

USP – Universidade de São Paulo

Física Experimental C - Laboratório

# Difração de Raio X

João Kogler

PSI / EP USP

Versão EAD - 2023

Vídeo 2

# Difração de Raio-X

## Sumário

- Introdução à Difração de Bragg
  - Difração de Bragg – Teoria
    - Cristais
    - Determinação da distância inter atômica no NaCl
    - Produção de raios x
      - Tubo de raio x
      - Radiação de fundo de *Bremsstrahlung*
      - Radiação característica
    - Espalhamento de Bragg
      - Detecção do feixe espalhado
      - Difração dos raios x



# Difração de Raio-X

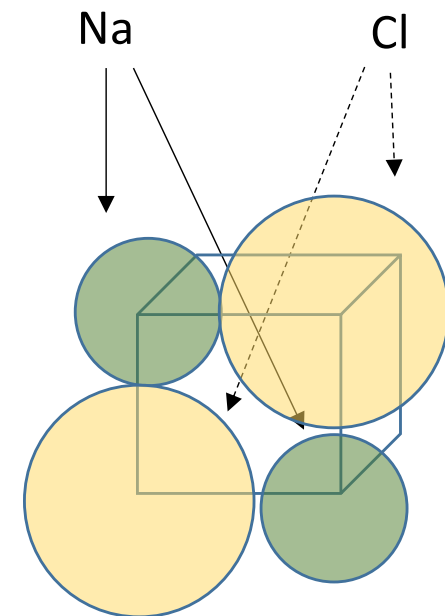
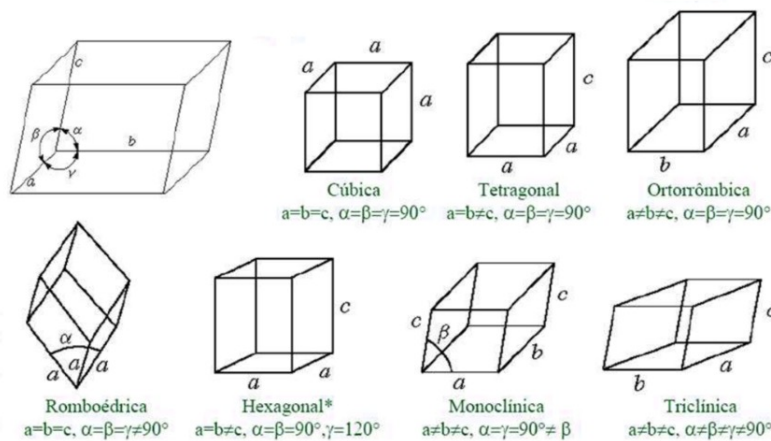
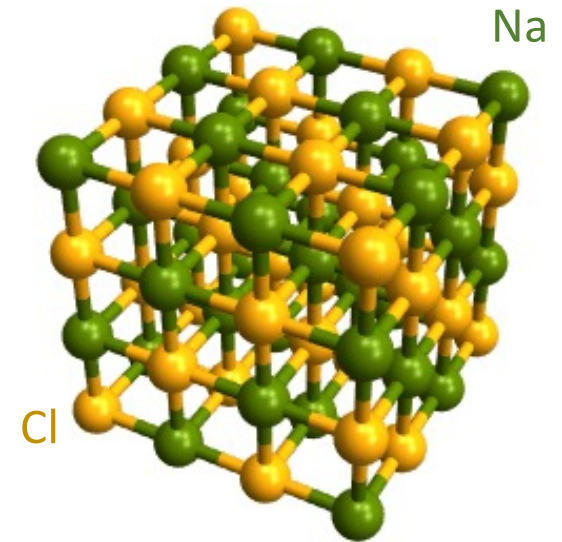
## Emprego da difração de Bragg para caracterização de estruturas de cristais

- Cristais apresentam regularidade estrutural

- Estrutura periódica

- Repetição espacial da célula unitária

- Caracterizada pelos seus parâmetros geométricos

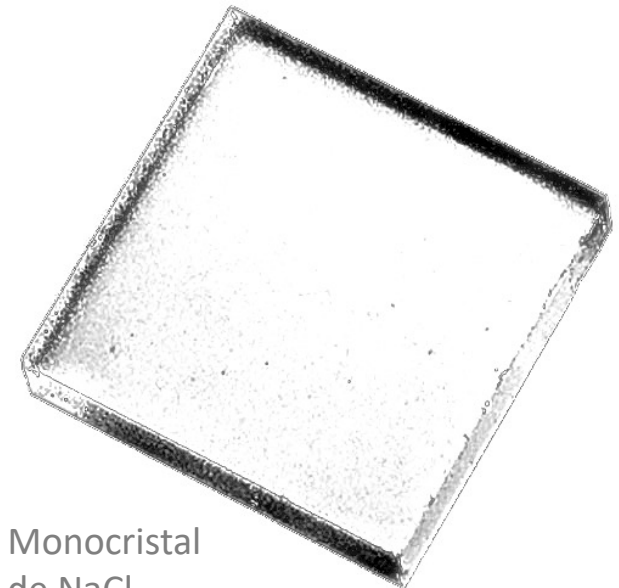
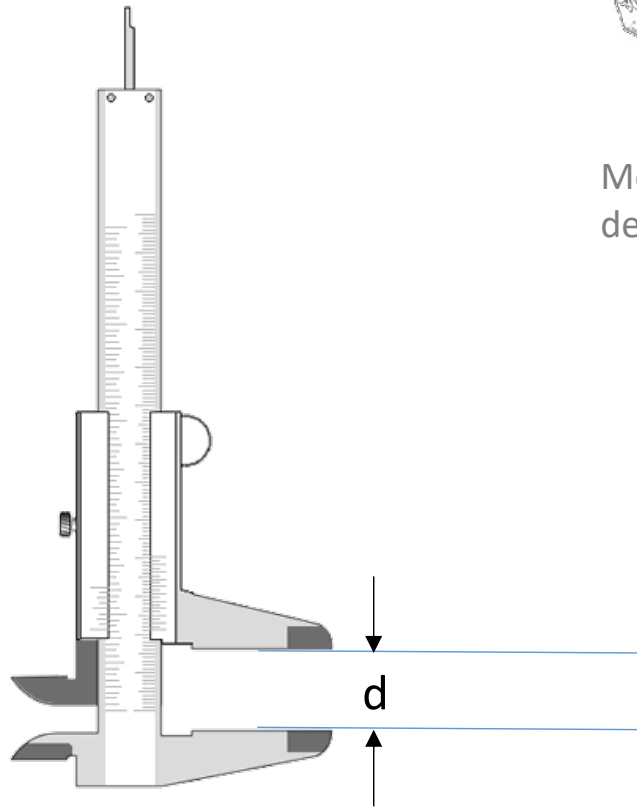


# Difração de Raio-X

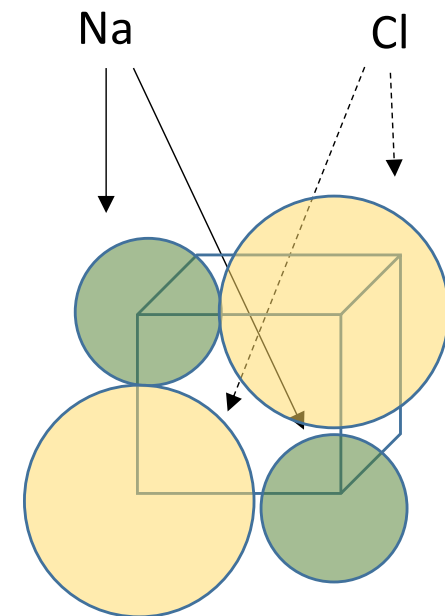
Emprego da difração de Bragg para  
caracterização de estruturas de cristais

- Mediremos a distância inter atômica entre o Na e o Cl
  - $d \sim \text{Angstrom}$   
( $10^{-10} \text{ m}$ )

Precisamos de  
um padrão para  
comparação



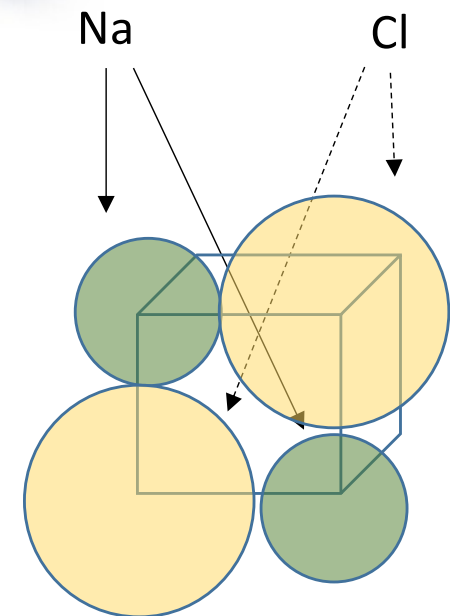
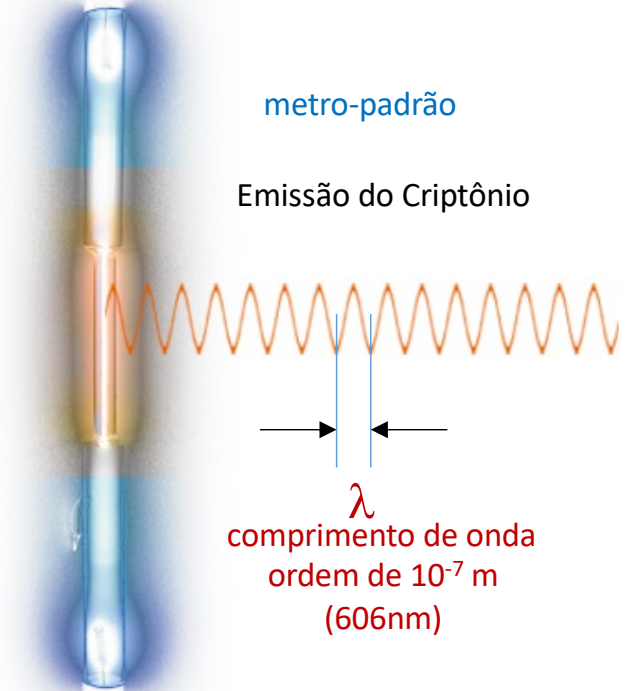
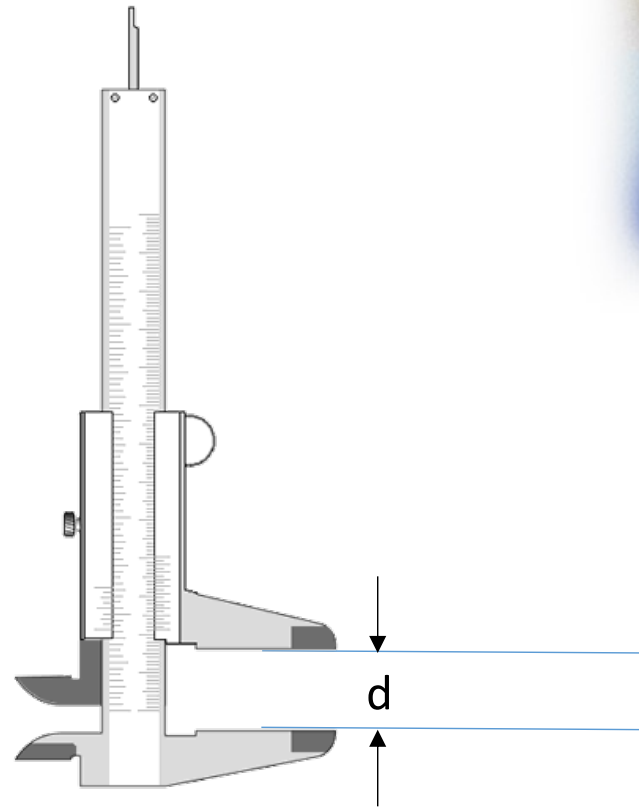
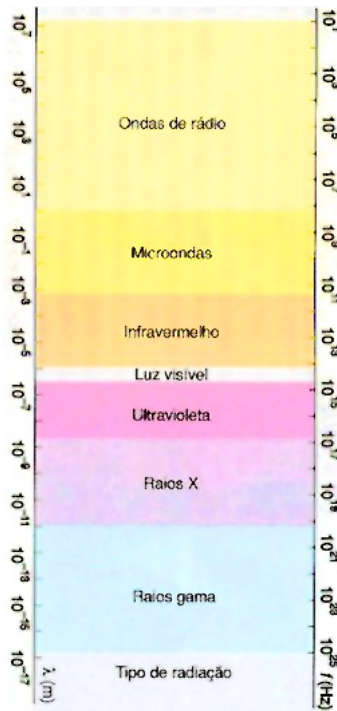
Monocristal  
de NaCl



# Difração de Raio-X

Emprego da difração de Bragg para caracterização de estruturas de cristais

- Mediremos a distância inter atômica entre o Na e o Cl
  - $d \sim$  Angstrom ( $10^{-10}$  m)

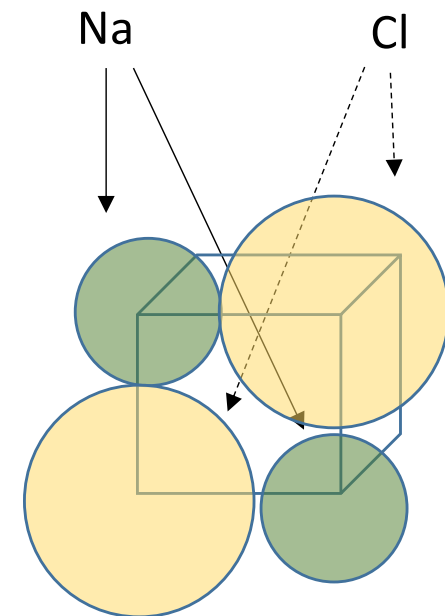
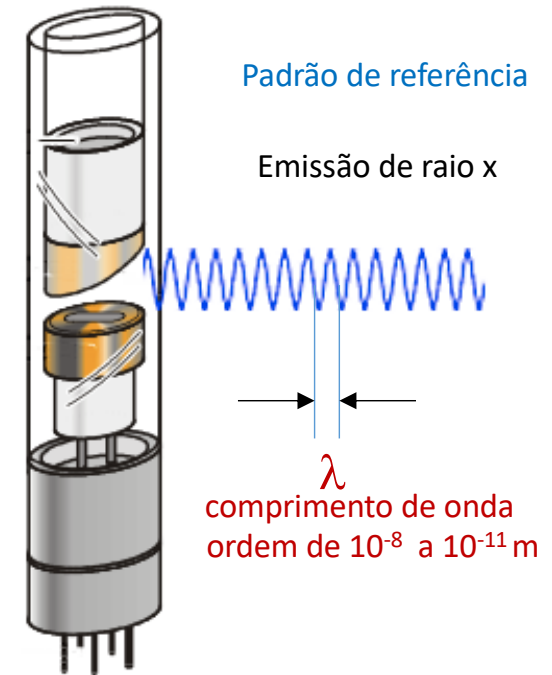
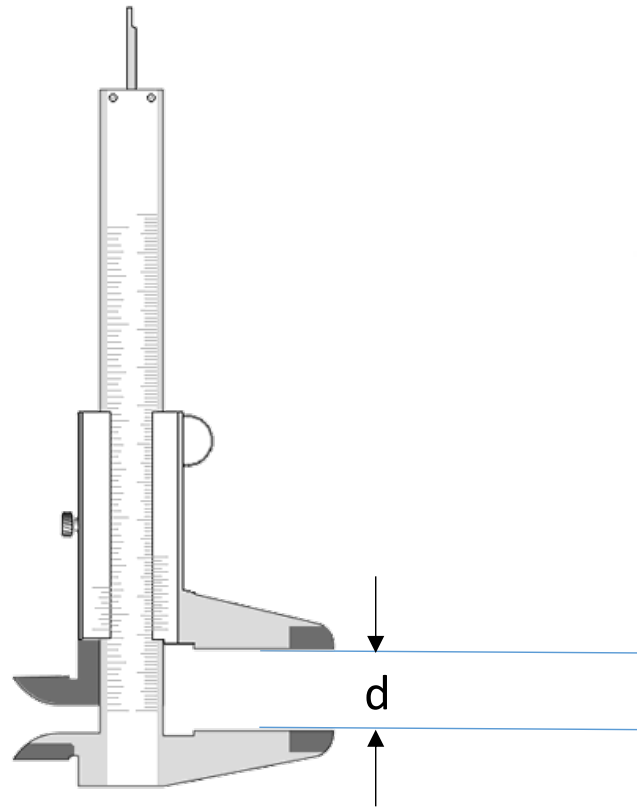


# Difração de Raio-X

Emprego da difração de Bragg para caracterização de estruturas de cristais

- Mediremos a distância inter atômica entre o Na e o Cl
  - $d \sim \text{Angstrom}$   
( $10^{-10} \text{ m}$ )

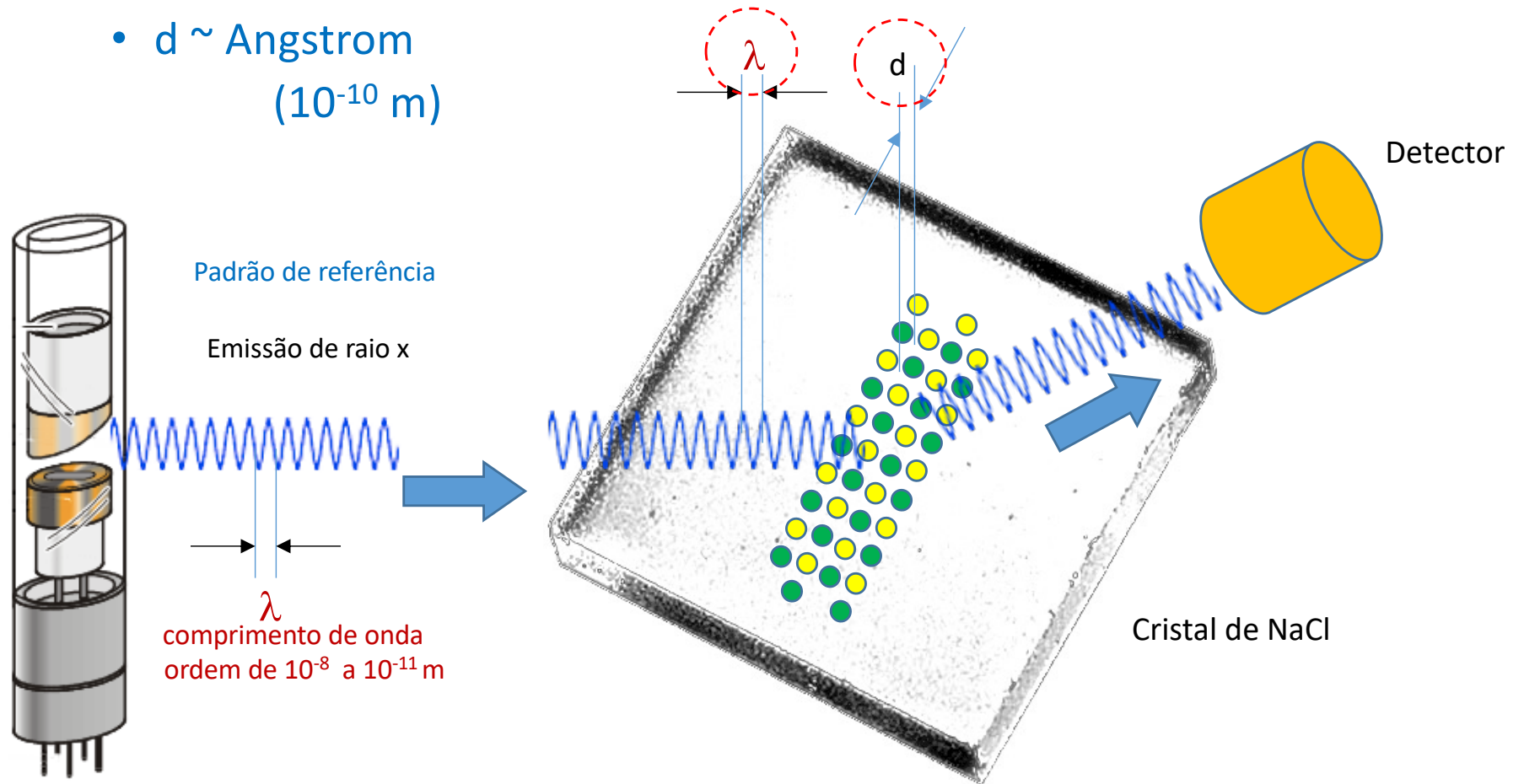
Raio x encontra-se na faixa de comprimentos de onda de 10 nm a 10 pm



# Difração de Raio-X

Emprego da difração de Bragg para caracterização de estruturas de cristais

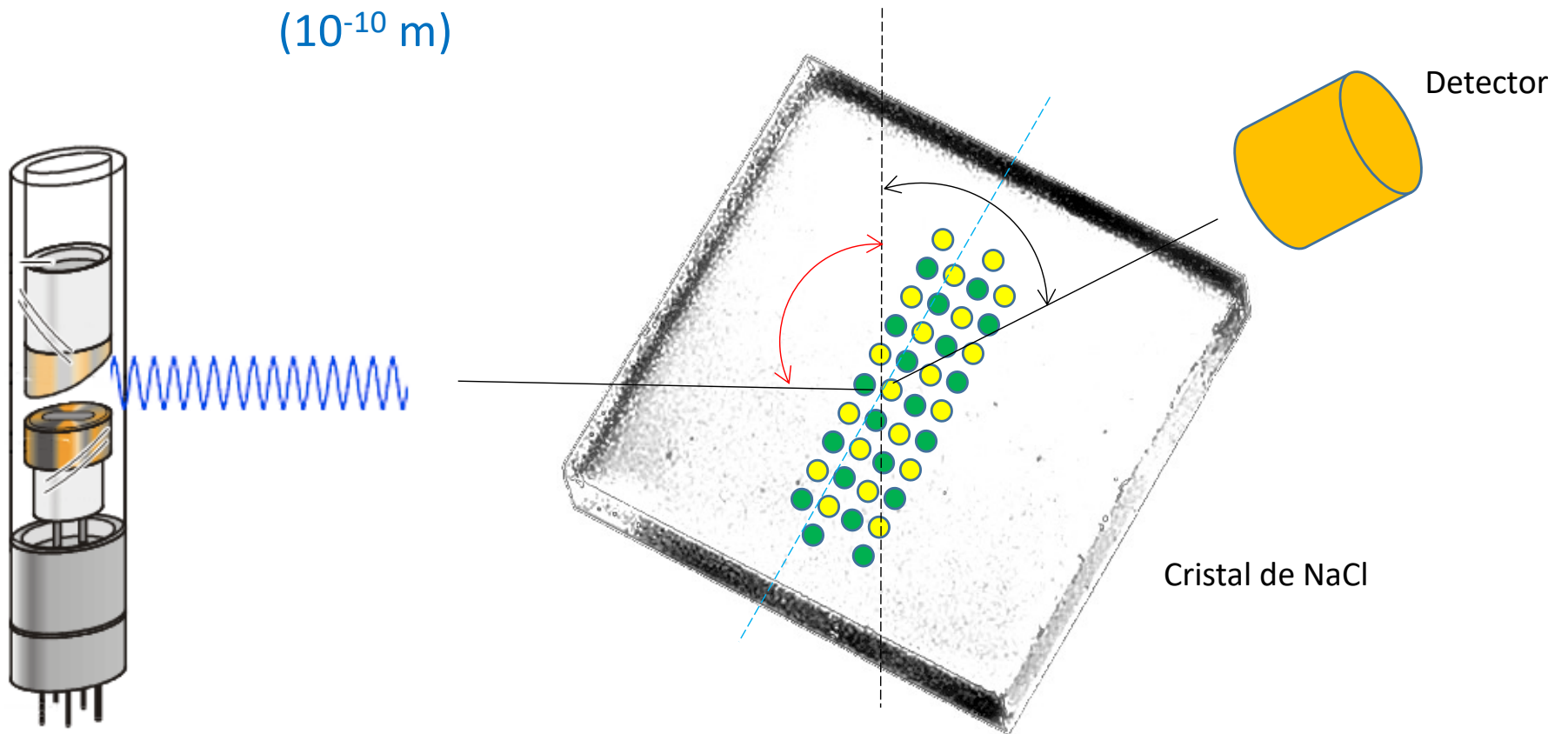
- Mediremos a distância inter atômica entre o Na e o Cl
  - $d \sim \text{Angstrom}$   
( $10^{-10} \text{ m}$ )



# Difração de Raio-X

Emprego da difração de Bragg para caracterização de estruturas de cristais

- Mediremos a distância inter atômica entre o Na e o Cl
  - $d \sim \text{Angstrom}$   
( $10^{-10} \text{ m}$ )





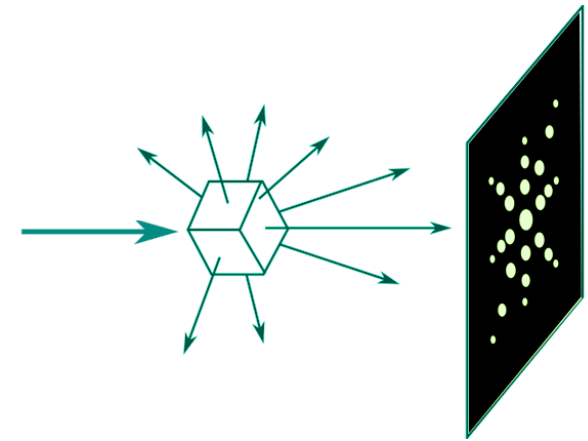
# Difração de Raio-X

- Raio x descoberto em 1895

- Wilhelm Röntgen

- Onda eletromagnética

- Comprimento de onda da ordem de Angstrom ( $10^{-10}$  m)



- Max von Laue (1912)

- Difração de raio x

- Através do reticulado cristalino

- Testar a hipótese de raio x ser onda eletromagnética

- Feixe de raio x de espectro contínuo

- Incidência perpendicular à superfície de um monocristal

- Experimento realizado por Friedrich e Knipping (1912)

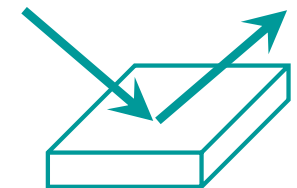


- William Henry Bragg e William Lawrence Bragg (1913)

- Raio x monocromático

- Incidência oblíqua à superfície do cristal

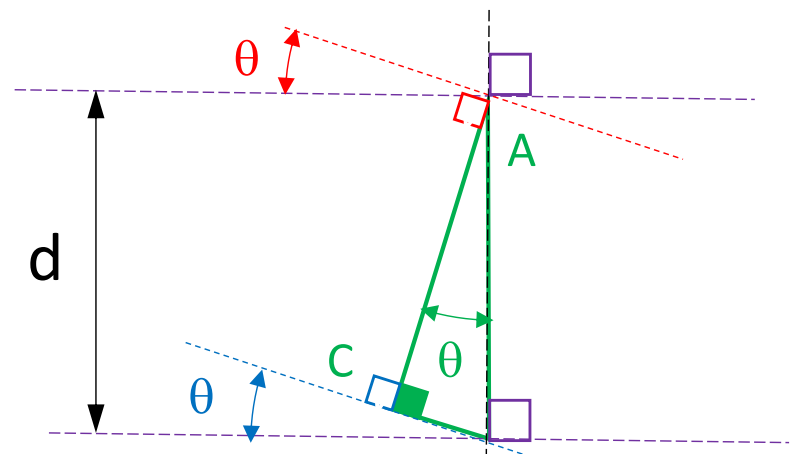
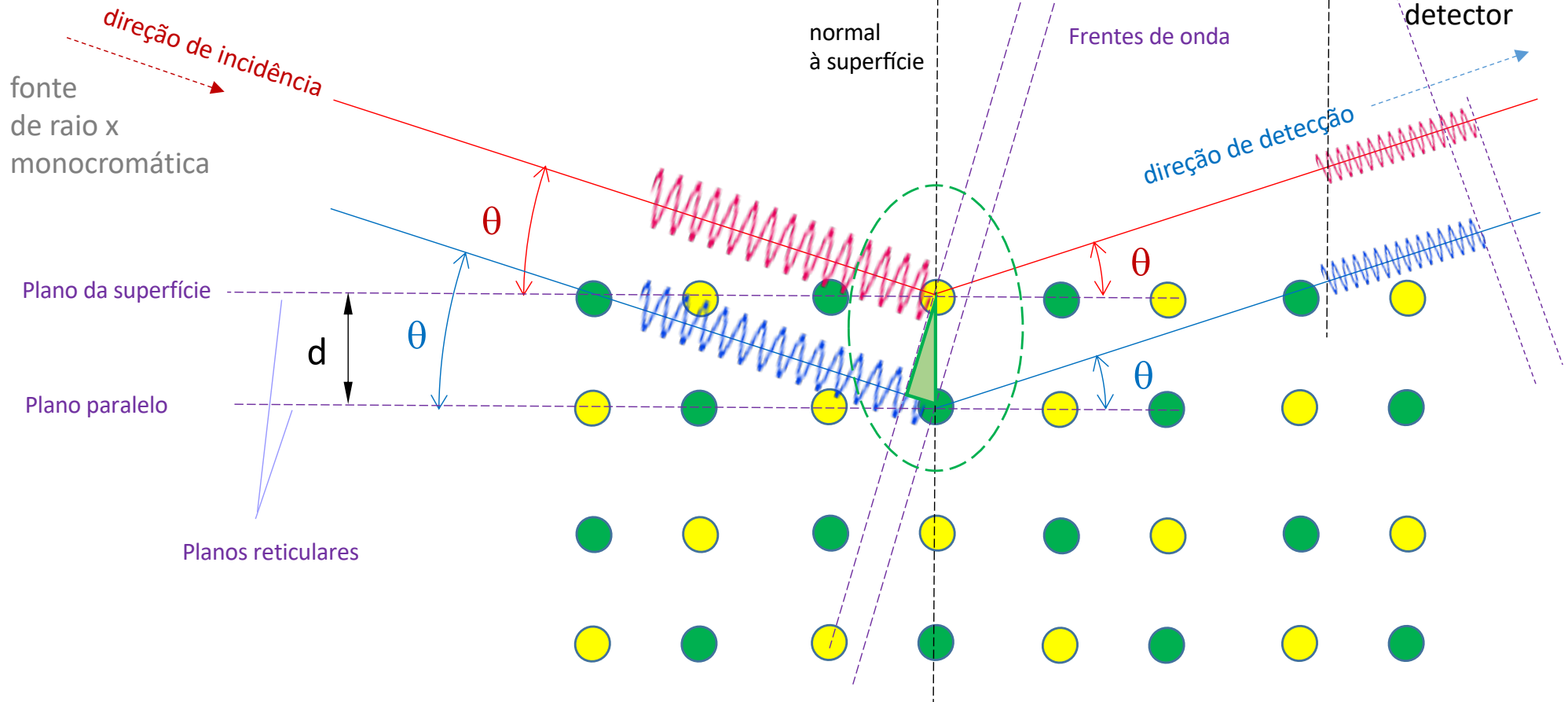
- Reflexão especular nos planos reticulares



# Difração de Raio-X

## Difração de Bragg

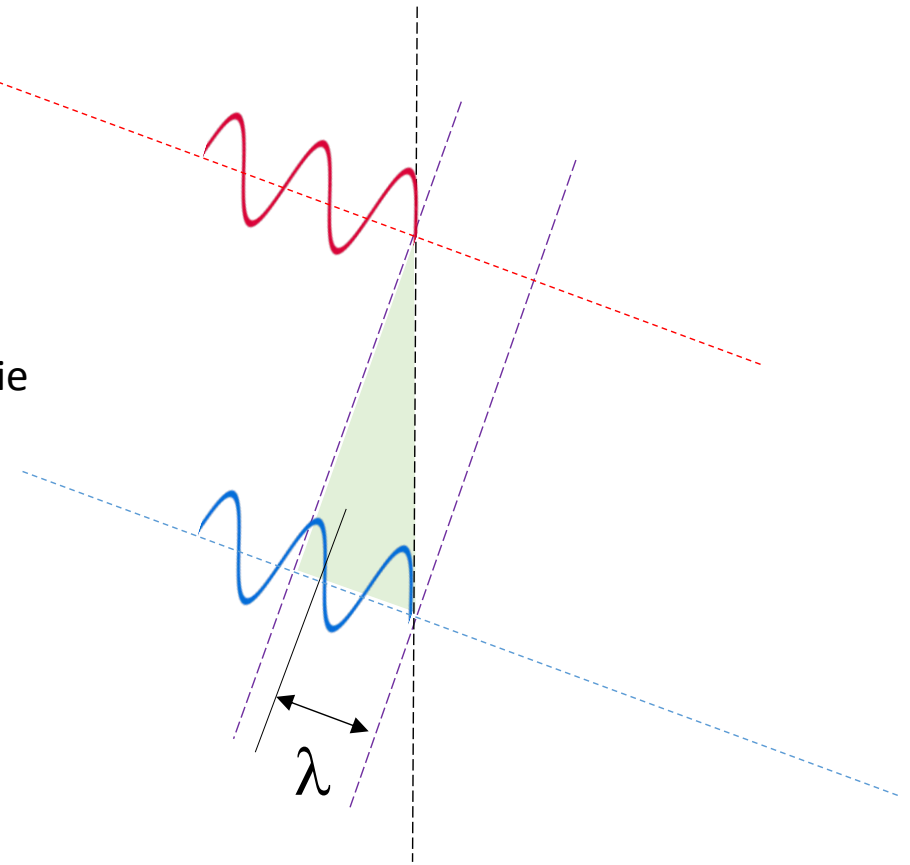
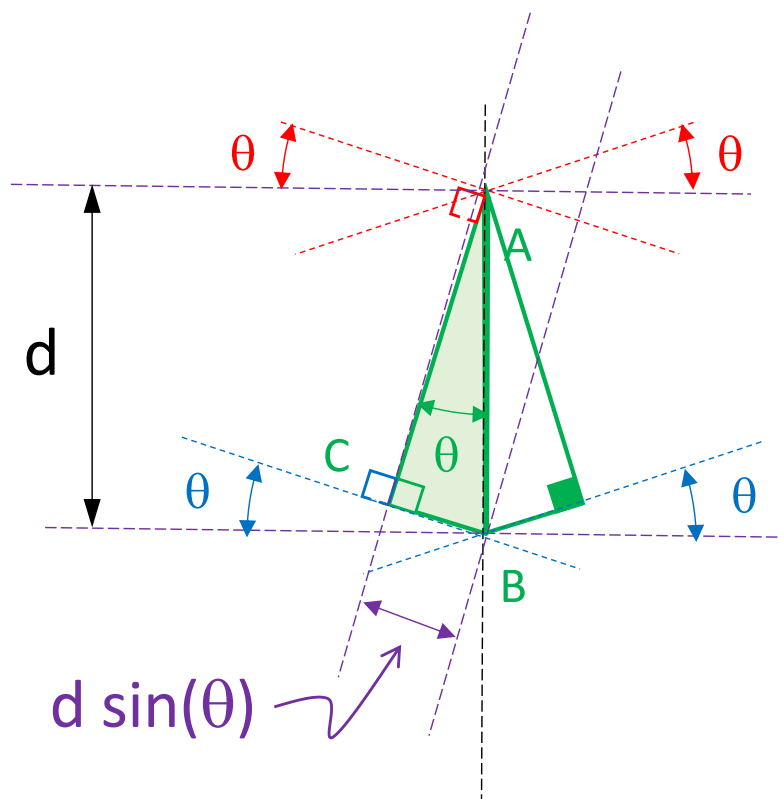
- Feixe monocromático de raio x
- Feixe incidente inclinado em relação à superfície
- Detecção do feixe espalhado sob ângulo equivalente à reflexão na superfície



# Difração de Raio-X

## Difração de Bragg

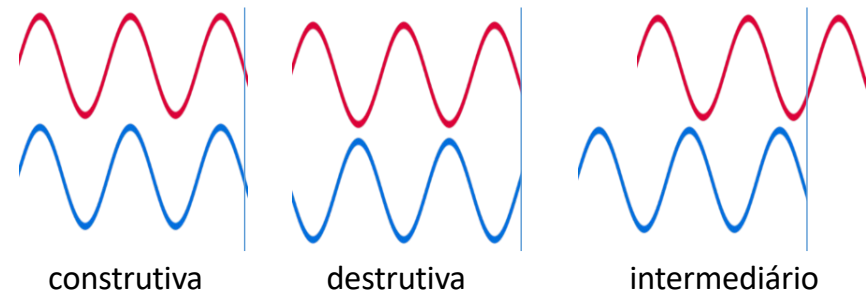
- Feixe monocromático de raio x
- Feixe incidente inclinado em relação à superfície
- Detecção do feixe espalhado sob ângulo equivalente à reflexão na superfície



$n \lambda = 2 d \sin(\theta)$   
relação de Bragg

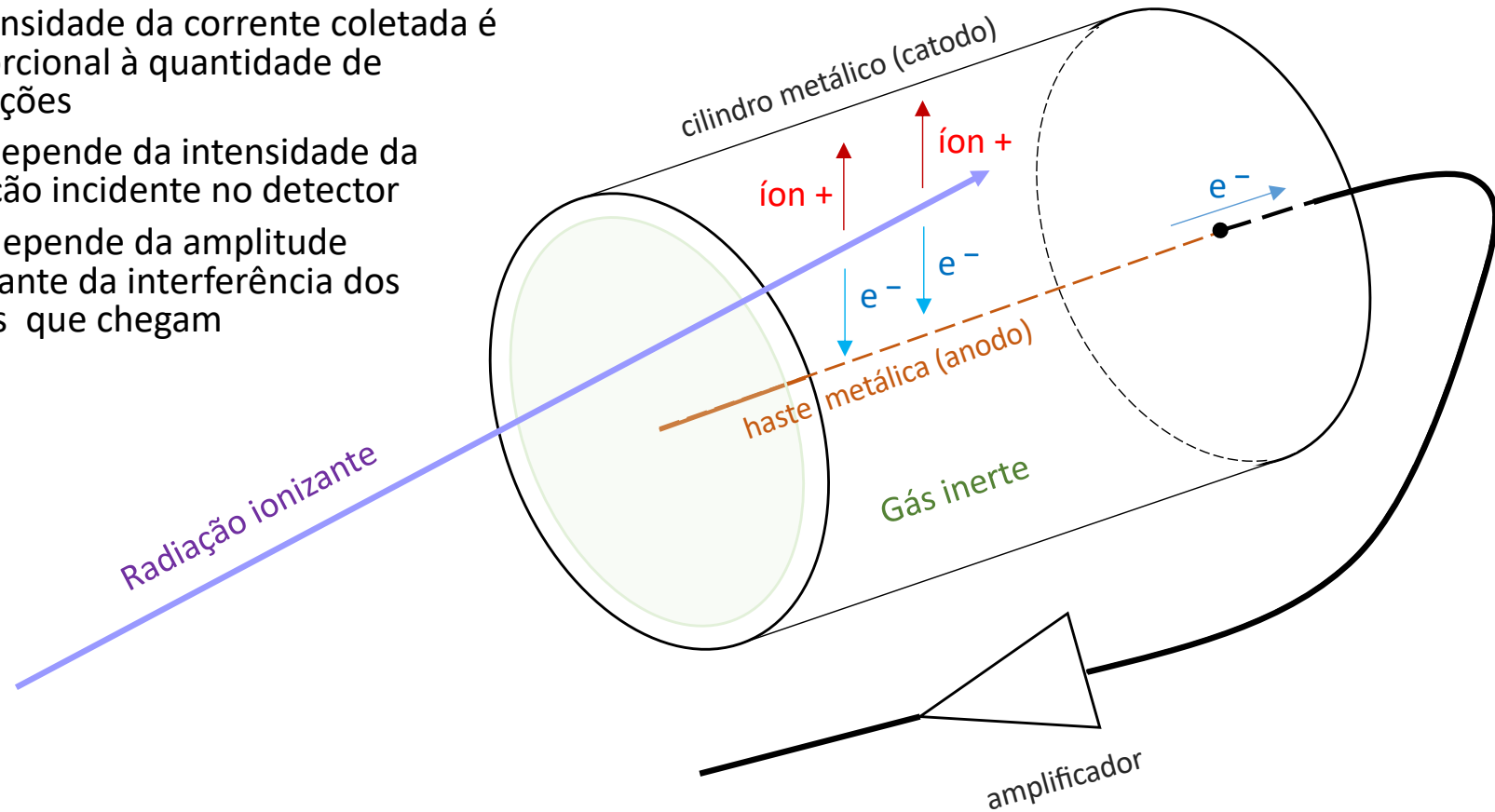
# Difração de Bragg

## Detecção do feixe espalhado



- Detector de Geiger-Müller

- A intensidade da corrente coletada é proporcional à quantidade de ionizações
- Esta depende da intensidade da radiação incidente no detector
- Que depende da amplitude resultante da interferência dos fótons que chegam

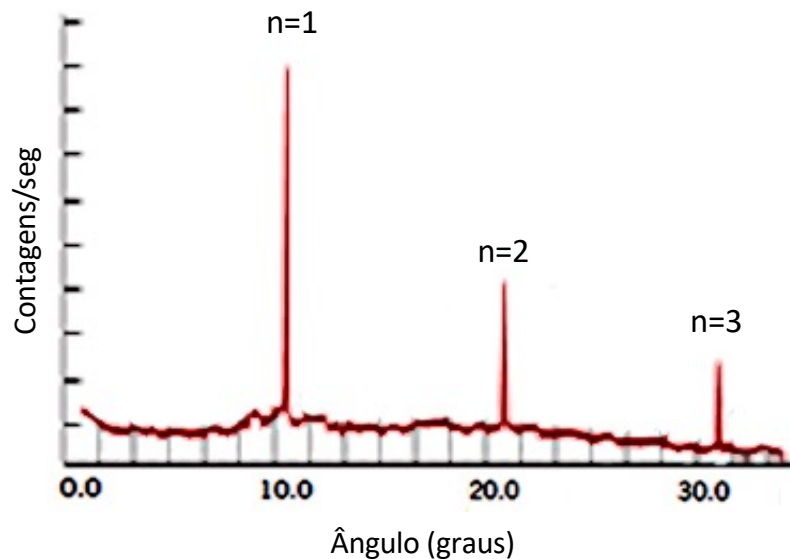




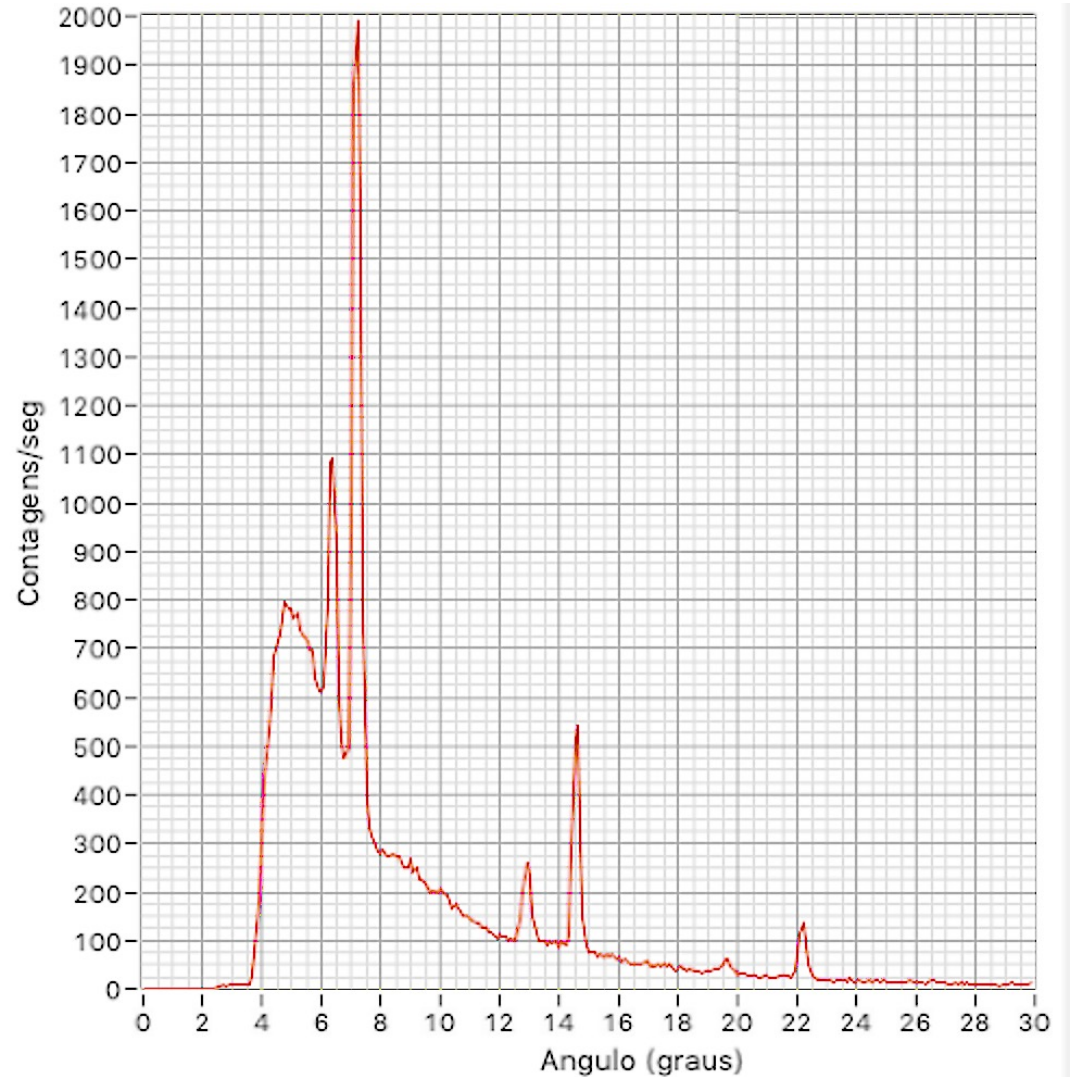
# Difração de Bragg

relação  
de Bragg  $n \lambda = 2 d \sin(\theta)$

Note que o que se mede é a contagem de fótons de raio x por intervalo de tempo, em função do ângulo de detecção.  
A correspondência entre o ângulo e o comprimento de onda  $\lambda$  é dada pela relação de Bragg.



o que se espera obter

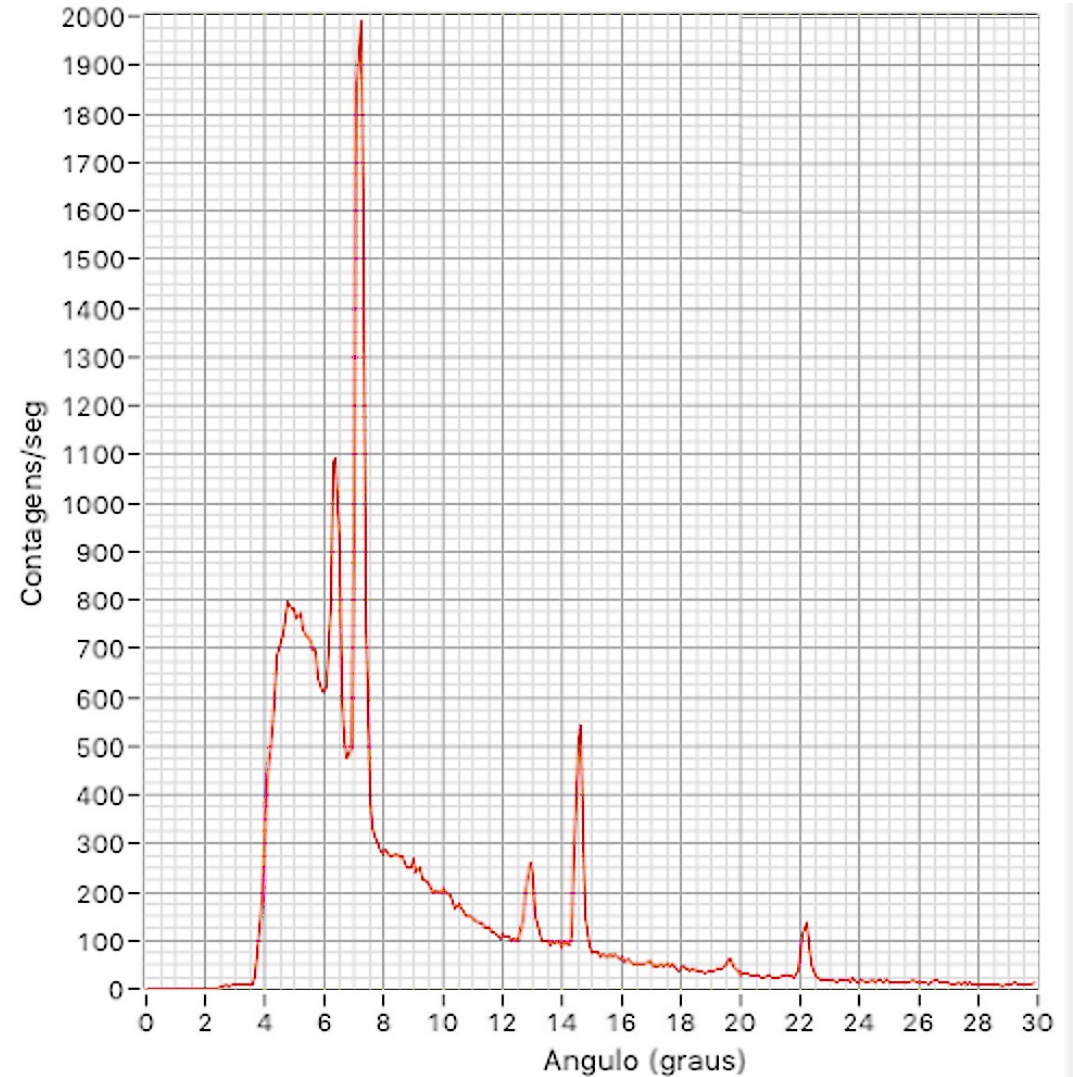
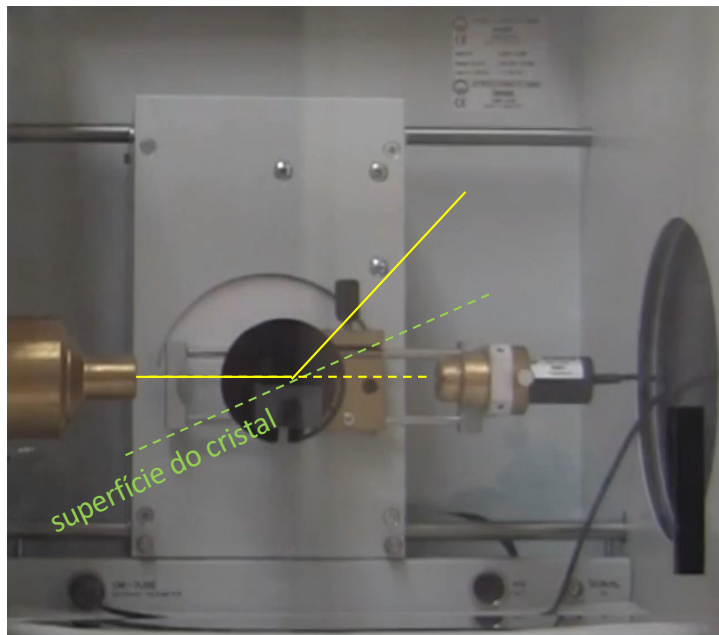


o que se obtém

# Difração de Bragg

relação  
de Bragg  $n \lambda = 2 d \sin(\theta)$

Note que o que se mede é a contagem de fótons de raio x por intervalo de tempo, em função do ângulo de detecção.  
A correspondência entre o ângulo e o comprimento de onda  $\lambda$  é dada pela relação de Bragg.

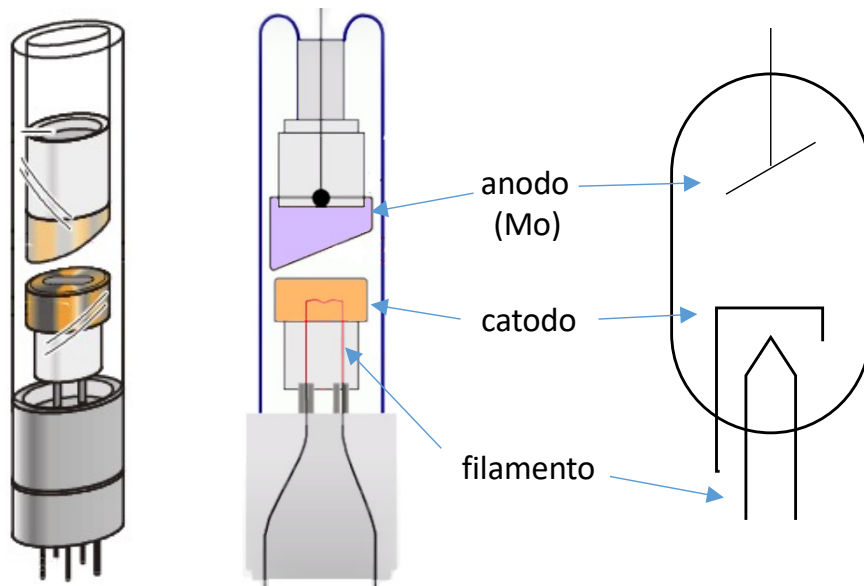


o que se obtém

# Produção de Raio X

## Tubo de raio X

- Produção de ondas eletromagnéticas
  - Lâmpada incandescente
    - Lei de Planck da radiação de corpo negro
    - Inviável para as energias envolvidas no raio x
  - Emissão termiônica
    - Tubo de raio x

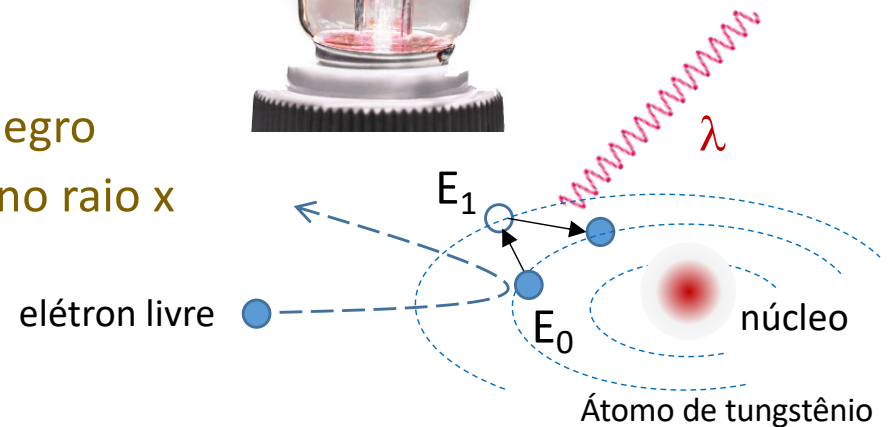


Filamento aquecido



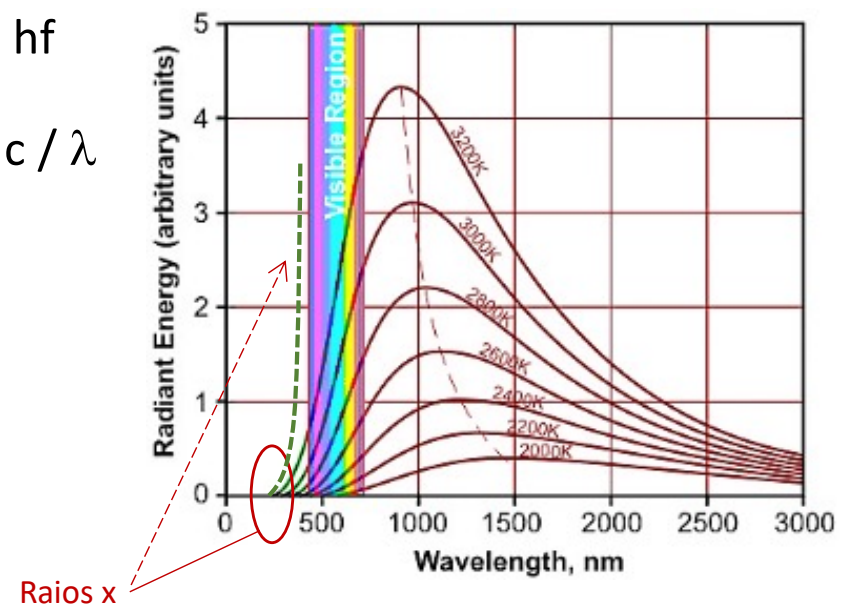
$$\Delta E = E_1 - E_0$$

$$\lambda = hc / \Delta E$$



$$E = hf$$

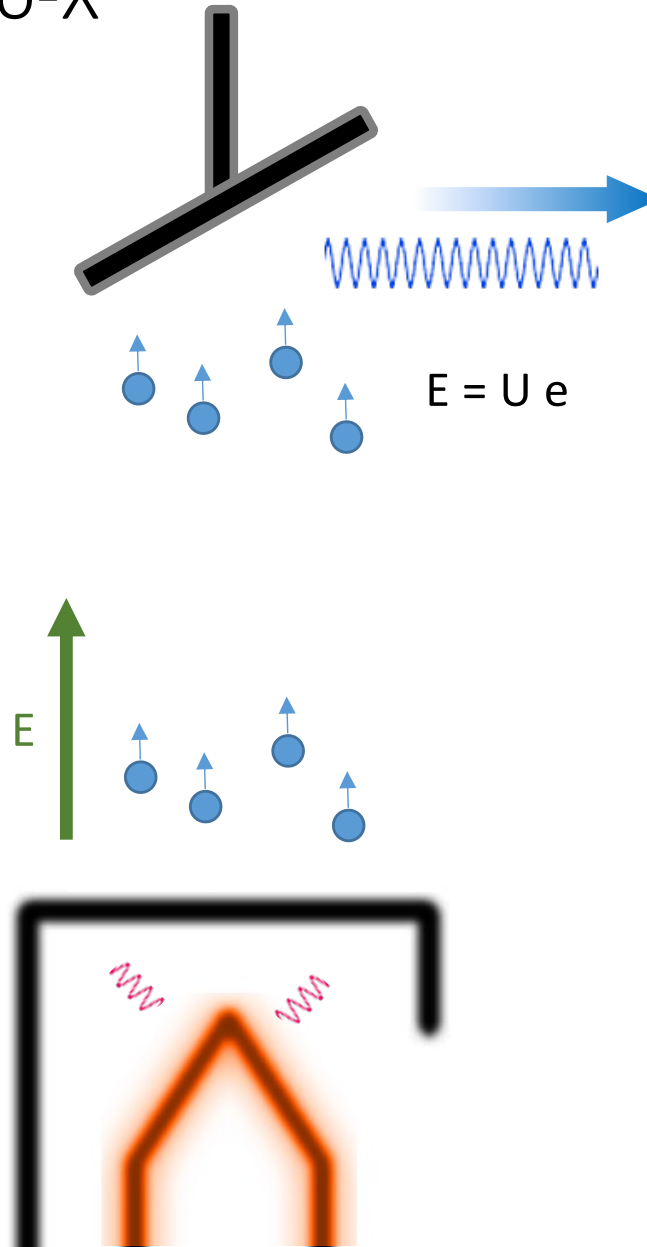
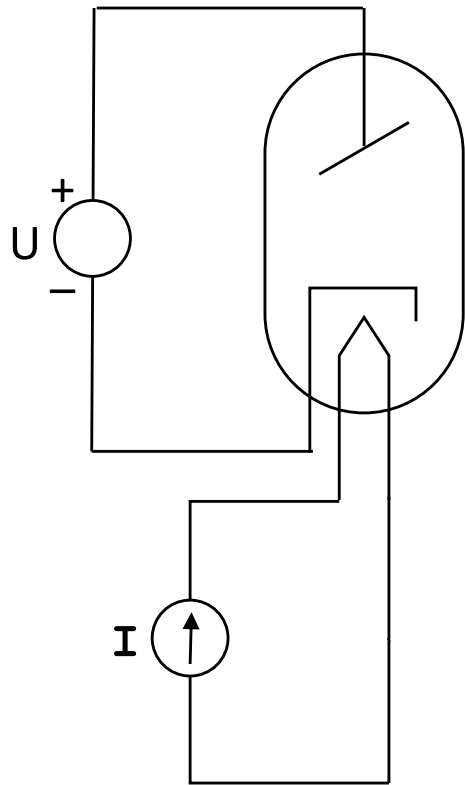
$$E = hc / \lambda$$



# Produção de Raio-X

## Tubo de raio x

- Operação

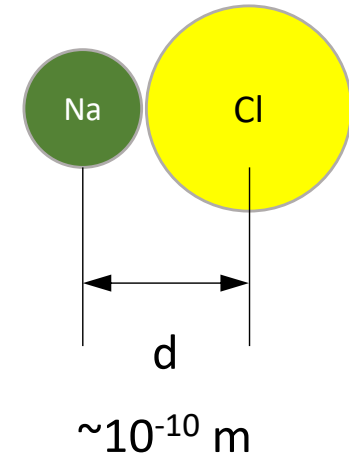
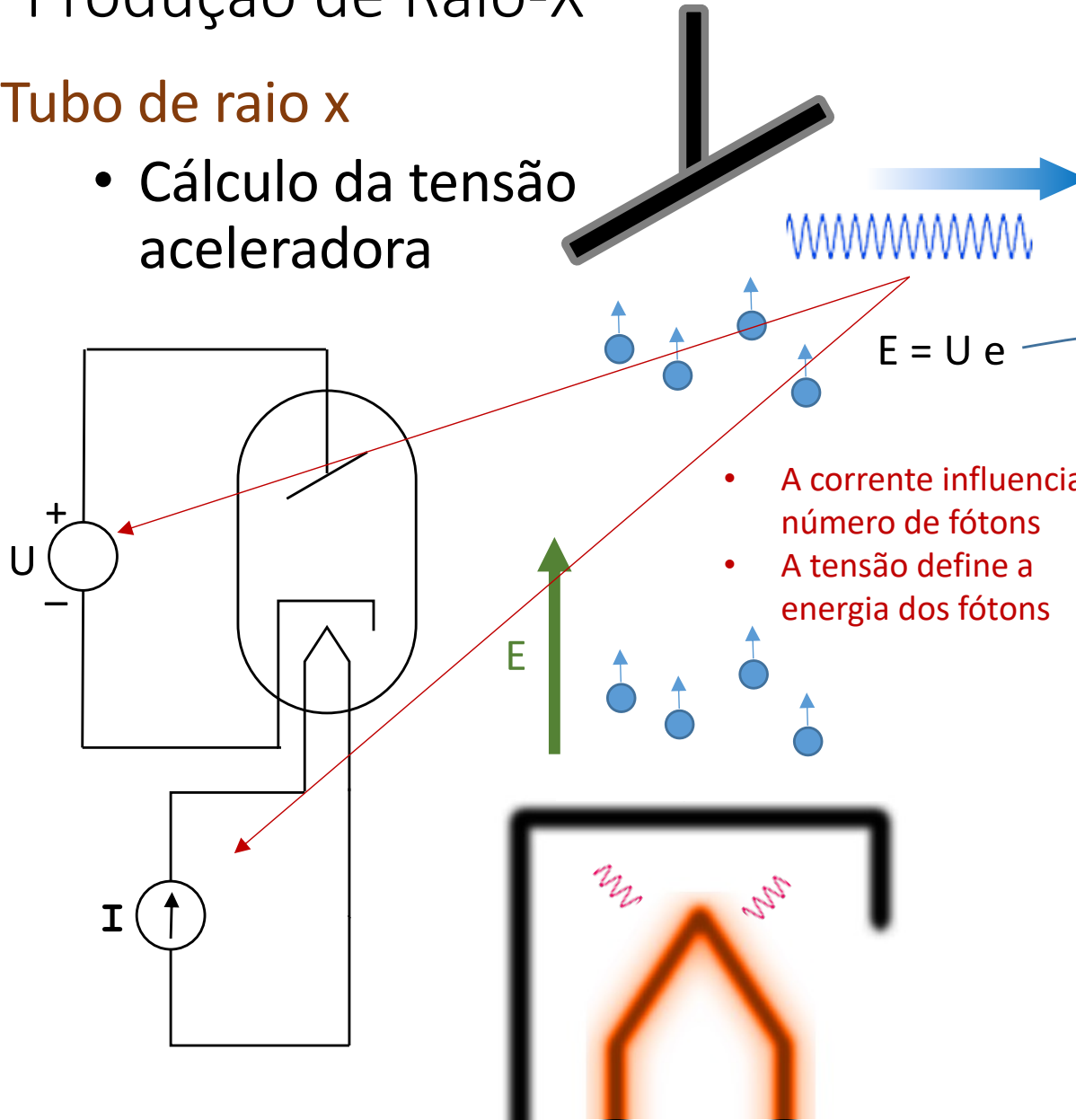




# Produção de Raio-X

## Tubo de raio x

- Cálculo da tensão aceleradora



$$\lambda \sim 10^{-11} \text{ m}$$

relação de Einstein:

$$E = hc / \lambda$$

portanto:

$$U e = hc / \lambda$$

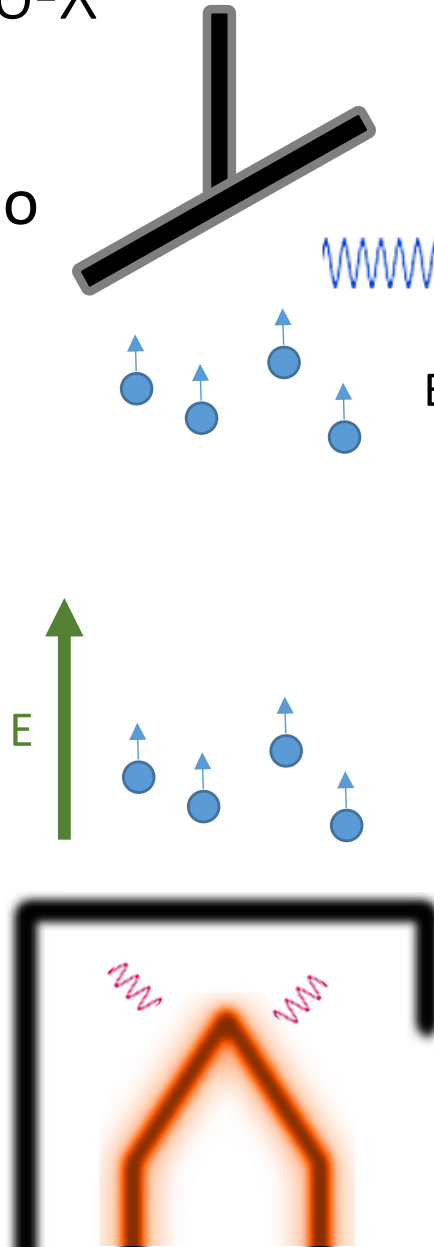
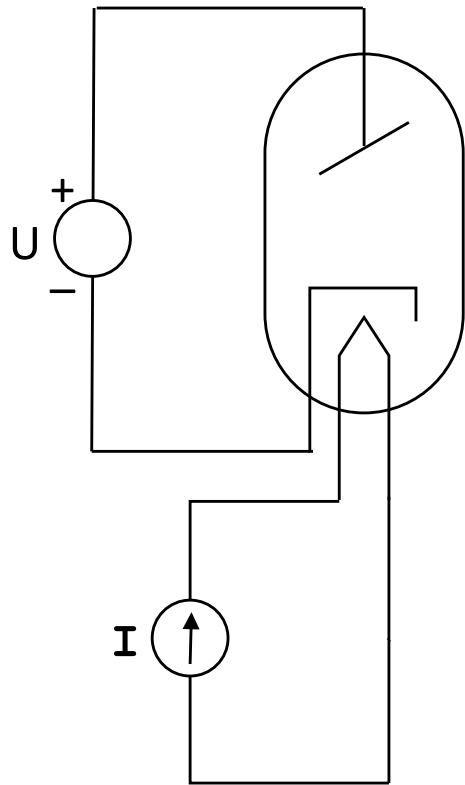
$$U \sim 10^4 \text{ V}$$

Usaremos entre 35 kV e 22 kV

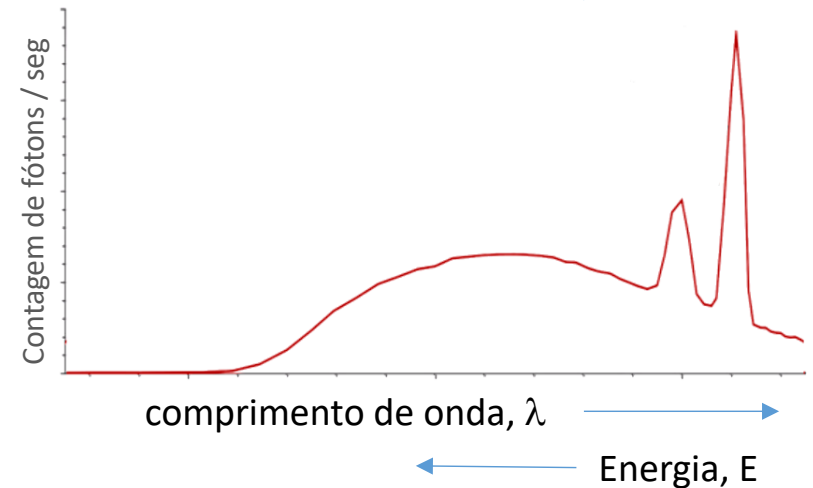
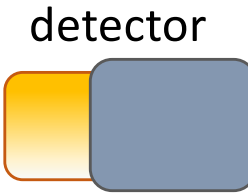
# Produção de Raio-X

## Tubo de raio x

- Espectro do Mo



Colocando-se o detector diretamente apontado para a fonte

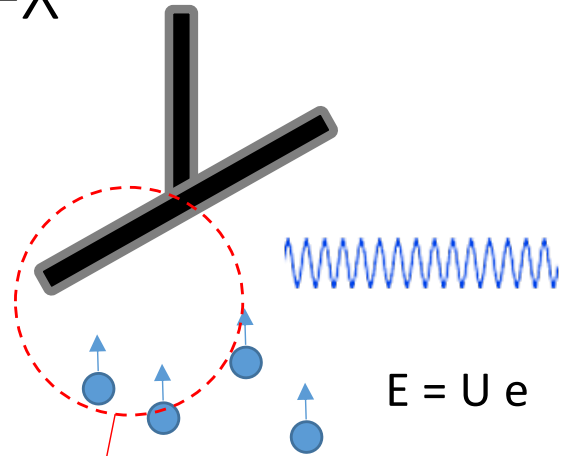


Observa-se que o feixe de raio x não é monocromático

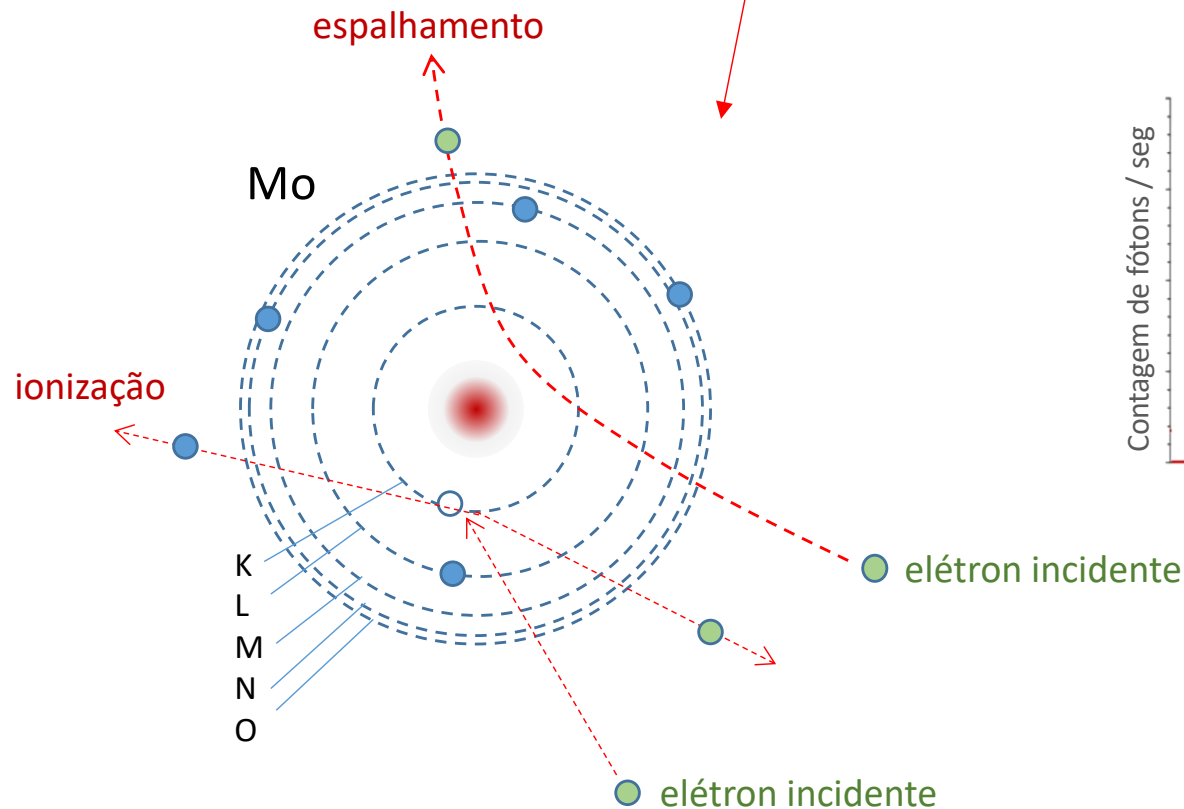
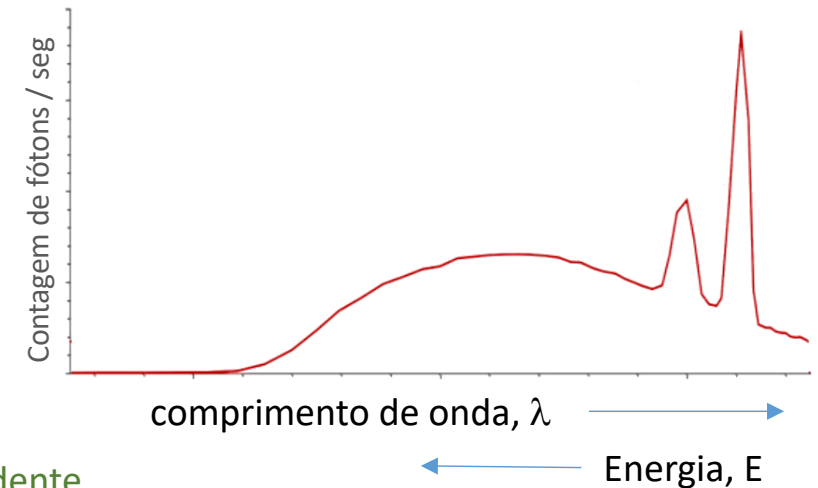
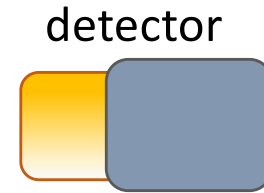
# Produção de Raio-X

## Tubo de raio x

- Espectro do Mo
- Radiação de freamento (*Bremsstrahlung*)
- Radiação característica



Colocando-se o detector diretamente apontado para a fonte

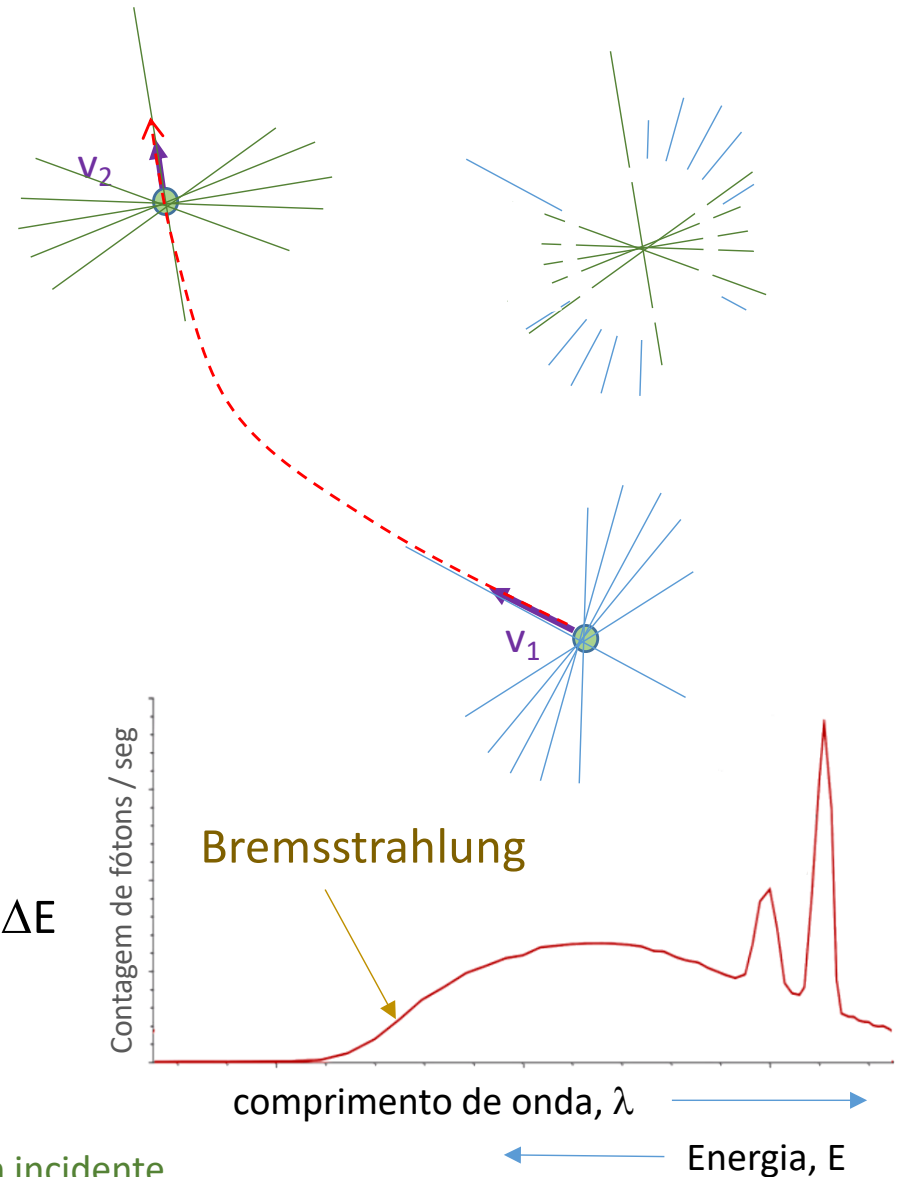
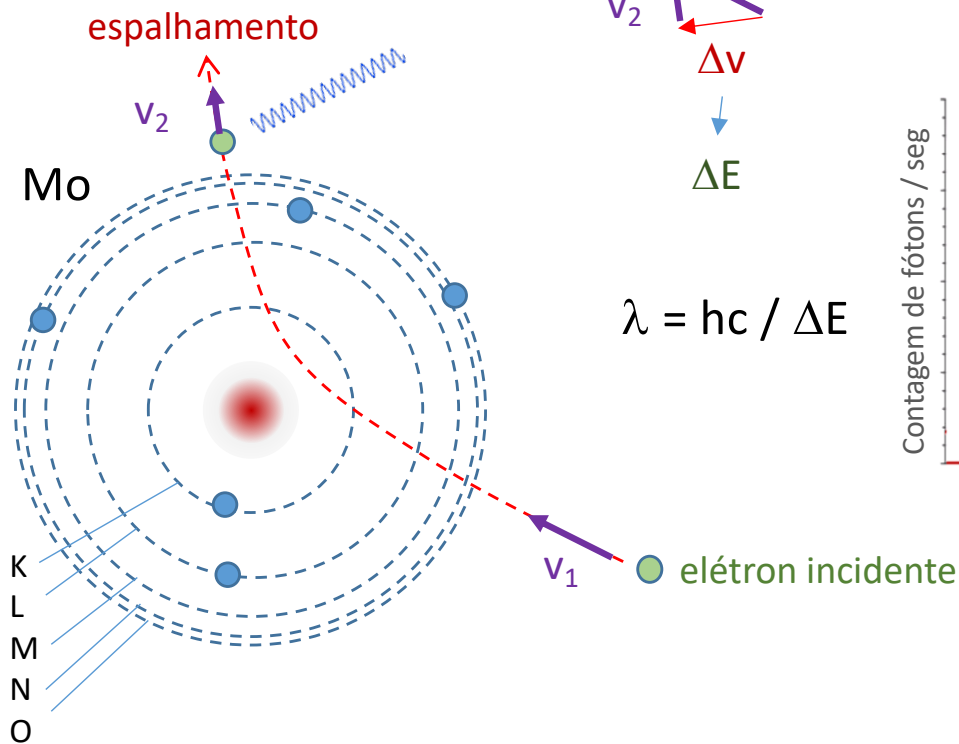


Observa-se que o feixe de raio x não é monocromático

# Produção de Raio-X

## Tubo de raio x

- Espectro do Mo
- Radiação de freamento (*Bremsstrahlung*)
- Radiação característica



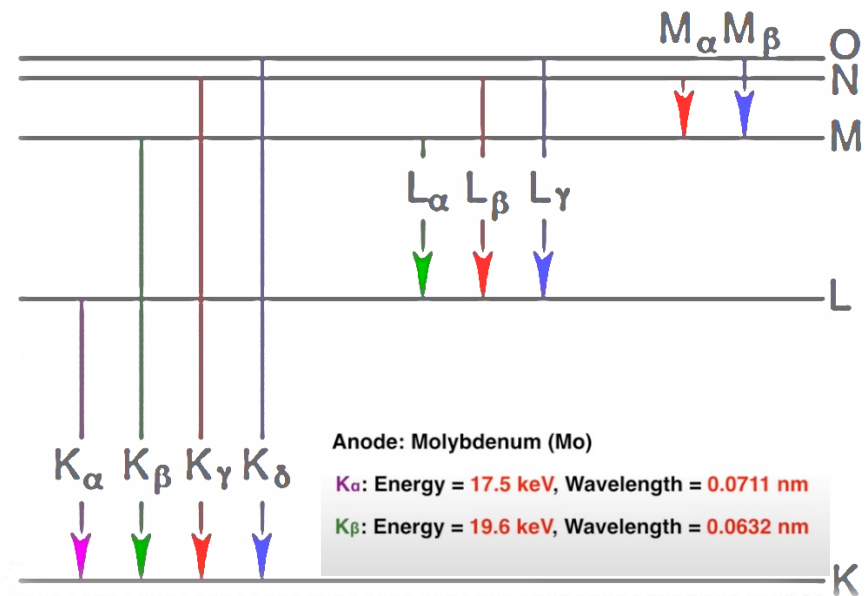
Observa-se que o feixe de raio x não é monocromático



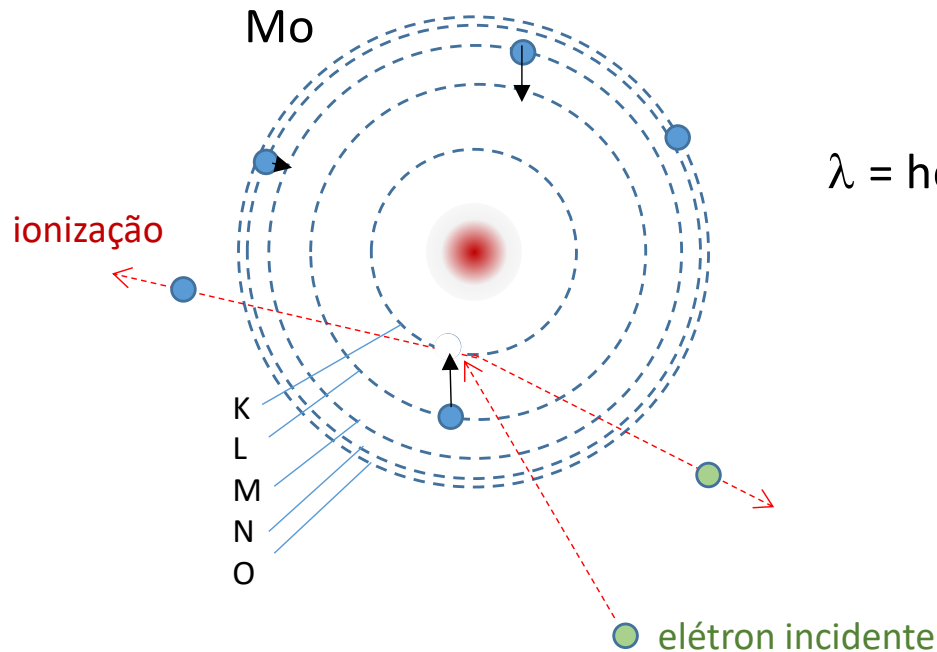
# Produção de Raio-X

## Tubo de raio x

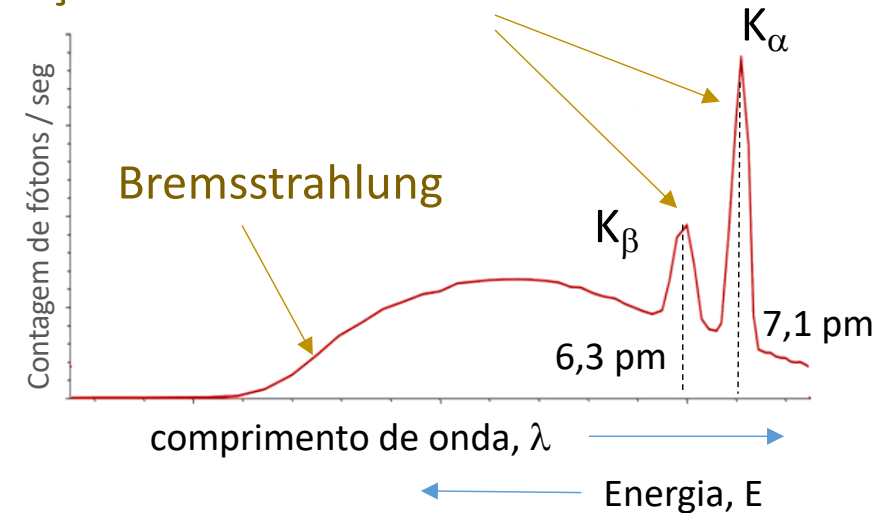
- Espectro do Mo
- Radiação de freamento (*Bremsstrahlung*)
- Radiação característica



### Transições características



$$\lambda = hc / \Delta E$$

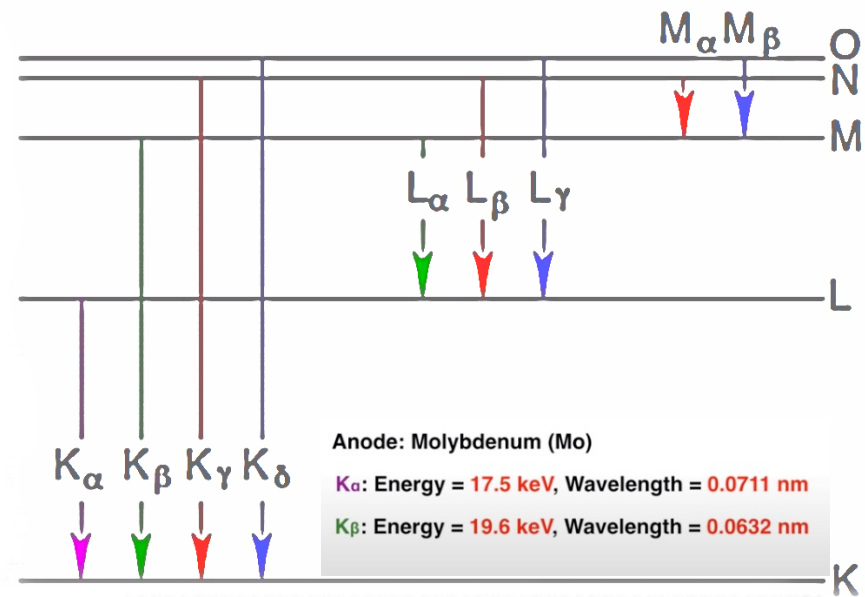


Observa-se que o feixe de raio x não é monocromático

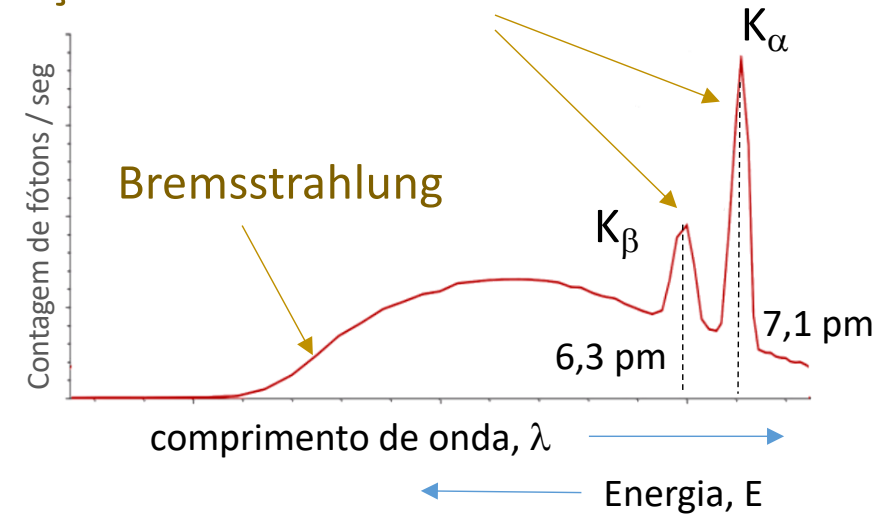
# Difração de Raio-X

relação de Bragg  $n \lambda = 2 d \sin(\theta)$

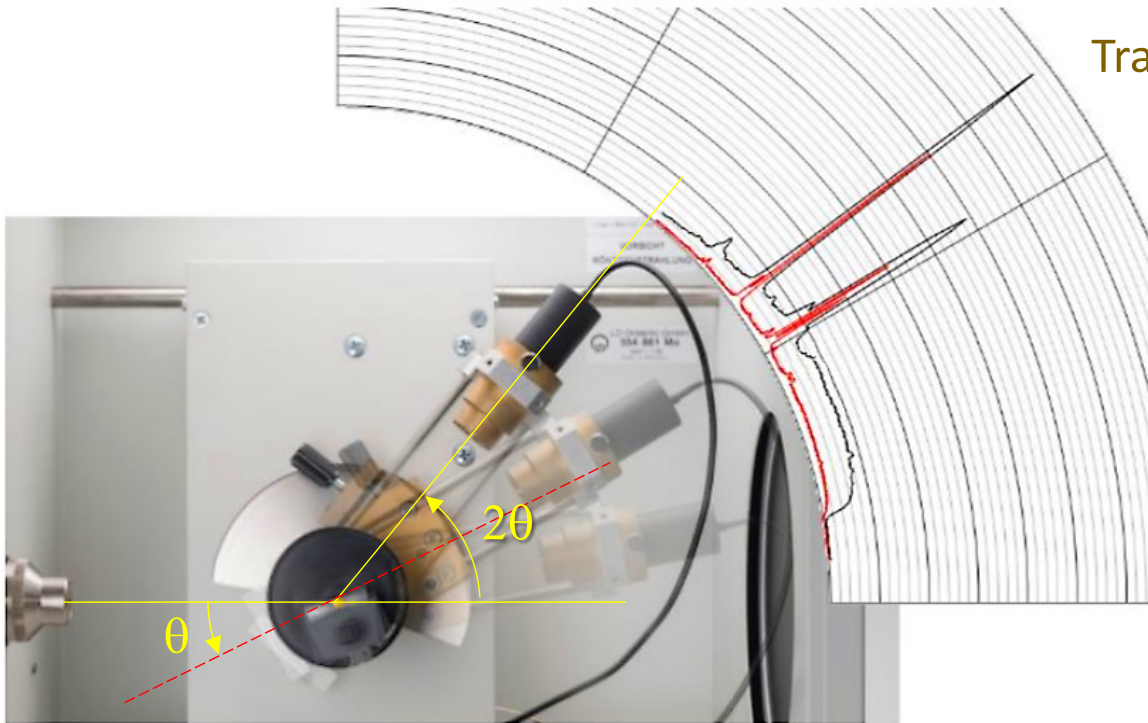
A correspondência entre o ângulo e o comprimento de onda  $\lambda$  é dada pela relação de Bragg.



## Transições características



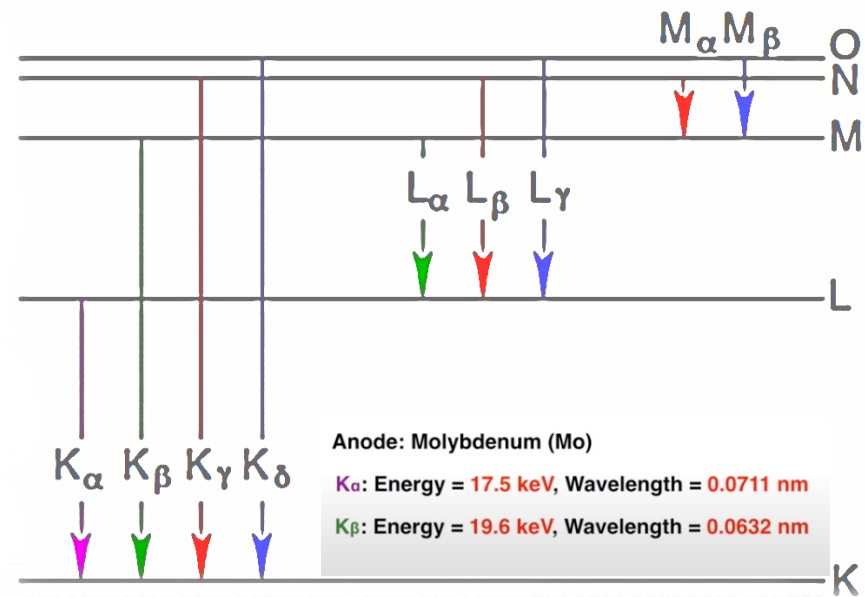
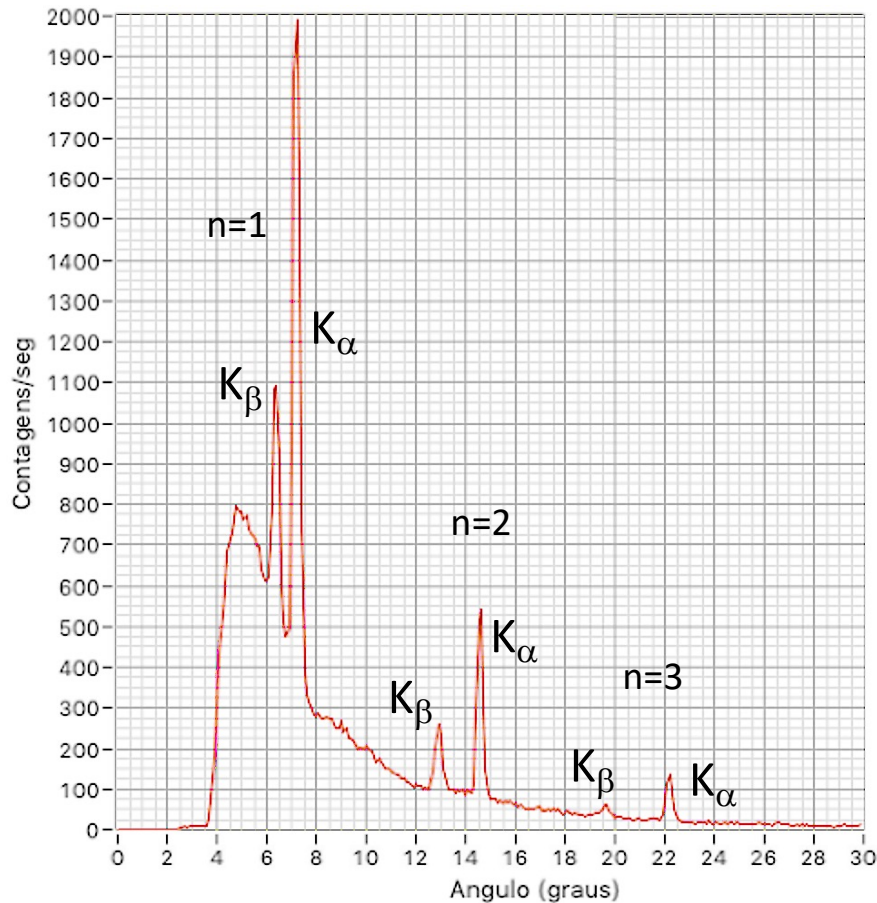
$$\lambda = hc / \Delta E$$



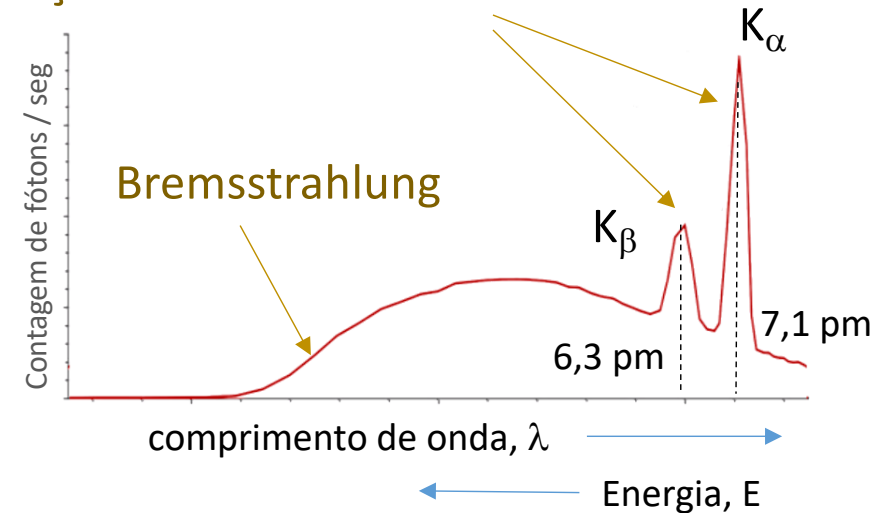
# Difração de Raio-X

relação de Bragg  $n \lambda = 2 d \sin(\theta)$

A correspondência entre o ângulo e o comprimento de onda  $\lambda$  é dada pela relação de Bragg.



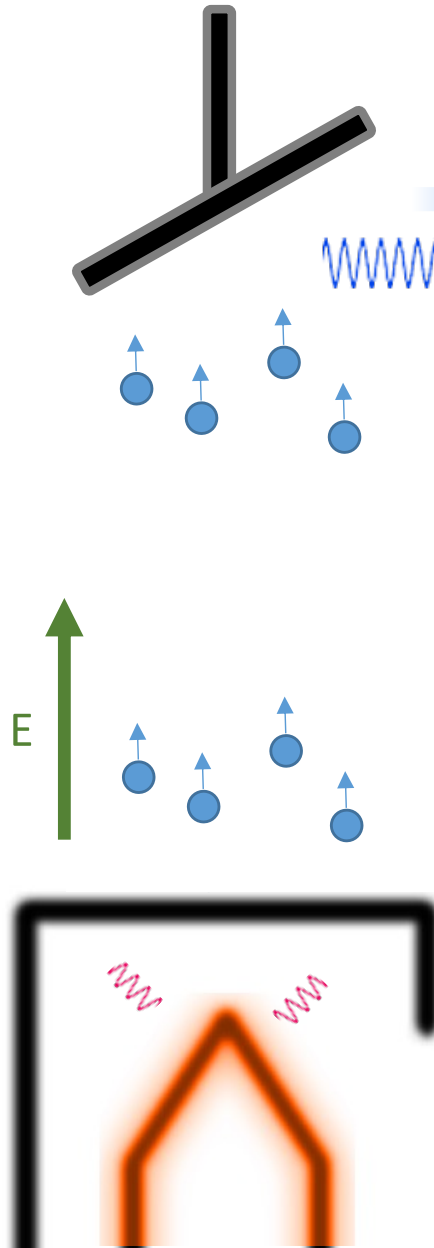
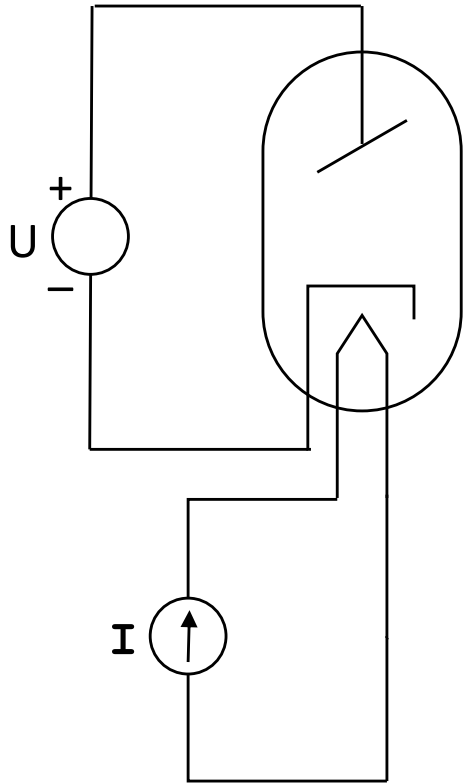
## Transições características



$$\lambda = hc / \Delta E$$

# Experimento de Duane e Hunt

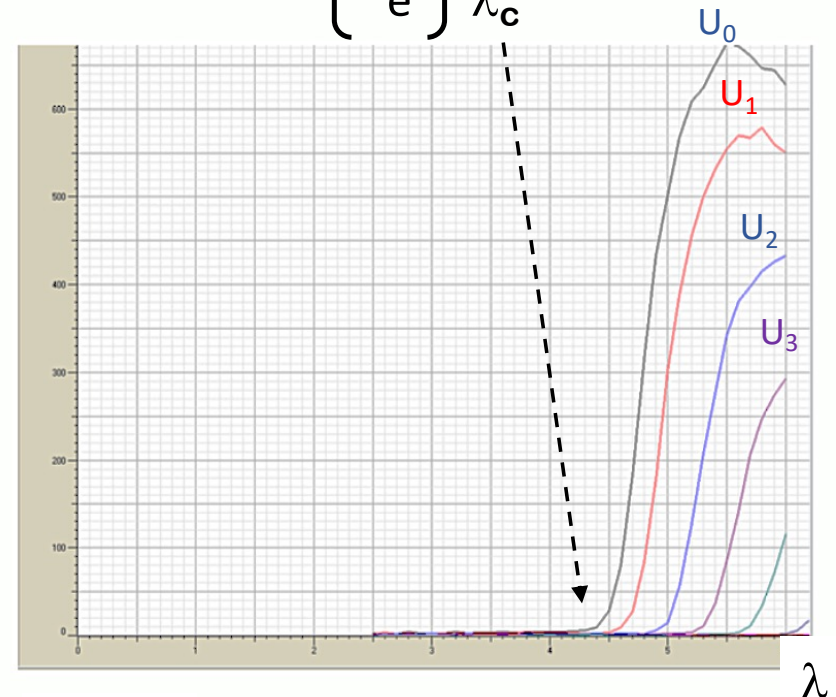
Relação entre a **tensão** entre anodo-catodo e o **comprimento de onda de corte de Bremsstrahlung**



$$E = hc / \lambda_c$$
$$E = U e \rightarrow U e = hc / \lambda_c$$

$$U = \left[ \frac{hc}{e} \right] \frac{1}{\lambda_c}$$

Relação de Duane-Hunt



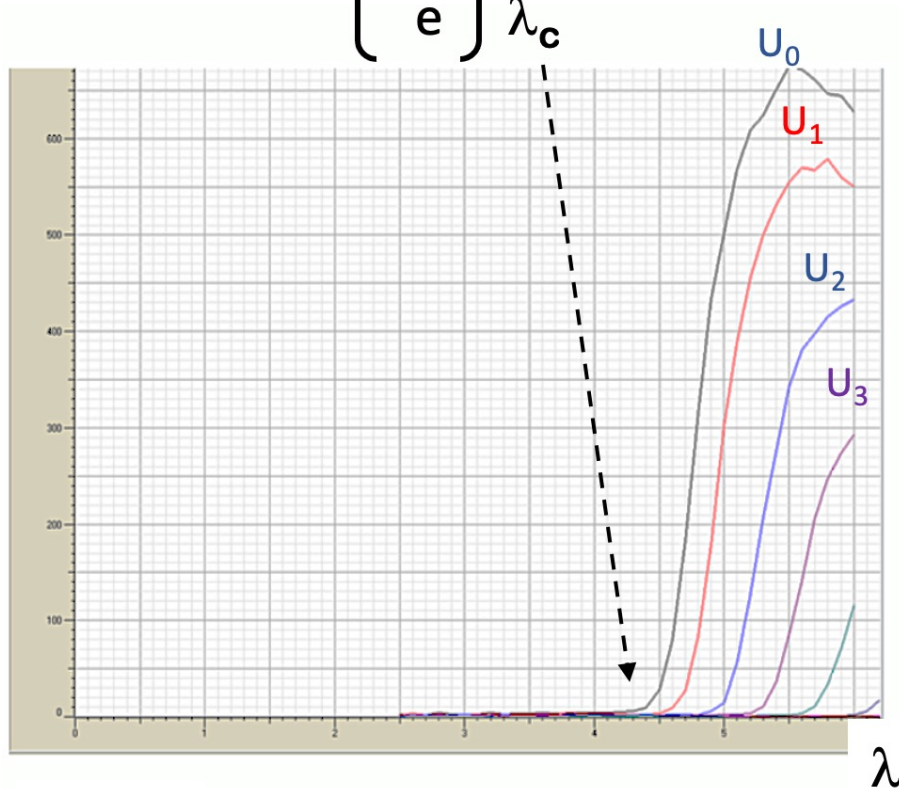
Curvas de espectro de bremsstrahlung

A (coeficiente angular)



$$U = \left( \frac{hc}{e} \right) \frac{1}{\lambda_c}$$

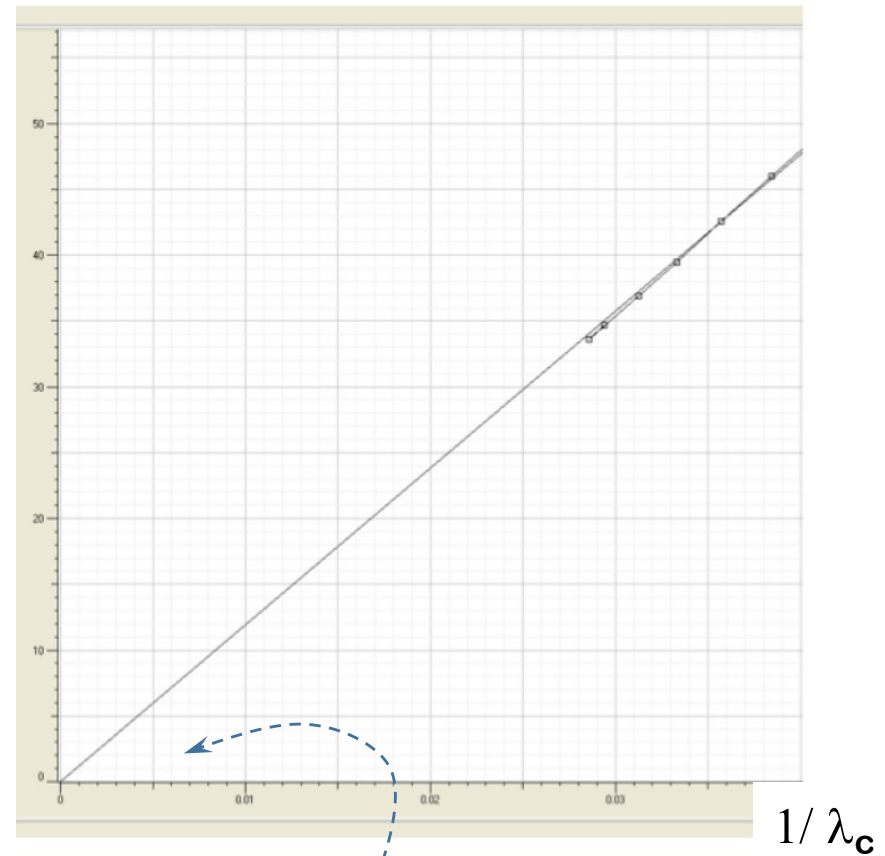
Relação de  
Duane-Hunt



Curvas de espectro de bremsstrahlung


U

Regressão linear



A





*Quaisquer dúvidas,  
perguntem! Boa sorte!*

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física  
Laboratório de Física Moderna

Disciplina: Física Experimental C - 4323301  
Coordenador: José Helder Facundo Severo

Experimento: Difração de Raio-X  
Edição 2020 – EAD

Autor: João Eduardo Kogler Jr.  
Escola Politécnica da USP  
Departamento de Sistemas Eletrônicos  
[kogler@lsi.usp.br](mailto:kogler@lsi.usp.br)

Vídeo 2 – versão 2020 EAD



USP – Universidade de São Paulo

Física Experimental C - Laboratório

# Difração de Raio X

João Kogler

PSI / EP USP

Versão EAD - 2020

Vídeo 2