Instituto de Física
USP

Física V - Aula 15

Professora: Mazé Bechara

Avisos

- 1. 9 estudantes da média de um pouco mais de trinta que assistem aulas (39 fizeram a 1ª prova) responderam o questionário de avaliação da disciplina. Darei retorno do resultado, e como esperam tais alunos, em ações. O número não dá valor estatístico na avaliação, mas certamente dá o valor da qualidade dos 09 alunos protagonistas.

2. Em aula futura (em 1 semana aproximadamente) discutirei as questões 1ª prova e os critérios de avaliação dela.

Aula 15 – Caráter dual da radiação eletromagnética na produção de Raios-X

- 1. Comentários finais sobre o efeito Compton.
- 2. Raios-X - Breve histórico da sua descoberta e aplicações.
- 3. O Tubo que cria raiox-X por incidência de elétrons, com energia cinética da ordem de KeV, sobre matéria pesada.
- 4. Principais características do espectro de intensidade de Raios-X versus comprimento de onda ou frequência. A necessidade da visão fotônica para entender a frequencia de corte e a estrutura fina ou picos caracaterísticos.

Efeito Compton - O que não se discutiu

a)A intensidade da radiação espalhada a cada ângulo. E ela depende da comprimento de onda incidente e do material que espalha a radiação .

b)Tal intensidade, dos picos Compton e Thomson, podem ser calculados com a fórmula de Klein-Nishima, primeira ordem de um cálculo com a eltrodinâmica quântica.

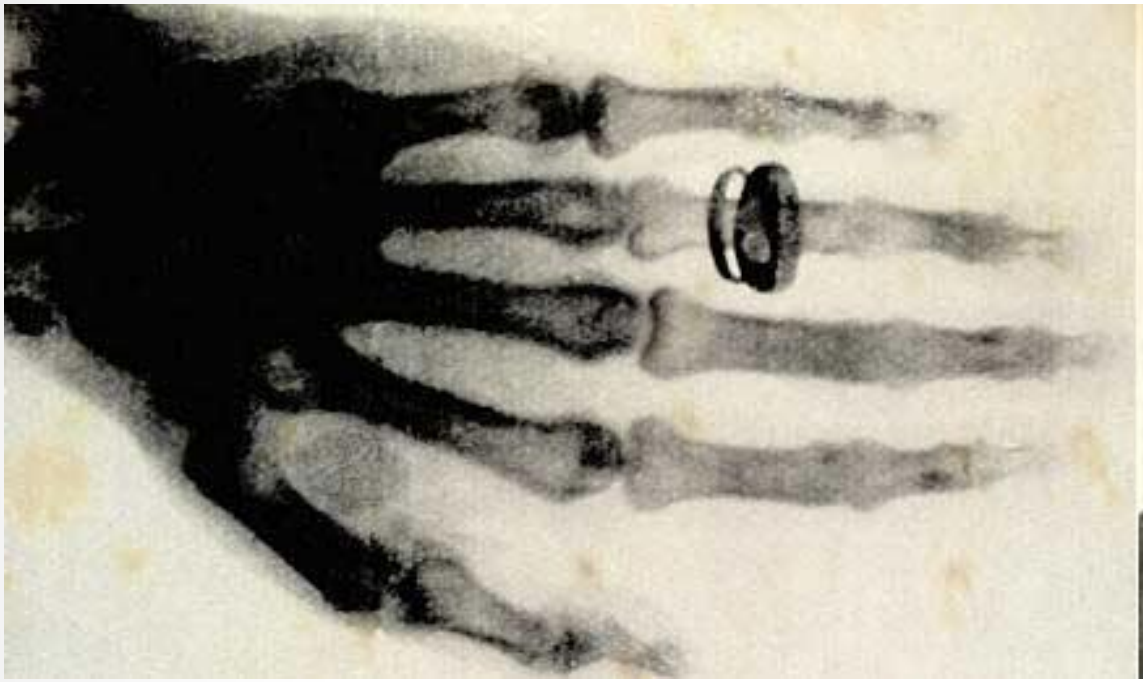
c)A eletrodinâmica quântica (QED), teoria que qantiza o campo eletromagnética, foi introduzida nos anos 20 de 1900 por Dirac, e teve um desenvolvimento para a forma atual principalmente nos trabalhos de Schwinger , já no final da década de 40, e com os diagramas de Feynmann se tornou uma teoria "usável", e modelo para as teorias posteriores, como QCD .

d) **A competição entre os processos de espalhamento (Compton e Thomson) e de absorção de fótons (efeito fotoelétrico) por materiais será discutida qualitativamente na próxima aula**.

Efeito Compton - Aplicação

1. Pode ocorrer o efeito Compton com a luz? Justifique "quantitativamente".

Descobridor dos Raios – X: Wilhelm Conrad Röntgen (1845 —1923) físico alemão - 1º Prêmio Nobel de Física (1901)



Estudava os efeitos dos raios catódicos (*) quando observeu que "outros raios" eram produzidos quando os raios catódicos batiam nos vidros do tubo. Chamou-os de Raios-X por não saber qual a sua natureza.

(*)Thomson mostrou em 1897 que os raios catódicos eram elétrons arrancados do metal por efeito termoiônico e ganhou o premio Nobel de Fisica em 1906.

A primeira radiografia de Wilhelm Röntgen.

Há controvérsias sobre de quem seria a mão: autores dizem que seria da esposa **de Röntgen.** *e que a protuberância em um dos dedos seria o anel dela (neste local?). Outros dizem seria a mão de um biólogo colaborador e a protuberância seria calcificação em um de seus dedos.*

O nome vem do fato que ele não tinha idéia da natureza de tais raios - era uma incógnita, o X da questão!

Produção de Raios-X - Informações Históricas

1. Em **1895 Wilhelm C. Röntgen** estudava a fluorescência de certas substâncias com um **Tubo de Raios Catódicos**, quando observou **emissão de algo** que deu o nome de **Raios-X. Dois meses depois** de sua descoberta, **o equipamento – tubo de raios-X -** estava sendo usado na Medicina para se obter ***radiografia dos ossos. Talvez tenha sido uma das mais evolução do conhecimento científico para uso na sociedade.***

2. Só em **1913, portanto mais de década depois da desco berta, *W. H. Bragg*** *(pai)* **e *W. L. Bragg*** *(filho)* **mostram que os Raios-X sofrem difração por cristais** – e **geram a convicção de que se trata de onda eletromagnética (difração de Bragg),** com **comprimento de onda da ordem de Angstrons.**

Condizente com a natureza ondulatória da luz – raios-X são ondas eletromagnéticas de frequencias muito maiores que a da luz!

http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/xraydiffraction/xraydiffraction_index.htm

Produção de Raios-X - Informações Históricas

3. **Em 1913-1914, ou seja, paralelamente aos estudos dos Bragg, Moseley (físico inglês)** estudou o **espectros de linha (estrutura fina) emitidos por muitos elementos,** e a regra do comprimento de onda deles. *(Este assunto será tratado um pouco mais adiante depois de modelos atômicos).*

Moseley morreu aos 27 anos em 1917 na 1ª guerra mundial, na qual lutou como voluntário, mesmo desaconselhado por seus mestres acadêmicos!

4. **Em 1923, Compton** *(que esteve no Brasil em 1941)* mostra que raios-X têm também **caráter corpuscular** quando descreve o espalhamento **de Raios-X** pela matéria (**efeito Compton**). E ganha o prêmio Nobel de Física em 1927. **(Einstein ganhou o prêmio Nobel em 1921).**

O caráter corpuscular, como proposto por Einstein, é necessário para descrever os dois fenômenos acima.

Os tubos de Raios-X

Os Raios-X podem ser produzidos pela incidência de elétrons com energia cinética da ordem de keV sobre diferentes materiais, principalmente os pesados (grandes massas atômicas).

Os tubos modernos, usados em aplicações atualmente, foram desenvolvidos pelo americano Willian David Coolidge: têm filamentos em geral de tungstênio, e o anodo (material de colisão) é muito comumente de cobre, molibdênio ou tungstênio.

Tubo de raios-X

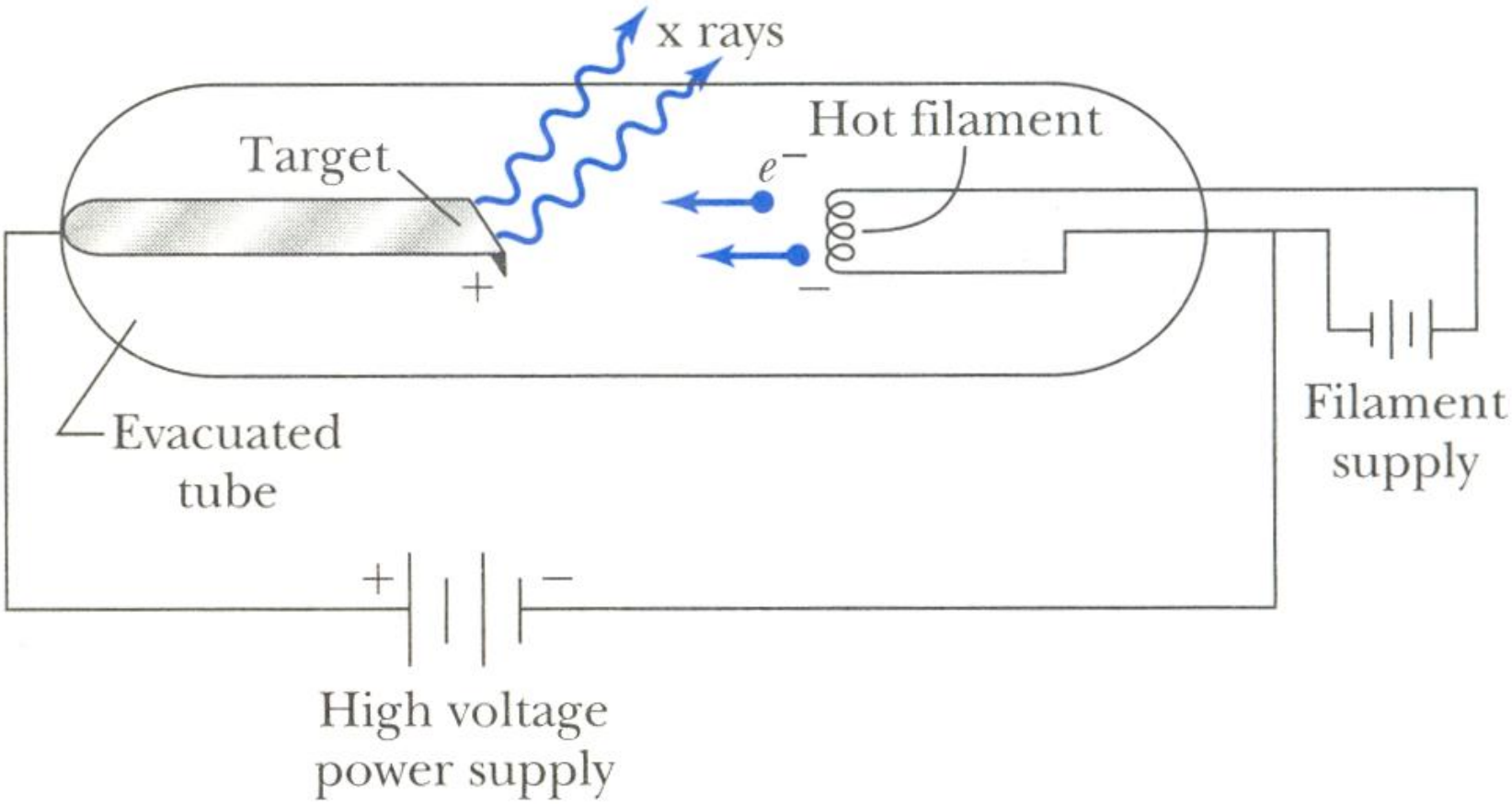
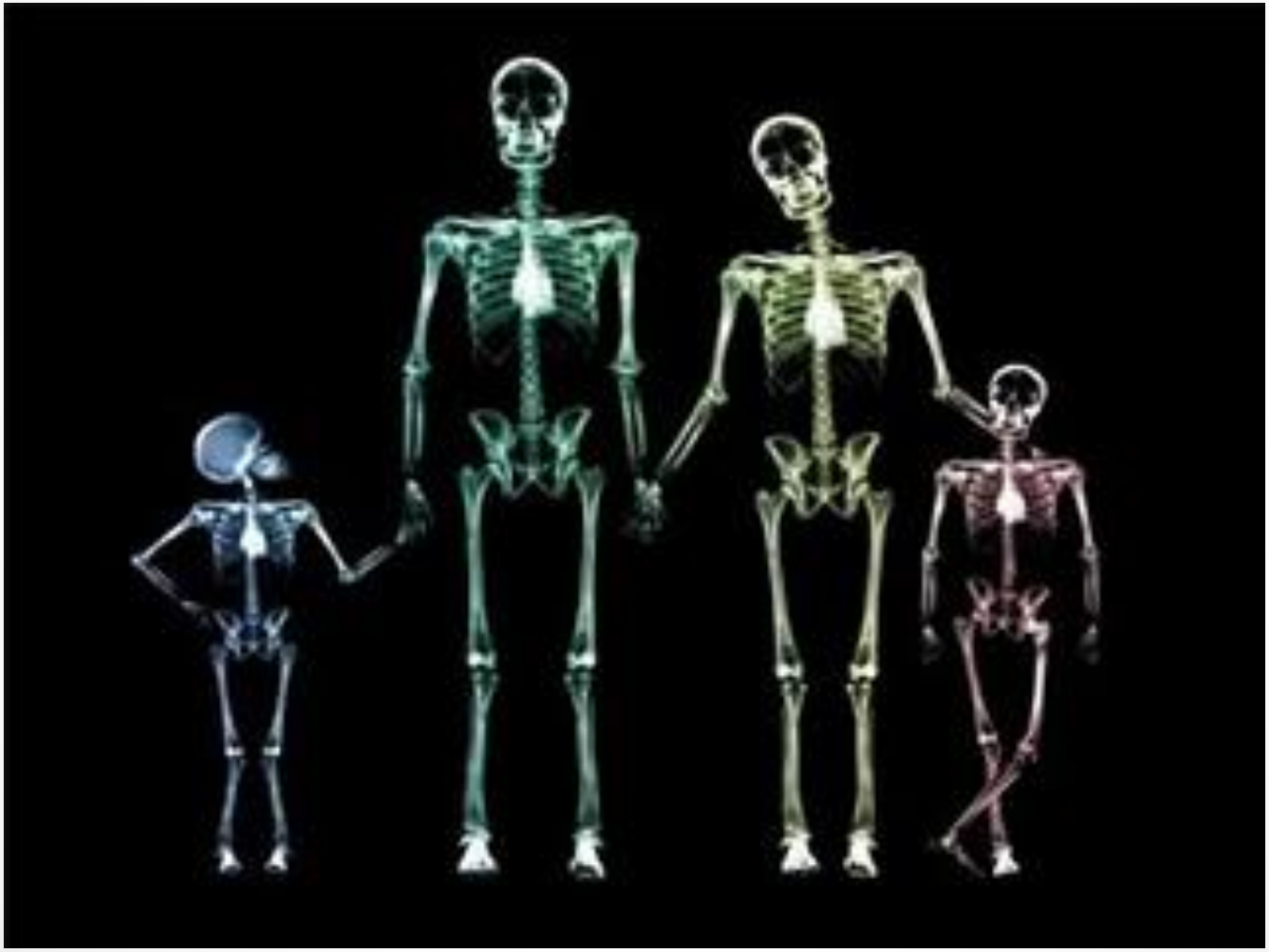


FIGURE 3.16 Schematic of x-ray tube where x rays are produced by the bremsstrahlung process of energetic electrons.

Principais características dos Raios-X

1. **Não são desviados por fortes campos magnéticos (**fato que indicou nas origens tratar-se de radiação eletromagnética, diferentemente dos "raios catódicos" que Thomson mostrou serem partículas materiais "leves" carregadas – os elétrons).
2. **Marcam, de forma fluorescente, alguns materiais quando incidem sobre eles.**
3. **Atravessam materiais opacos à luz, mas são bloqueados por relativamente finas espessuras de materiais metálicos, especialmente o chumbo. (Peça o aventalzinho de chumbo ao tirar radiografia no dentista , e proteja a sua glândula tiroide!** ***E quando tirar radiografia do tórax use o aventalzinho para proteger sua região genital.)***
4. **No corpo humano penetram (se transmitem) facilmente pelo tecido e nervos, mas são opacos para os ossos. Esta opacidade vem do fato que são fortemente absorvidos (por efeito fotoelétrico) pelo cálcio dos ossos.**
5. ***O que se observa nas chapas de raios - X (radiografia) é, portanto, a "sombra" dos ossos (cheios de cálcio).***

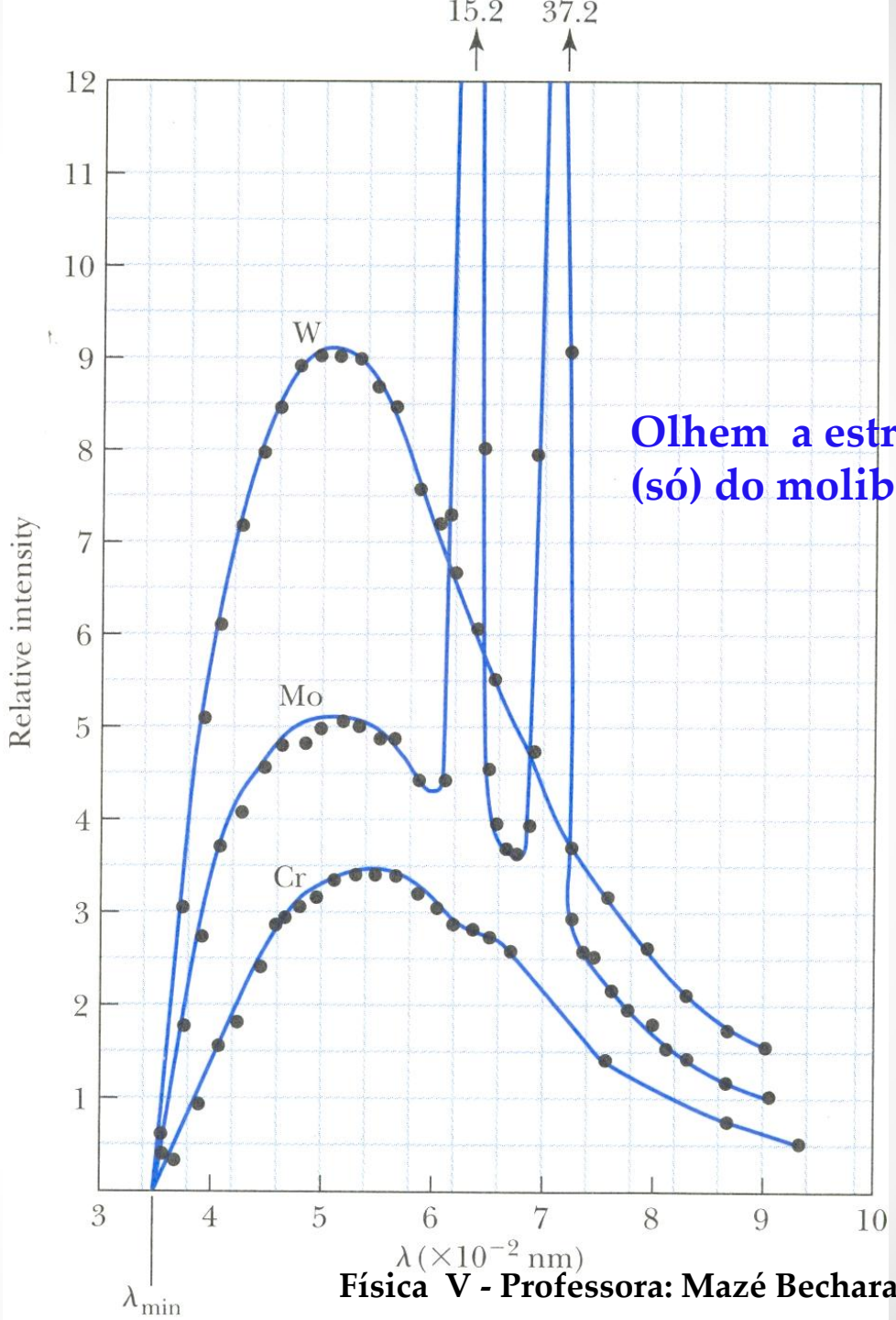
Raios-X - um exemplo familiar



Intensidade relativa dos raios-X produzidos em um tubo com voltagem aceleradora de 35kV no cromo, molibidênio e tungstênio.

Note que o comprimento de onda mínimo é o mesmo para os três alvos.

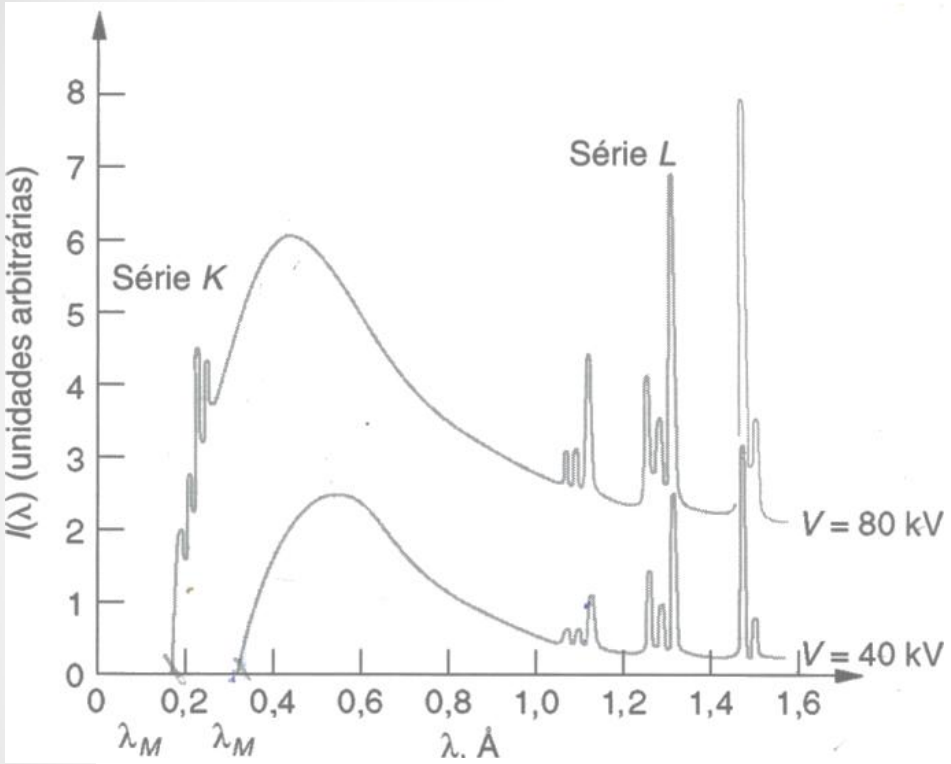
De C. T. Ulrey, Physical Review 11, 405(1918)



Olhem a estrutura fina (só) do molibidênio

a) **O tungstênio mostra sua estrutura fina (séries L e K) – características do material, que independem do potencial acelerador de elétrons.**

b) **A estrutura fina do molibidênio (série K). A série L só aparece para λ~5Angstrons**



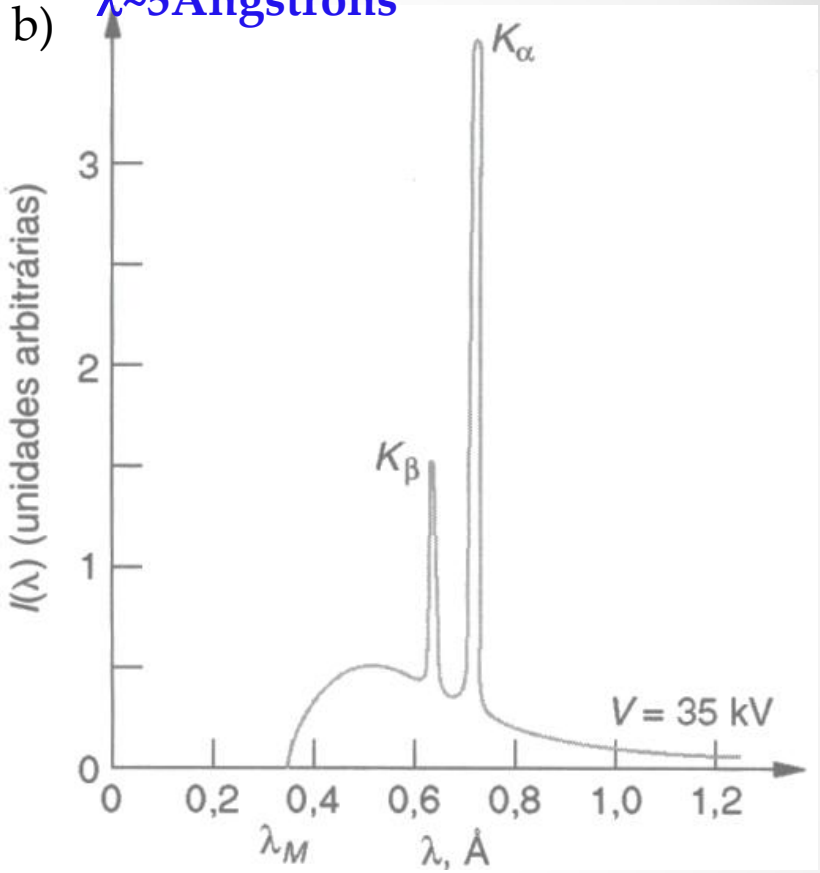


Fig. 3-18 Espectros de raios X do tungstênio (*a*) e do molibdênio (*b*). Os nomes das séries de linhas (*K* e *L*) são explicados no Cap. 4. As linhas da série *L* do Mo (que não aparecem na figura) ocorrem para $\lambda \approx 5$ Å. O comprimento de onda de corte λ_m não depende do material e é dado 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.

Figura do Tipler & Llewellyn

Principais características do espectro de Raios-X gerados na colisão de elétrons com a matéria

1. Os espectros têm uma **parte contínua** (estrutura grossa com variação de intensidade lenta com o comprimento de onda) **cuja forma depende essencialmente do potencial acelerador dos elétrons,** e praticamente independe do material com o qual os elétrons colidem (do anodo).
   a) **Os espectros têm um comprimento de onda mínimo (uma frequência máxima) que depende apenas do potencial acelerador dos elétrons.**
   b) **A forma é a mesma para qualquer material com o qual os elétrons colidem, mas a intensidade depende do material.**

2. Há uma **estrutura fina,** ou seja, **alguns comprimentos de onda são emitidos com grande intensidade, se destacando sobre a estrutura grossa.** Tais comprimentos de onda, praticamente monocromáticos, **dependem do material, e independem do potencial acelerador** dos elétrons que colidem. ***São os chamados picos característicos (do material) ou estgrutura fina do espectro.***

O espectro dos Raios-X produzidos

Questão: Quais aspectos não poderiam ser entendidos pelo eletromagnetismo clássico? Por que?

1. A **parte contínua** (estrutura grossa) do espectro?

2. com **comprimento de onda mínimo (uma frequência máxima) que depende apenas do potencial acelerador dos elétrons?**

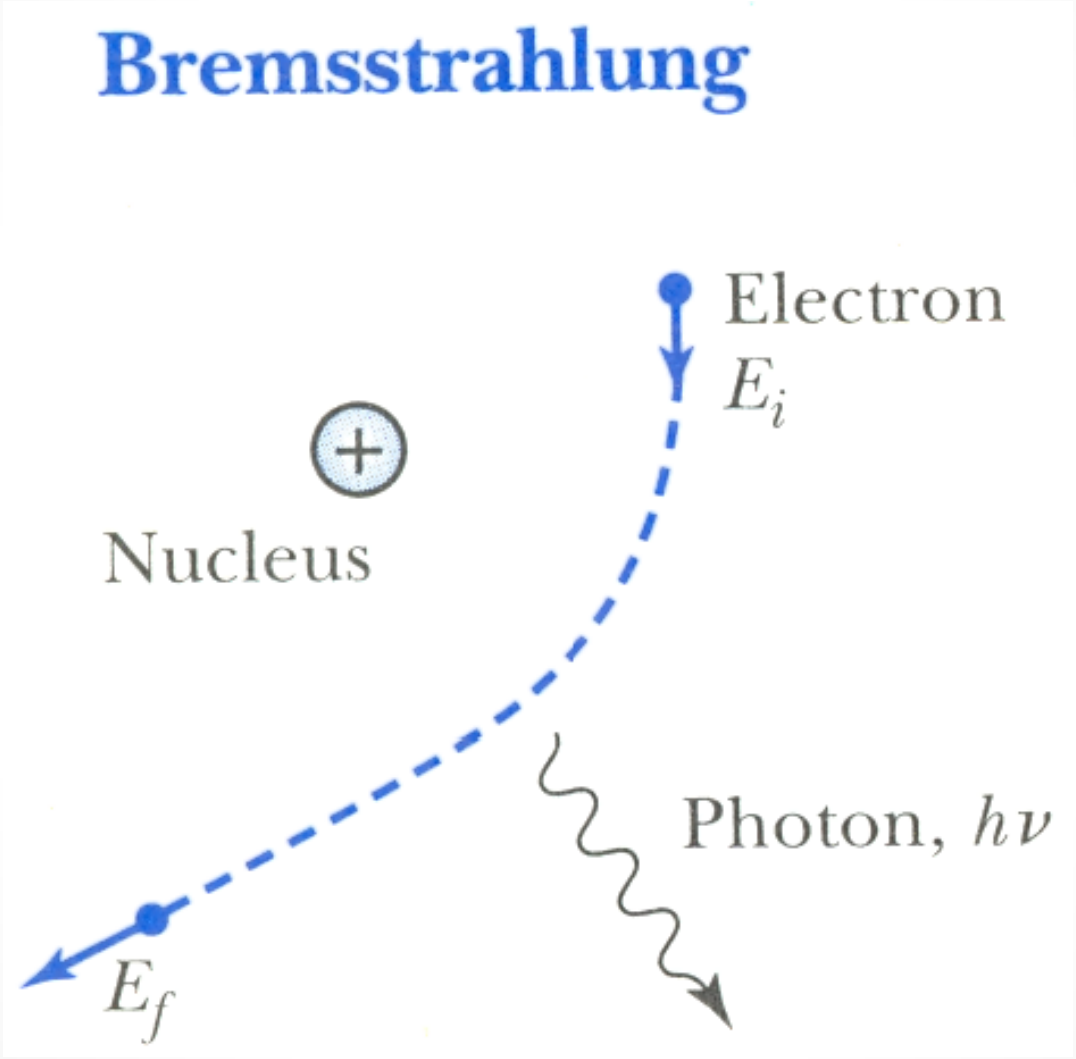
3. A **estrutura fina se destacando sobre a estrutura grossa que depende do material, e independem do potencial acelerador** dos elétrons que colidem?

Processo que gera Raios-X segundo o eletromagnetismo clássico

Na **interação Coulombiana** dos elét*rons* com os constituintes dos átomos, ao colidir com a matéria, **eles iriam perdendo a sua energia cinética, até atingir o repouso, emitindo um espectro contínuo, a estrutura grossa** do espectro de Raios-X. **Porém, não haveria razão para haver um corte inferior no comprimento de onda e superior na frequencia, e muito menos fortes intensidades monocromáticos (espectro característico de estrutura fina) que dependem do material.**

Assim a eletrodinâmica clássica prevê a criação de radiação com estrutura grossa, mas não com o corte na frequencia/comprimento de onda, e nem a estrutura fina do espectro.

O processo responsável pela parte contínua do espectro - visão fotônica



Processo que gera o espectro contínuo de Raios-X - visão fotônica

1. **Os elétrons de KeV de energia cinética incidentes na matéria, interagem** (interação Coulombiana) **com os núcleos dos átomos (carga +Ze). Em cada interação com um núdleo o elétron** emite um fóton de **energia hν, igual ao valor de energia cinética que perdeu em cada** interação, até parar, **o que resulta no espectro contínuo de frequencias/comprimento de onda.**

2. **A diferença da explicação fotônica para a clássica é que se o elétron gera um fóton de energia hν em cada interação, há uma frequência limite máxima que corresponde à perda de toda a energia cinética em uma única interação.**

3. **Este processo é conhecido como *bremsstrahlung*** (radiação por desaceleração em alemão).

O comprimento de onda mínimo.

- **Um elétron para depois de uma única interação, emitindo um único fóton - *ou ninguém perde mais do que tem!***

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

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{e\Delta V}$$

Energia cinética de elétrons virando fótons...

Muitos gostam de dizer que o ***processo bremsstrahlung*** é um **efeito fotoelétrico às avessas:** há emissão de radiação eletromagnética (raios-X) por incidência de elétrons energéticos na matéria. ***Você concorda com esta idéia? Por que?***

☠ ***Cuidado***: os elétrons estavam no interior da matéria e são arrancados, não criados na interação da radiação com a matéria, diferentemente da produção de raios-X na qual a **radiação é criada quando elétrons interagem com a matéria.**

A estrutura fina do espectro de Raios-X

tem que haver quantização nas energias dos estados atômicos

1. Alguns dos elétrons incidentes **podem transferir parte, ou toda a energia cinética para um dos elétrons mais internos do átomo do material, arrancando tal elétron do átomo.**

Havendo um **estado de energia menor disponível**, outro elétron ligado **faz a transição de um estado de maior para este de menor energia, e assim sucessivamente, com emissão de um fóton** em cada transição eletrônica no interior do átomo. Porém estes **"estados atômicos" teriam que ter energias quantizadas, já que na estrutura fina há "linhas" monocromáticas.**

Este processo é o responsável pelos **picos característicos (do material) no espectro de de raios-X gerados por colisões com elétrons.**

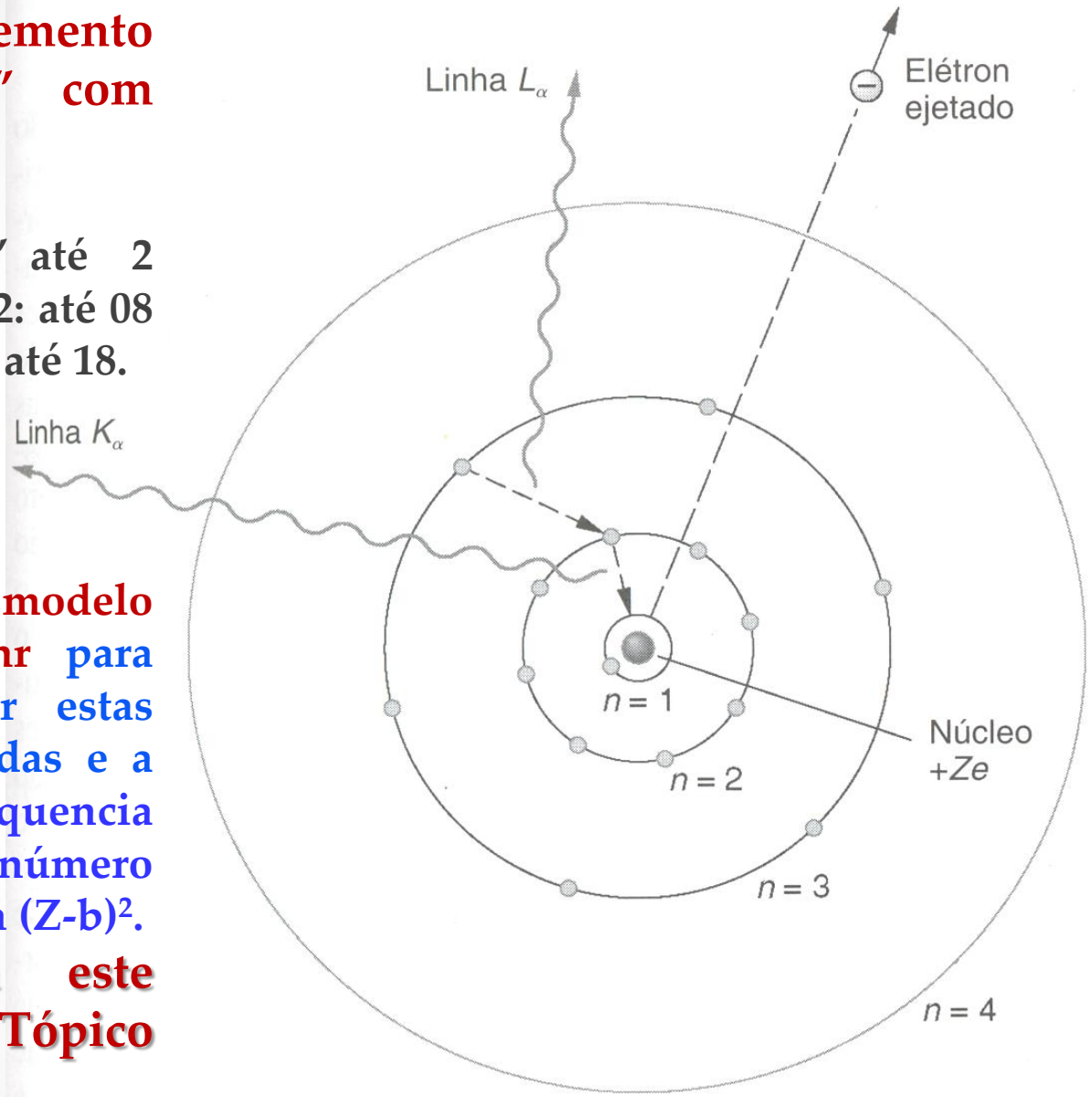
- **Este tema será revisitado no próximo tópico, por ocasião da apresentação de modelos atômicos.**

A estrutura fina, típica do elemento "bombardeado" com elétrons

Em n=1 "cabem" até 2 elétrons); em n=2: até 08 elétrons; em n=3: até 18.

Aguarde o modelo atômico de Bohr para melhor entender estas órbitas quantizadas e a relação da frequencia emitida com o número quântico n e com $(Z-b)^2$.

Voltaremos a este fenômeno no Tópico III



O elétron da camada n=1 absorve energia do elétron livre energético e sai do átomo.

O elétron de n=2 indo para n=1 emite um fóton da linha K_α . Se for o elétron da camada n=3 que transita para n=1, o átomo emite um fóton da linha K_β .

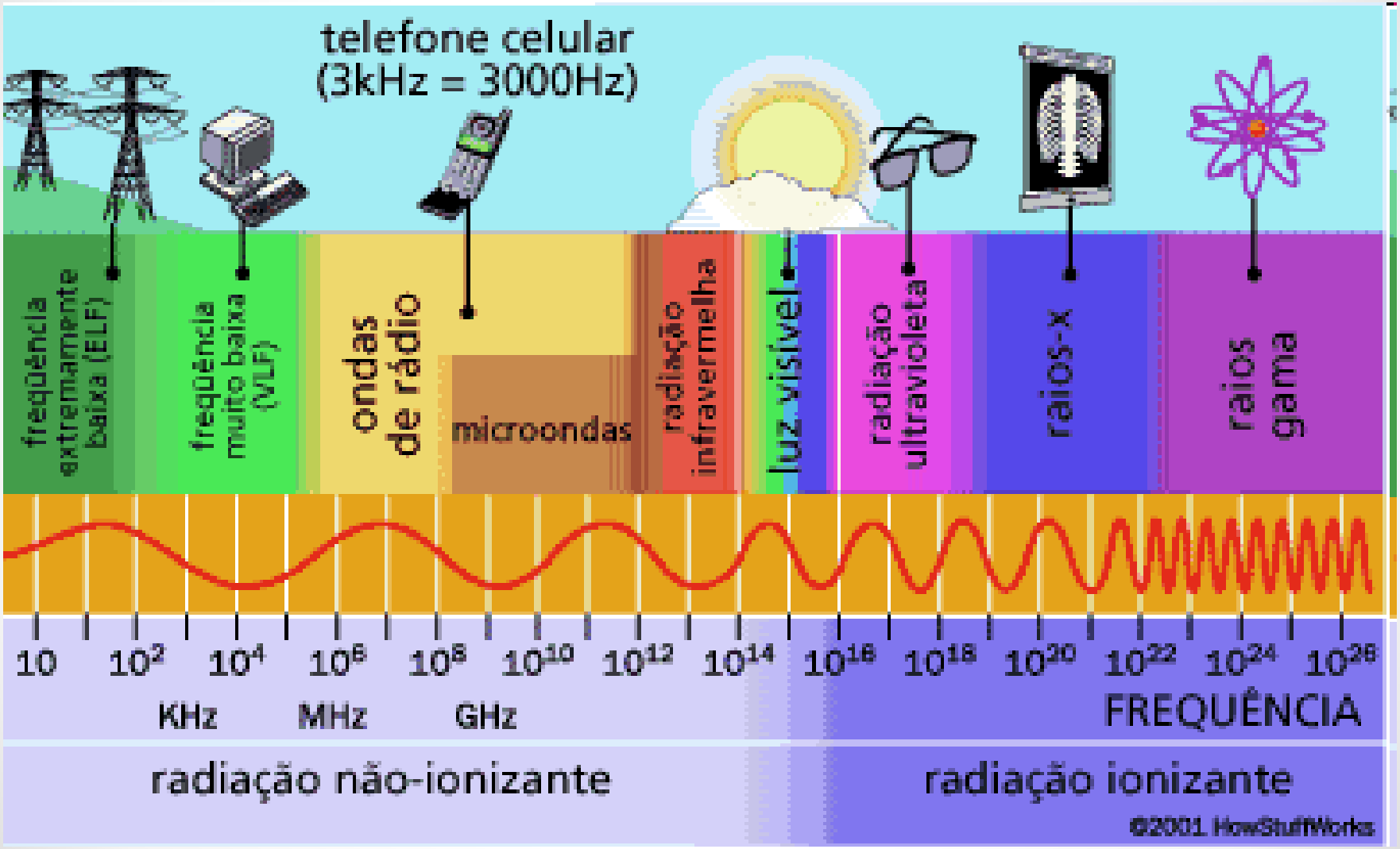
Figura do Tipler & Llewellyn

Os aparelhos de raios-X em nossa vida - Aplicação

(a) Os elétrons de um tubo de TV (antiga!) são acelerados até 18000V. Determine a freqüência 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 freqüência e a energia máxima dos raios-X que chegam no cidadão cujos dentes estão sendo radiografados.

(c)Faça um esboço do espectro de raios-X, Intensidade versus frequencia, produzidos em um tubo de raios-X.

(d) Seria interessante para radiografar ossos humanos ter um aparelho de raios-X com picos característicos ou sem eles? Por que?

Radiação eletromagnética e o mal que ela– a radiação ionizante nos faz !