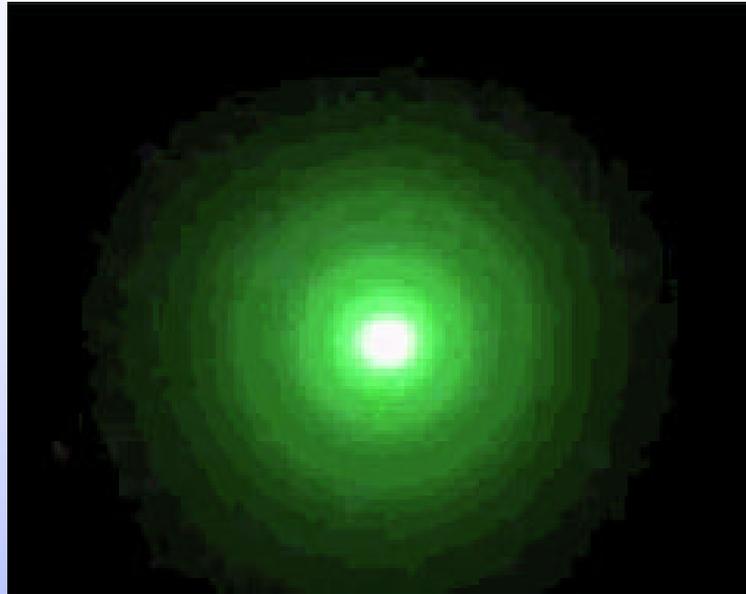


Fig. 2

O tubo utilizado é evacuado e os elétrons saem do filamento pelo efeito termo-iônico, quando este é submetido a uma corrente da ordem de 300 mA.

O cátodo e o ânodo estão a uma ddp da ordem de kV, que acelera os elétrons até o alvo composto por cristal de grafite.

Estes elétrons então sofrem difração e produzem um padrão luminoso num anteparo de sulfato de zinco (ZnS).



O padrão luminoso é formado por anéis circulares, já que o feixe de elétrons que incide sobre o cristal (grafite) é circular.

Visualizamos neste caso dois anéis circulares simultaneamente sendo que cada anel é produzido pela refração dos elétrons em cada um dos planos de Bragg.

Existe uma separação d distinta, os dois anéis vistos são produzidos pelos planos com maior separação já que os demais, por terem separação menor espalham os elétrons que não chegam a atingir o anteparo.

$$d_1 = 2,13 \text{ \AA} \quad d_2 = 1,23 \text{ \AA}$$

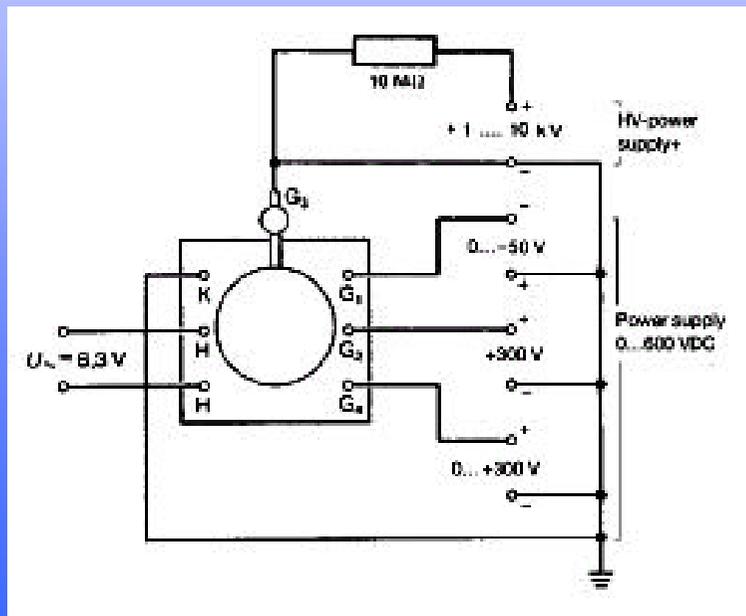


Diagrama Elétrico do Tubo



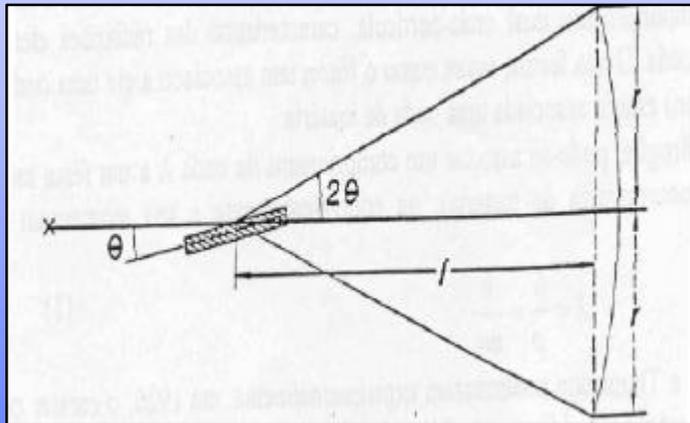
Foto do manual Phywe

O Experimento

- Elétrons emitidos do cátodo e acelerados por potencial V

- Conservação de Energia: $v = \sqrt{\frac{2 e V}{m}}$

- Comprimento de onda de de Broglie: $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 m e V}} = \sqrt{\frac{150}{V}} \text{ \AA} \quad (\text{I})$



- Lei de Bragg: $\lambda = (2 d \sin \theta)/n$

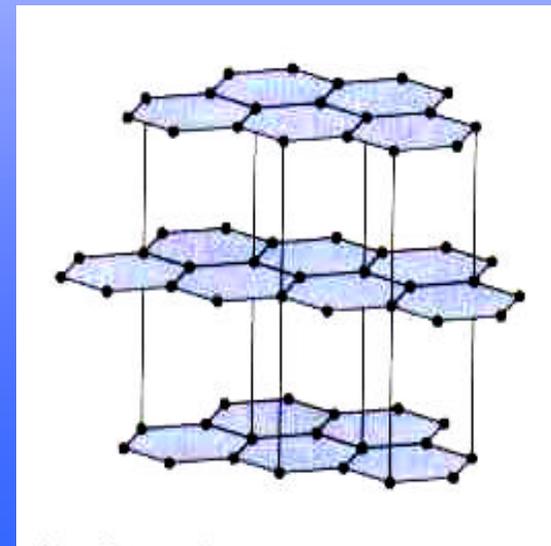
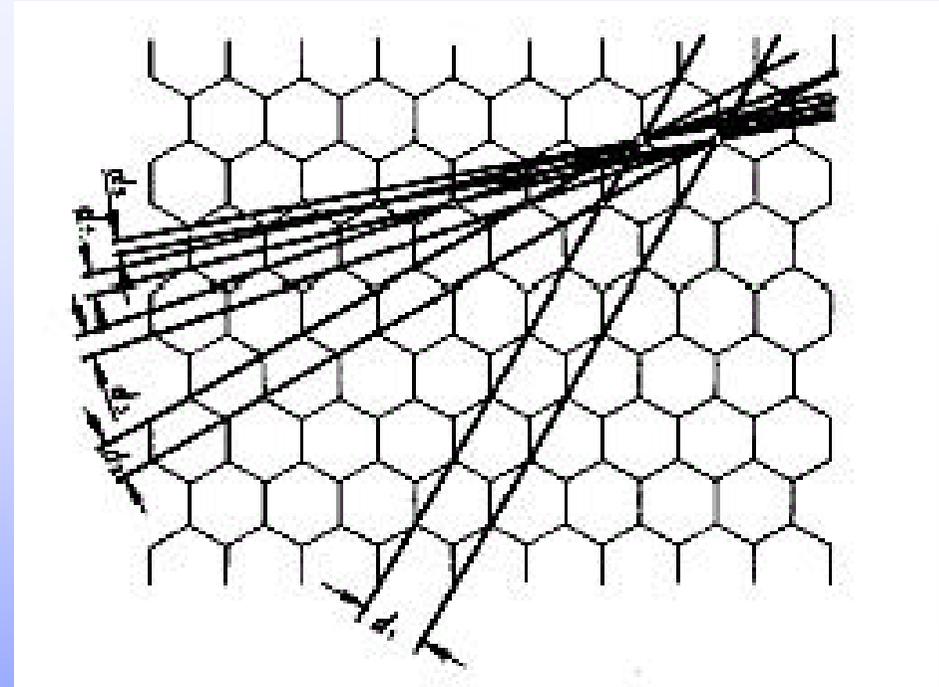
- $\text{tg } 2\theta \approx 2 \sin \theta = r/l$

Portanto: $\lambda = \frac{r d}{n l} \quad (\text{II})$

- Calcular comprimentos de onda para cada anel observado
- Conhecido d , calcular h ; conhecido h , determinar d (gráfico $r \times V^{-1/2}$)

Cristal

- Cristais são estruturas caracterizadas por um arranjo periódico e bem ordenado de seus componentes.
- Uma estrutura formada por um grande número de pequenos cristais orientados aleatoriamente é chamado de um policristal



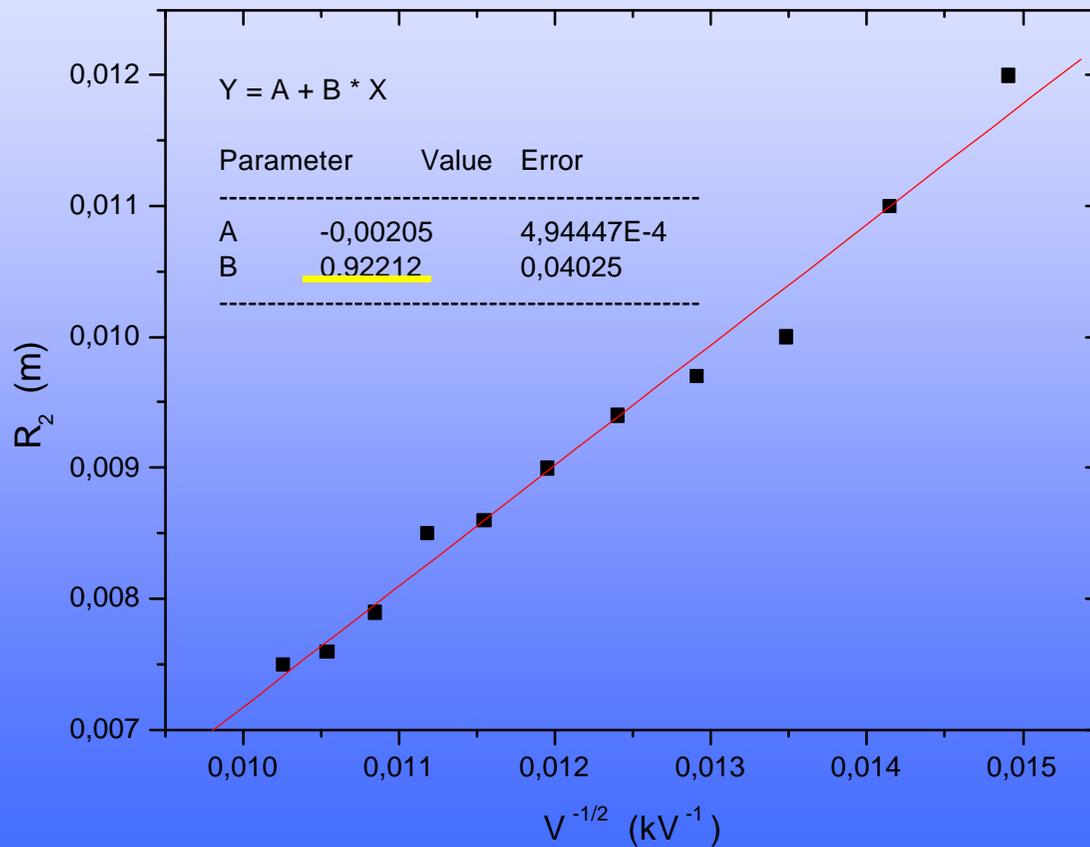
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

V (kV)	R ₂ (m)	R ₁ (m)	V ^{-1/2} (V ⁻¹)	l (Å)	l ₂ (Å)	l ₁ (Å)
4,5	0,0115	0,0195	0,01491	0,179	0,193	0,189
5,0	0,0110	0,0190	0,01414	0,174	0,186	0,184
5,5	0,0100	0,0183	0,01348	0,165	0,167	0,177
6,0	0,0097	0,0181	0,01291	0,158	0,163	0,175
6,5	0,0095	0,0174	0,01240	0,152	0,158	0,168
7,0	0,0090	0,0168	0,01195	0,147	0,151	0,163
7,5	0,0087	0,0156	0,01155	0,142	0,144	0,151
8,0	0,0085	0,0155	0,0118	0,137	0,142	0,150
8,5	0,0080	0,0149	0,01085	0,133	0,132	0,144
9,0	0,0077	0,0143	0,01054	0,129	0,127	0,138
9,5	0,0075	0,0141	0,01026	0,126	0,126	0,136

Resultados

Gráfico: $R_2(\text{m}) \times V^{-1/2}(\text{kV}^{-1})$

Distância Interplanar



ANEL MENOR

Tabelado = $1,23\text{\AA}$

Calculado:

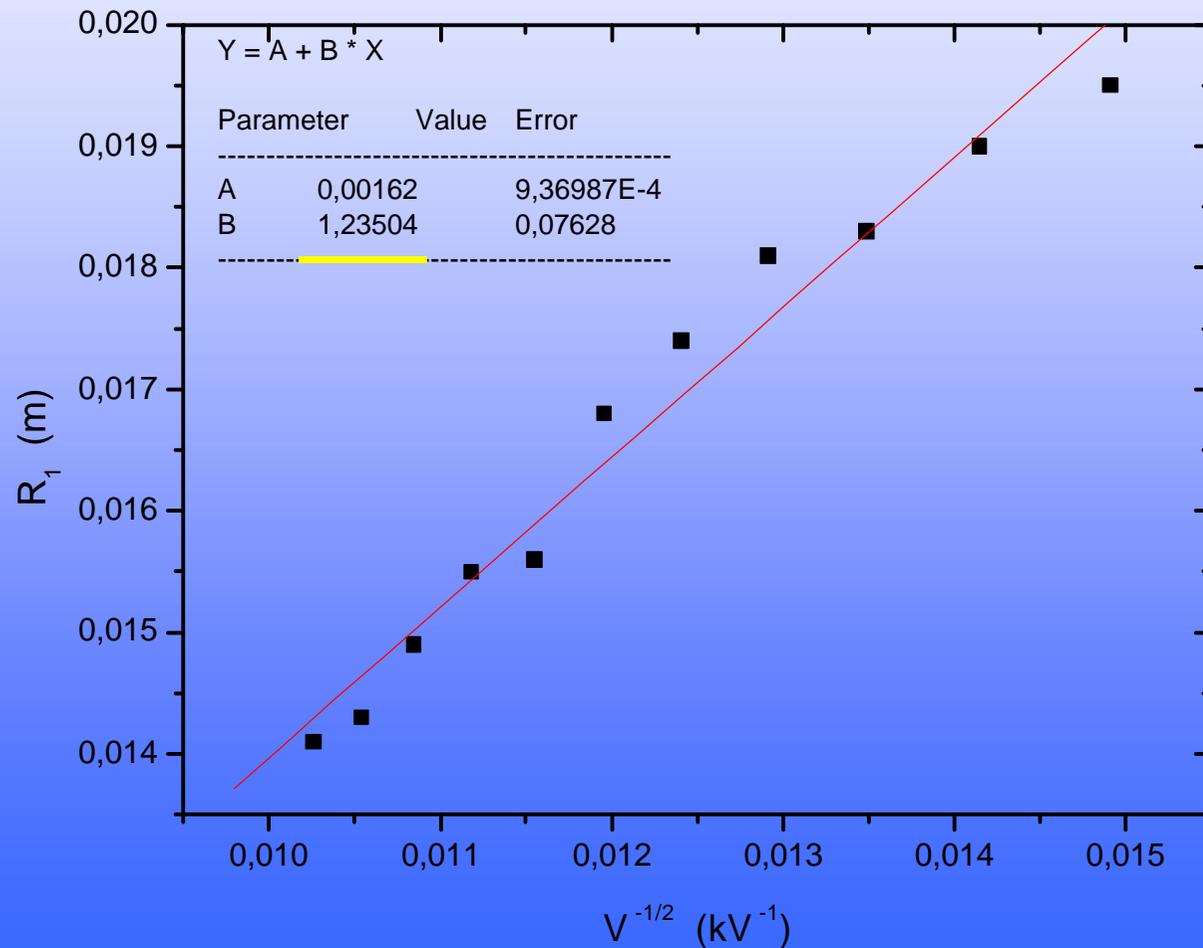
$d_2 = (1,43 \pm 0,04) \text{\AA}$

Erro: 16,26 %

Resultados

Gráfico: $R_1(\text{m}) \times V^{-1/2}(\text{kV}^{-1})$

Distância Interplanar



ANEL MAIOR

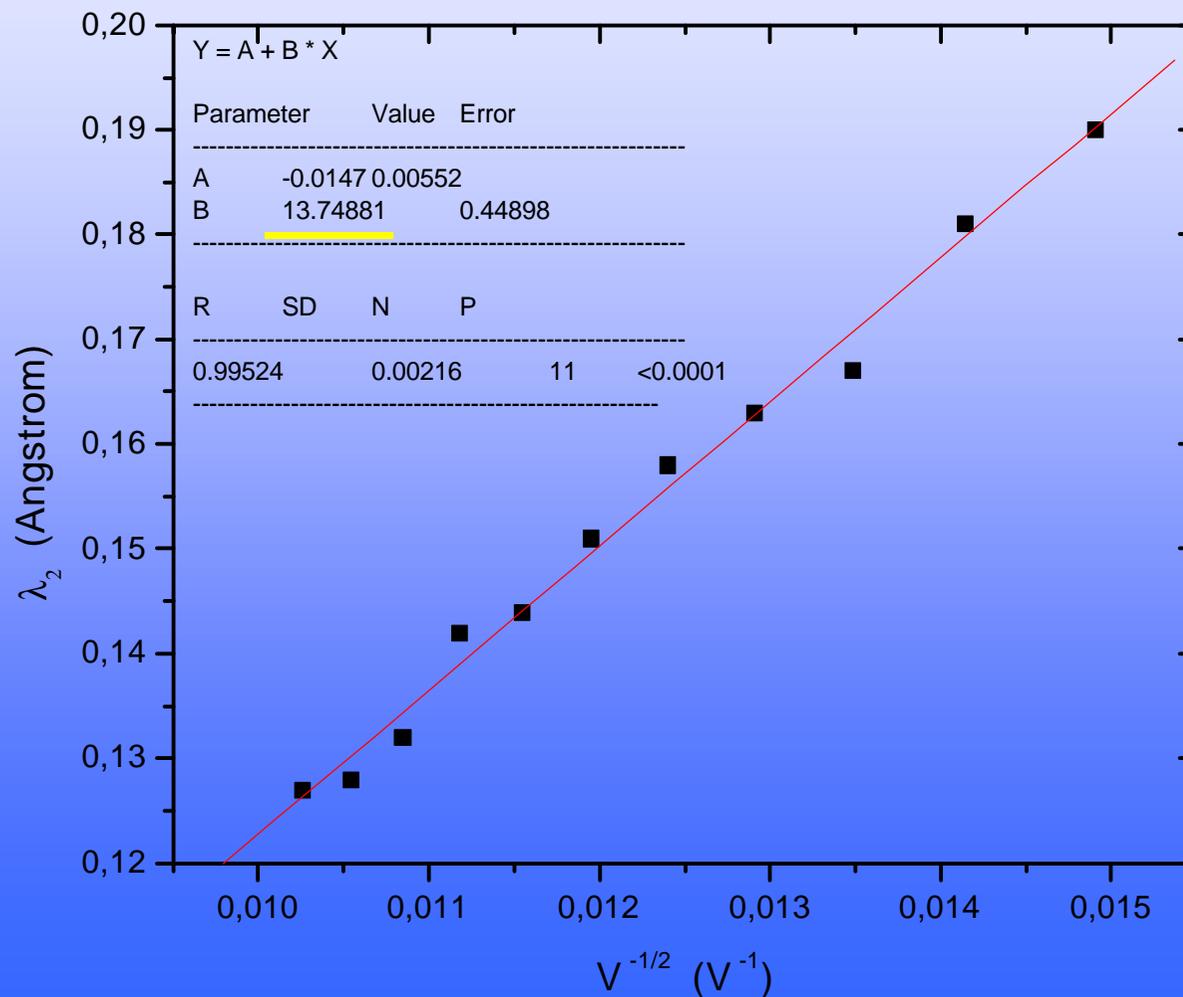
Tabelado: 2,13 Å

Calculado:

$d_2 = (1,91 \pm 0,07) \text{ \AA}$

Erro: 10,32 %

Gráfico: λ_2 (Å) x $V^{-1/2}$ (kV⁻¹)



Constante de Planck

Valor tabelado:

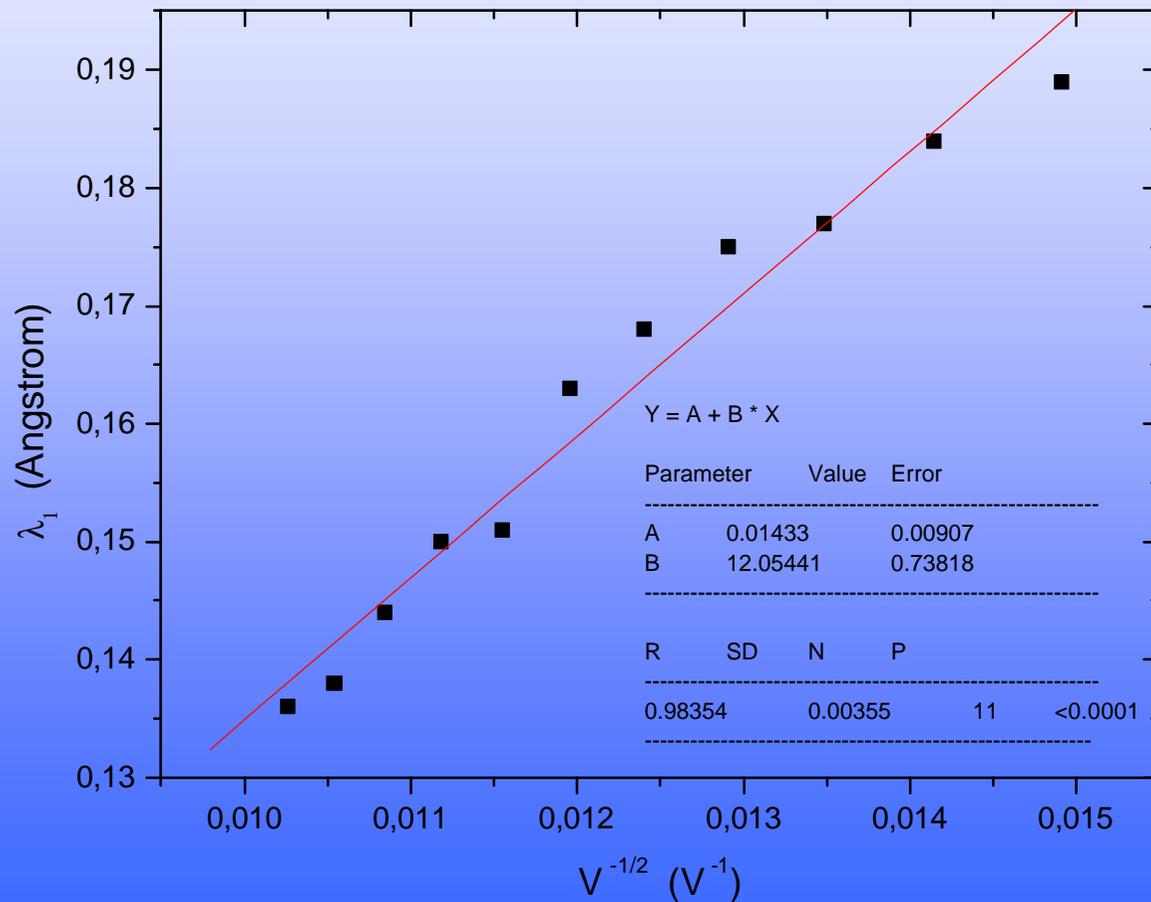
$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Valor Calculado

$$h = 7,51 \times 10^{-34} (\pm 0,44) \text{ J.s}$$

Erro: 13,27 %

Gráfico: λ_1 (Å) x $V^{-1/2}$ (kV⁻¹)



Constante de Planck

Valor tabelado:

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Valor Calculado

$$h = 6,59 \times 10^{-34} (\pm 0,74) \text{ J.s}$$

Erro: 0,60 %

Conclusão

- Verificação do comportamento ondulatório do elétron.
- Medida satisfatória de duas separações interplanares do grafite, na qual, obtivemos: $d_1 = 1,91 \pm 0,20 \text{ \AA}$ (erro de 10,32 %) e $d_2 = 1,43 \pm 0,10 \text{ \AA}$ (erro de 16,26 %).
- Compreensão do mecanismo de formação dos anéis a partir da estrutura policristalina;
- As medidas foram satisfatórias da constante de Planck com :
 $h = (7,51 \times 10^{-34} \pm 0,44) \text{ J.s}$ - erro de 13,27 %, para o anel menor e
 $h = (6,51 \times 10^{-34} \pm 0,72) \text{ J.s}$ - erro de 0,60 %, para o anel maior.
- A causa principal dos erros relativos nos valores encontrados é a imprecisão na medida dos raios ou diâmetros dos anéis da figura de difração. As medidas devem ser tomadas em relação ao seu raio/diâmetro central, aonde o anel é mais intenso, mas mesmo assim os anéis são indefinidos e de difícil visualização.

Difração e Interferência

A Interferência e a difração são dois importantes fenômenos que distinguem das partículas. A **interferência** é a combinação, por superposição, de duas ou mais ondas que se encontram em um ponto do espaço. A **difração** é a curvatura das ondas em torno de arestas, que ocorre quando uma parte da frente de onda encontra uma barreira ou um obstáculo.

A intensidade a luz em qualquer ponto do espaço pode ser calculada pelo princípio de Huygens, tomando cada ponto da frente de onda como se fosse uma fonte puntiforme e calculando a interferência resultante.

Em nosso caso os máximos de difração são fornecidos pela lei de Bragg:

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

Onde d é a distância entre os planos da rede cristalina que atua como uma fenda possibilitando a difração.

Aplicações de Difração de Elétrons

A difração de elétrons serve não só como uma observação científica para o comportamento corpuscular para a radiação eletromagnética, mas tem muitas aplicações tecnológicas, a saber:

a) Para um material desconhecido, pode-se estudar:

- Estrutura cristalina
- Parâmetros de rede
- Composição química

b) Para um material conhecido:

- Orientação em relação ao feixe de elétrons incidentes
- Orientação entre 2 ou mais monocristais
- Orientação cristalográfica de defeitos, etc...

Bibliografia

- Rohlf, JW, Modern Physics..., Wiley, 1994;
- Beeston, BEP, Electron Diffraction and Optical Diffraction Techniques, North Holland, 1973
- Tipler, P, Ótica e Física Moderna Vol 04, Guanabara Koogan, 1995.
- Apostilas e Manuais de Lab. Avançado de Física, IFSC – 2001
- R-Eiberg – R Resimik, Física Quântica, Ed. Campus.
- <http://phya.yonsei.ac.kr/~phylab/data/phywe/content.htm>

Questionário

1- O que você entende por dualidade onda-partícula em radiação eletromagnética e na matéria? Dê exemplos de experiências que, historicamente, levaram a esse dualismo.

A radiação eletromagnética apresenta características típicas de ondas (interferência, difração), mas também características corpusculares (carregam energia em quantidades discretas); o mesmo foi confirmado acontecer com partículas, como os elétrons.

Os experimentos de interferências da luz Young, no século XIX, comprovaram o caráter ondulatório da radiação eletromagnética; já o caráter corpuscular foi sugerido pelo *Quantum de Ação* originado do estudo da Radiação de Corpo Negro por Planck, e confirmado pelo Efeito de Espalhamento Compton (“colisão” entre elétrons e fóton).

O caráter corpuscular do elétron foi estabelecido pelos experimentos com tubos de raios catódicos por **J. J. Thompson**, no qual um feixe de elétrons pode ser desviado e colimado por campos elétricos e magnéticos, o que permitiu obter a relação entre massa e a carga das partículas do feixe o caráter ondulatório previsto por De Broglie, foi confirmado por experimentos de difração de elétrons e posteriormente de nêutrons e átomos leves.

2- Por que você pode aplicar a Lei de Bragg nesta experiência?

Só podemos utilizar a lei de Bragg, pois as dimensões dos planos cristalinos são da ordem do comprimento de onda De Broglie associado ao elétron, evidenciando seu caráter ondulatório.

3- Por que somente são vistos dois anéis de difração?

Os dois anéis vistos correspondem à difração pelos planos que contém maior densidade de átomos, nos outros a densidade é muito pequena, ou até o raio do anel seria maior que o anteparo fluorescente.

$$l = 2d \sin \theta \implies \sin \theta = \frac{l}{2d}$$

$$l = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

Se d diminuir o seno cresce e o ângulo cresce, maior o ângulo mais borrado o anel (intensidade fraca)

4- Podemos observar difração de prótons? E de nêutrons?

- Sim, pelo mesmo motivo do elétron, a dualidade onda-partícula, apesar de prótons e nêutrons serem bem mais massivos do que o elétron. Por isso se torna mais difícil observar o comportamento dual para prótons e nêutrons.
- Sim, desde que o comprimento de onda de De Broglie destes seja da ordem das distâncias características da rede utilizada e elas não interferem eletricamente (Próton) com a rede.
- Obs: Se utilizarmos o policristal de grafite, devemos conseguir $l \cong \text{Å}$, para que ocorra difração.

Como $m_{\text{próton}} = m_{\text{nêutron}} = 2000 m_{\text{elétron}}$, para obter l ordem precisamos diminuir V 2000 vezes.

5- Verifique a alternativa de que a correção relativista (energia relativista do elétron), para as voltagens utilizadas, é de somente 0,5%.

Primeiro vamos estimar o valor da velocidade do elétron emitido pelo cátodo, considerando a sua massa de repouso para os seguintes potenciais aceleradores: $V_i = 4500\text{V}$

$$v = \sqrt{\frac{2eV_i}{m_0}}$$

Como conhecemos os valores para $e=1,60 \times 10^{-19}\text{ C}$
 $m_0=9,11 \times 10^{-31}\text{ Kg}$
 $V_i=4500\text{ V}$
 $c=3 \times 10^8\text{ m/s}$

Obtemos $V_i \cong 3,97 \times 10^7\text{ m/s}$

Logo segue que:

$$m_1 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_i}{c}\right)^2}} \Rightarrow \frac{m_1}{m_0} = 1,009$$

Para um potencial $V_f = 9500\text{ V}$ temos que:

$$V_f \cong 5,78 \times 10^7\text{ m/s} \quad m_2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_f}{c}\right)^2}} \Rightarrow \frac{m_2}{m_0} = 1,019$$

Como a massa relativista aumenta com o aumento do potencial temos que a correção necessária vai aumentando junta. Mas esta correção para o nosso experimento é de 0,98%.

FIM