Física Moderna I
Aula 10

Marcelo G Munhoz
Edifício HEPIC, sala 202, ramal 916940
munhoz@if.usp.br

Limitações do Modelo de Bohr

- Apesar de bem sucedido em vários aspectos, o modelo de Bohr mostra diversas deficiências
- Um exemplo é sua interpretação física. Como podemos compreender, por exemplo, a quantização do momento angular, ou seja, os estados estacionários?

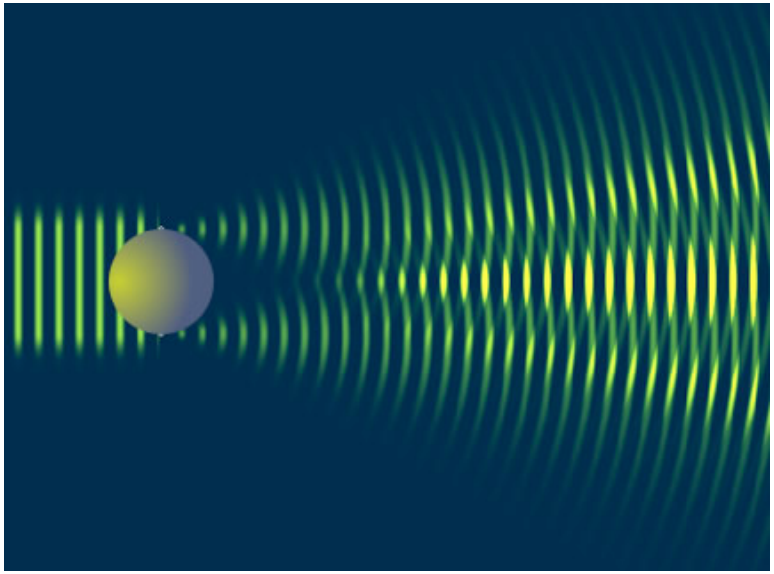
Hipótese de de Broglie

- Em sua tese de doutorado de 1924, Maurice de Broglie propõe que, assim como a radiação eletromagnética tem um caráter dual onda-partícula, a matéria também deve apresentar um caráter ondulatório
- Ele propõe que as partículas de matéria também podem ter associadas a elas propriedades ondulatórias (frequência e comprimento de onda), onde:

$$E = h\nu \qquad\qquad p = h/\lambda \Rightarrow \lambda = h/p$$

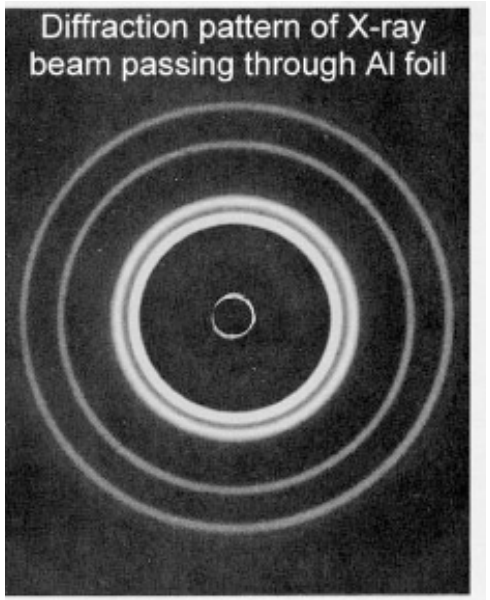
Difração de elétrons

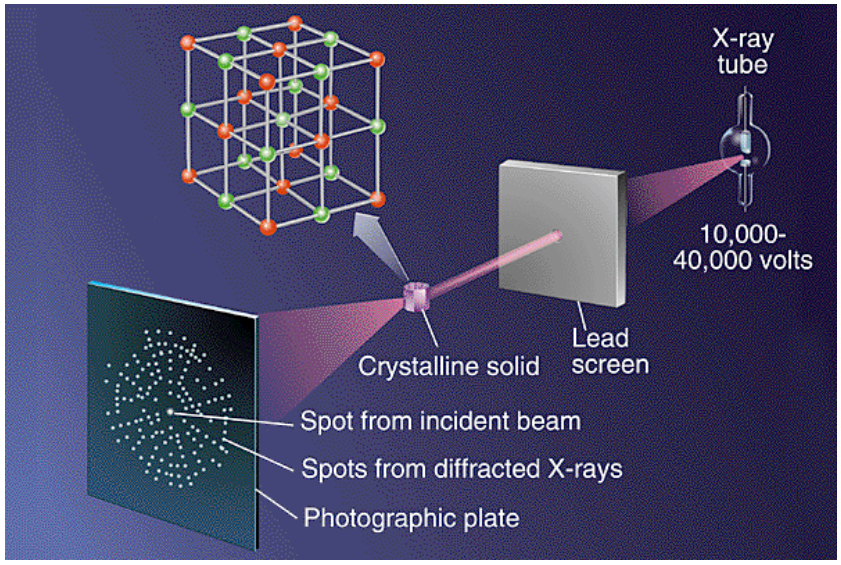
- Como verificar se a hipótese de de Broglie está correta?
- Podemos tentar observar a difração de elétrons, da mesma forma como observamos a difração da luz ou de raios-X



Difração de elétrons

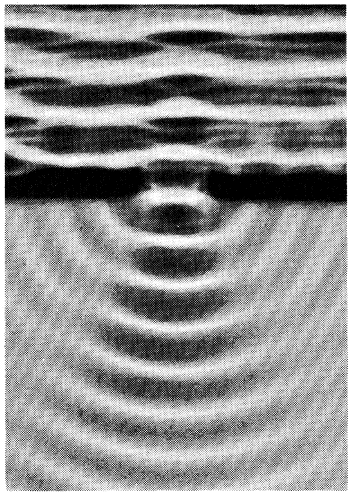
- Para ocorrer o fenômeno da difração é preciso que a dimensão do "obstáculo óptico" (abertura da fenda, espaçamento em uma rede de difração, etc.) seja da ordem de grandeza do comprimento de onda que se deseja estudar

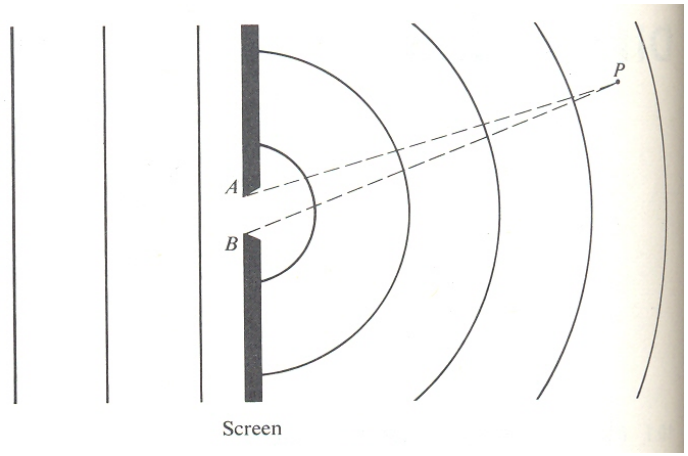




Difração de Fraunhofer: espalhamento por um ponto

- Princípio de Huygens-Fresnel
  - "Todo ponto não-obstruído de uma frente de onda, servirá como uma fonte de ondas esféricas secundárias"
  - Neste caso, teremos apenas interferência construtiva





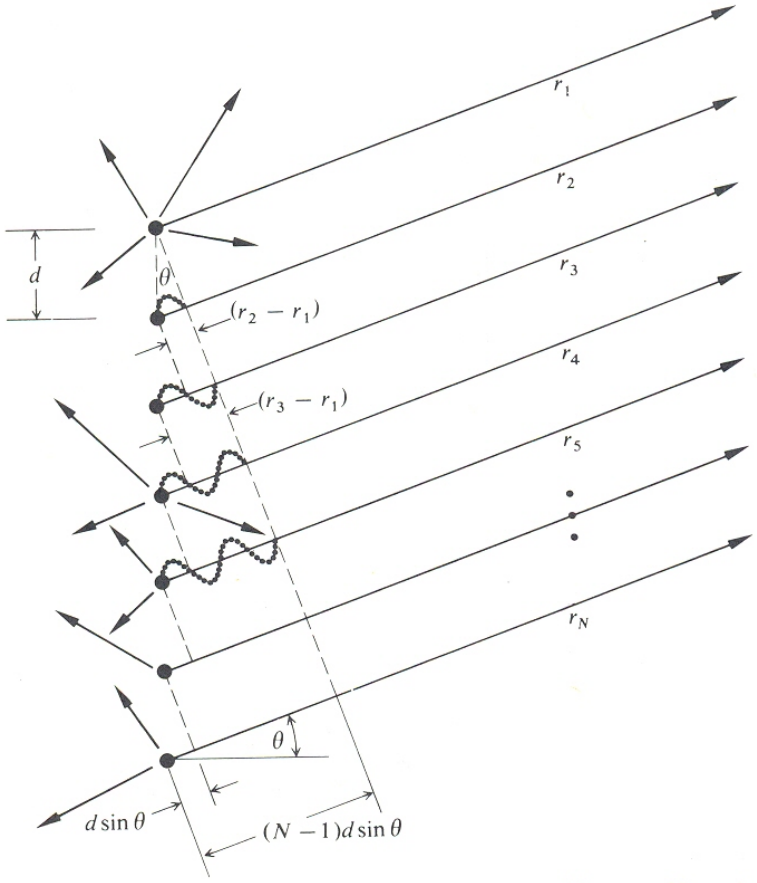
Difração de Fraunhofer: espalhamento por vários pontos

- Se houver duas os mais fontes ocorrerá também uma interferência destrutiva formando o conhecido padrão de interferência

Difração de Fraunhofer: espalhamento por vários pontos

- Princípio de Huygens-Fresnel:
  - Haverá interferência destrutiva e os pontos de máximo ocorreram para ângulos de espalhamento dados por:

$$d \cdot sen(\theta) = n\lambda$$



Difração de elétrons

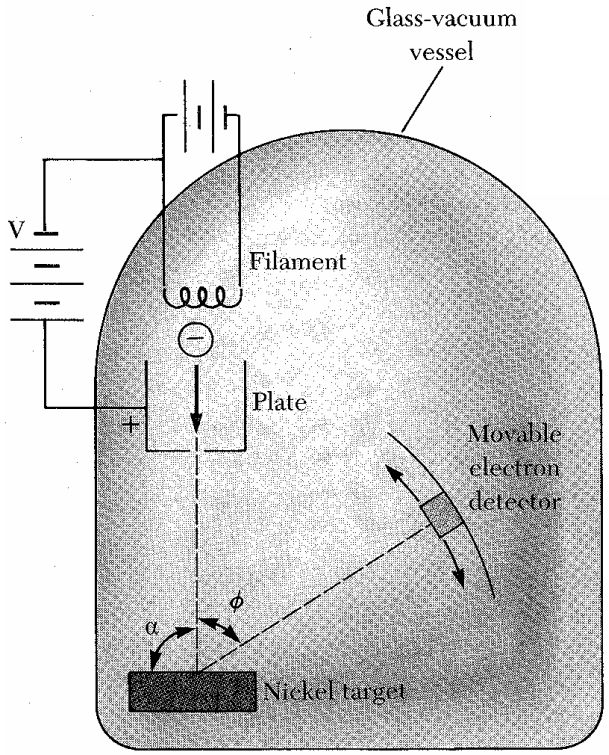
- Para o caso de elétrons com 100 eV de energia espera-se, segundo a relação de de Broglie, que:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mK}} = \frac{6.6 \times 10^{-34} J \cdot s}{\sqrt{2 \cdot 9.1 \times 10^{-31} kg \cdot 100 eV \cdot 1.6 \times 10^{-19} J/eV}} = 1.2 \times 10^{-10} m$$

Difração de elétrons

- Clinton J. Davisson e Lester H. Germer realizaram um experimento que demonstrou a difração de elétrons em 1927

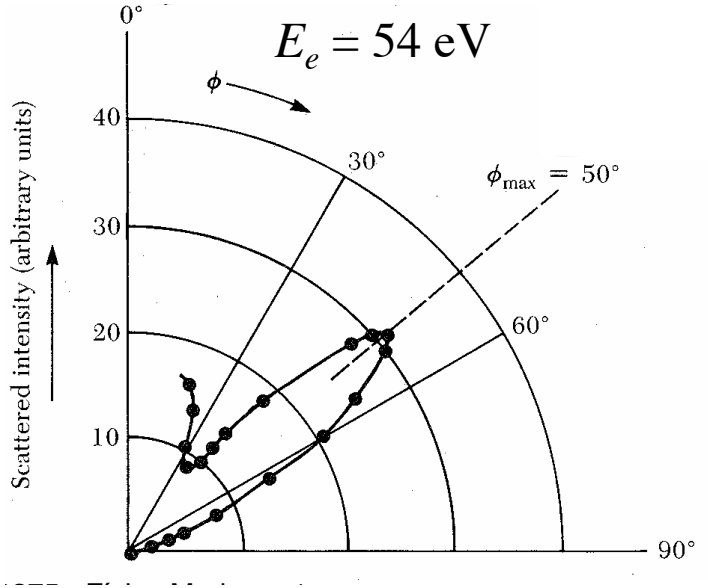
- Eles estudaram a quantidade de elétrons que eram espalhados em uma superfície de Ni em função do ângulo de espalhamento

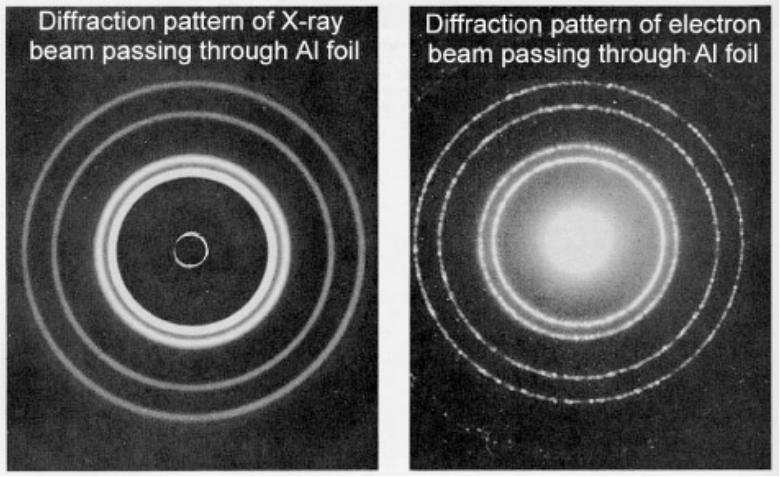


Difração de elétrons

- Eles observaram que, para elétrons com energia de 54 eV, a quantidade de elétrons espalhados apresentava picos em função do ângulo, como no caso de uma figura de difração

- O primeiro pico se encontrava em 50º





Difração de elétrons

- Portanto, o comprimento da onda difratada nesse caso é dado por

$$\lambda = d \cdot sen(\theta) = 2.15 \times 10^{-10} m \cdot sen(50^o) = 1.65 \times 10^{-10} m$$

- Por outro lado, o comprimento de onda esperado para esses elétrons é:

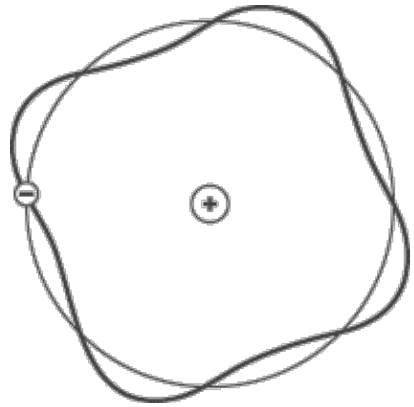
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mK}} = \frac{6.6 \times 10^{-34} J \cdot s}{\sqrt{2 \cdot 9.1 \times 10^{-31} kg \cdot 54 eV \cdot 1.6 \times 10^{-19} J/eV}} = 1.67 \times 10^{-10} m$$

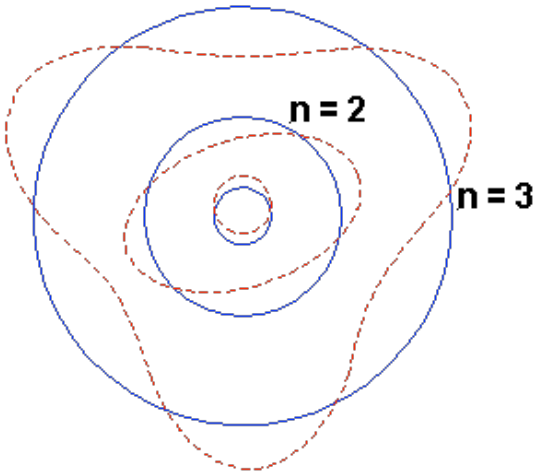
Quantização de Bohr

- Diante dessa visão ondulatória do elétron, o modelo de Bohr pode ser reinterpretado

- A quantização do momento angular pode ser visto como consequência do elétron se comportar como uma onda estacionária

- Animação





Regra de Quantização de Wilson e Sommerfeld

- Em 1916, Wilson e Sommerfeld propuseram a seguinte regra de quantização de sistemas físicos:
- "Para qualquer sistema físico no qual as coordenadas são funções periódicas do tempo, existe uma condição quântica para cada coordenada. Estas condições quânticas são

$$\oint p_q dq = n_q h$$

onde q é uma das coordenadas, p_q é o momento associado a essa coordenada, n_q é um número quântico que toma apenas valores inteiros, e a integração é tomada sobre um período da coordenada q"

Princípio da Correspondência

- Enunciado por Bohr em 1923, ele diz que:
  - "As previsões da teoria quântica para o comportamento de qualquer sistema físico devem corresponder às previsões da física clássica no limite no qual os números quânticos que especificam o estado de um sistema se tornam muito grandes"
  - "Uma regra de seleção é válida para todos os números quânticos possíveis. Portanto, todas as regras de seleção que são necessárias para obter a correspondência exigida no limite clássico (n grande) também se aplicam no limite quântico"

Limitações da "Antiga" Teoria Quântica

- A teoria só trata de sistemas periódicos (regra de quantização de Wilson-Sommerfeld)
- Não é capaz de prever a taxa de transição entre estados quânticos
- É bem sucedida apenas na descrição de átomos de um único elétron
- Apresenta "lacunas conceituais"