

Instituto de Física USP

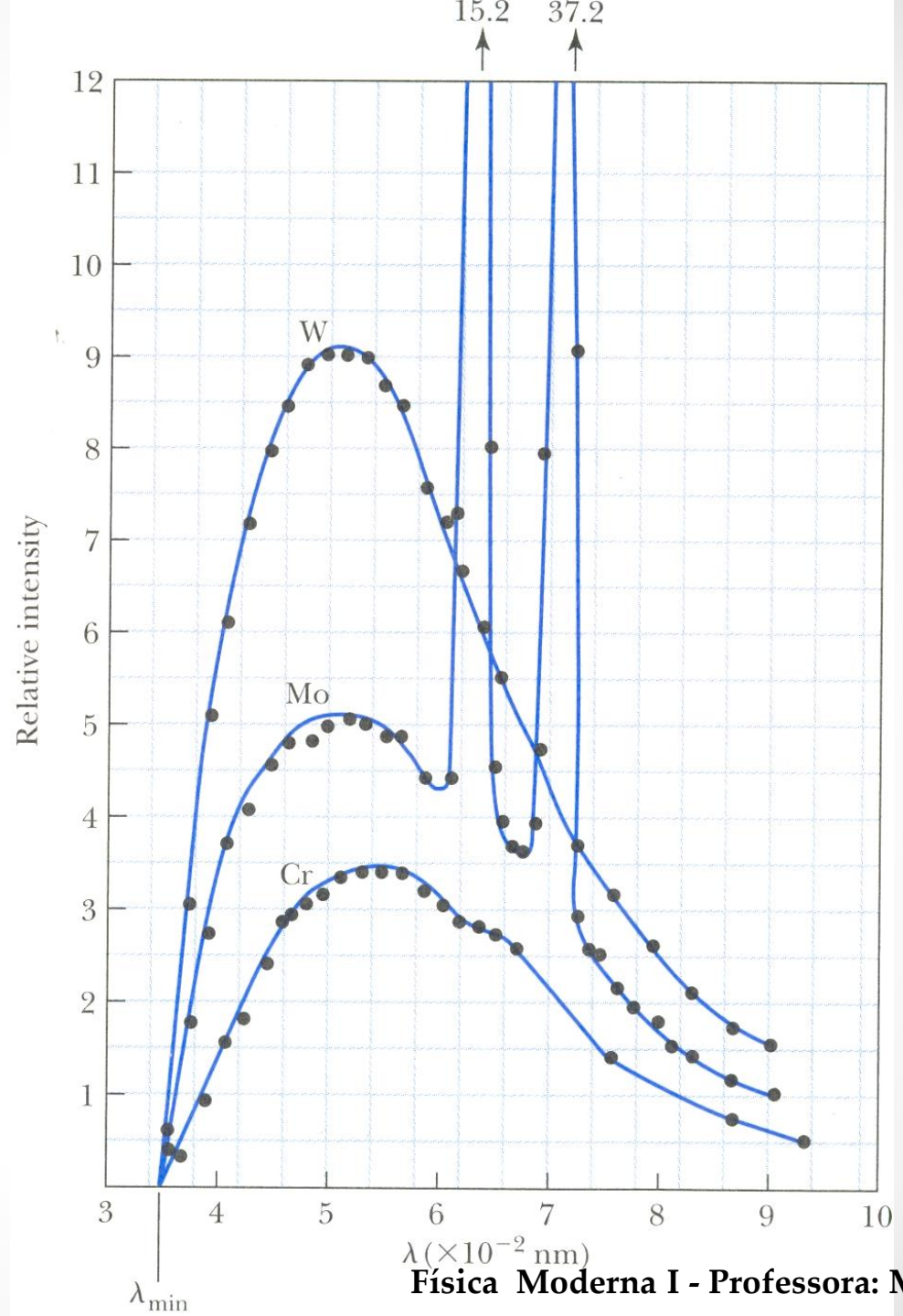
Física Moderna I Aula 12

Professora: Mazé Bechara

Aula 12 – Processos de produção de Raios-X. Solução das questões 3 e 4 da prova 1.

1. A interpretação dos processos que descrevem os espectros experimentais na criação dos raios-X. A necessidade do caráter corpuscular. Aplicações.
2. **Solução e critério** de correção das **questões 3 e 4** da prova 1.
3. A matéria e a anti-matéria - conceituação.

Intensidade relativa dos raios-X produzidos em um tubo com voltagem aceleradora de 35kV. Note que o comprimento de onda mínimo é o mesmo para os três alvos. De C. T. Ulrey, Physical Review 11, 405(1918)



Comportamento experimental

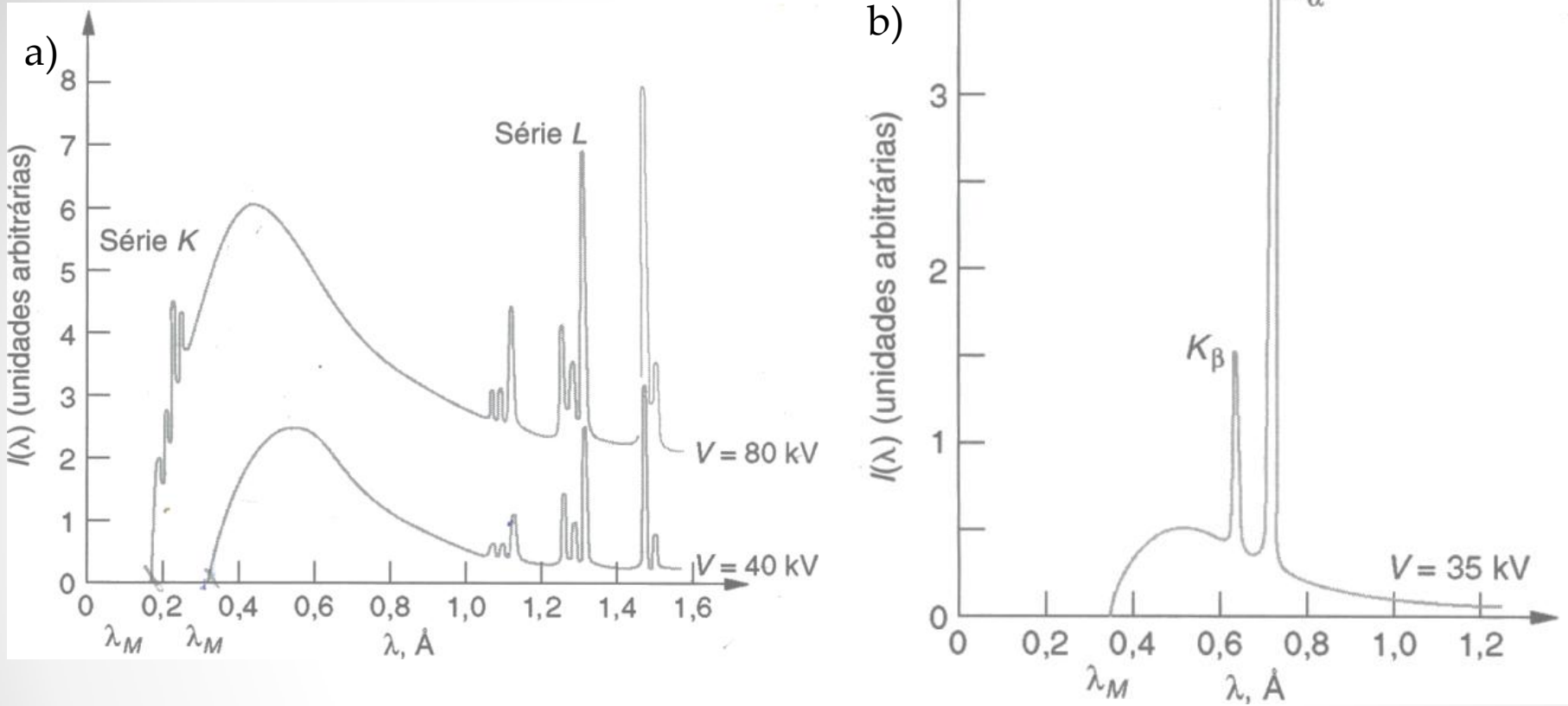


Fig. 3-18 Espectros de raios X do tungstênio (a) e do molibdênio (b). Os nomes das séries de linhas (K e L) são explicados no Cap. 4. As linhas da série L do Mo (que não aparecem na figura) ocorrem para $\lambda \approx 5 \text{ \AA}$. O comprimento de onda de corte λ_m não depende do material e é dado por $\lambda_m = hc/eV$, onde V é a tensão do tubo de raios X. Os comprimentos de onda das linhas de difração são característicos de cada material.

Principais características do espectro de Raios-X

Interpretações

Os elétrons de KeV de energia cinética, quando colidem no material, interagem com a matéria **através de dois processos:**

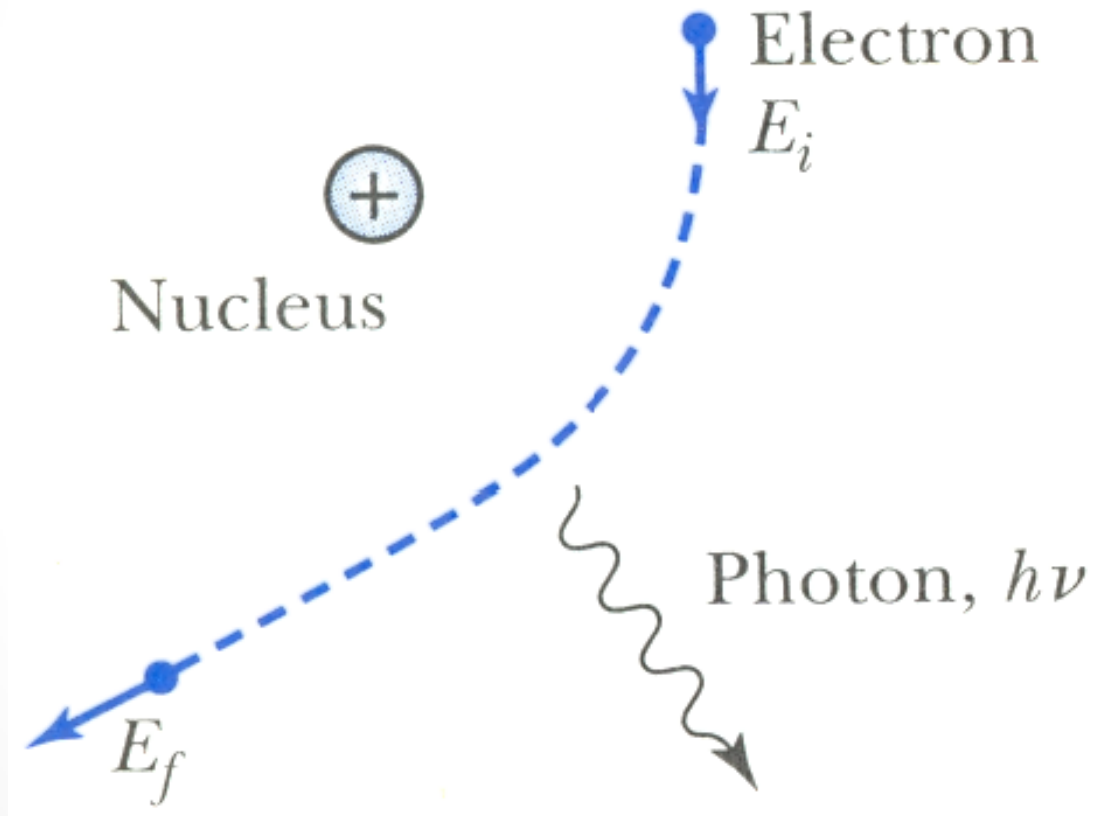
a) Espectro contínuo ou estrutura grossa do espectro de Raios-X

Os elétrons incidentes interagem (interação Coulombiana) sucessivamente com os núcleos dos átomos, enquanto atravessa o material. A energia perdida por um elétron em cada interação, que depende da distância que passou de um núcleo, permite diferentes desacelerações dos elétrons com emissão de fótons de diferentes frequências, o que forma o espectro contínuo.

Este espectro é conhecido como **efeito de *bremsstrahlung*** (radiação por desaceleração em alemão), e em certo sentido é um efeito fotoelétrico às avessas – há emissão de radiação eletromagnética (raios-X) por incidência de elétron na matéria. Mas, ☠ **Cuidado**, diferentemente do efeito fotoelétrico, a radiação é criada, não estava dentro da matéria, como era o caso dos elétrons do efeito fotoelétrico.

O processo responsável pela parte contínua do espectro

Bremsstrahlung



O comprimento de onda mínimo ou ninguém perde mais do que tem!

- Há conservação de energia para cada etapa das interações de um elétron com a matéria. A maioria deles sofre várias pequenas desacelerações, da interação com cada núcleo, emitindo um fóton. Por isto o espectro de estrutura grossa é contínuo.
-
- Poucos elétrons perdem toda a sua energia cinética em um único freamento na interação com um núcleo. Cada um deles cria um fóton com a máxima energia possível que é a energia cinética do elétron. Ou seja na criação dos raios-X de comprimento de onda mínimo:

$$E_{ce} = e\Delta V = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \quad \Rightarrow$$
$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{e\Delta V}$$

Principais características do espectro de Raios-X

Interpretações

b) espectro característico ou estrutura fina do espectro de raio X

Alguns dos elétrons incidentes podem transferir sua energia cinética, em parte ou toda, para um dos elétrons mais internos do átomo do material, arrancando tal elétron do material, e deixando vago o estado de maior energia de ligação que o arrancado ocupava, ou seja, um estado de menor energia quantizada.

Na sequência, com a abertura de uma vaga de estado com energia menor, um outro elétron ligado faz uma transição de um estado de maior para o de menor energia, e assim sucessivamente, com emissão de um fóton de energia igual à diferença de energia entre os estados atômicos, que são quantizados. Os fótons emitidos nas transições atômicas são portanto monocromáticos, e formam os picos de grandes intensidades e de pequena largura (monocromáticos). **Este tema será revisitado quando da apresentação de modelos atômicos.**

Observem novamente: a estrutura grossa (efeito de Bremsstrahlung – em diferentes materiais para elétrons de mesma energia cinética 35KV.

Os picos característicos, relacionados com as transições entre estados atômicos específicos nos átomos do material bombardeado, depois do elétron de 35kV dar energia a um estado ligado do átomo do material, o que só ocorre no Molibdênio dentre os casos mostrados, nos comprimentos de onda da figura.

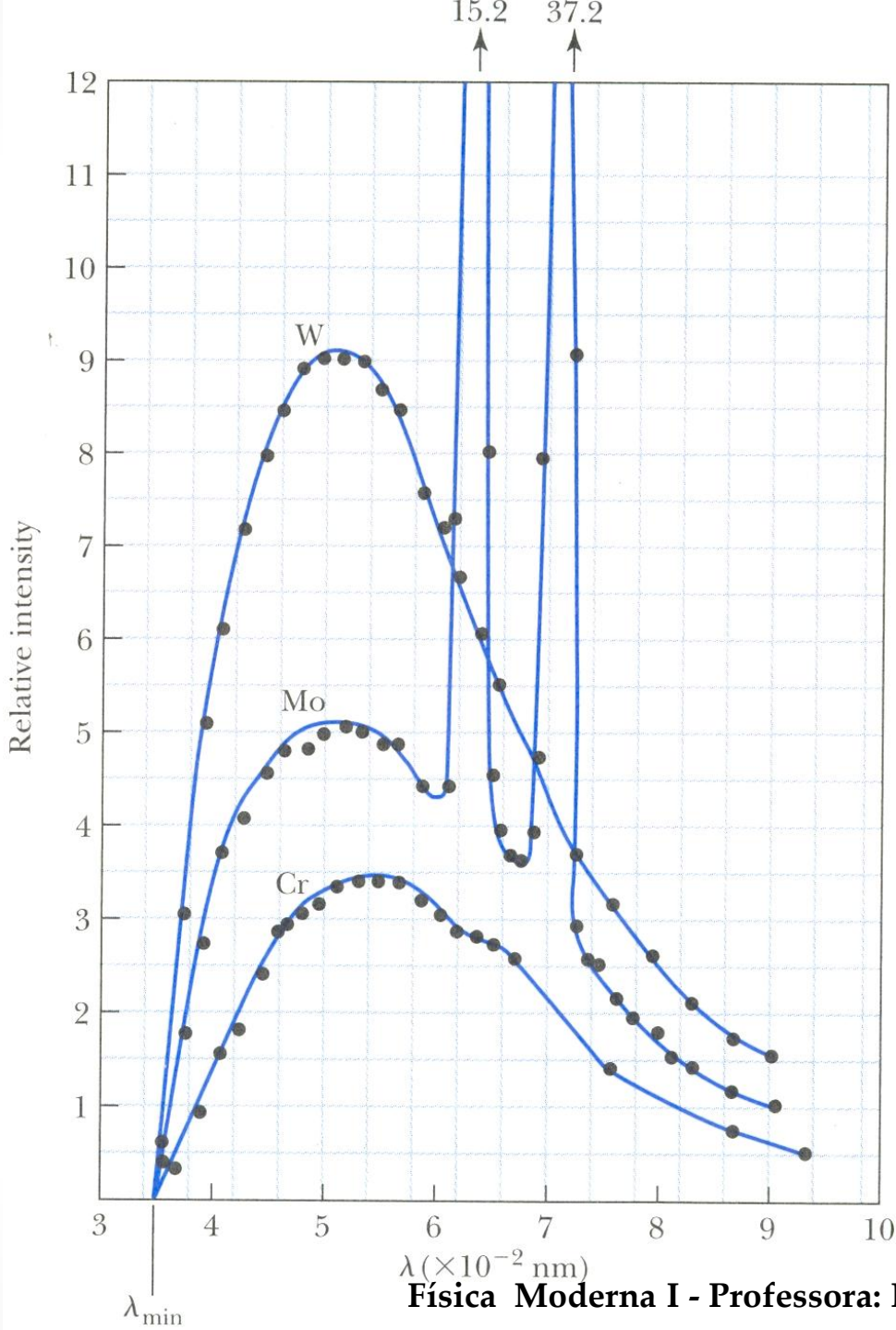


Figura do Tipler & Llewellyn

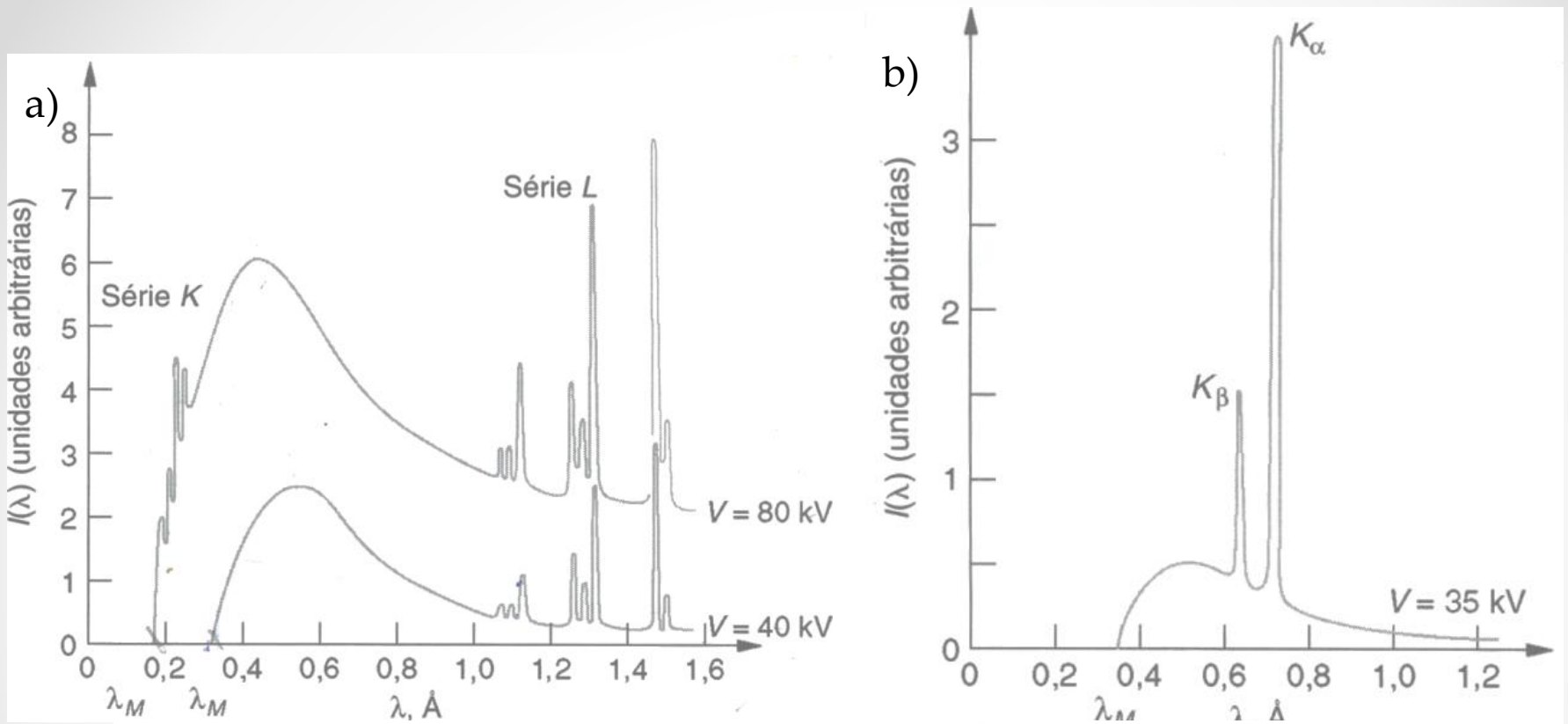


Fig. 3-18 Espectros de raios X do tungstênio (a) e do molibdênio (b). Os nomes das séries de linhas (K e L) são explicados no Cap. 4. As linhas da série L do Mo (que não aparecem na figura) ocorrem para $\lambda \approx 5 \text{ \AA}$. O comprimento de onda de corte λ_m não depende do material e é dado por $\lambda_m = hc/eV$, onde V é a tensão do tubo de raios X. Os comprimentos de onda das linhas de difração são característicos de cada material.

Ob serve os picos característicos do tungstênio para outras energias dos elétrons, em outras regiões do comprimentos de onda.

O caráter corpuscular na criação de raios X

Aplicação

- (a) Os elétrons de um tubo de TV (dos antigos que têm tubos) são acelerados até 18000V. Determine a frequência e a energia máximas dos raios-X produzidos no choque dos elétrons na tela da TV.
- (b) No caso dos aparelhos de produção de raios-X usados em radiografia de dentes, o potencial acelerador é tipicamente de 80KV. Determine a frequência e a energia máxima dos raios-X que chegam no cidadão cujos dentes estão sendo radiografados.
- (c) Se você tem um aparelho de raios-X que opera com 35kV, qual dos materiais material W, Mo e Cr, mostrados em transparência anterior, seria conveniente usar para se fazer uma boa medida do efeito Compton? Por que?

Questão 3 da prova 1

- **(0,75)** (a) Toda a radiação do **feixe** de 3mm de raio chega na placa quadrada de 3cm de lado.

- Assim:

$$P = \left\langle \frac{dU_{EB}}{dt} \right\rangle_t = \left\langle \frac{dN_f \varepsilon_f}{dt} \right\rangle_t = \left\langle \frac{dN_f}{dt} \right\rangle_t \frac{hc}{\lambda}$$

- O n úmero de fótons por segundo – equação literal e valores numéricos:

$$\left\langle \frac{dN_f}{dt} \right\rangle_t = \frac{P}{\frac{hc}{\lambda}} = \frac{80W}{\frac{12408 \times 1,6 \times 10^{-19} J \overset{o}{\underset{o}{\text{\AA}}}}{4000 \overset{o}{\text{\AA}}}} = 1,6 \times 10^{20} \frac{fotons}{s}$$

- **(0,75)** (b) Alguns do fótons interagem da seguinte forma: **um fóton é absorvido por um elétron ligado** do metal. Praticamente a totalidade da energia é transferida ao elétron ligado, mas **parte do momento linear é transferido à rêde (ou núcleo da rede)**. *Quem não colocou o conceito da frase em azul, conceito este associado ao fato do elétron ser ligado, perdeu apenas 0,05 desta vez. Nas próximas perderá mais.*

Questão 3 da prova 1

- **0,75** (c) Para o elétron menos ligado, com energia de ligação $-\phi$ tem-se a conservação de energia:

$$h\nu = \varepsilon_e^{cin\max} + |\varepsilon_e^{lig\min}| = eV_o + \phi$$

- Ou numericamente $3,10eV = eV_o + 2,0eV$

$$eV_o = 3,10 - 2,0 = 1,10eV$$

- Ou $V_o = 1,10V$

- **(1,0)** (d) **(0,5)** Os **fótons** do feixe, cada um **com 3,10eV**, absorvidos pelos **elétrons menos ligados**, energia ligação mínima = $-\phi = -2,0eV$ (**conceito conhecido**) deixam os elétrons com a energia cinética máxima eV_o : 1,10eV.

Questão 3 da prova 1

- (d) **(0,5)** continuação: Já os elétrons que saíram com energia cinética mínima, que é zero, tinham energia de ligação máxima dentre os que saíram, ou seja, igual ao valor negativo da energia do fóton (conservação de energia).

$$h\nu + \varepsilon_e^{lig\max} = \varepsilon_{cine}^{\min}$$

- Numericamente: $\varepsilon_e^{lig\max} = -h\nu = -3,10eV$

Questão 4 da prova 1

- **(0,75)** (a)
- **(0,25)** Para qualquer ângulo de espalhamento, portanto também para 120° há espalhamento com o mesmo comprimento de onda que o incidente, portanto $\lambda = 0,0177 \text{ \AA}$

- **(0,50)** Há ainda outro comprimento de onda:

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_{oe}c}(1 - \cos\theta) = 0,0177 + 0,0243 \text{ \AA}(1 - \cos 120) = 0,05415 \text{ \AA}$$

- **Se só calculou $\Delta\lambda$, sem chegar em λ' : ganha 0,20**
- **Se errou o $\cos 120$: perde 0,10**
- **Se subtraiu em vez de somar λ ao $\Delta\lambda$: perde 0,15**

Questão 4 da prova 1

(0,75) (b) Gráfico na aula.

- **escala dos comprimentos de onda qualitativamente correta: 0,15**
- **Se não estiver claramente monocromático: ganha 0,35 pelo gráfico (que vale 0,60).**

(1,0) (c) (0,40) os fótons espalhados a 120 graus com o mesmo comprimento $\lambda = 0,0177 \text{ \AA}$ foram espalhados por elétrons ligados ou núcleos, e neste caso a perda de energia é pequena já que o comprimento de onda Compton é pelo menos 2000 menor do que $0,0243 \text{ \AA}$ para o elétron livre, o que significa que não mudou praticamente o comprimento de onda, portanto a energia do fóton, mas foi transferido o momento linear para a partícula ligada no material. **Nenhuma partícula sai do material associado a este processo de espalhamento.**

- (0,45) Os fótons espalhados com comprimento de onda de 0,0541 angstroms foram espalhados pelos elétrons “livres”, ou seja, aqueles cuja energia de ligação são desprezíveis em relação à energia do fóton incidente. Neste espalhamento há conservação de energia e momento linear entre o fóton incidente e o espalhado e o elétron “livre”. (0,15) Os elétrons “livres” neste último processo são **arrancados do material se tornando efetivamente livres com energia cinética igual à diferença de energia entre o fóton incidente e o espalhado. Eles formam corrente Compton.**

Questão 4 da prova 1

(0, 5) (d) (0,25) Segundo a visão ondulatória só haveria o feixe espalhado com o mesmo comprimento de onda que o feixe incidente: 0,0177 angstroms.

(0,25) Isto porque as cargas do material oscilam com a mesma frequência da onda monocromática incidente e, desta oscilação de cargas, seriam geradas outras ondas eletromagnéticas de mesma frequência da oscilação de carga, portanto da onda incidente, em qualquer direção perpendicular à direção de oscilação da carga, em particular a 120 graus da direção incidente.

TEC 2 – 2ª chance para aprimorar

- Os alunos que já entregaram o tec 2 podem, se quiserem, entregar **uma 2ª versão de questões, em parte ou totalidade, até 19h10min da próxima sexta-feira, 20 de abril de 2012.**
-
- **Serão corrigidas as 2ª versões das questões, desde que tenham sido feitas e entregues na 1ª versão.**

Matéria e Anti-Matéria - informações

Antipartículas são as partículas da chamada **antimatéria**. **São em pequeníssima quantidade em relação às partículas da matéria.**

Antipartícula é a denominação que se utiliza para partículas que apresentam: **a mesma massa** (propriedade da física clássica), spin (**propriedade quântica**) e paridade (**propriedade quântica**) de **sua partícula** – aquela que existe em grande quantidade na matéria. Porém, **a carga elétrica** (propriedade também clássica), número bariônico, número leptônico, estranheza, charme, força trifônica, beleza e top (**propriedades quânticas**) **são opostos aos de sua partícula**. **Para cada tipo de partícula da matéria corresponde uma antipartícula.**

No caso de **partículas neutras, como o nêutron, pode existir a antipartícula também**. No antinêutron o momento magnético é oposto ao do nêutron e seus quarks são os antiquarks existentes no nêutron.

Algumas partículas neutras, como pi neutro, são suas próprias antipartículas - *ou seja não há aniquilação de pares !*

O fóton, que não é exatamente matéria, também é sua antipartícula.

Fatos históricos sobre matéria e antimatéria

1. A existência de antimatéria foi prevista por **Dirac em 1928** por entender que a energia da partícula deveria contemplar os dois sinais da raiz quadrada: $E = T + m_0 c^2 = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$
2. O **par elétron-pósitron** foi observado pela 1ª vez na **radiação cósmica por Carl David Anderson(*) em 1932**. Ganhou o Nobel de Física em 1936.
3. O **pósitron** (anti-elétron) foi observado em **laboratório pela primeira vez em 1955**.

(*)Anderson descobriu também a partícula muon. Este físico americano se recusou a trabalhar na fabricação da bomba atômica americana durante a II Guerra Mundial, alegando razões de consciência. E foi criticado e até acusado de nazista por esta atitude.

Não é fácil ser um pacifista, especialmente em tempo de guerras!

Experimento histórico: o aparecimento “do nada” da trajetória de duas partículas de cargas opostas e massas idênticas à do elétron (**uauh!**).

