

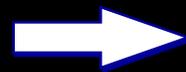
SEL 397 - PRINCÍPIOS FÍSICOS DE FORMAÇÃO DE IMAGENS MÉDICAS

Prof. Homero Schiabel

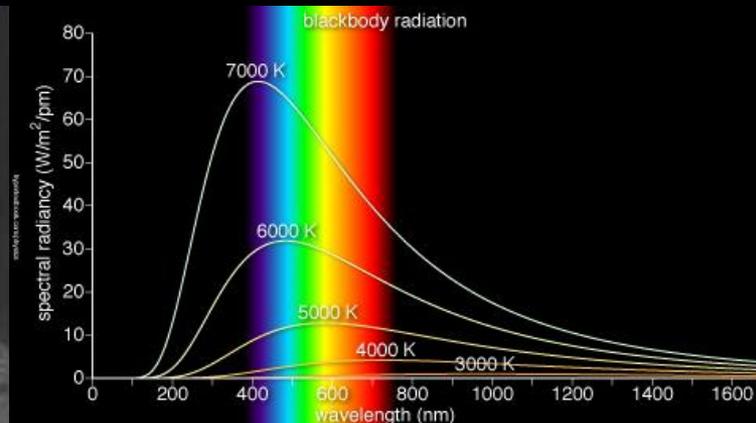
- Max Planck (1901): teoria dos *quanta* → E depende da frequência de radiação (ou de λ):

$$E = h \nu$$

$$\nu = c / \lambda$$

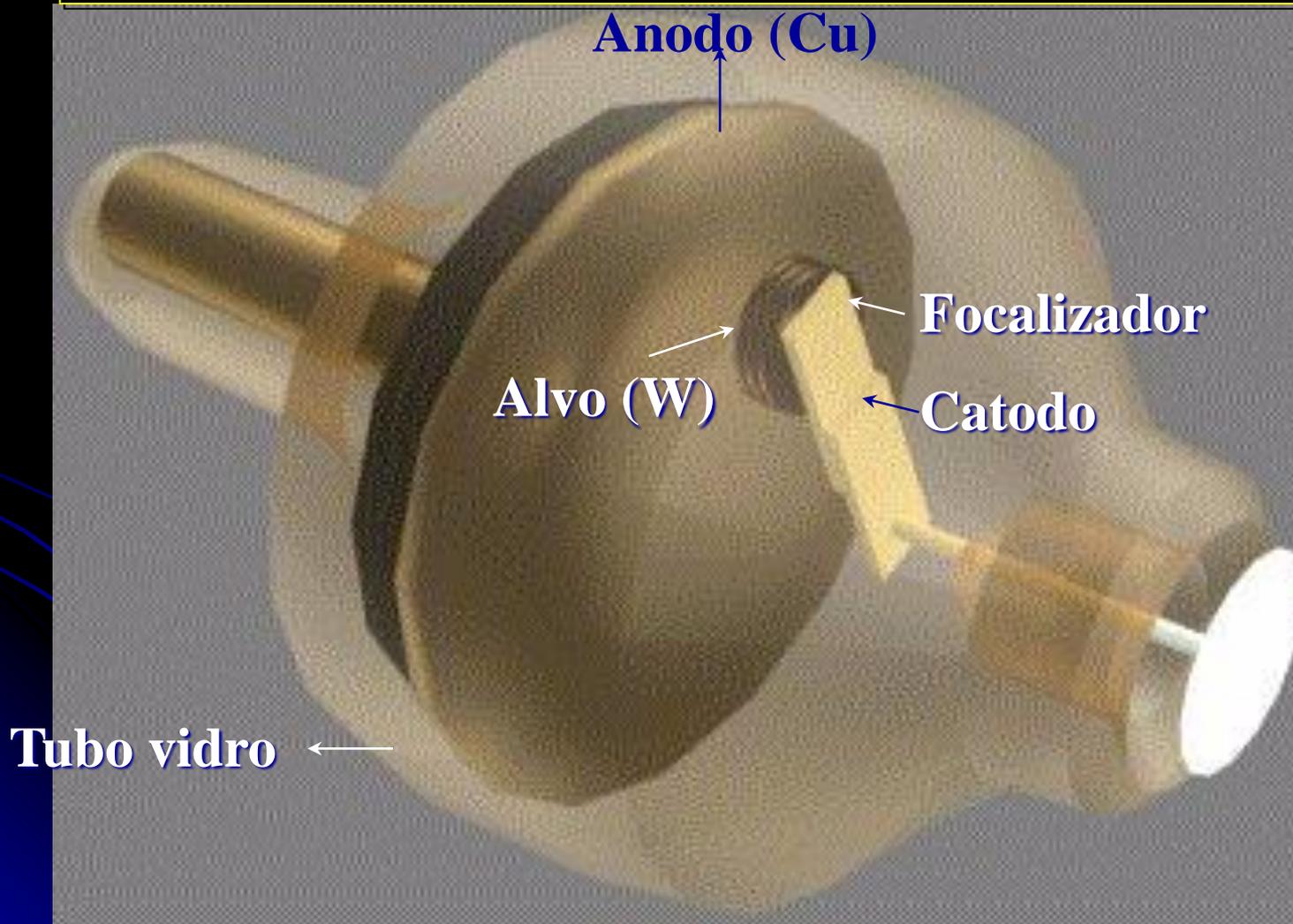


$$E = h c / \lambda$$

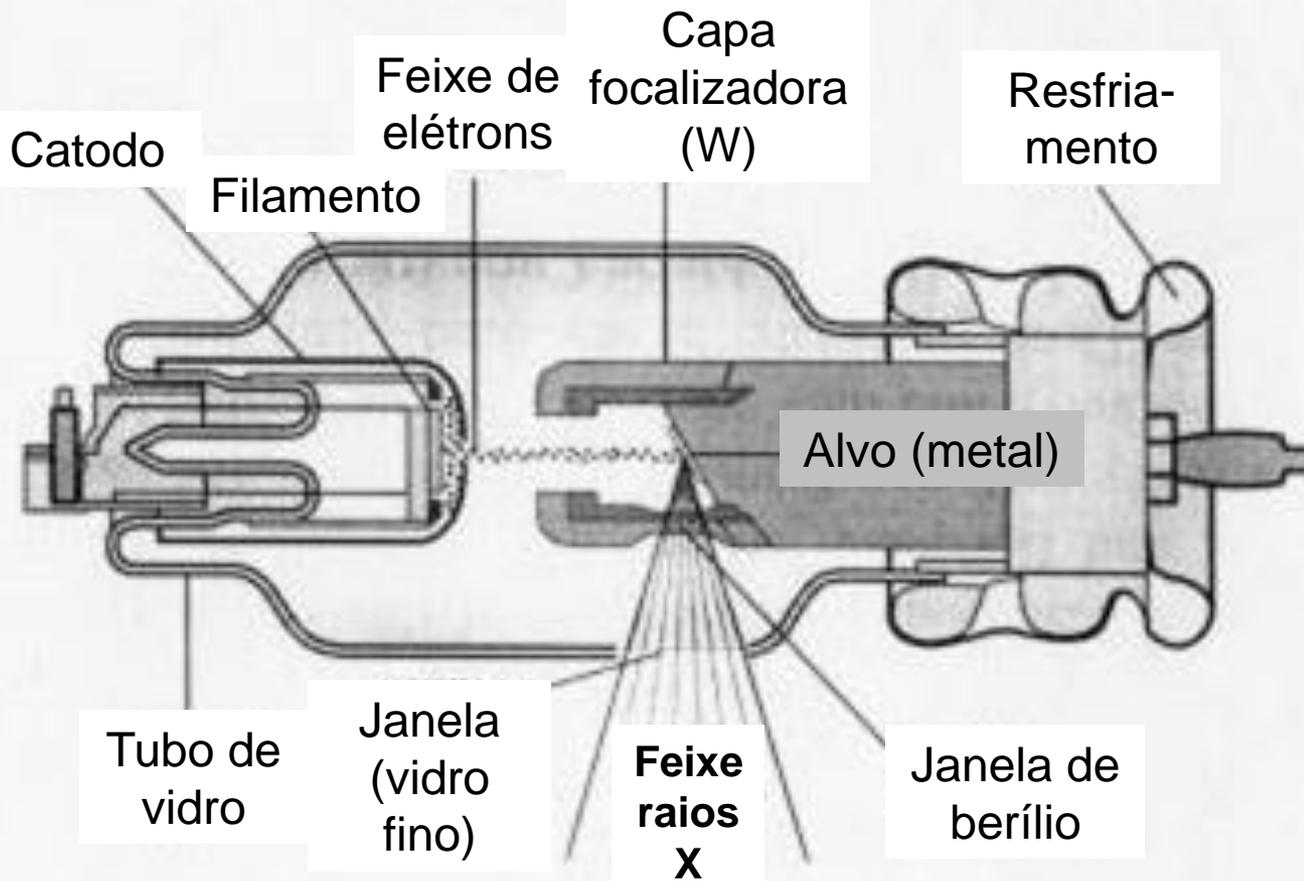


4. PRODUÇÃO DE RAIOS X

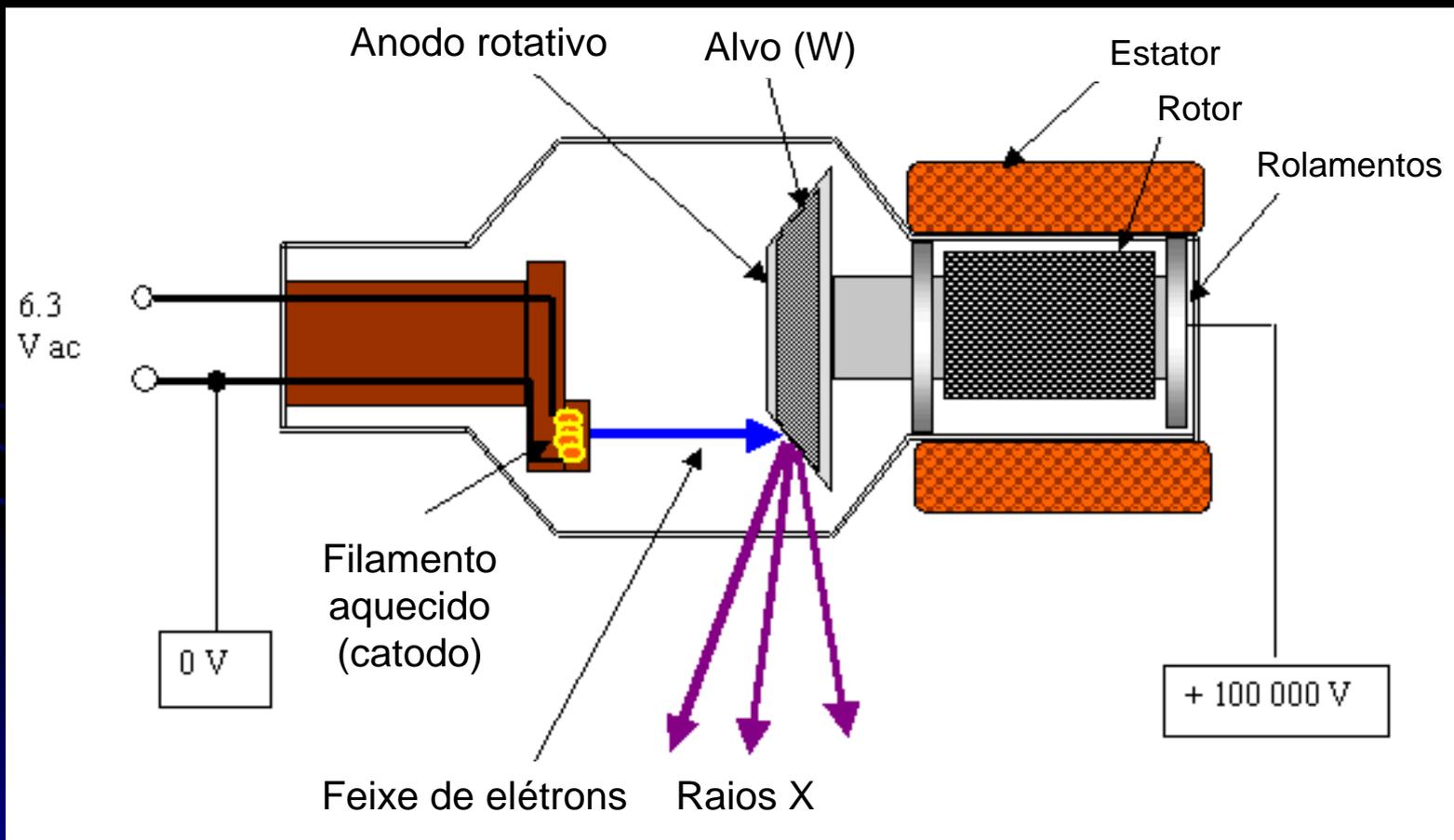
Tubo de Raios X (Anodo estacionário)



Tubo de Raios X (Anodo estacionário)



Tubo de Raios X (Anodo rotativo)



- Eletrodos submetidos a uma alta ddp (milhares de V);
- elétrons do filamento emitidos em direção ao alvo e subitamente desacelerados → E → calor e R-X

$$E = e \cdot V$$

E = energia do e⁻
e = carga do e⁻
V = tensão entre os eletrodos [KV]





Tubo de 1900



Tubo rotativo Siemens (meados séc. XX)

4.1. Excitação e Ionização

- Se denotarmos E_1 como a energia original de um e^- orbital e E_2 como sua energia final, a energia de um *quantum* será:

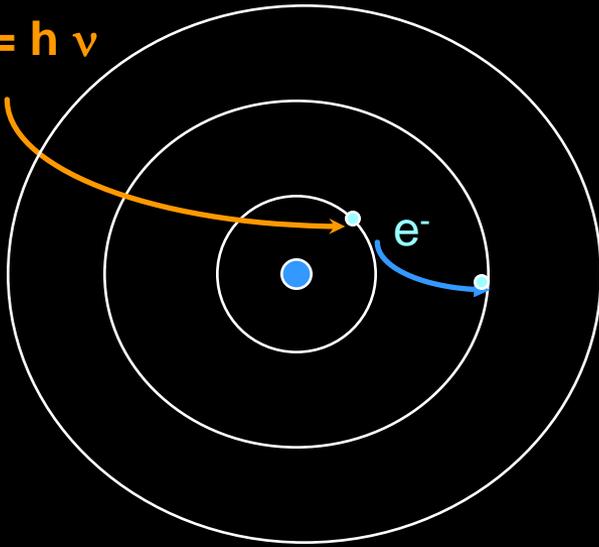
$$E = h \eta = E_2 - E_1 \quad (1)$$

- Quando um *quantum* tem energia tal que possibilite levar o e^- a uma órbita mais alta →

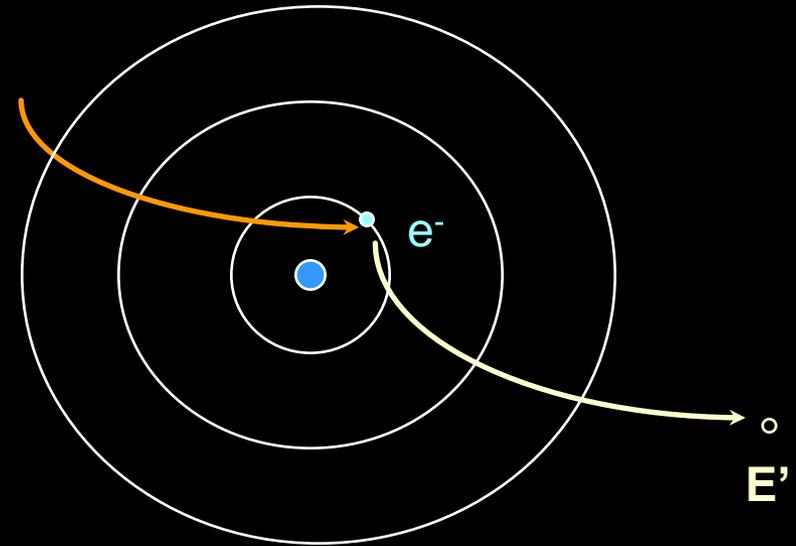
EXCITAÇÃO

- Quando um e^- orbital recebe energia suficiente para escapar do átomo → IONIZAÇÃO

$$E = h \nu$$



EXCITAÇÃO



IONIZAÇÃO

$$E' = h \nu - B$$

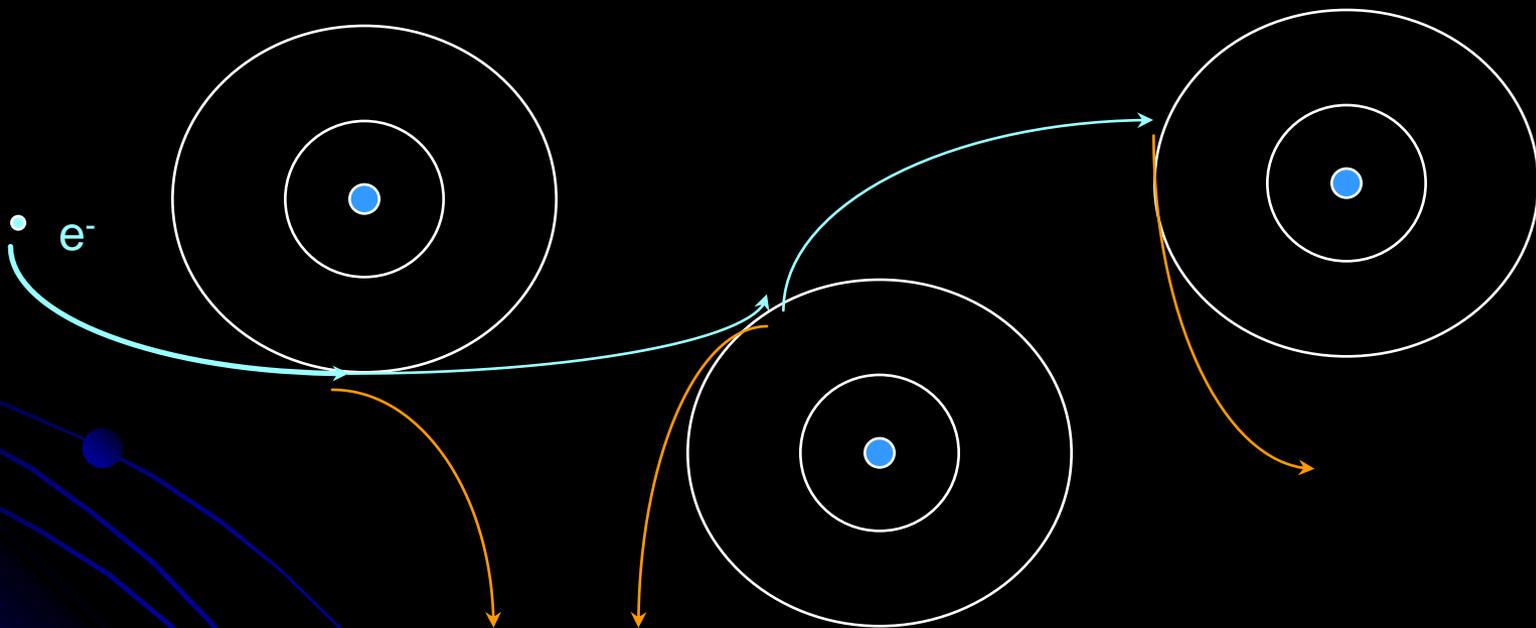
E' = Energia cinética do elétron livre;

B = Energia de ligação do elétron ao átomo

- Ionização causada pela absorção de radiação eletromagnética → ABSORÇÃO FOTOELÉTRICA
→ fóton incidente desaparece após a ejeção do elétron.
- Emissão de elétrons da superfície de uma substância como resultado da irradiação por ondas eletromagnéticas → EFEITO FOTOELÉTRICO

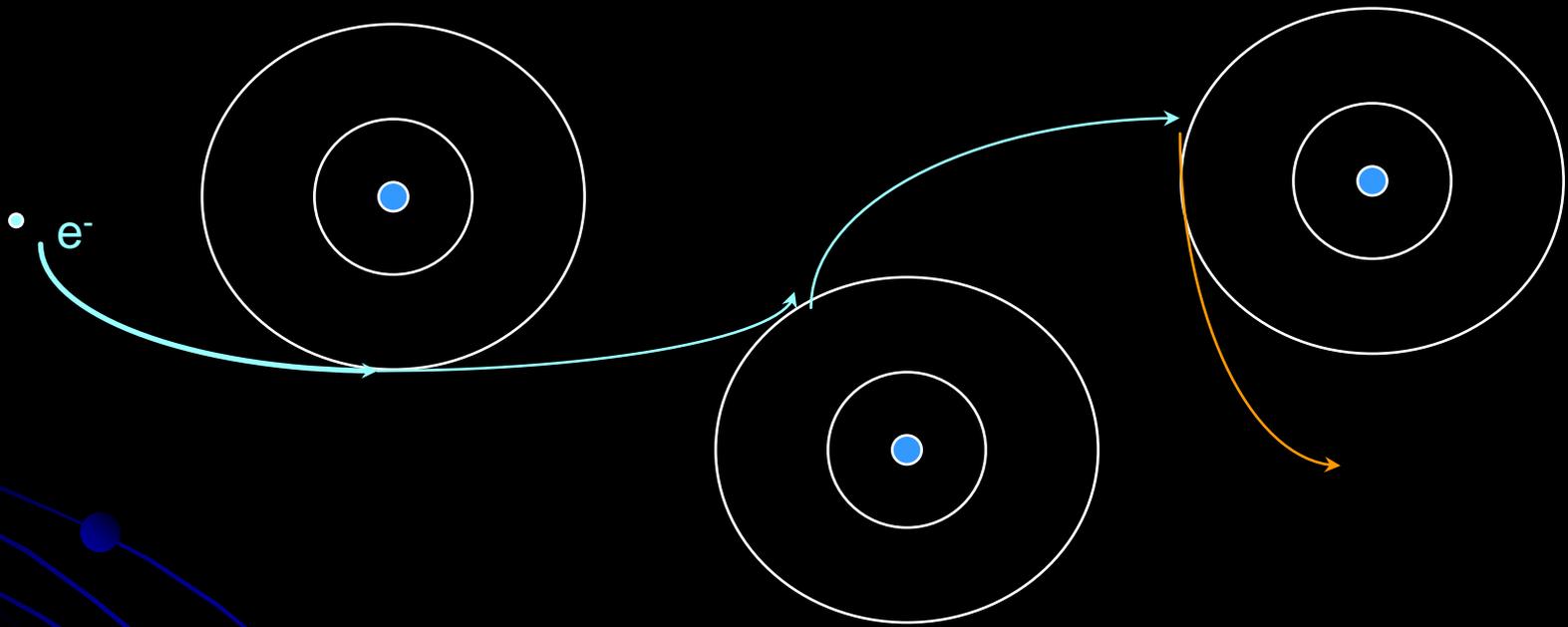
4.2. Possíveis interações entre os elétrons do feixe e os átomos do alvo no tubo de raios X

1



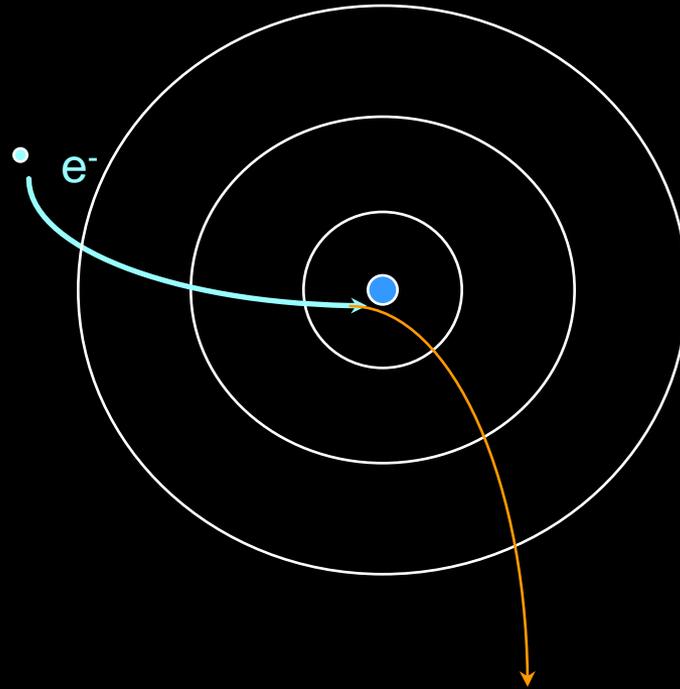
elétron sofre 3 deflexões e produz 3 fótons de raios X

2



elétron sofre 3 deflexões e produz ionização, calor e um fóton de raios X

3

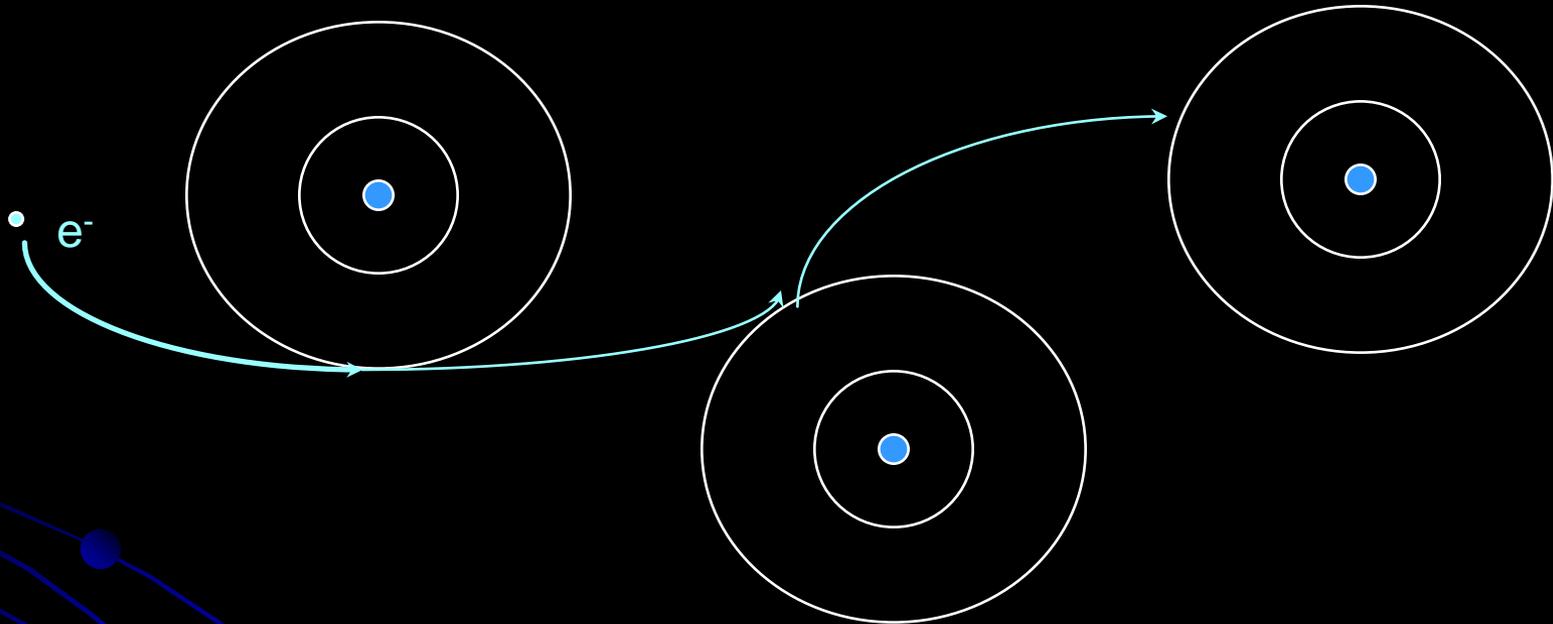


elétron perde toda sua energia numa única colisão:

➤ fóton X de máxima energia;

➤ $E = hc / \lambda = eV \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\text{mín}} = 12,4 / kV \text{ [Å]}$

4



elétron sofre 3 deflexões, produzindo ionizações e calor

(*) OBS.: rendimento $\rightarrow \eta = Z V 10^{-9}$

4.3. Espectro de raios X

Espectro Contínuo

- Raios X podem assumir qualquer valor de intensidade, desde 0 até a máxima energia (numericamente = kVp)

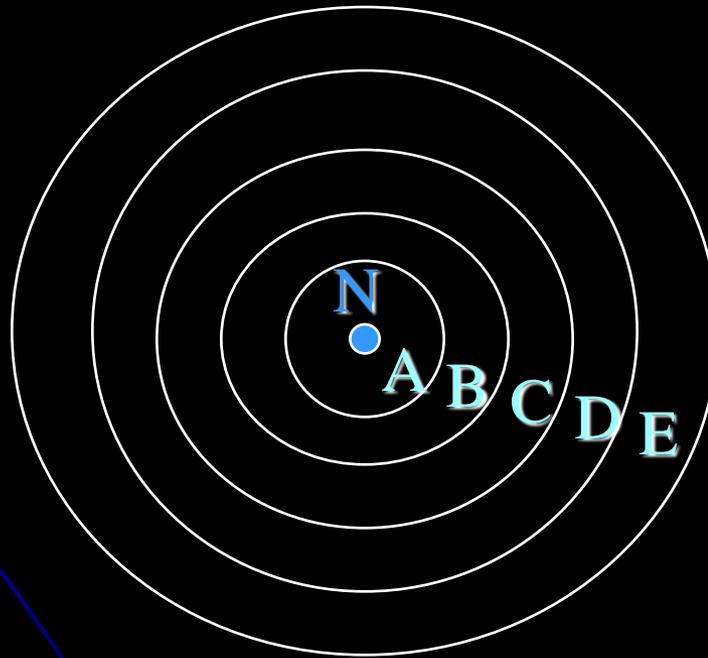
A - 100

B - 80

C - 60

D - 40

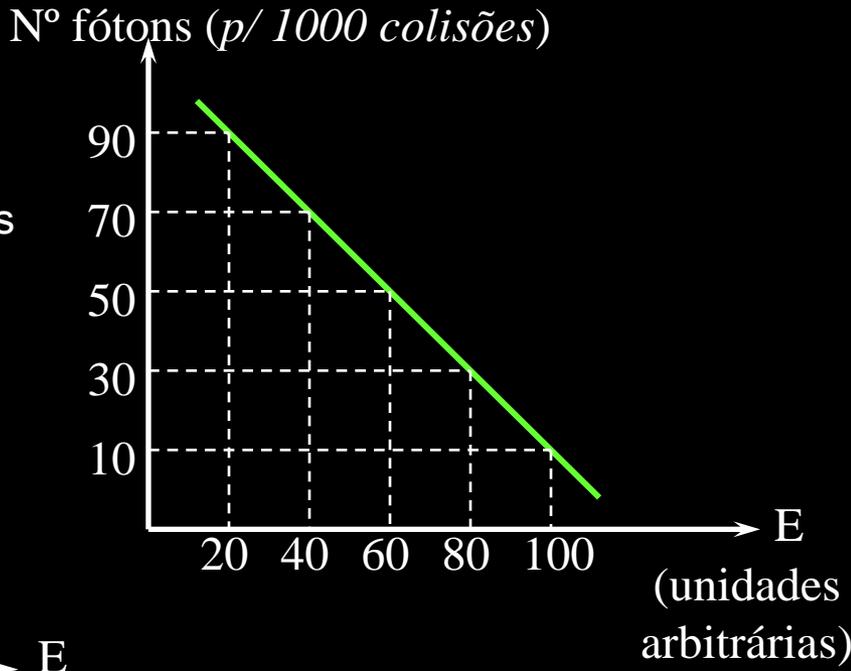
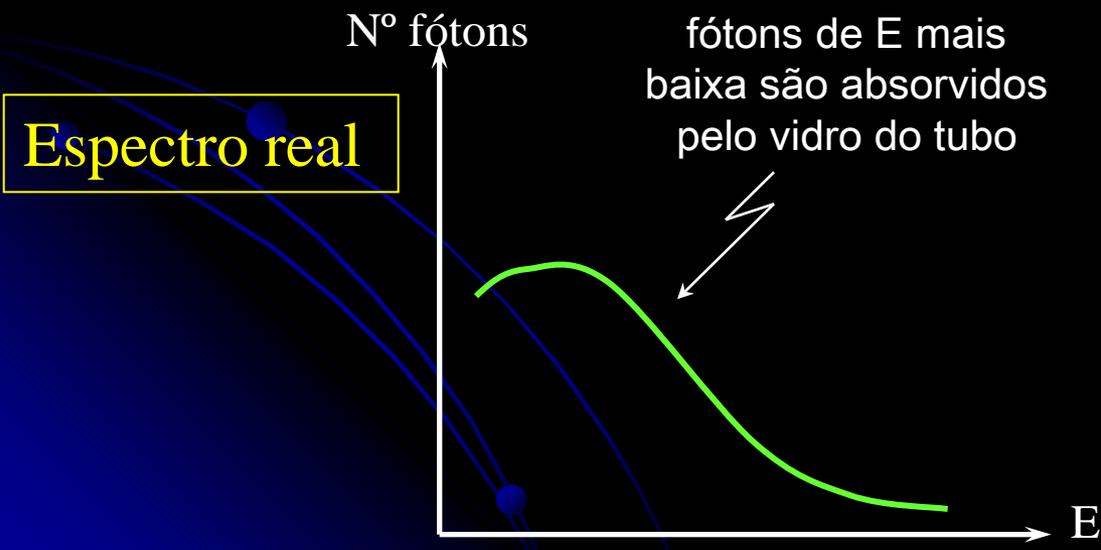
E - 20



- Probabilidade de interação de um elétron do feixe com elétrons orbitais de cada camada para a produção de fótons de raios X:

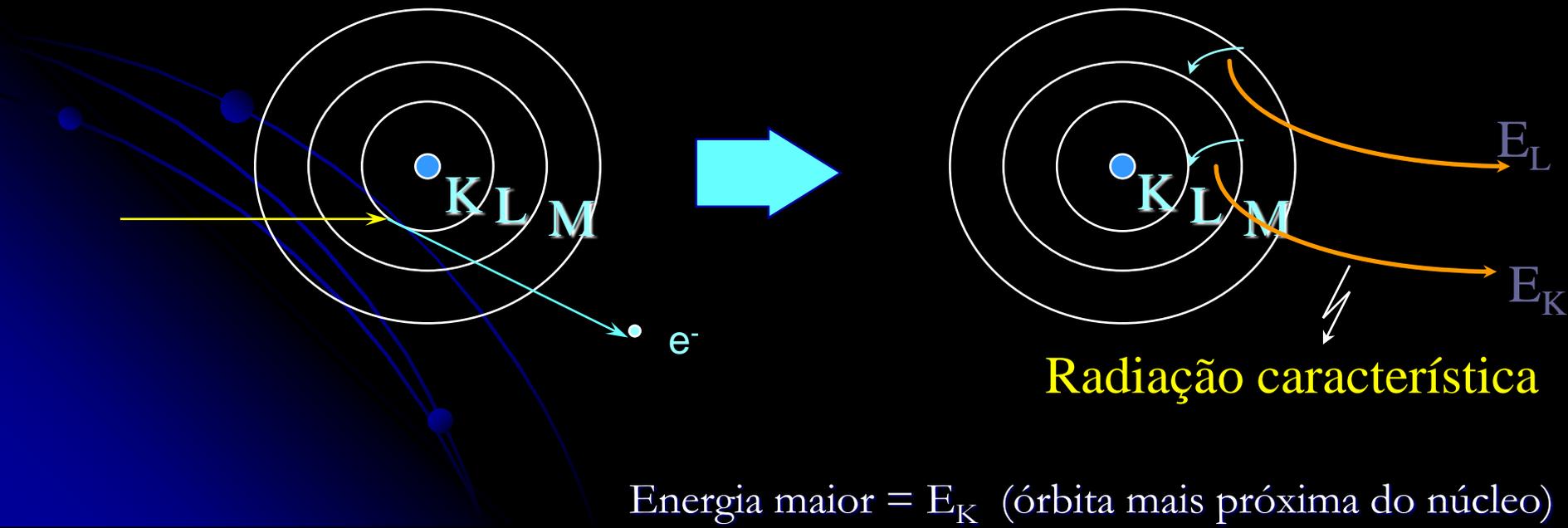
E - 9/100 D - 7/100 C - 5/100 B - 3/100 A - 1/100

- Supondo 1000 colisões:

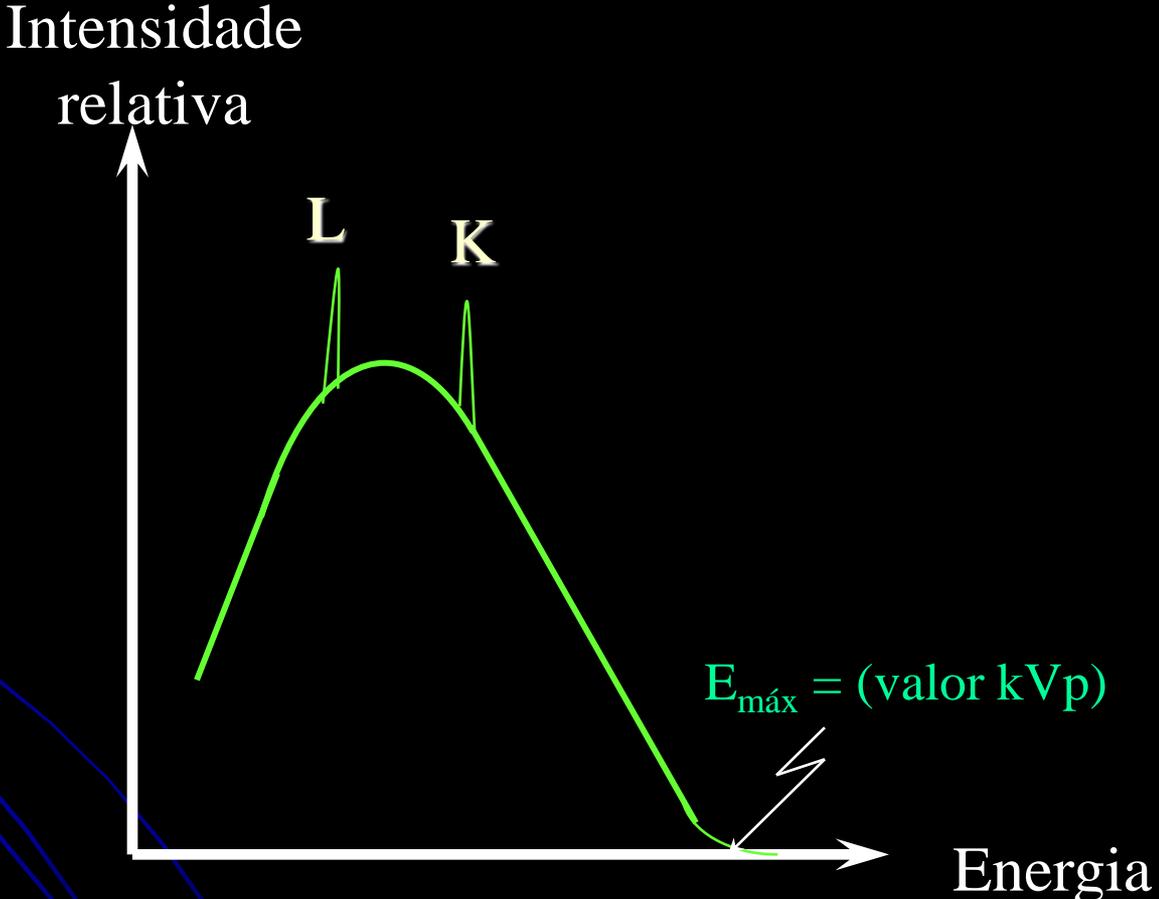


Espectro de Linhas

- Interação dos e^- do feixe com e^- orbitais dos átomos do alvo □ e^- ou fótons produzidos no alvo removem e^- das camadas mais internas dos átomos □ ionização □ e^- das camadas superiores (+ externas) decaem, ocupando o espaço vazio das camadas inferiores □ emissão de fótons de energia característica (radiação característica).

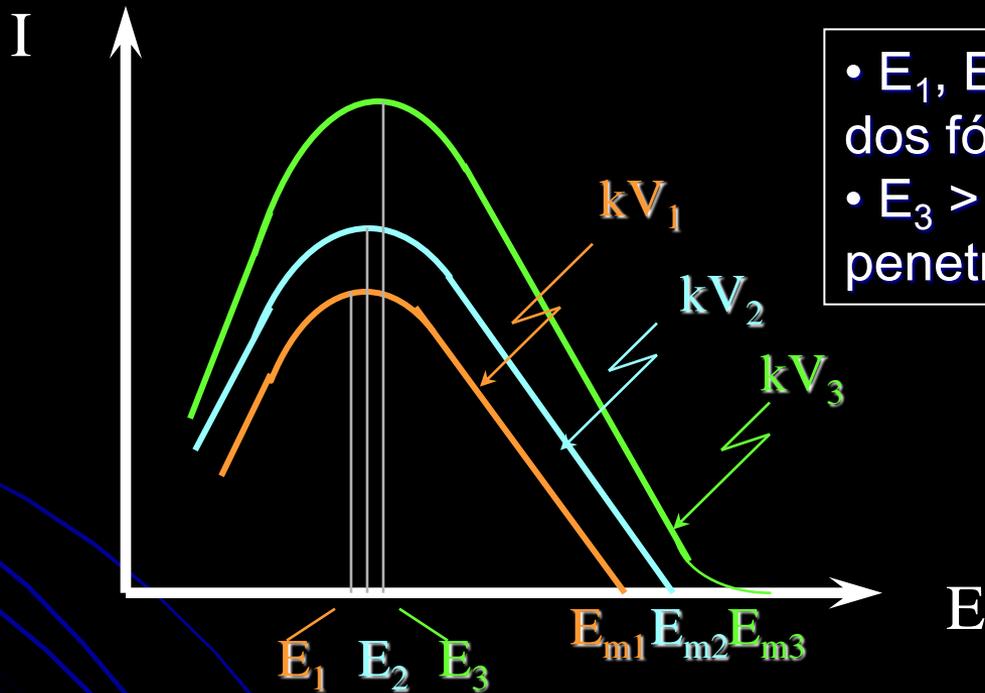


Espectro total (“Bremsstrahlung” + característico):



4.4. Fatores que afetam o espectro de raios X

Tensão entre os eletrodos (kVp)



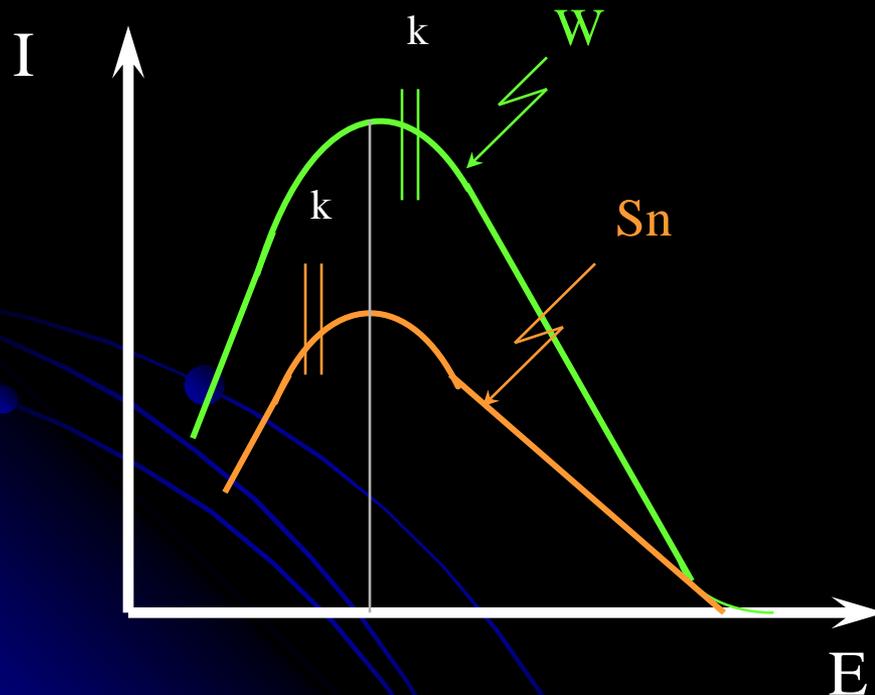
- E_1, E_2, E_3 : energia da maioria dos fótons produzidos
- $E_3 > E_2 > E_1 \Rightarrow$ poder de penetração dos fótons

Quantidade de fótons produzidos aumenta com a kV:

- qualidade do feixe proporcional à kV*
- quantidade de fótons proporcional a $(kV)^2$*

□ Corrente de tubo (mA)

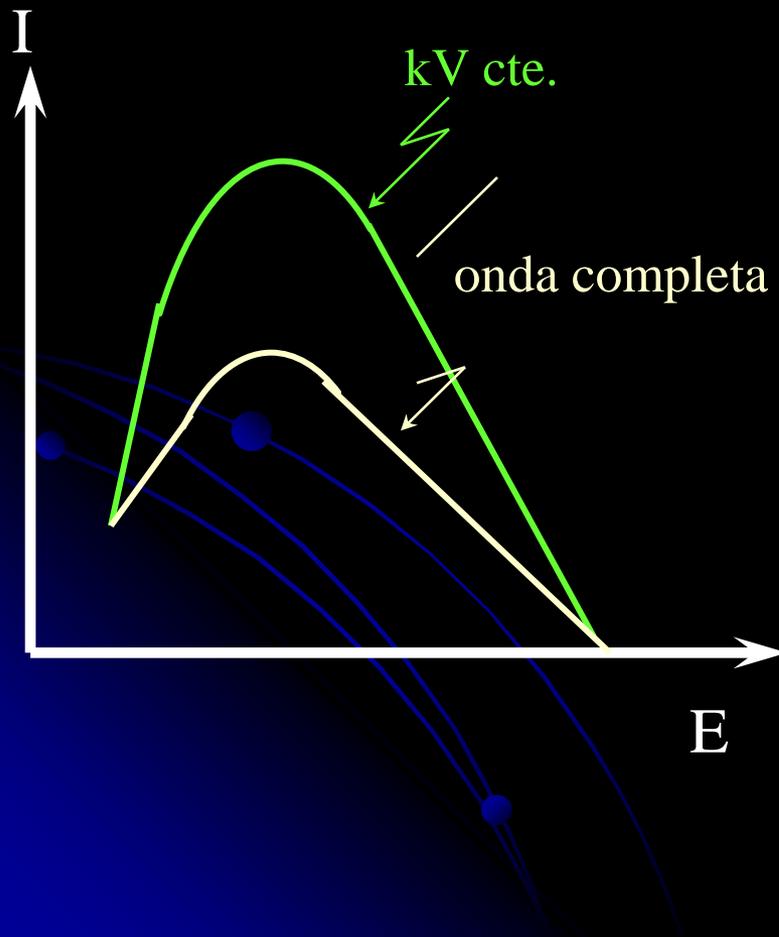
- Quanto mais corrente no tubo, maior a quantidade de elétrons produzidos no feixe e, portanto, maior quantidade de fótons de raios X.



□ Material do alvo

- Alvos com nº atômico maior produzirão mais fótons;
- para uma dada kVp, o máximo da intensidade sempre ocorre para uma dada energia dos fótons

□ Forma de onda (retificação)



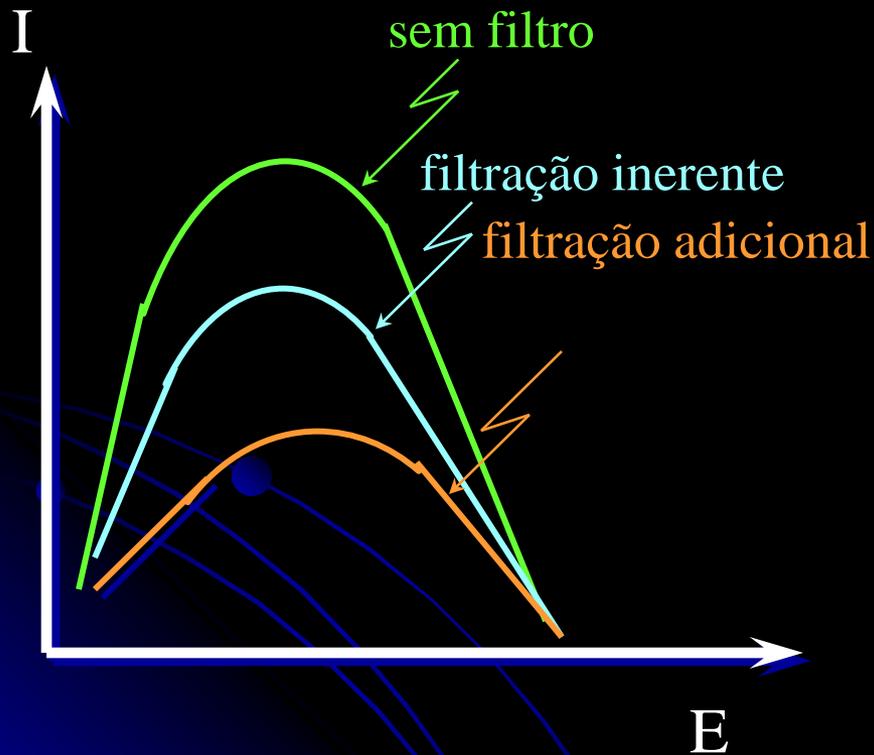
□ Filtros

- **Filtração inerente:** filtração inevitável do feixe ao ser emitido a partir do alvo (vidro do tubo);

- fótons com energia mais baixa sofrem maior absorção e, como são mais facilmente absorvidos pela matéria, não são adequados para formação da imagem, já que não contribuem para impressionar o filme

- **Filtração adicional:** elimina fótons de energia mais baixa

□ Forma de onda (retificação)



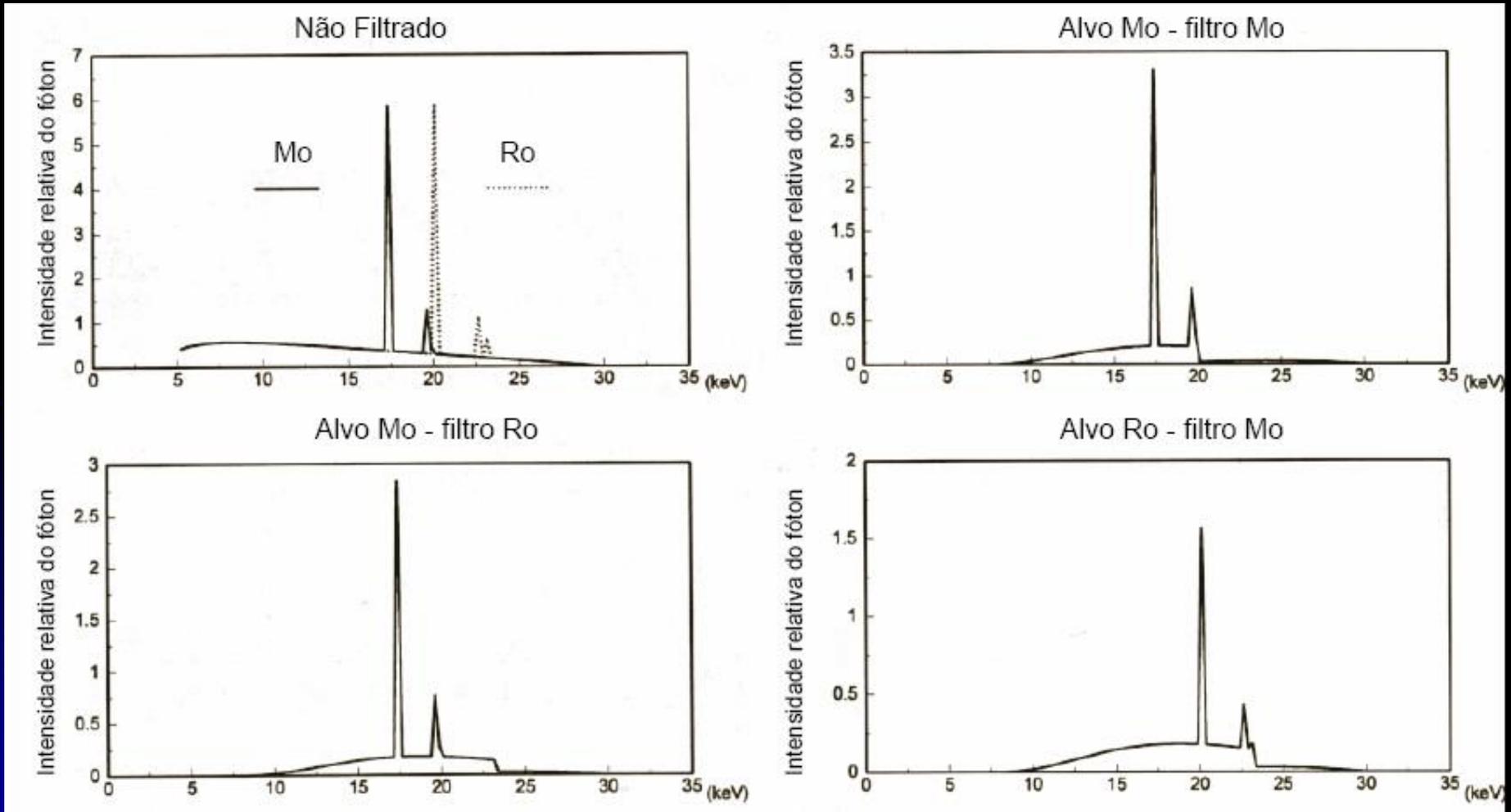
□ Filtros

- **Filtração inerente:** filtração inevitável do feixe ao ser emitido a partir do alvo (vidro do tubo);

- fótons com energia mais baixa sofrem maior absorção e, como são mais facilmente absorvidos pela matéria, não são adequados para formação da imagem, já que não contribuem para impressionar o filme

- **Filtração adicional:** elimina fótons de energia mais baixa

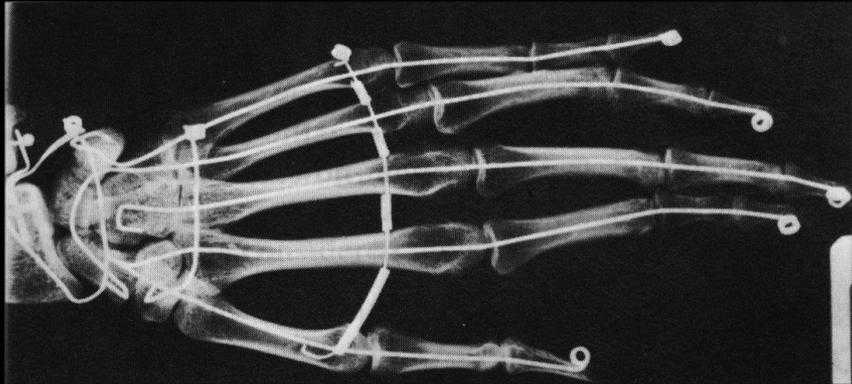
Espectros - Exemplos



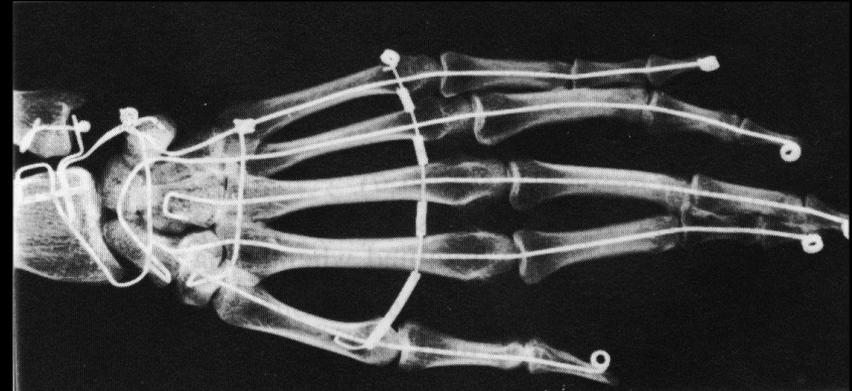
4.5. Fatores que afetam o espectro do feixe R-X

| FATOR | INTENSIDADE | QUALIDADE | COMENT. |
|-------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------|
| mA | $I_{OC} \propto mA$ | não afetada | formato espectro não afetado |
| kVp | $I_{OC} \propto (kVp)^2$ | $Q_{OC} \propto kVp$ | - |
| Z (alvo) | $I_{OC} \propto Z$ | não afetada | - |
| retificação | > para kV cte. | idem | forma onda altera o espectro |
| filtração | $I_{OC} \propto 1/f$ | $Q_{OC} \propto f$ | filtros removem R-X moles |
| dist. focal | $I_{OC} \propto 1/d^2$ | não afetada | Lei Inv. Quadrado da Distância |

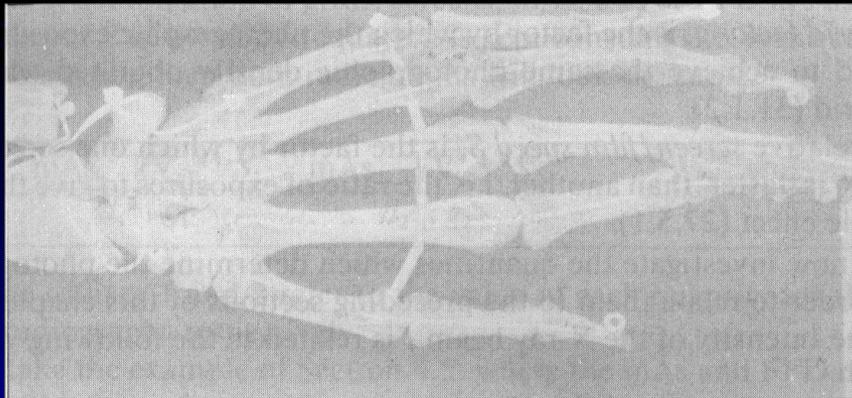
Ex. prático da Lei do Inverso do Quadrado da Distância



$d_{FF} = 50 \text{ cm} - 6 \text{ mAs}$



$d_{FF} = 100 \text{ cm} - 24 \text{ mAs}$



$d_{FF} = 100 \text{ cm} - 6 \text{ mAs}$

(*) $kVp = 50$ em todos os casos