

# Raios X



## Prêmios Nobel de Física



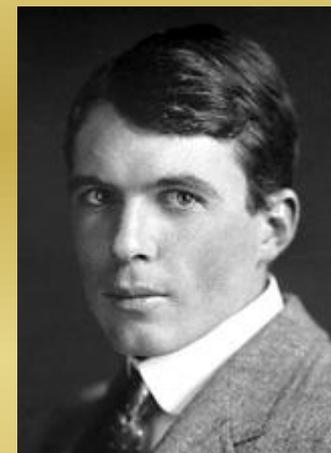
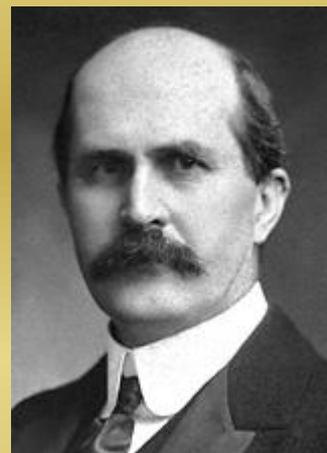
**1901 - Wilhelm Röntgen**

“em reconhecimento pelos extraordinários serviços que ele possibilitou pela descoberta dos notáveis raios que subsequentemente levaram seu nome”



**1914 - Max von Laue**

“por sua descoberta da difração de raios X por cristais”

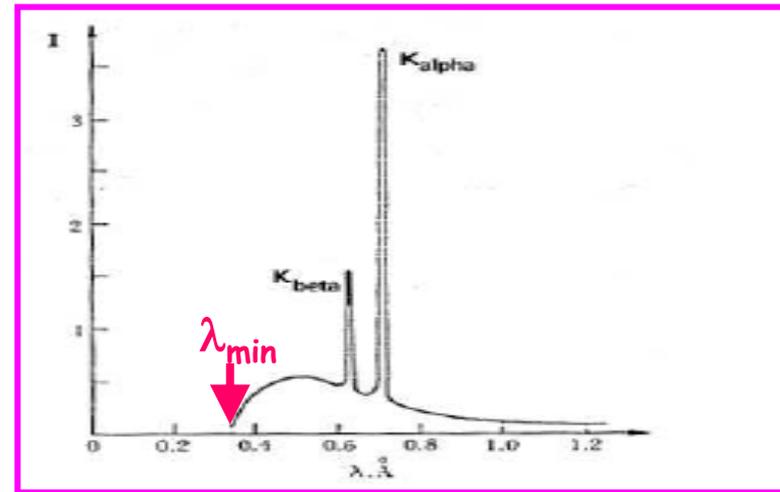
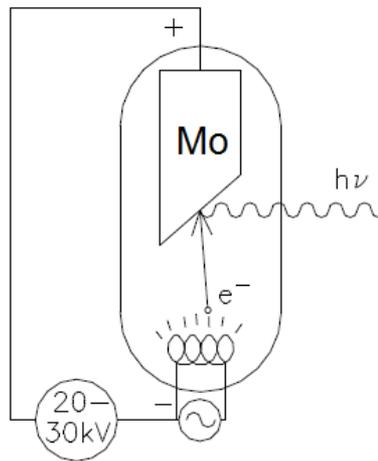


**1915 - Sir William Henry Bragg & William Lawrence Bragg**

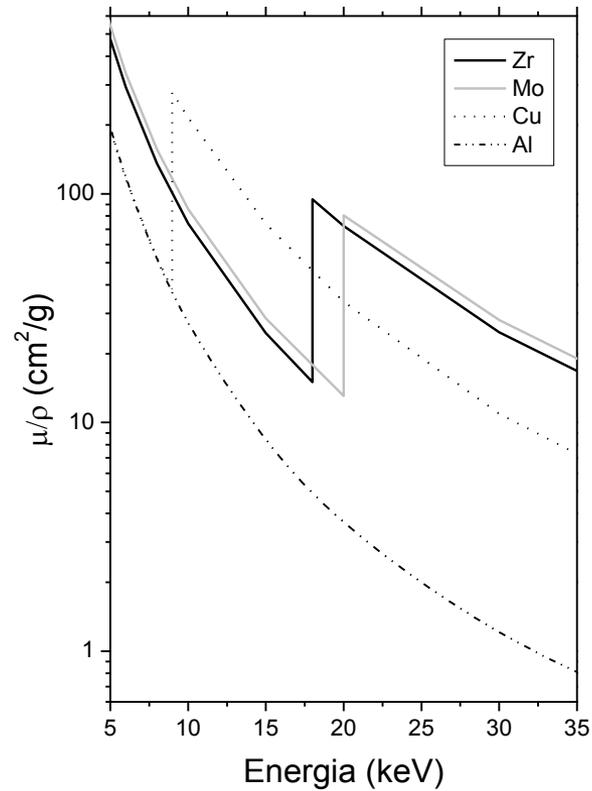
“por seus serviços na análise da estrutura cristalina por meio de raios X”

# Produção de Raios – X

Tubo de RX



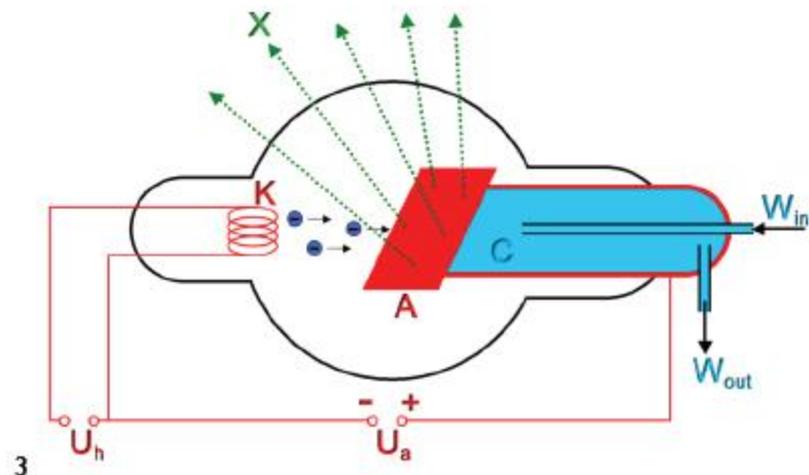
# Interação de Raios – X com a Matéria



# Röntgen descobre os raios-X (1895)

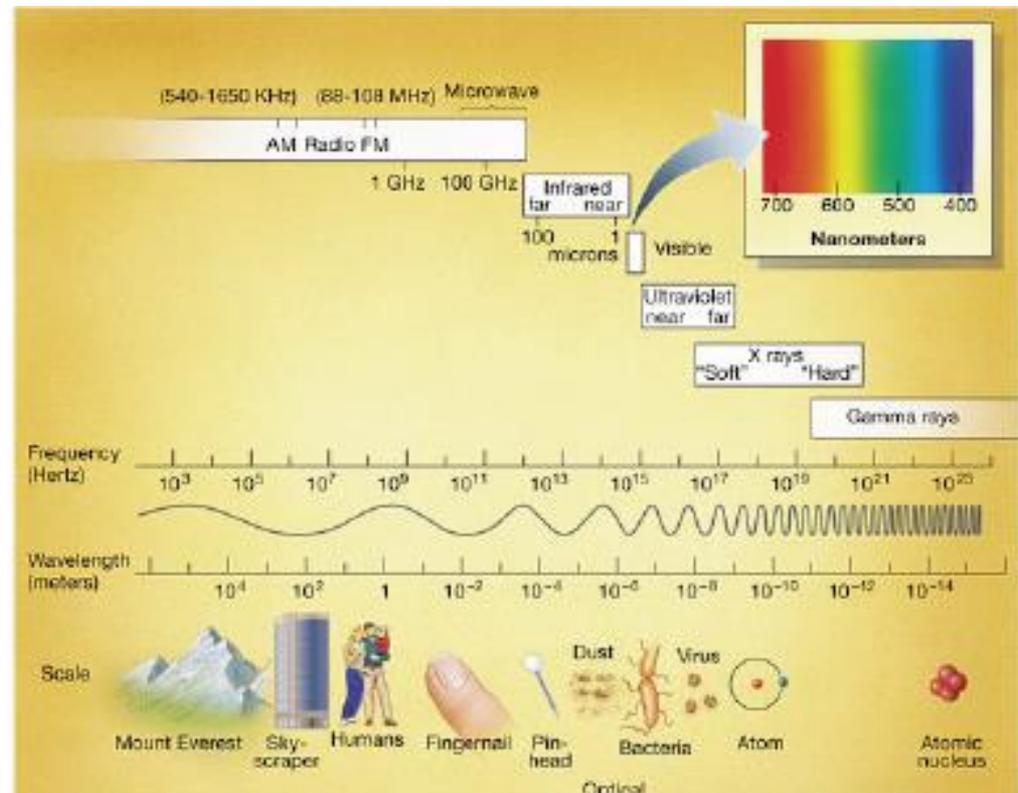


- Röntgen trabalhava com tubos de raios catódicos
- Durante seus estudos ele observou algo bastante estranho...



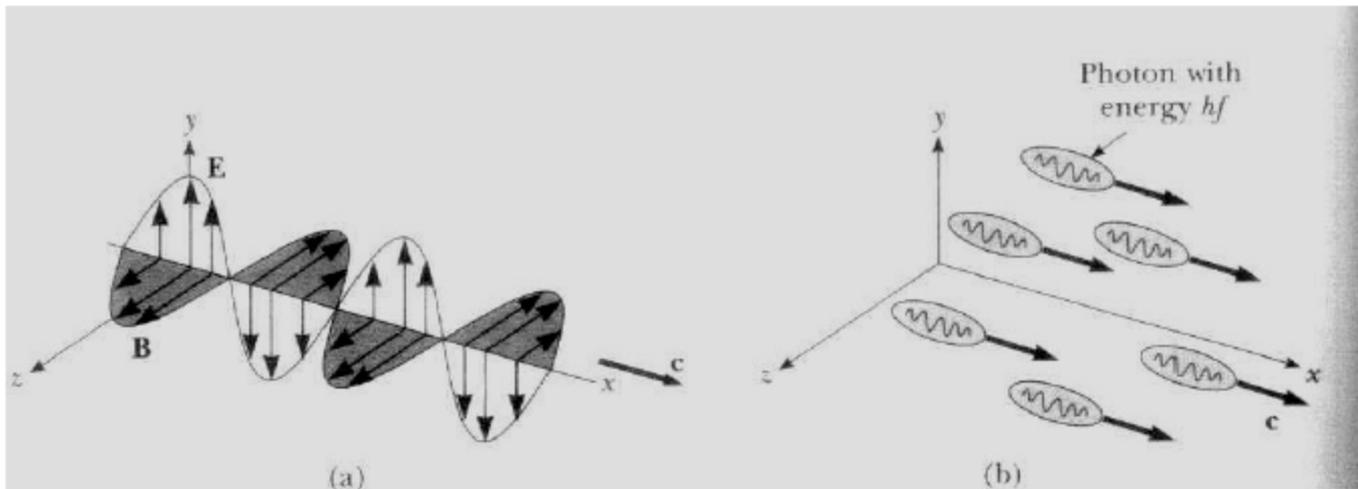
# E o que são os Raios – X???

- Após alguns anos de estudo, ficou claro que os raios-X eram ondas eletromagnéticas

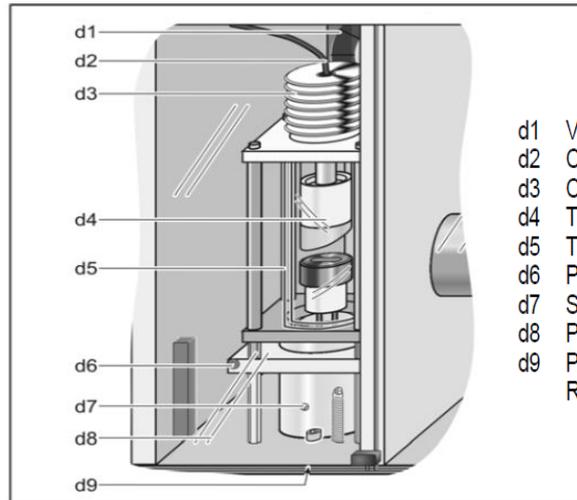
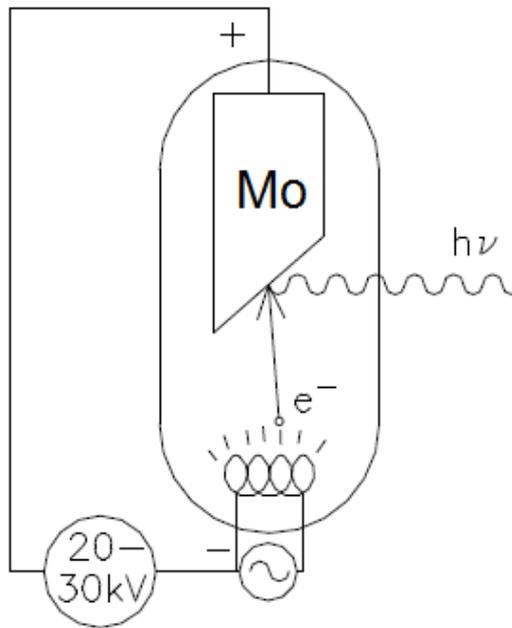


# Dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética

- A luz é uma onda eletromagnética e uma partícula (fóton) ao mesmo tempo!
- Ela se propaga como onda e interage como partícula...



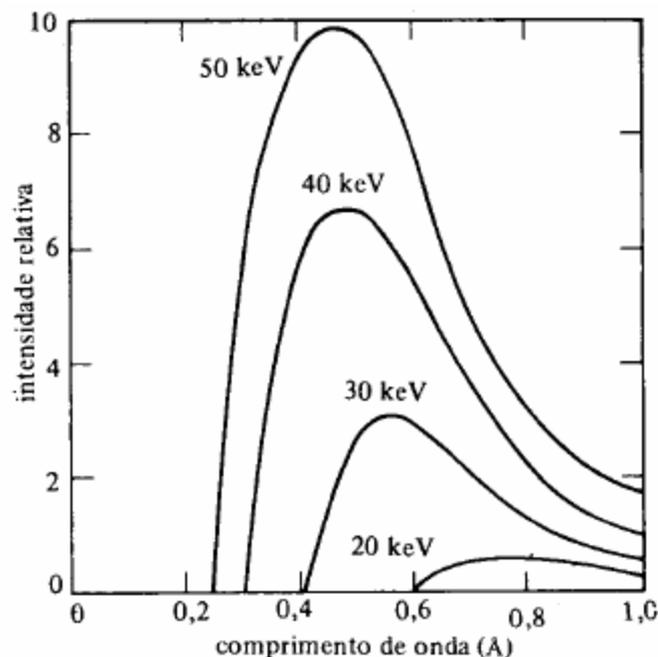
# E como são produzidos os Raios – X num tubo ???



- d1 Ventilador
- d2 Cabo de alta tensão
- d3 Corpo de refrigeração
- d4 Tubo de raios X
- d5 Tubo de vidro de chumbo
- d6 Parafuso de retenção
- d7 Soquete do tubo com parafuso de fixação
- d8 Porta corrediça de vidro de chumbo
- d9 Parafuso de regulagem da altura (no piso do Aparelho de Raios X)

# Como são produzidos os raios-X?

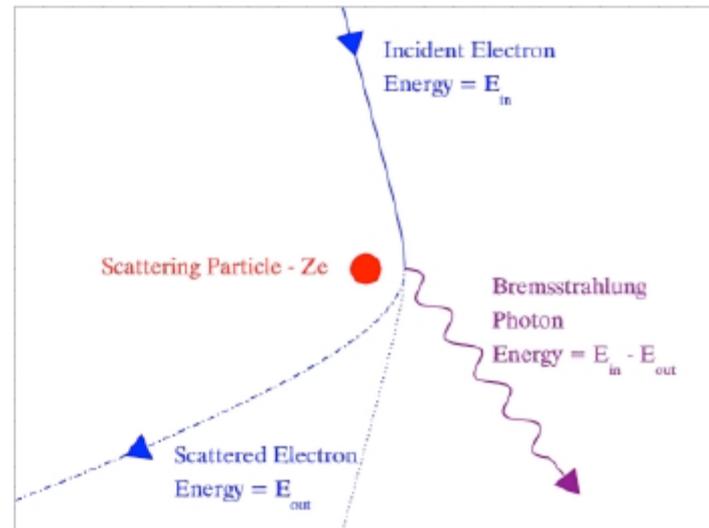
- Segundo a física clássica uma carga em aceleração emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética
- Porém, ela não pode explicar a razão de existir um valor mínimo de comprimento de onda nesse espectro



# Produção de raios-X

- Se postularmos que a diferença de energia do elétron é usada para criar um fóton de radiação, temos:

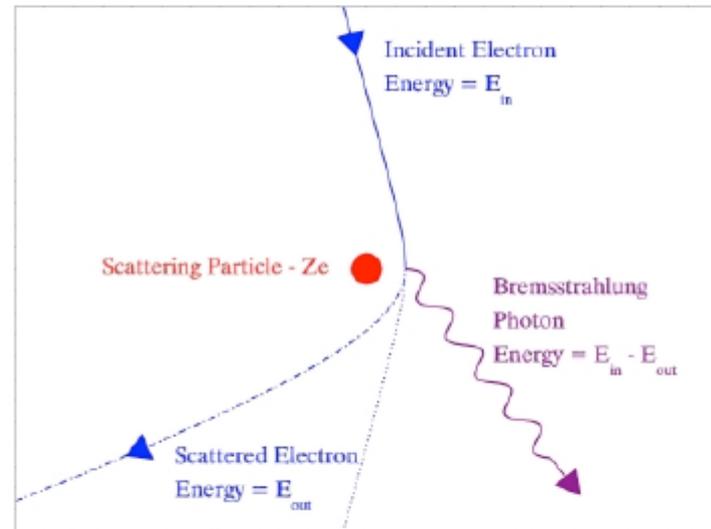
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$



# Produção de raios-X

- No caso do nosso aparato experimental:  $E_i = eV$
- Portanto, se o elétron perder toda sua energia, ou seja,  $E_f = 0$ , tem-se:

$$E_i - 0 = eV = \frac{hc}{\lambda_{min}} \Rightarrow \lambda_{min} = \frac{hc}{eV}$$

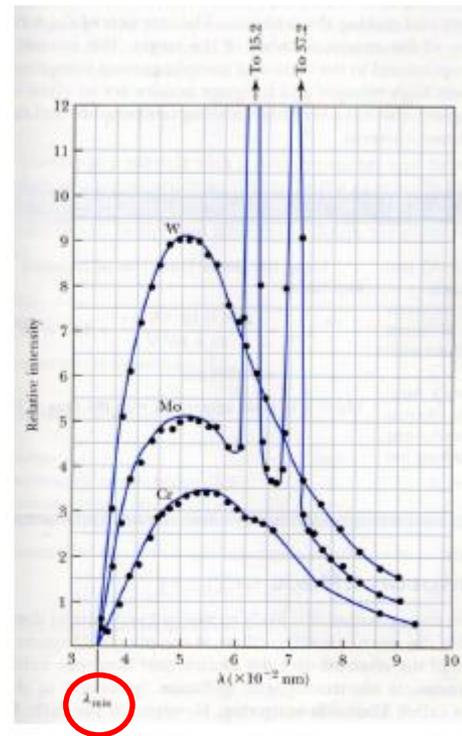


# *Bremsstrahlung* e o efeito fotoelétrico

- Produção de raios-X: elétrons acelerados produzem fótons. Esse efeito é chamado de *Bremsstrahlung*
- Efeito Fotoelétrico: fótons “arrancam” elétrons do material

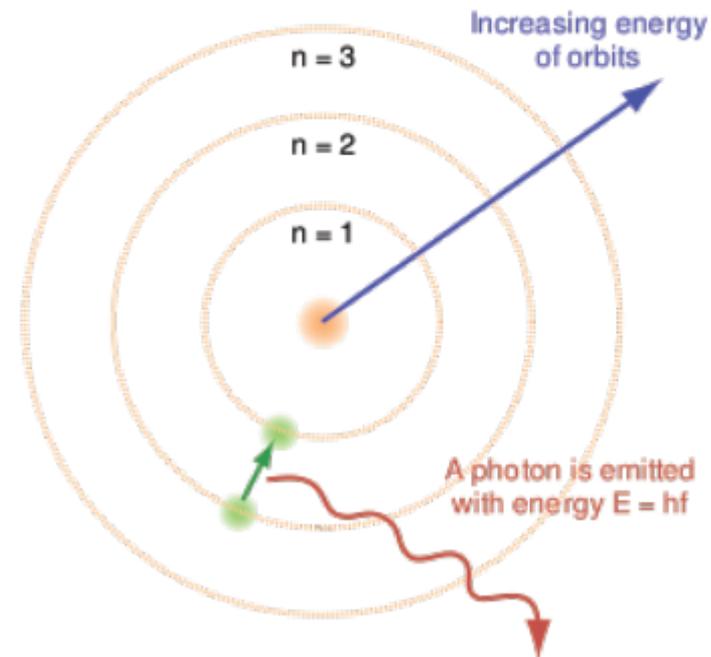
# Como são produzidos os raios-X?

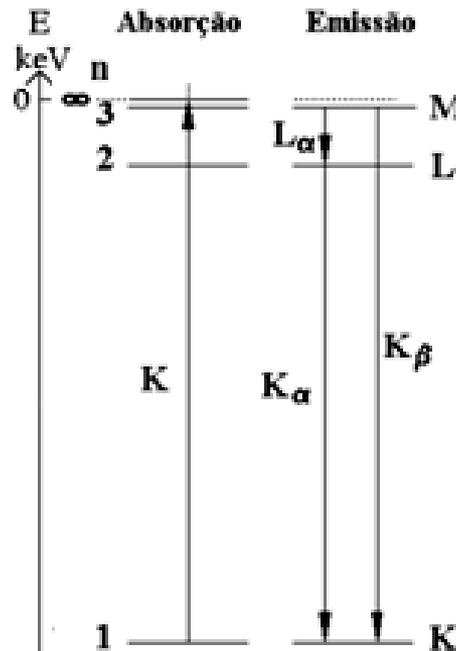
- E o que são os picos que as vezes aparecem na emissão de raios-X?



# Como são produzidos os raios-X?

- E o que são os picos que as vezes aparecem na emissão de raios-X?
- Eles correspondem a transições entre níveis de energia dos átomos que compõem o anteparo onde incide os elétrons





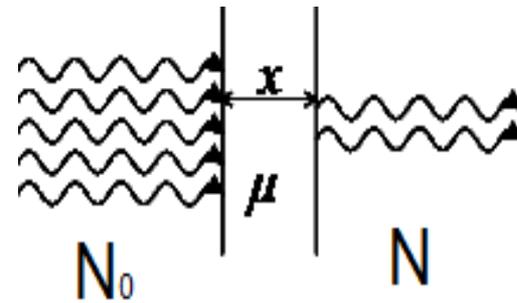
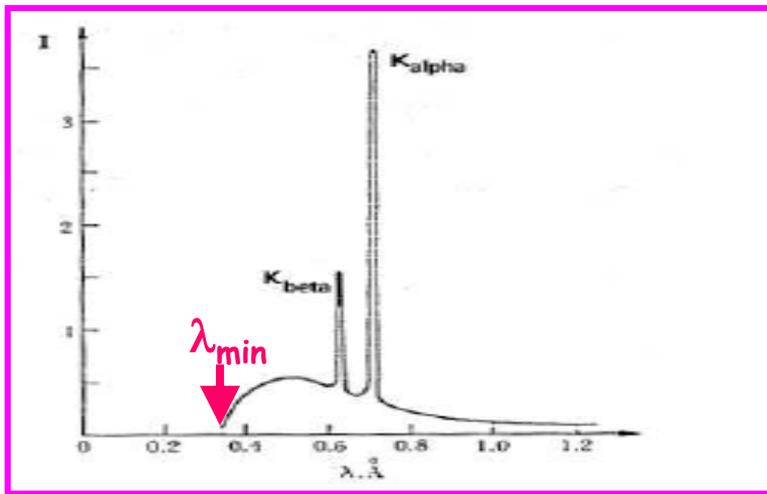
**Linhas características!!!**

Absorção e emissão de energia em transições que resultam no espectro característico. É utilizada a notação espectroscópica:  $n = 1$  é camada K;  $n = 2$ , camada L ... A estrutura fina dos níveis de energia não é mostrada

| Absorção Ionização | Energia (keV) |
|--------------------|---------------|
| <b>Molibdênio</b>  |               |
| Borda K            | 20,000        |
| Borda L            | 2,867         |
| <b>Zircônio</b>    |               |
| Borda K            | 17,996        |
| Borda L            | 2,530         |

|                                      | <b>Molibdênio</b> |               |
|--------------------------------------|-------------------|---------------|
|                                      | Emissão Transição | Energia (keV) |
| $\langle K_a \rangle = 17,44$<br>keV | K-L2              | 17,37         |
|                                      | K-L3              | 17,48         |
| $\langle K_b \rangle = 19,60$<br>keV | K-M2              | 19,59         |
|                                      | K-M3              | 19,61         |
|                                      | K-M4              | 19,77         |
|                                      | K-M5              | 19,78         |

# E como um feixe de RX interage com a matéria ???



$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad \text{ou} \quad T = e^{-\mu x}$$

$\mu$  é o coeficiente de atenuação linear (em  $\text{cm}^{-1}$ )

$T$  é a transmitância

| Absorção Ionização | Energia (keV) |
|--------------------|---------------|
| <b>Molibdênio</b>  |               |
| Borda K            | 20,000        |
| Borda L            | 2,867         |
| <b>Zircônio</b>    |               |
| Borda K            | <u>17,996</u> |
| Borda L            | 2,530         |

|                                      | <b>Molibdênio</b> |               |
|--------------------------------------|-------------------|---------------|
|                                      | Emissão Transição | Energia (keV) |
| $\langle K_a \rangle = 17,44$<br>keV | K-L2              | 17,37         |
|                                      | K-L3              | 17,48         |
| $\langle K_b \rangle = 19,60$<br>keV | K-M2              | 19,59         |
|                                      | K-M3              | 19,61         |
|                                      | K-M4              | 19,77         |
|                                      | K-M5              | 19,78         |

# Procedimento

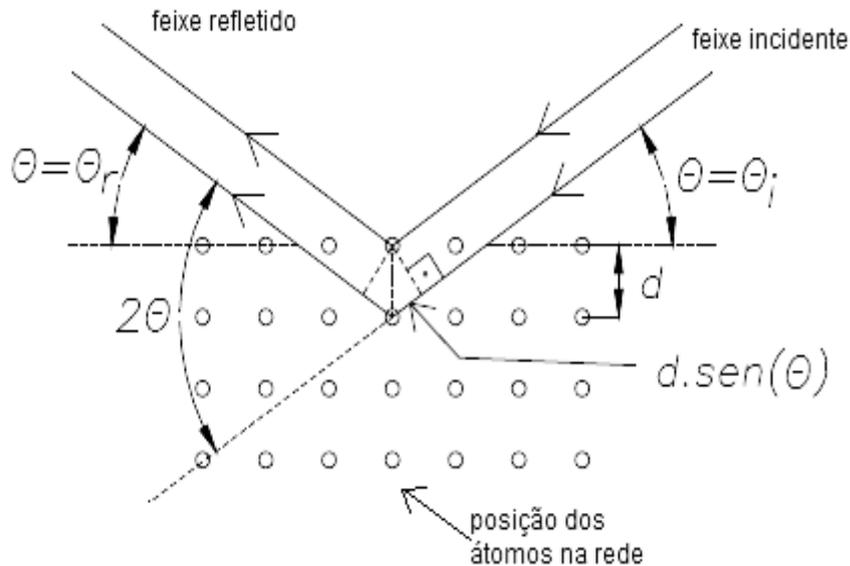
- Fonte de alta tensão (~ 20-30 kV) que gera elétrons
- Anodo de Molibdênio, onde os elétrons são freados e geram raios-X
- Difração de raios-X nos cristais de NaCl e KBr
- Contador Geiger-Muller que mede a intensidade da radiação em função do ângulo de espalhamento



# Objetivos

- Determinar o espectro de emissão de RX do tubo de Mo (intensidade x Energia)
- Observar a interação de RX com a matéria – fenômeno de absorção de RX
- Determinar a constante de Planck a partir do fenômeno de radiação de freamento-  
*Bremsstrahlung*

# Difração de RX em cristais (NaCl)



$$d(\text{NaCl}) = 0,282 \text{ nm}$$

- **Lei de Bragg**  $n\lambda = 2d \sin\theta$   $n = \text{ordem de difração}$

Lembre que  $E = hc/\lambda$



# Difração de elétrons

## 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:

$$p = h/\lambda \Rightarrow \lambda = h/p$$

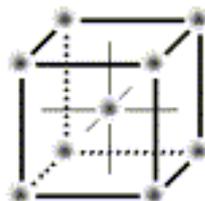
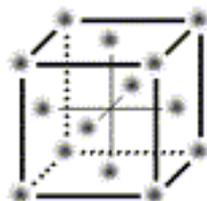
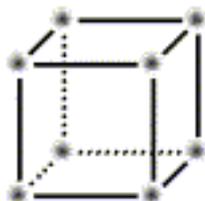
# Difração de elétrons

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

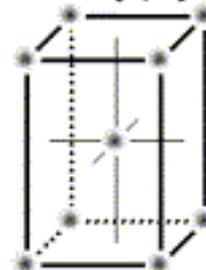
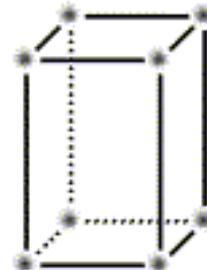
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mK}} = \frac{6.6 \times 10^{-34} J \cdot s}{\sqrt{2 \cdot 9.1 \times 10^{-31} kg \cdot 100 eV \cdot 1.6 \times 10^{-19} J/eV}} = 1.2 \times 10^{-10} m$$

**AS 14 REDES DE BRAVAIS**

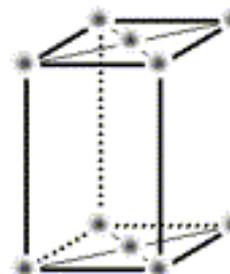
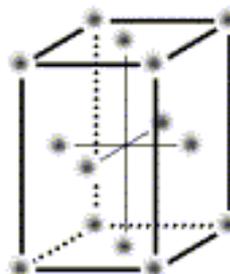
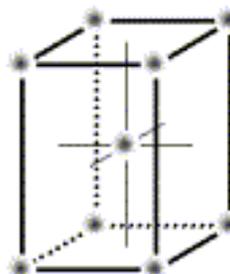
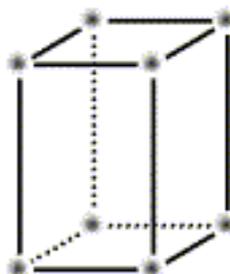
**CUBICA (P, F, I)**



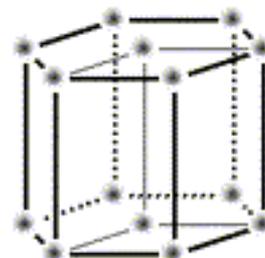
**TETRAGONAL (P, I)**



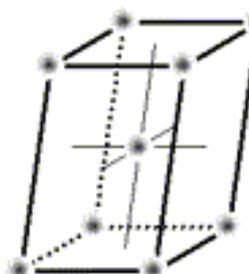
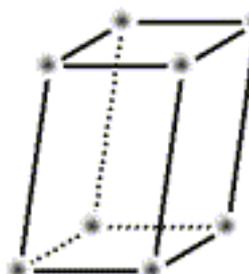
**ORTORRÓMBICA (P, I, F, C)**



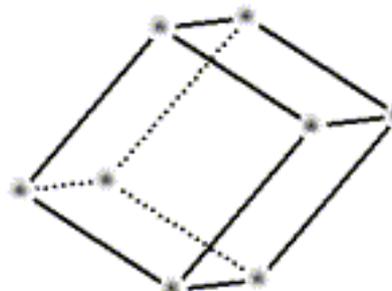
**TRIGONAL /  
HEXAGONAL P**



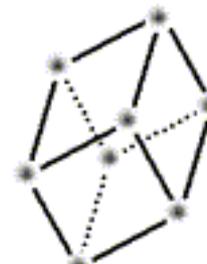
**MONOCLÍNICA (P, C)**



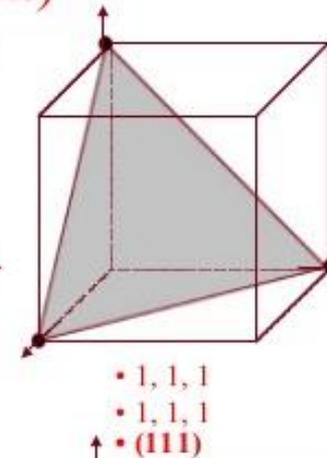
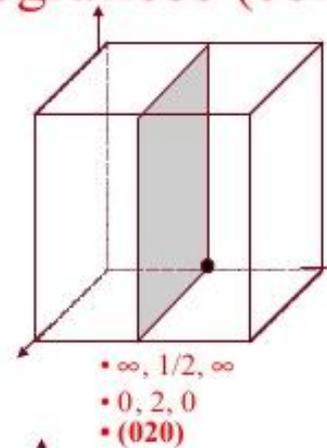
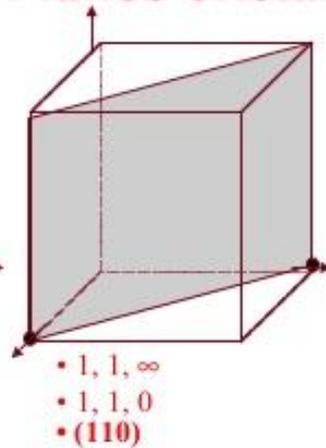
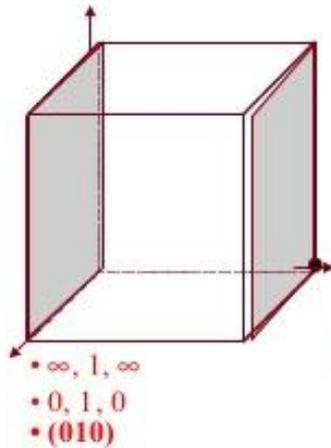
**TRICLÍNICA**



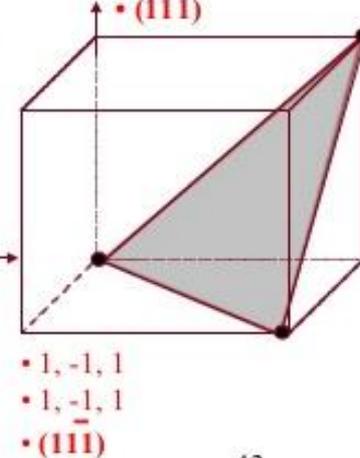
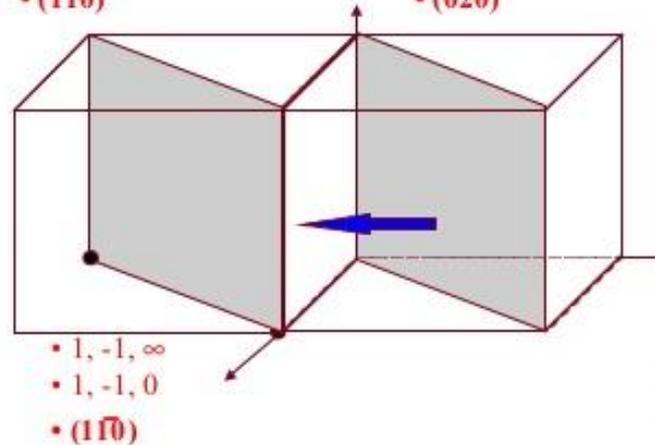
**TRIGONAL**



## Planos cristalográficos (cont.)



Quando as intersecções com os eixos não são óbvias, deve-se deslocar o plano ou a origem até obter as intersecções corretas.



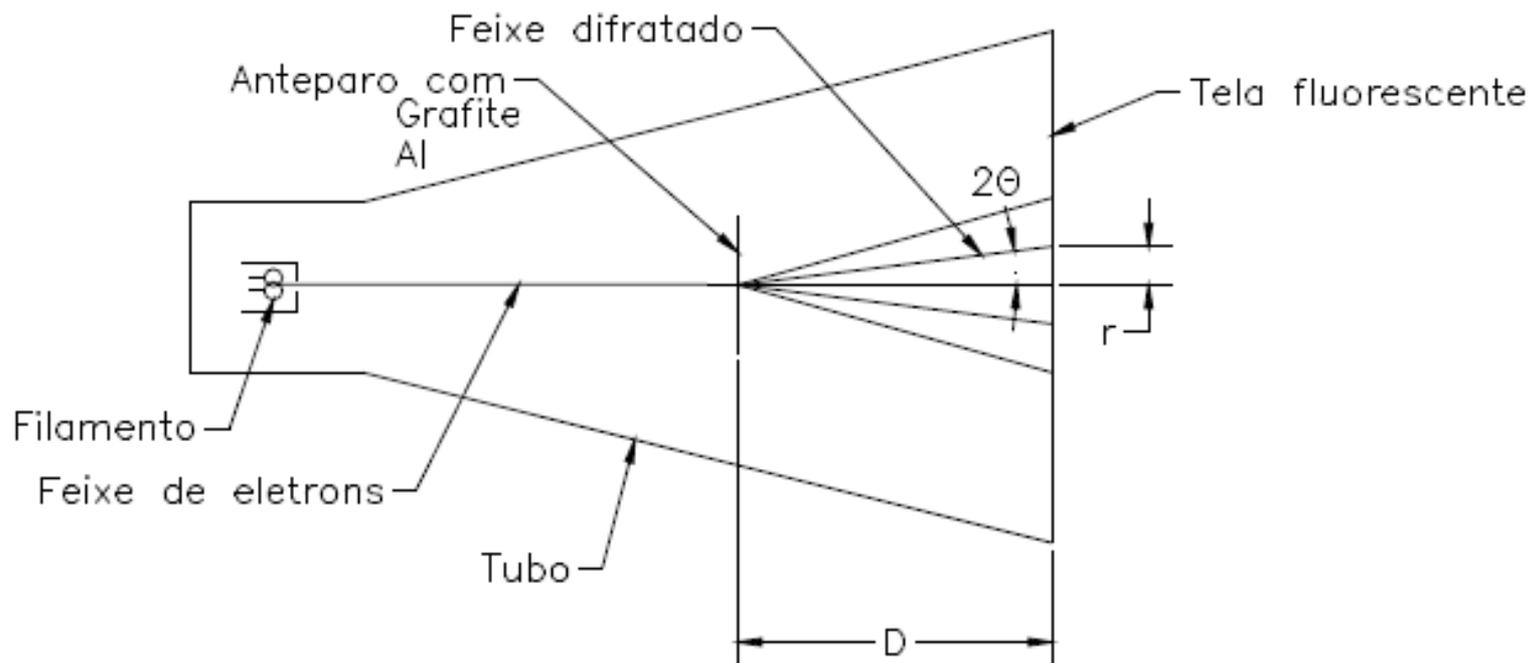


Figura c-1. Tubo de raios catódicos para medida de difração de elétrons.

*A medida do comprimento de onda dos elétrons*

Pela lei de Bragg:

$$\lambda = \frac{2d \operatorname{sen}(\theta)}{n} \quad (4)$$

onde  $d$  é a distância interplanar de uma certa família de planos cristalinos e  $n$  é a ordem da difração.

Os ângulos de difração são obtidos de:

$$2\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{r}{D}\right) \quad (5)$$

onde  $r$  é a distância entre o ponto de incidência do feixe direto e um ponto de máximo da figura de interferência, medida sobre a tela fluorescente, e  $D$  é a distância entre o alvo e a tela. Como o comprimento de onda dos elétrons de

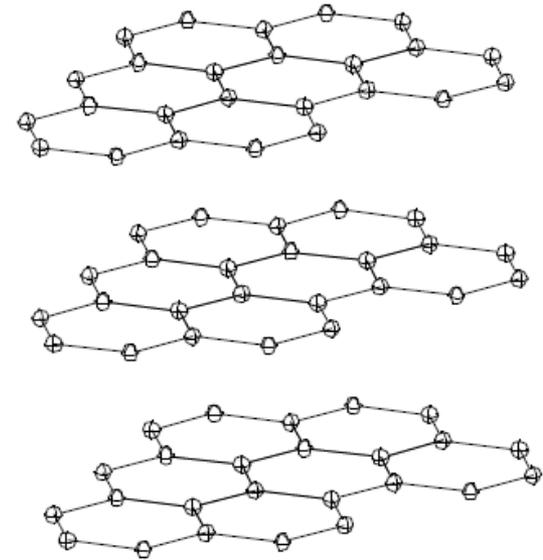


Figura c-2. Camadas de rês hexagonais de um cristal de grafite em perspectiva.

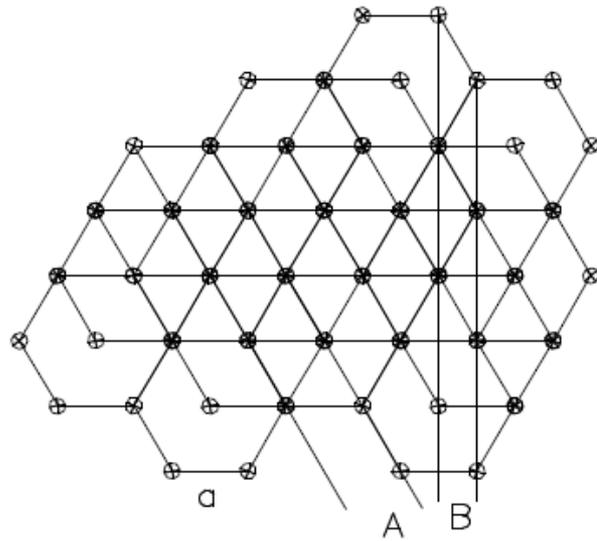


Figura c-3. Vista superior do cristal de grafite mostrando as famílias de planos A e B.

que correspondem aos menores ângulos de difração para um dado  $\lambda$ .

Tabela c-1 - Parâmetros da rede cristalina do grafite,  $a = (2.46 \pm 0.01) \text{ \AA}$  (fig. c-3).

| Família | $d$                   | $n$ | $\frac{2d}{n}$        | Ângulo     |
|---------|-----------------------|-----|-----------------------|------------|
| A       | $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ | 1   | $a\sqrt{3}$           | $\theta_1$ |
| B       | $\frac{a}{2}$         | 1   | $a$                   | $\theta_2$ |
| A       | $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ | 2   | $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ | $\theta_3$ |

## *A estrutura policristalina do alumínio*

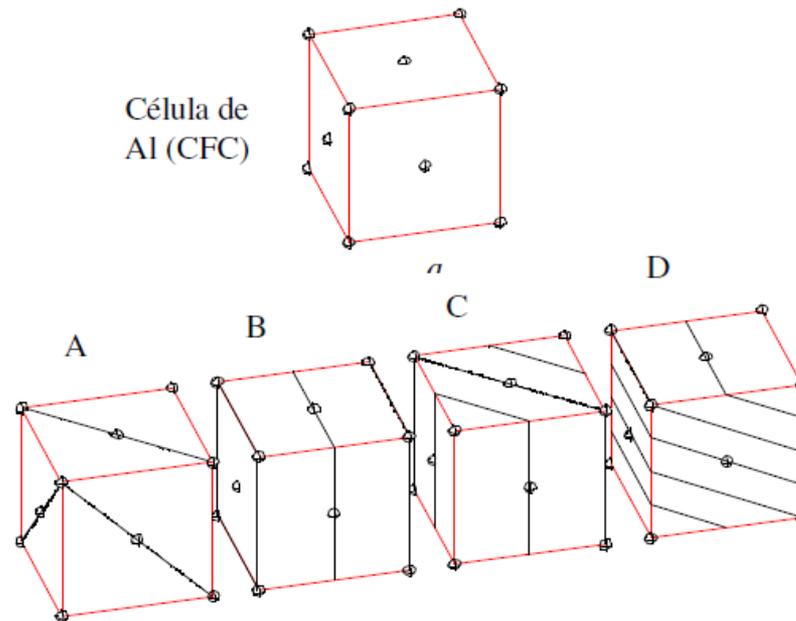


Figura c-4 - Célula cúbica de faces centradas e correspondentes famílias de planos cristalinos com  $d$  em ordem decrescente (A,B,C,D).

Tabela c-2 - Parâmetros de um cristal de alumínio (CFC),  $a = (4.04 \pm 0.01) \text{ \AA}$ .

| <b>Família</b> | $d$                   | $n$ | $\frac{2d}{n}$         | <b>Ângulo</b> |
|----------------|-----------------------|-----|------------------------|---------------|
| <b>A</b>       | $\frac{a}{\sqrt{3}}$  | 1   | $\frac{2a}{\sqrt{3}}$  | $\theta_1$    |
| <b>B</b>       | $\frac{a}{2}$         | 1   | $a$                    | $\theta_2$    |
| <b>C</b>       | $\frac{a}{2\sqrt{2}}$ | 1   | $\frac{a}{\sqrt{2}}$   | $\theta_3$    |
| <b>D</b>       | $\frac{a}{\sqrt{11}}$ | 1   | $\frac{2a}{\sqrt{11}}$ | $\theta_4$    |
| <b>A</b>       | $\frac{a}{\sqrt{3}}$  | 2   | $\frac{a}{\sqrt{3}}$   | $\theta_5$    |
| <b>B</b>       | $\frac{a}{2}$         | 2   | $\frac{a}{2}$          | $\theta_6$    |