

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS DA NATUREZA QUÂNTICA DA  
RADIAÇÃO E DA MATÉRIA

---

## AULA 05 - MEDIDAS RAIOS X

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**  
Pelletron – sala 220  
rizzutto@if.usp.br  
rodrigo.fernandes.me@gmail.com

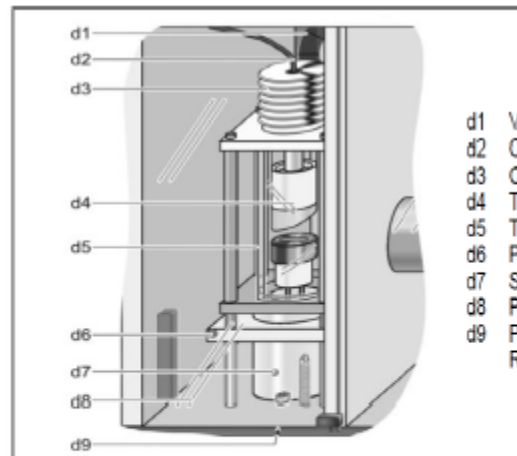
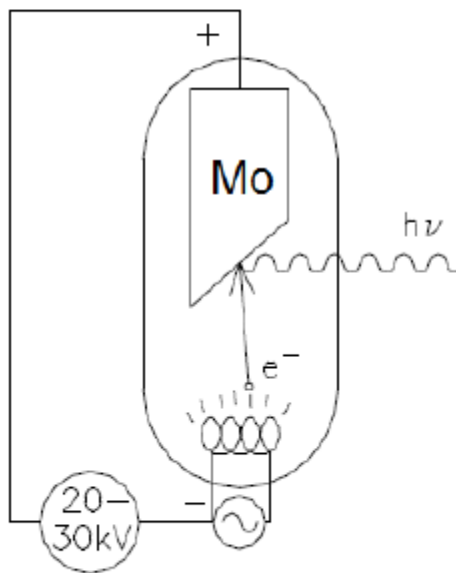
**2º. Semestre de 2023**

**Monitores:** Rodrigo Fernandes de Almeida  
Samuel Pizzol

# Objetivos

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

# 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 corredeira de vidro de chumbo
- d9 Parafuso de regulação da altura (no piso do Aparelho de Raios X)

# 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



# Procedimento

- Colocar o cristal no suporte e ajustar o parafuso para deixar o suporte alinhado (escolher o lado menos riscado do cristal)
- Fechar a porta
- No software (X-ray apparatus): ferramenta abre a janela para calibração
- X-ray apparatus – condições escolha do NaCl
- Escolher Mo anode
- Cristal calibrate
- Visor: taxa de contagem de fótons / seg  
ângulo (graus)

Acha um ângulo correspondente a máxima intensidade

Use este ângulo como calibragem

$K_{\alpha}$  do Mo para o cristal de NaCl tem pico em  $7,2^{\circ}$  (adopte)

Fazer um segunda vez para garantir

Adopte – start Search - chegou em  $7,2^{\circ}$  adopted

Uma vez calibrado volta para os parâmetros X ray tirar Mo e NaCl para medir em graus

# Medidas Experimentais

- Espectro de emissão de RX de um tubo de Mo  
(Intensidade (contagens por segundo) x ângulo)

**Medida 1:**  $U = 35 \text{ kV}$ ;  $I = 1,0 \text{ mA}$ ;  $\theta_{\min} = 2,5^\circ$  e  $\theta_{\max} = 20,0^\circ$   
com  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ;  $\Delta t = 10 \text{ s}$ .

**Medida 2:**  $U = 30 \text{ kV}$ ;  $I = 1,0 \text{ mA}$ ;  $\theta_{\min} = 2,5^\circ$  e  $\theta_{\max} = 12,0^\circ$   
com  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ;  $\Delta t = 2 \text{ s}$ .

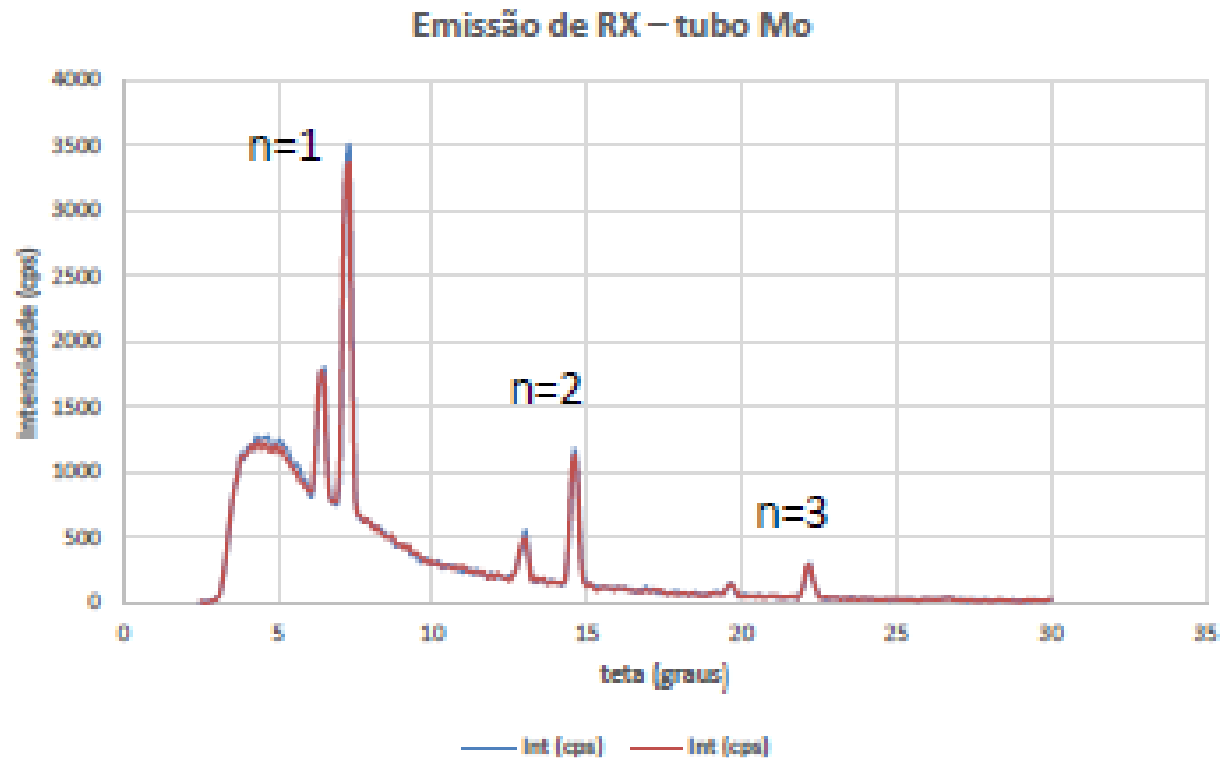
**Medida 3:**  $U = 25 \text{ kV}$ ;  $I = 1,0 \text{ mA}$ ;  $\theta_{\min} = 2,5^\circ$  e  $\theta_{\max} = 12,0^\circ$   
com  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ;  $\Delta t = 2 \text{ s}$ .

**Medida 4:**  $U = 18 \text{ kV}$ ;  $I = 1,0 \text{ mA}$ ;  $\theta_{\min} = 2,5^\circ$  e  $\theta_{\max} = 12,0^\circ$   
com  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ;  $\Delta t = 2 \text{ s}$ .

# 1º conjunto de dados: eqx\_35kV\_30graus

20 graus

- Medidas Experimentais e Apresentação dos Dados (para Relatório):

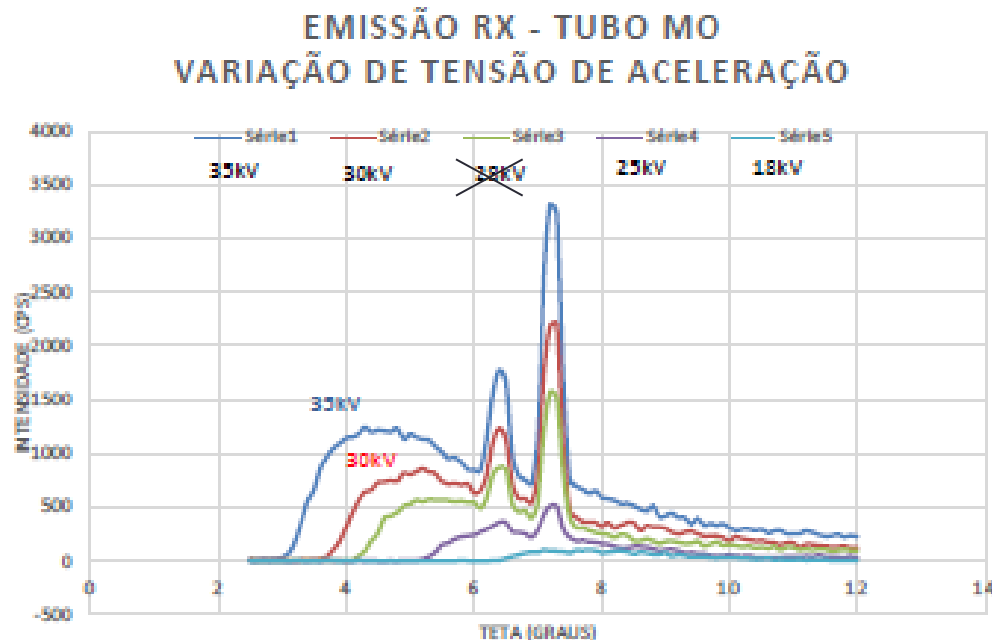


## 2º conjunto de dados: eqx\_variação tensão

- Medidas Experimentais e Apresentação dos Dados (para Relatório):
- Determinação da constante de Planck

EMISSÃO RX - TUBO MO

VARIAÇÃO DE TENSÃO DE ACELERAÇÃO



$$E = hc/\lambda$$

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

$$n=1$$



# Raios X

## COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?

□ Postulando que a diferença de energia do elétron é usado para criar um fóton de radiação.

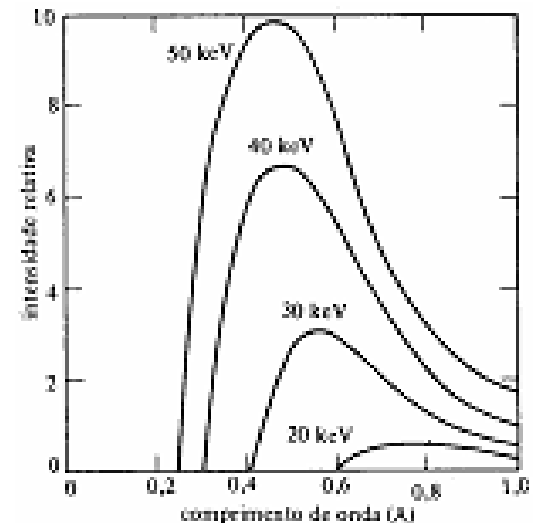
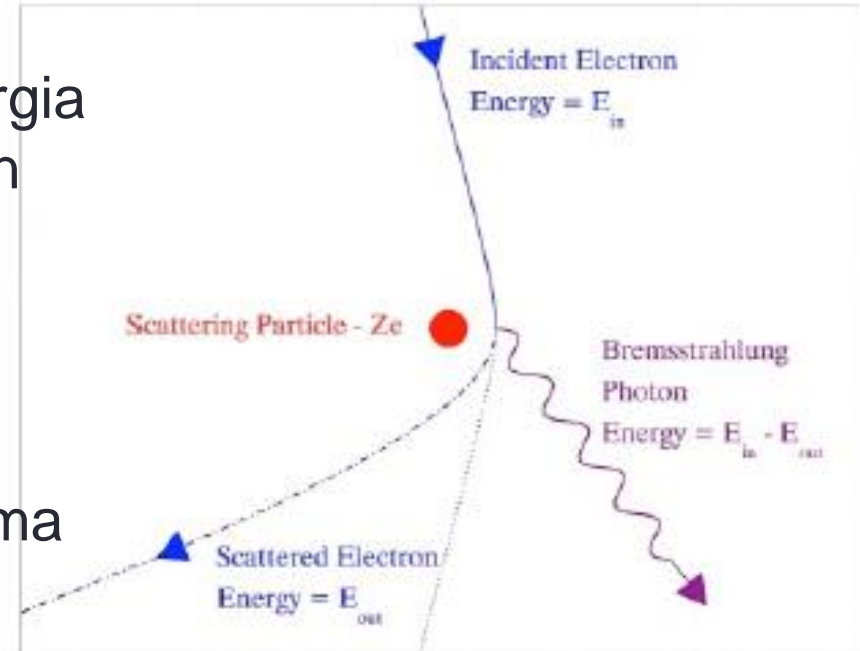
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

□ Os elétrons eram acelerados por uma ddp e freados ao atingir o alvo.  $E_i = eV$

□ Portanto se o elétron perder toda a sua energia, temos  $E_f = 0$  e ai:

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

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$



# Bremsstrahlung e Efeito fotoelétrico

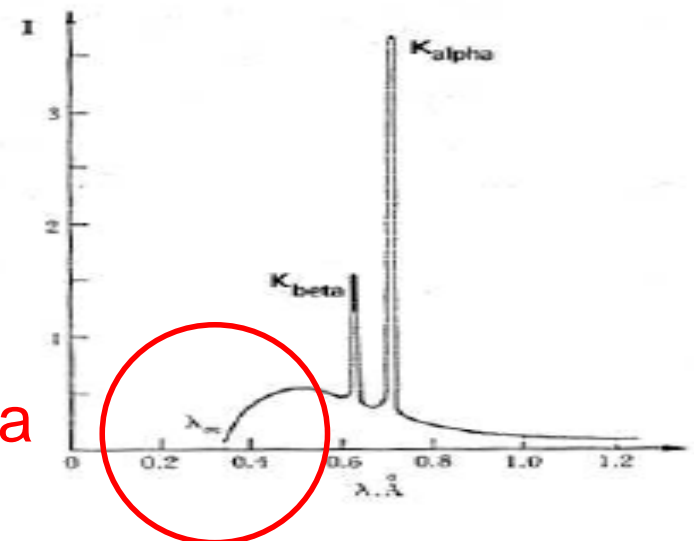
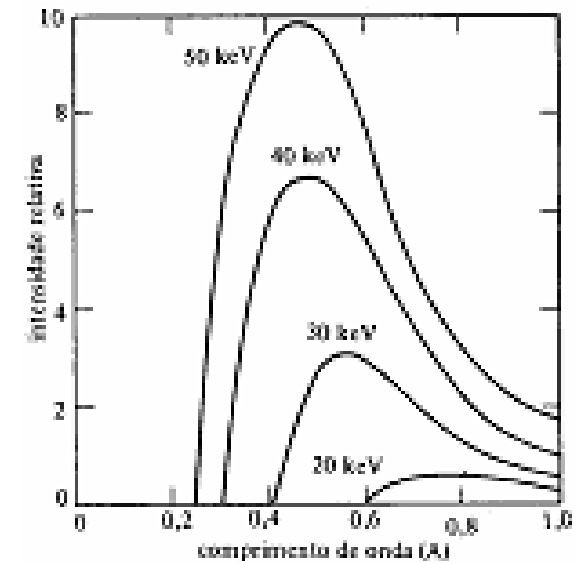
## Produção de raios X:

☐ Elétrons desacelerados na matéria produzem espectro contínuo de radiação

☐ Além dos espectro contínuo temos picos

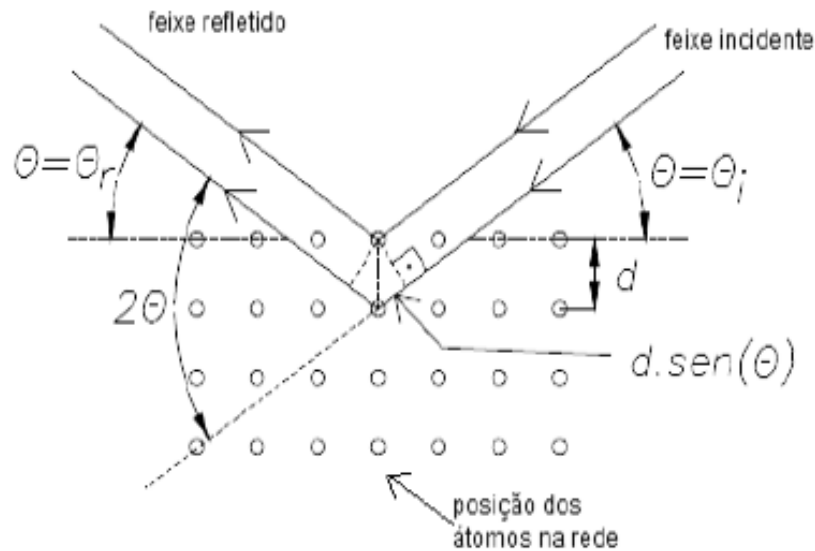
☐ Os elétrons podem se chocar com os elétrons do átomo do material e arrancá-los ocorre efeito fotoelétrico – por decorrência há emissão de raios X característicos

☐ Será que é possível fótons produzirem elétrons da mesma maneira que elétrons produzem fótons ?



	Molibdênio	
	Emissão Transição	Energia (keV)
$\langle K_{\beta} \rangle = 17,44$ keV	K-L2	17,37
	K-L3	17,48
$\langle K_{\beta} \rangle = 19,60$ keV	K-M2	19,59
	K-M3	19,61
	K-M4	19,77
	K-M5	19,78

# Difração de RX em cristais



A difração de raios-X se produz quando há interferência construtiva no processo de espalhamento dos fótons pelos átomos de uma estrutura cristalina.

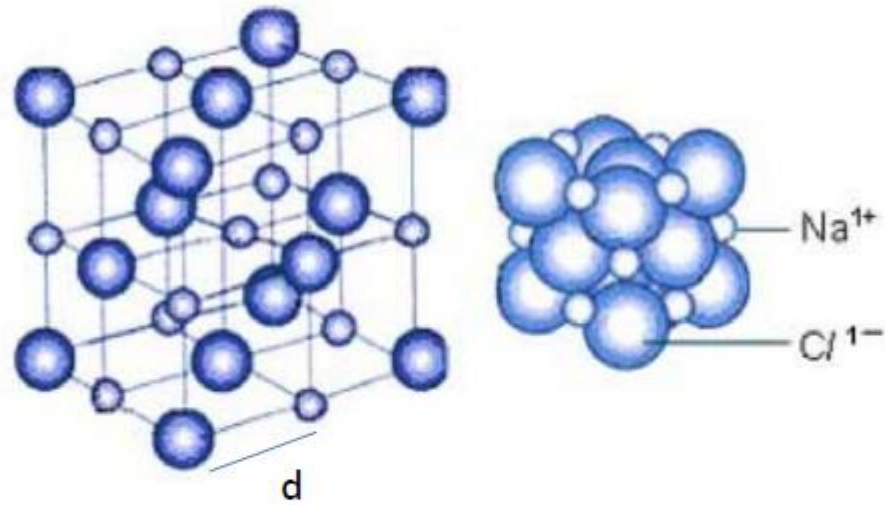
Esquemmatizando a estrutura periódica dos cristais por planos cristalográficos, tem-se condições de difração, ou reflexão de Bragg, quando:

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

Lembre que  $E = hc/\lambda$

## Estrutura da molécula NaCl

---



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

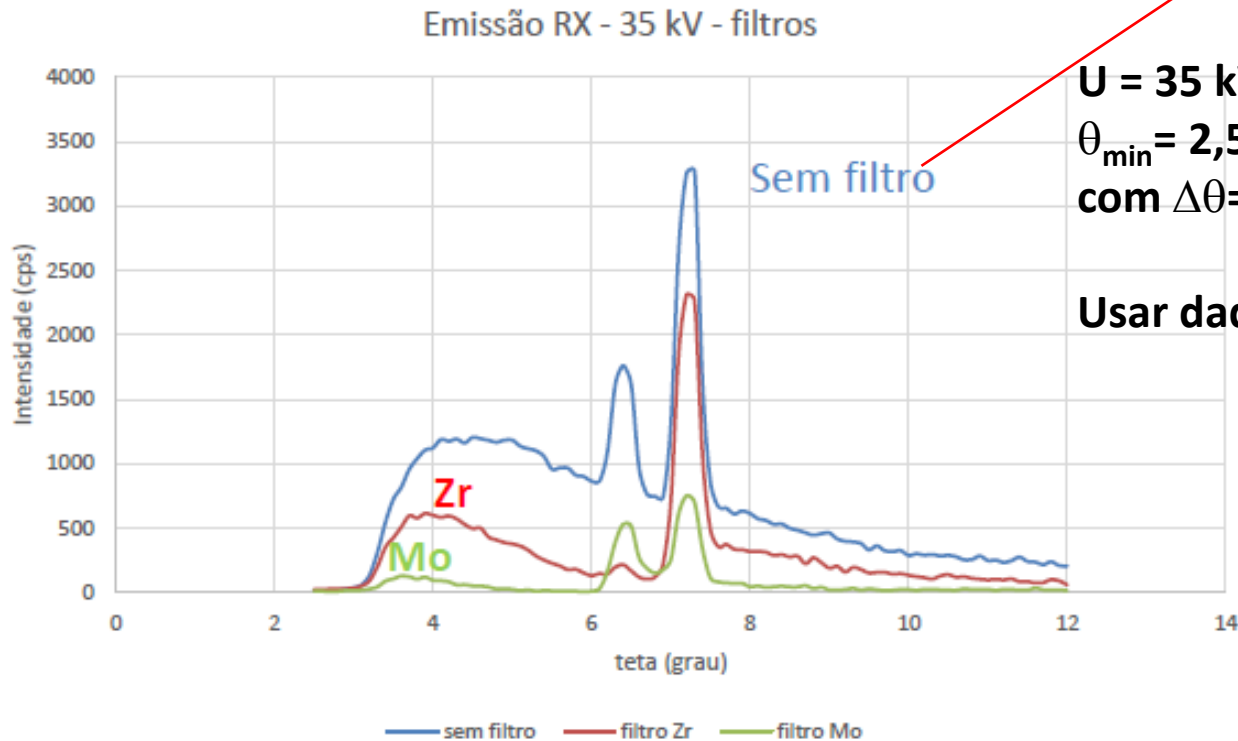
$$a = 0,564 \text{ nm}$$

## Nosso experimento : PARTE 2



**absorvedor**

# Filtros de absorção: Mo ( Molibdênio) Zr ( zircônio)



$U = 35 \text{ kV}$ ;  $I = 1,0 \text{ mA}$ ;  
 $\theta_{\min} = 2,5^\circ$  e  $\theta_{\max} = 12,0^\circ$   
com  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ;  $\Delta t = 10 \text{ s}$ .

Usar dados já coletados

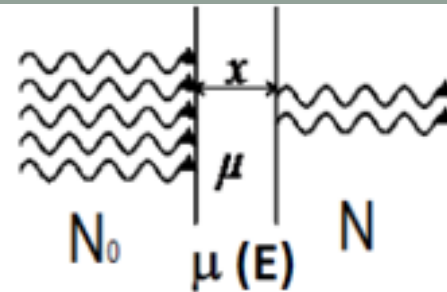
Usaremos

Filtro de Alumínio(Al) e zircônio (Zr)

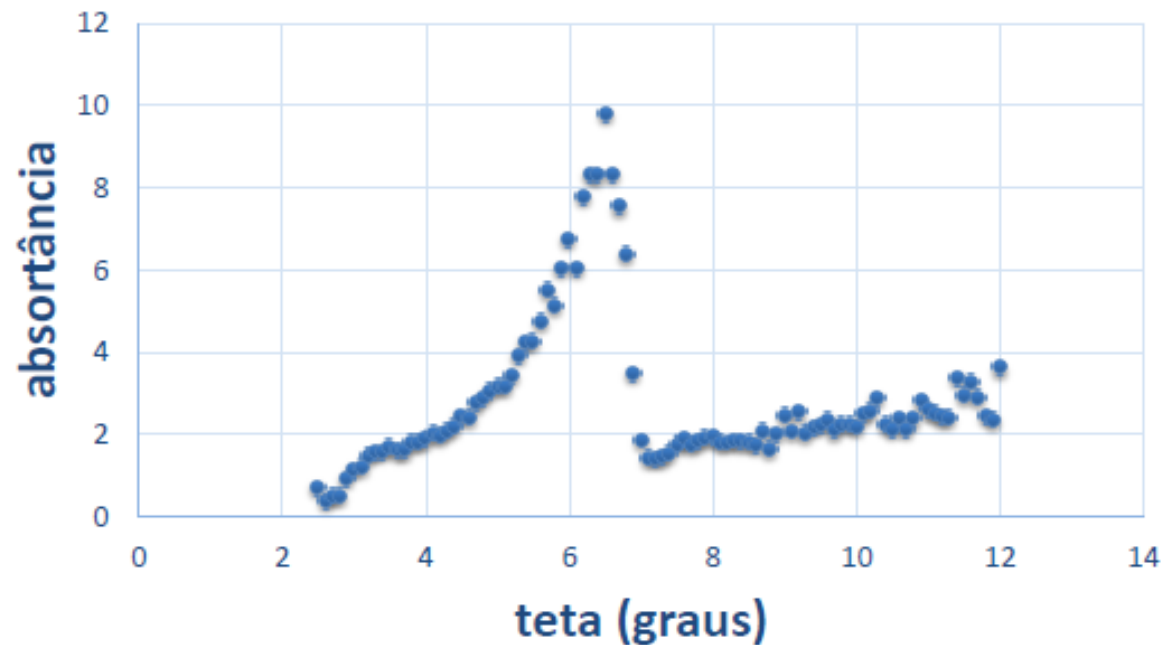
$U = 35 \text{ kV}$ ;  $I = 1,0 \text{ mA}$ ;  $\theta_{\min} = 2,5^\circ$  e  $\theta_{\max} = 12,0^\circ$   
com  $\Delta\theta = 0,1^\circ$ ;  $\Delta t = 10 \text{ s}$ .

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

$$\text{Absortância} = N_0 / N$$



semfiltro/com filtro Zr



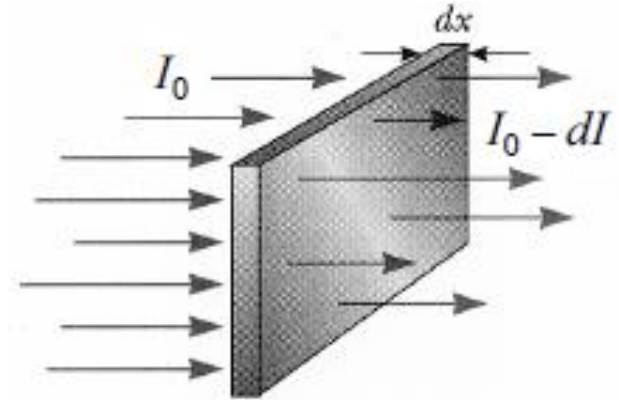
Arranjo experimental:  $E = hc / 2d \sin(\theta)$   
com  $\lambda = 2d \sin(\theta)$



# Absorção de fótons na matéria

Decréscimo do número de fóton .

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$



❑ após atravessar uma espessura  $x$  de um absorvedor o feixe o intensidade inicial cai exponencialmente para  $I$ .

❑ Como a absorção do feixe é causada pelos três processos de interação. O coeficiente de absorção pode ser decomposto em três termos:

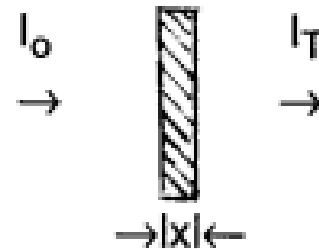
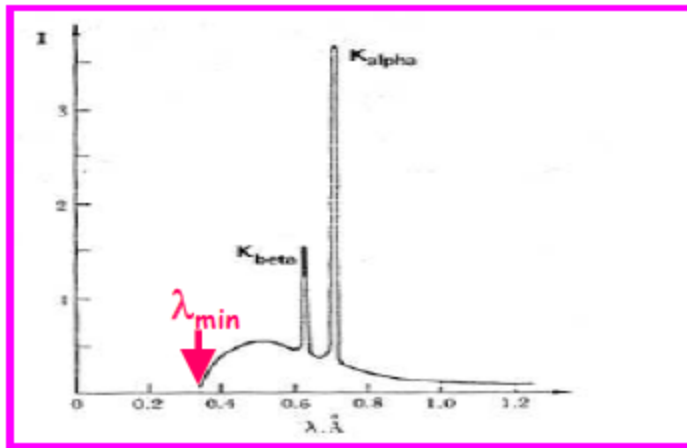
$$\mu = \mu_E + \mu_C + \mu_P$$

❑ nos cálculos é comum utilizarmos o coeficiente de absorção de massa definido como

$$\frac{\mu}{\rho} \quad I(x) = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)x}$$

# Interação de RX com materiais

$$I_T = I_0 e^{-\mu(E) \rho x} \quad (\text{Lei de Lambert-Beer})$$



$$A = e^{-\mu x}$$

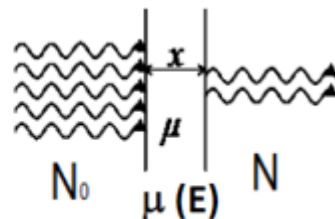
$\mu$  é o coeficiente de atenuação linear (em  $\text{cm}^{-1}$ )

**A** é a **absortância**

↓ **depende de energia (de  $\lambda$ )**

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

$$\text{Absortância} = N_0 / N$$



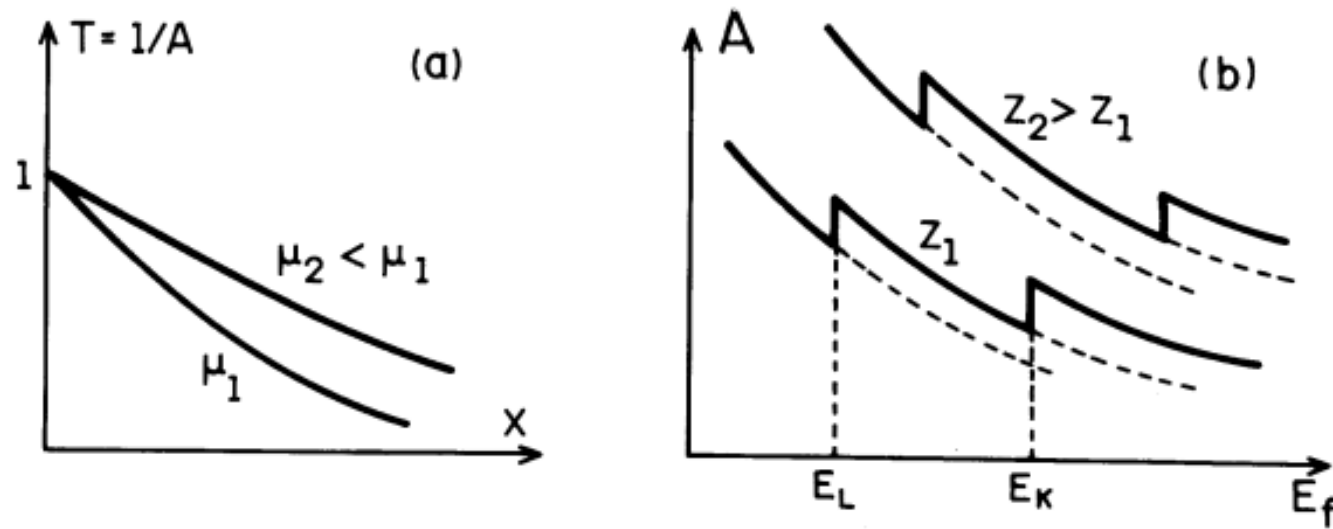
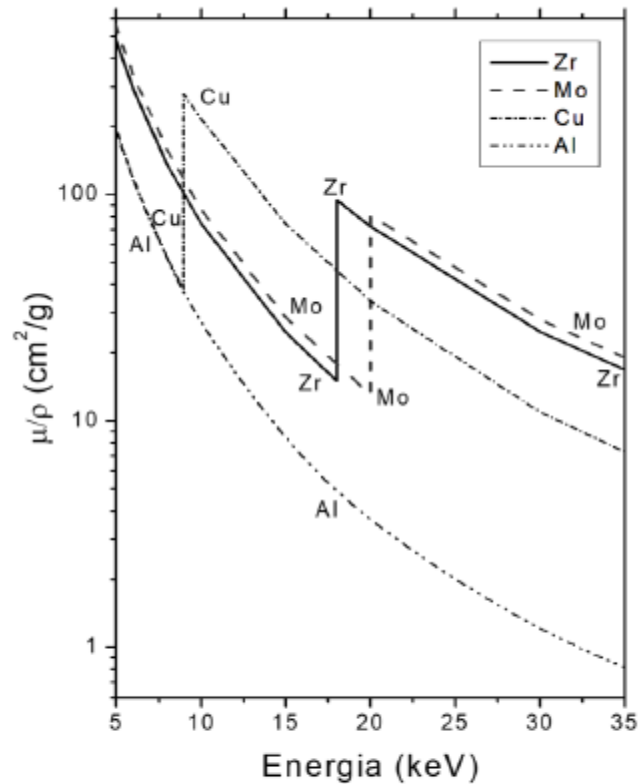


Fig. 5 – (a) Intensidade transmitida através de uma lâmina de espessura  $x$ . (b) Função absorvância para átomos com diferentes números atômicos em função da energia dos fótons incidentes.

Em geral o coeficiente de absorção e a absorvância diminuem para energias dos fótons crescentes. Existem porém, nos espectros de absorção, certas descontinuidades ou bordas associadas a um abrupto acréscimo na absorção para energias dos fótons crescentes (Fig. 5b). Estas descontinuidades se produzem quando a energia dos fótons tem um valor suficiente para conseguir ionizar camadas adicionais dos átomos absorvedores. Em consequência, as chamadas bordas K, L, M, etc. dos espectros de absorção correspondem às energias de ionização das respectivas camadas eletrônicas. Fótons com energia menor que a energia de ionização das diversas camadas podem eventualmente excitar átomos promovendo transições eletrônicas a níveis de energia superiores desocupados. Estas transições dão origem a picos de absorção em energias inferiores às das descontinuidades.



Coeficientes de atenuação de diversos elementos (NIST) [3].

## Borda ou Degrau de Absorção

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

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

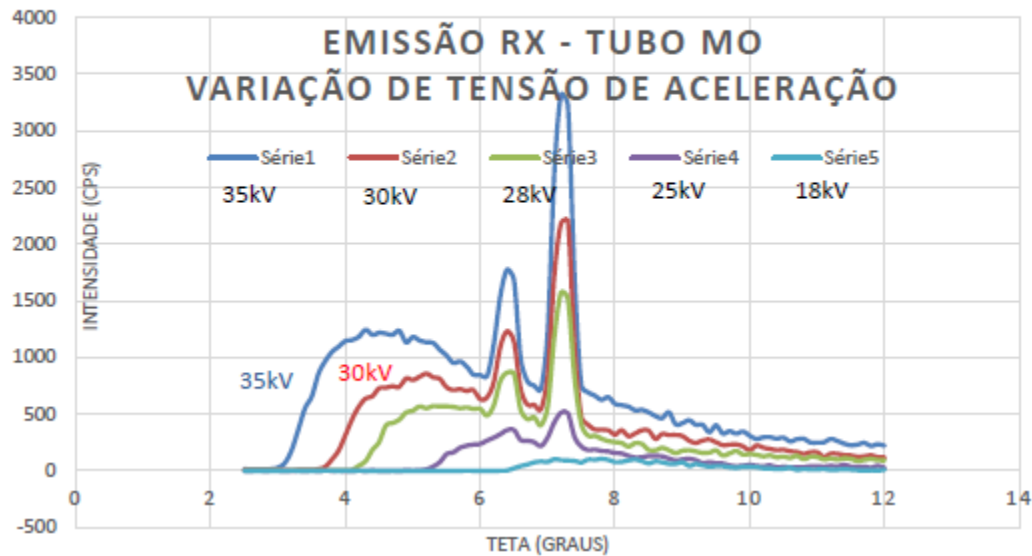
<b>Molibdênio</b>		
	Emissão Transição	Energia (keV)
$\langle K_{\beta} \rangle = 17,44$ keV	K-L2	17,37
	K-L3	17,48
$\langle K_{\beta} \rangle = 19,60$ keV	K-M2	19,59
	K-M3	19,61
	K-M4	19,77
	K-M5	19,78

## Fluorescência de raios-X

Após a ionização por efeito fotoelétrico, os átomos tendem a voltar a seu estado fundamental, de mínima energia, mediante vários processos. Aquele pelo qual a vacância eletrônica é simplesmente eliminada pela sua ocupação por um elétron de uma camada superior, com a consequente emissão de um fóton, denomina-se fluorescência. As energias dos fótons de fluorescência emitidos dependem exclusivamente da estrutura de energia eletrônica de cada átomo.

# Para o relatório

- **Medidas Experimentais e Apresentação dos Dados (para Relatório):**
- **Determinação da constante de Planck**
- **Apresentação dos resultados :**
  - apresentar os gráficos de **Intensidade** (número de fótons por unidade de tempo) em **função de energia (keV)**.
  - Não esqueça de associar uma incerteza a cada medida de contagem.
  - as energias características correspondem às esperadas? Qual(is) o(s) desvio(s) percentual(is)? Comente
  - para cada espectro (tensão de aceleração variando de 35 kV a 18 kV) determine o valor de  $\lambda_{\min}$  (via determinação de  $\theta_{\min}$  ou  $E_{\max}$  experimental)
  - Através de um gráfico de tensão de aceleração versus  $\lambda_{\min}$ , determine a constante de Planck. Compare com o valor esperado e discuta seu resultado.



$$E = hc/\lambda$$


$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad n=1$$

Para determinar  $E_{K\alpha}$  e  $E_{K\beta}$  →  
Posição do pico e incerteza do ajuste

ajustes com funções gaussianas →

Lembrar que a incerteza experimental intrínseca do equipamento em  $\theta = 0,05$  graus.

## Como avaliar incertezas experimentais:

Detecção de Radiação : Distribuição de Poisson  Distribuição Gaussiana  
N grande

valor médio =  $\langle N \rangle$ ; incerteza =  $\sigma = \text{sqrt}(\langle N \rangle)$

No experimento: Sendo N = número total de fótons num intervalo de tempo  $\Delta(t)$ ,

- $\sigma(N) = \text{sqrt}(N)/\Delta(t)$



# Para o relatório

- 1) Faça um **gráfico de absorptância** x energia do feixe de RX. **Analise o valor da borda de absorção do Zr e do Mo, com respectivas incertezas**, e comente seus resultados em relação aos valores esperados.
- 2) A partir de seus dados, é possível obter a **espessura do absorvedor**? Se sim, determinar a espessura do(s) absorvedor(es). Comente

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

$$\text{Absortância} = N_0 / N$$

