

*Instituto de Física*  
*USP*

*Física V - Aula 15*

**Professora: Mazé Bechara**

# *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 que é o tubo que cria raiox-X.**
- **4. Principais características do espectro de intensidade de Raios-X versus comprimento de onda ou frequência. A necessidade da visão fotônica para entender a frequência de corte e a estrutura fina ou picos característicos.**
- **5. Outras questões sobre a interação de raios-X com a matéria . O que é a antimatéria.**

# *Efeito Compton - O que não se discutiu*

**a) A intensidade da radiação espalhada a cada ângulo. E ela depende do 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-Nishina, primeira ordem de um cálculo com a eletrodinâmica quântica.**

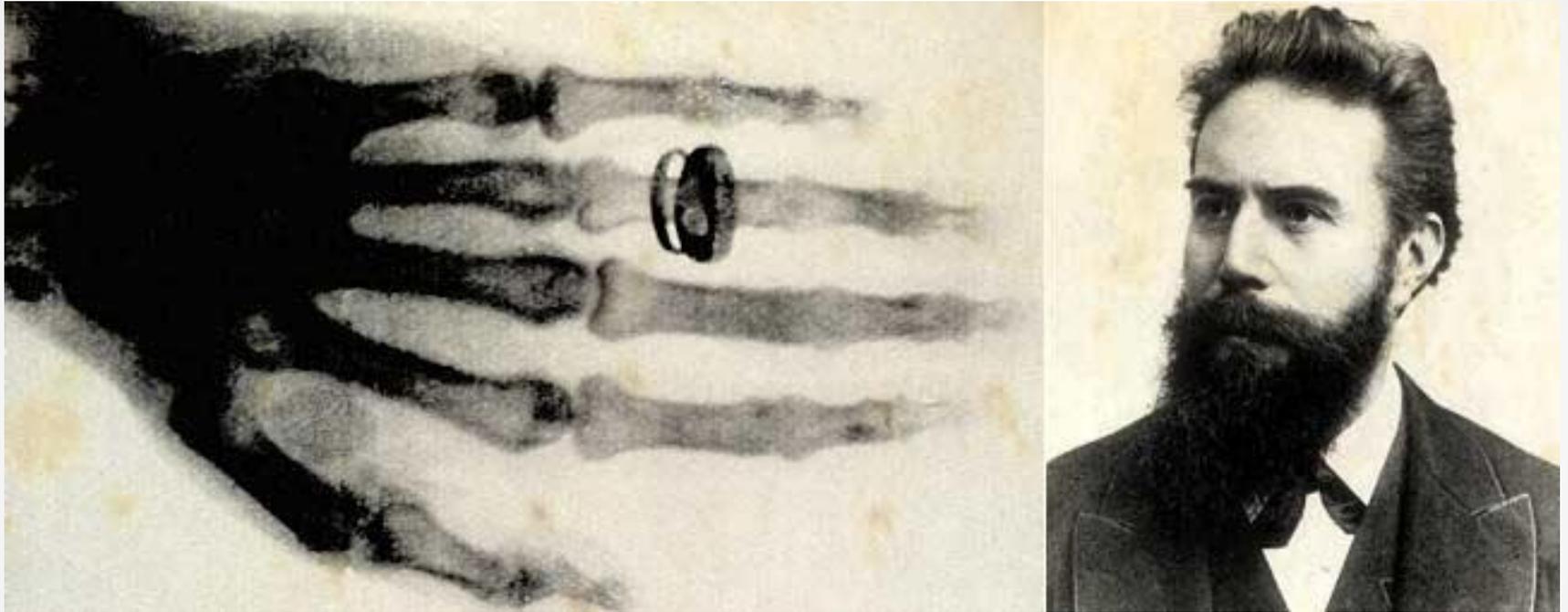
**c) A eletrodinâmica quântica (QED), teoria que quantiza o campo eletromagnético, foi introduzida nos anos 20 de 1900 por Dirac, e teve um desenvolvimento para a forma atual principalmente nos trabalhos de Schwinger , já no final da década de 40, e com os diagramas de Feynmann se tornou uma teoria "usável", 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 observou 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 prêmio Nobel de Física 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 rápidas evoluções do conhecimento científico para uso na sociedade.***
2. Só em **1913**, portanto mais de década depois da descoberta, **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 Angstroms**.

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

# *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**).**

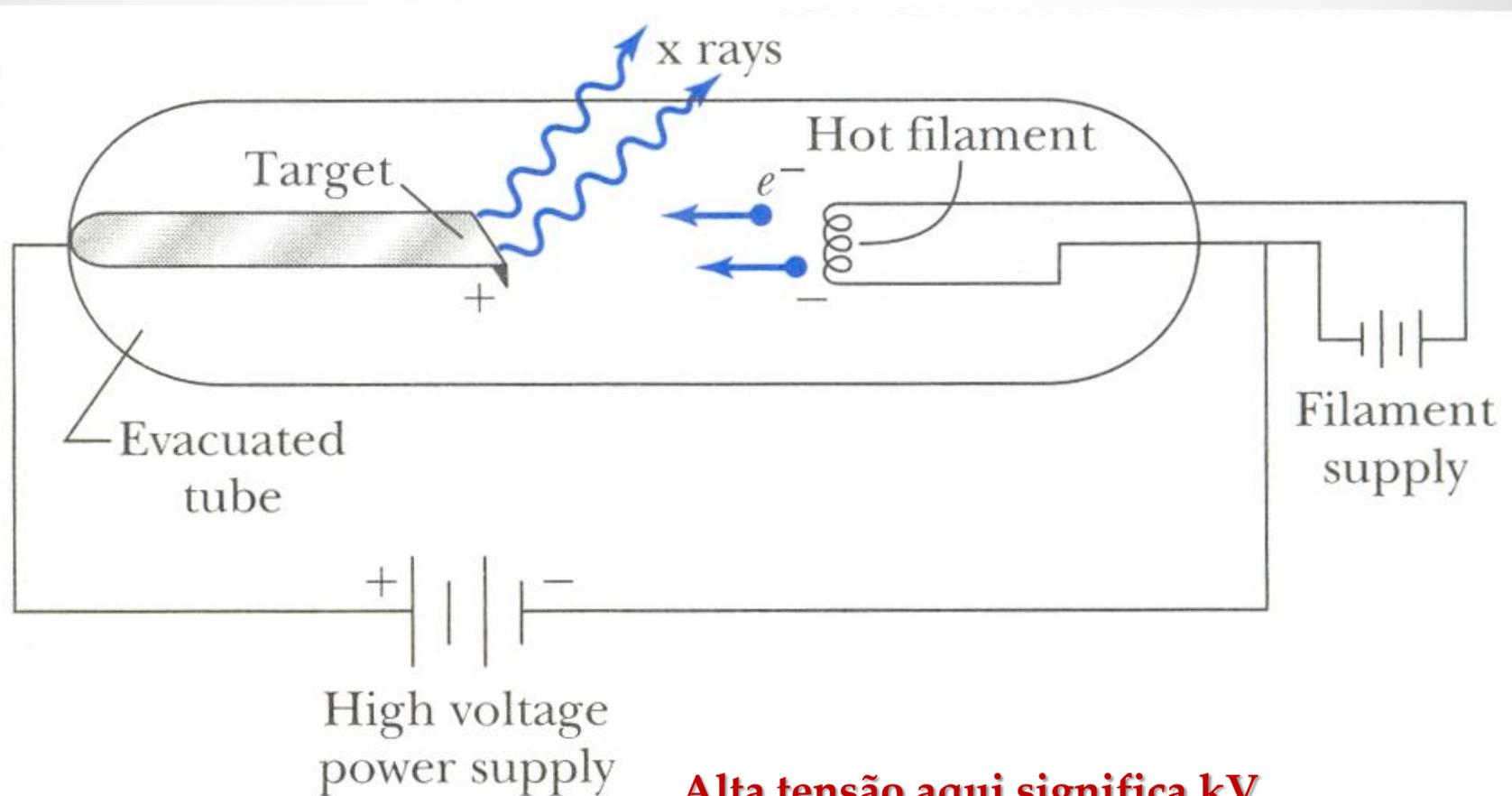
***O caráter corpuscular, como proposto por Einstein, é necessário para descrever os dois fenômenos acima.***

# *Os tubos de Raios-X*

**Os Raios-X podem ser produzidos pela incidência de elétrons com energia cinética da ordem ou superior a 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



**Alta tensão aqui significa kV**

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

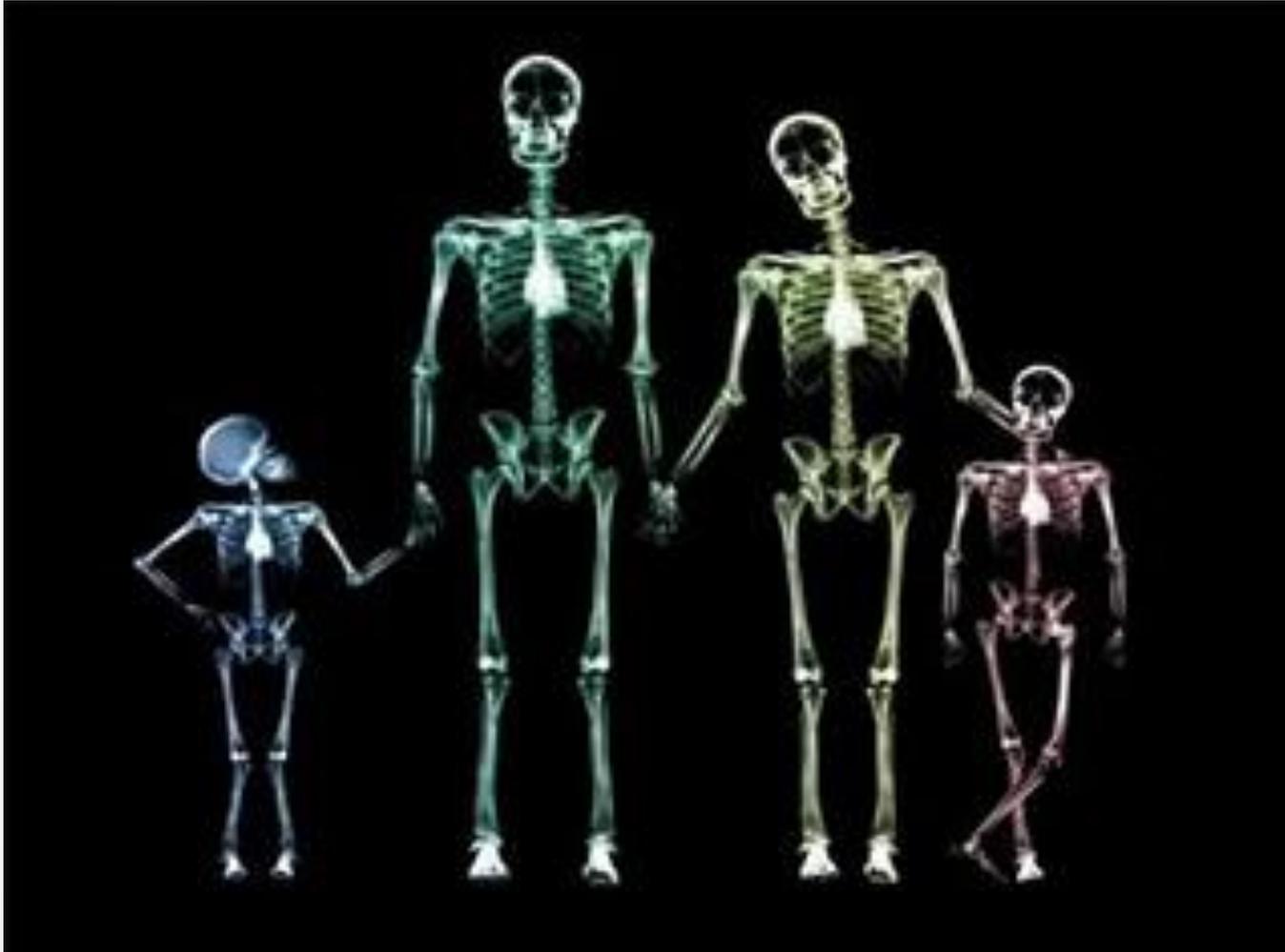
# *Principais características dos Raios-X*

- 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.)**

# *Principais características dos Raios-X*

- 4. No corpo humano penetram (se transmitem) facilmente pelo tecido e nervos, mas são opacos para os ossos.** Esta opacidade vem do fato que de serem 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).***

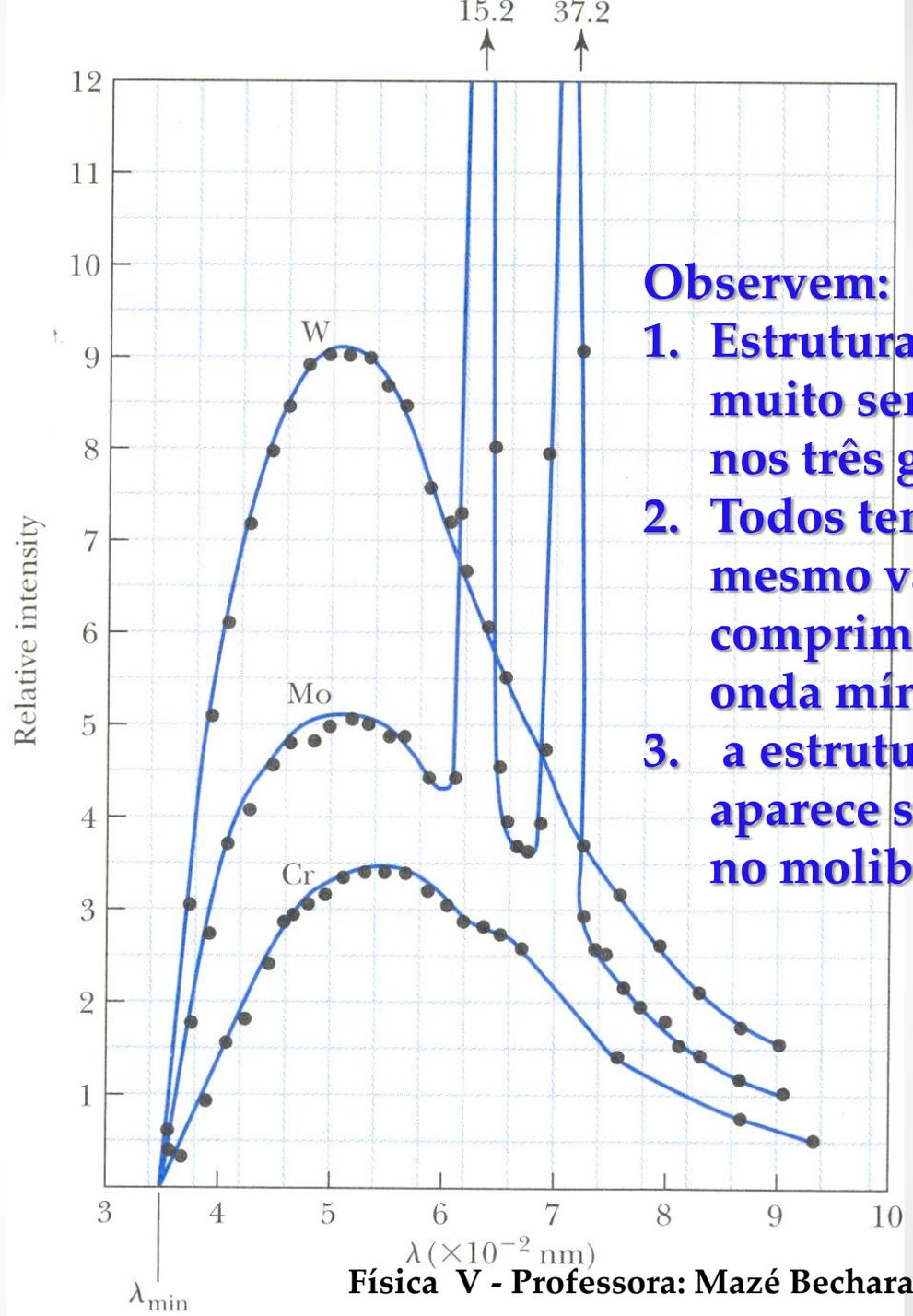
# *Raios-X - um exemplo familiar*



**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)

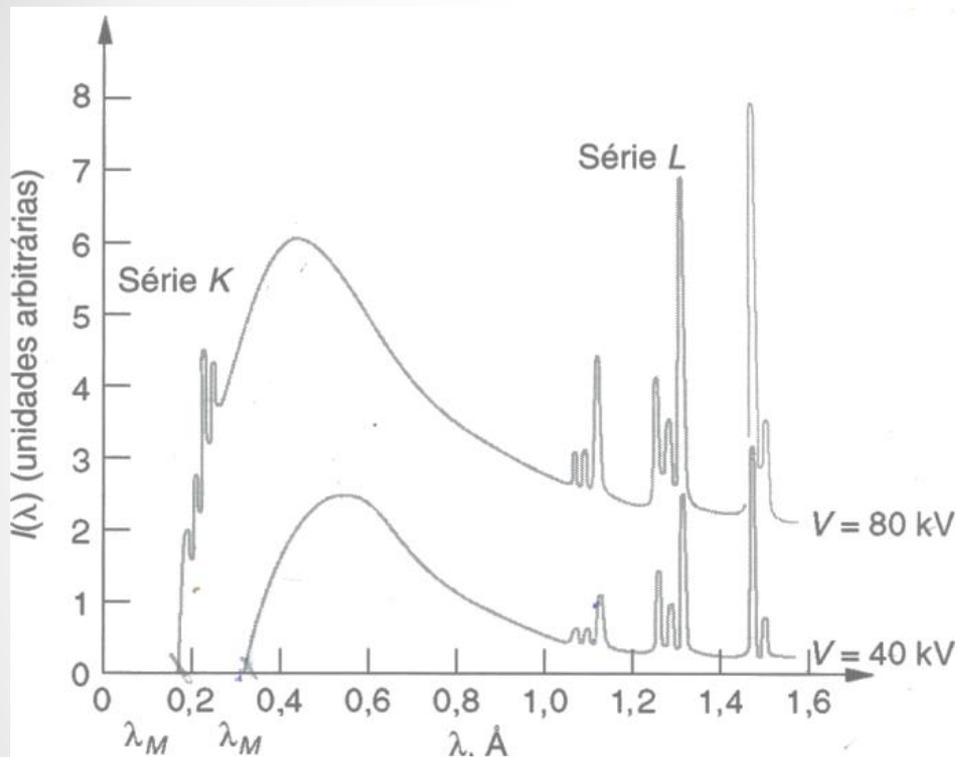


**Observem:**

- 1. Estrutura grossa muito semelhante nos três gráficos;**
- 2. Todos tem o mesmo valor de comprimento de onda mínimo;**
- 3. a estrutura fina aparece somente no molibidênio**

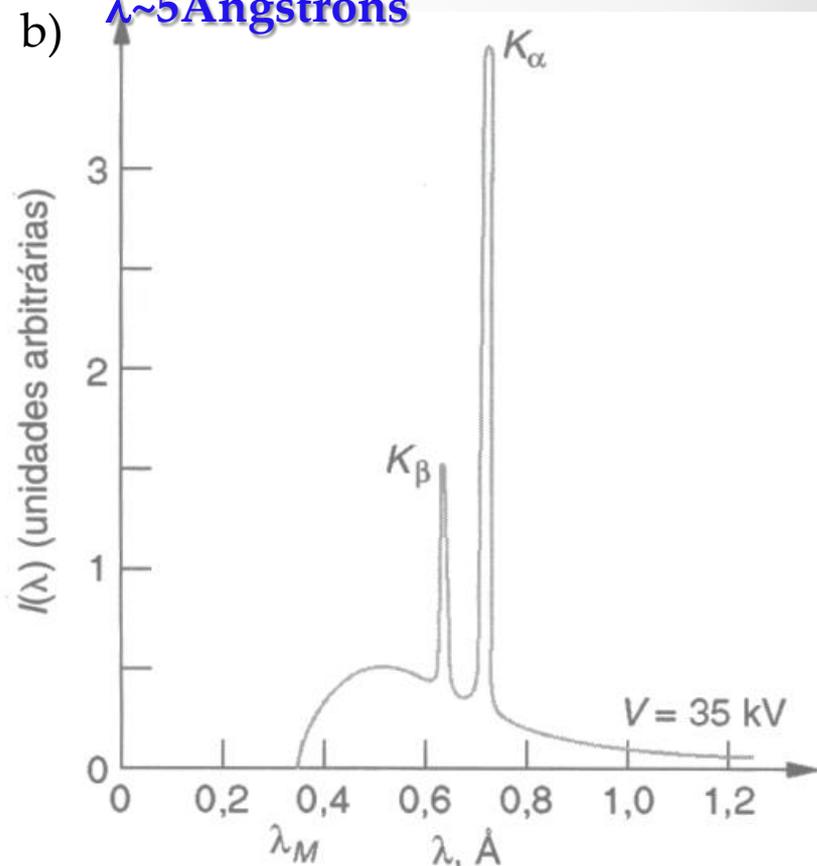
O tungstênio mostra sua estrutura fina (séries L e K) – características do material, que independem do potencial acelerador de elétrons.

a)



A estrutura fina do molibdênio (série K). A série L só aparece para  $\lambda \sim 5 \text{Ångstrons}$

b)



**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  $\lambda \approx 5 \text{Å}$ . O comprimento de onda de corte  $\lambda_m$  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 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 estrutura 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?**

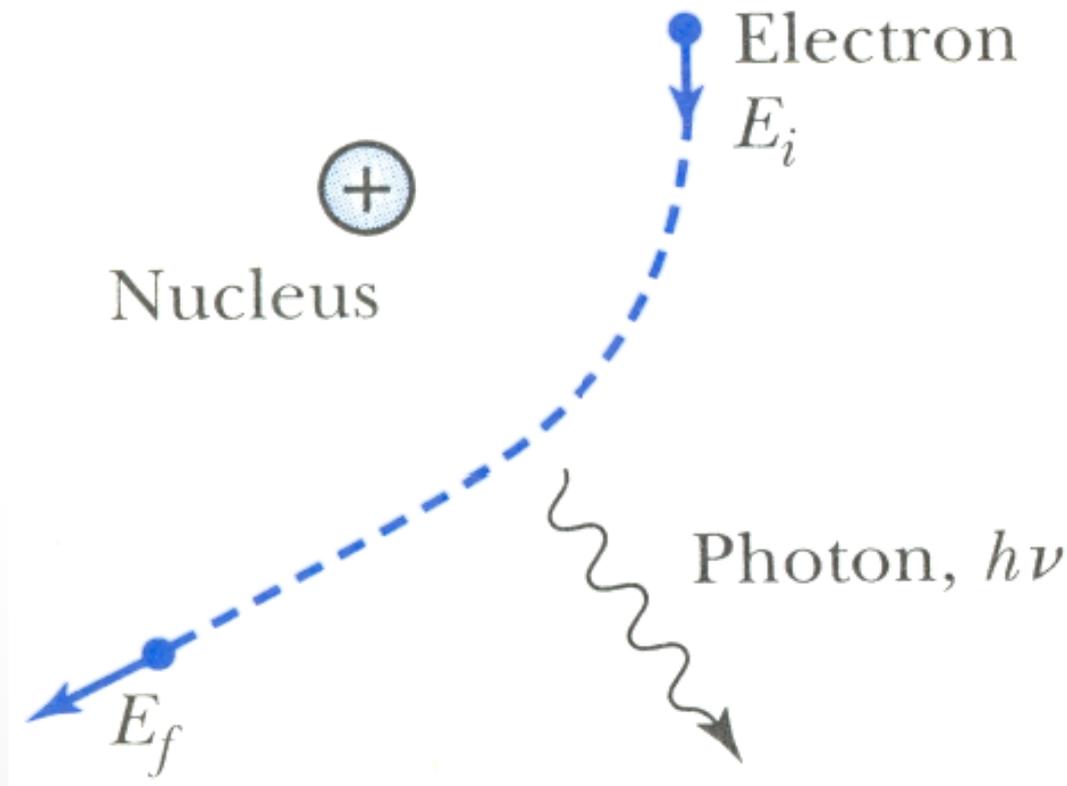
# *Processo que gera Raios-X segundo o eletromagnetismo clássico*

Na **interação Coulombiana** dos *elétrons* 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 frequência, e muito menos fortes intensidades monocromáticas (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 frequência/comprimento de onda, e nem a estrutura fina do espectro.**

# O processo responsável pela parte contínua do espectro - visão fotônica

## Bremsstrahlung



# 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 núcleo o elétron emite um fóton de energia  $h\nu$ , igual ao valor de energia cinética que perdeu em cada interação, até parar, o que resulta no espectro contínuo de frequências/comprimento de onda.**
- 2. A diferença da explicação fotônica para a clássica é que se o elétron gera um fóton de energia  $h\nu$  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 *bremstrahlung* (radiação por desaceleração em alemão).**

# O comprimento de onda mínimo e a frequência máximo dos espectros produzidos.

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

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

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

# *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.**

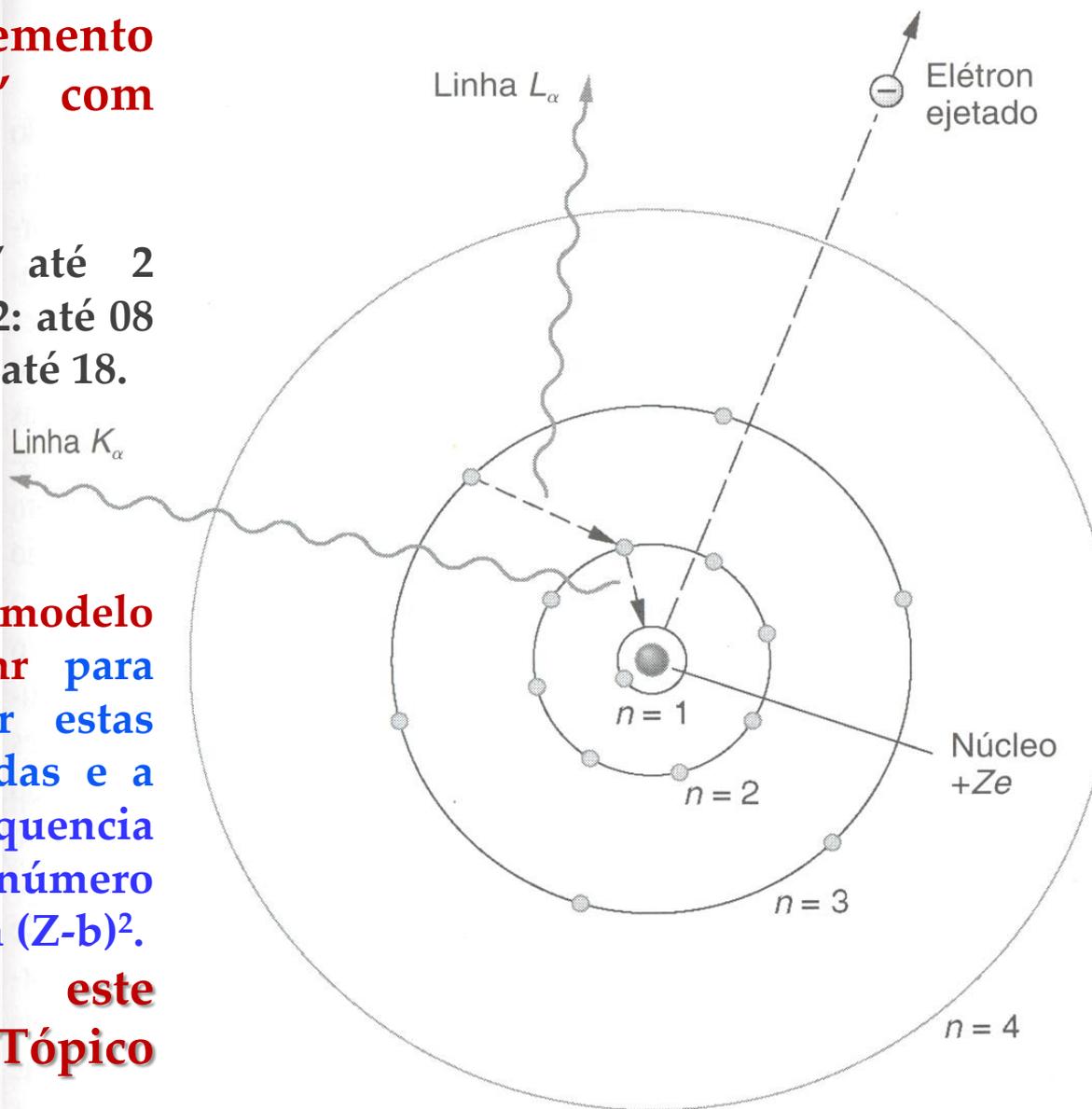
**Este tema será revisitado no próximo tópico, por ocasião da**

- 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 frequência emitida com o número quântico  $n$  e com  $(Z-b)^2$ . Voltaremos a este fenômeno no Tópico III**



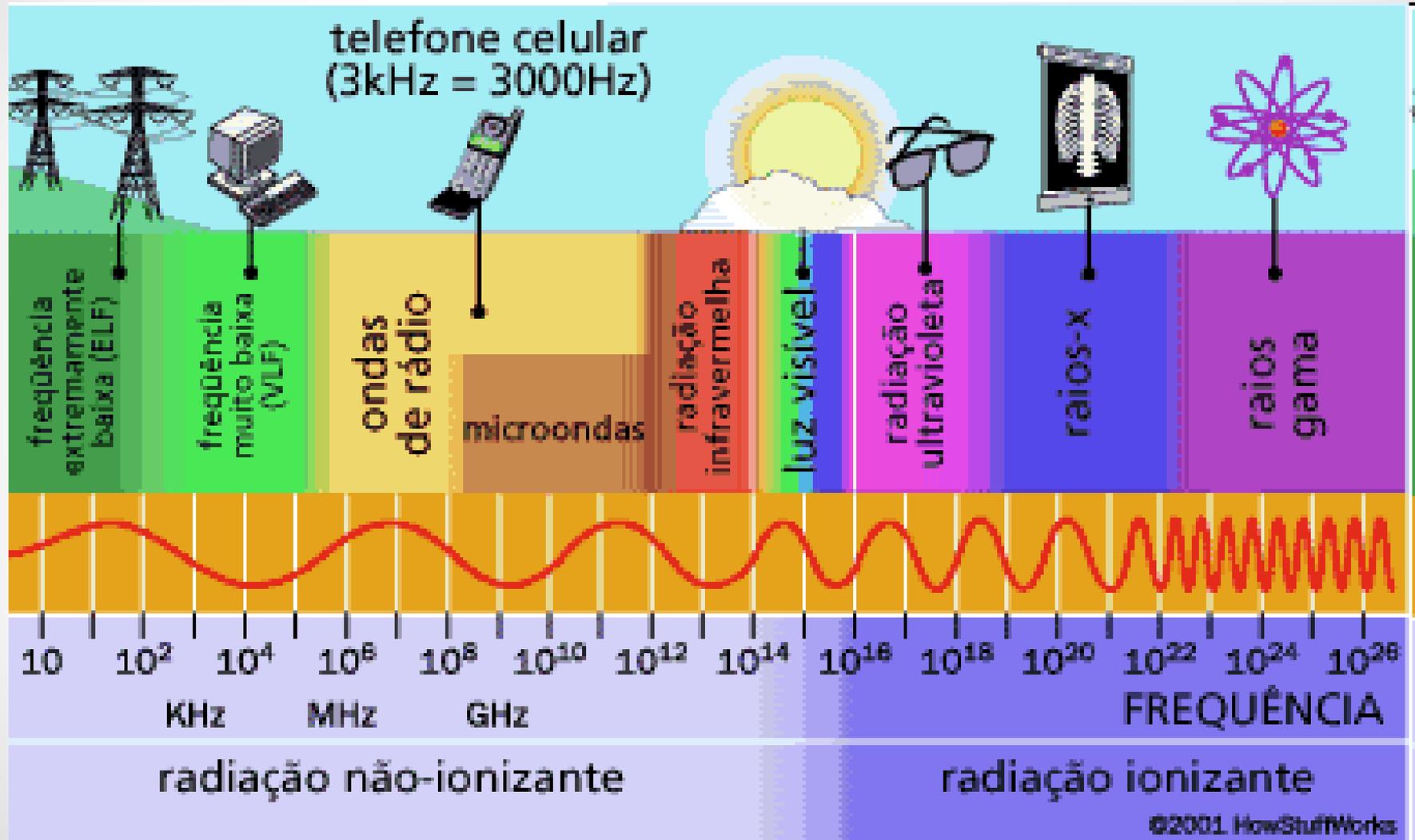
**O elétron da camada  $n=1$  absorve energia do elétron livre energético e sai do átomo.**

**O elétron de  $n=2$  indo para  $n=1$  emite um fóton da linha  $K_\alpha$ . Se for o elétron da camada  $n=3$  que transita para  $n=1$ , o átomo emite um fóton da linha  $K_\beta$ .**

# *Os aparelhos de raios-X em nossa vida - Aplicação*

- (a) 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.
- (b) **Faça um esboço do espectro de raios-X, Intensidade versus frequência, produzidos em um tubo de raios-X.**
- (c) **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 nos faz !



# *Os raios-X interagindo com a matéria*

- **O que mais poderiam fazer se interagem com a matéria?**

**Resposta: ser absorvido e virar matéria! Mas terá que ser um processo que resulte em conservação de energia, momento linear e cargas!**

- **E Aí surgiu a idéia da antimatéria!**

# *Partículas e Antipartículas*

**Antipartículas** são as partículas da **antimatéria**.

**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**.

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.***

# *Partícula e Antipartícula*

***As antipartículas são constituintes da antimatéria***

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.**

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

**Se uma partícula não tem anti-partícula, não há aniquilação deste tipo de matéria.**

**As antipartículas no universo hoje estão em pequeníssima quantidade em relação às partículas da matéria. Ufa!!!**

# *Matéria e Antimatéria*

## *fatos históricos*

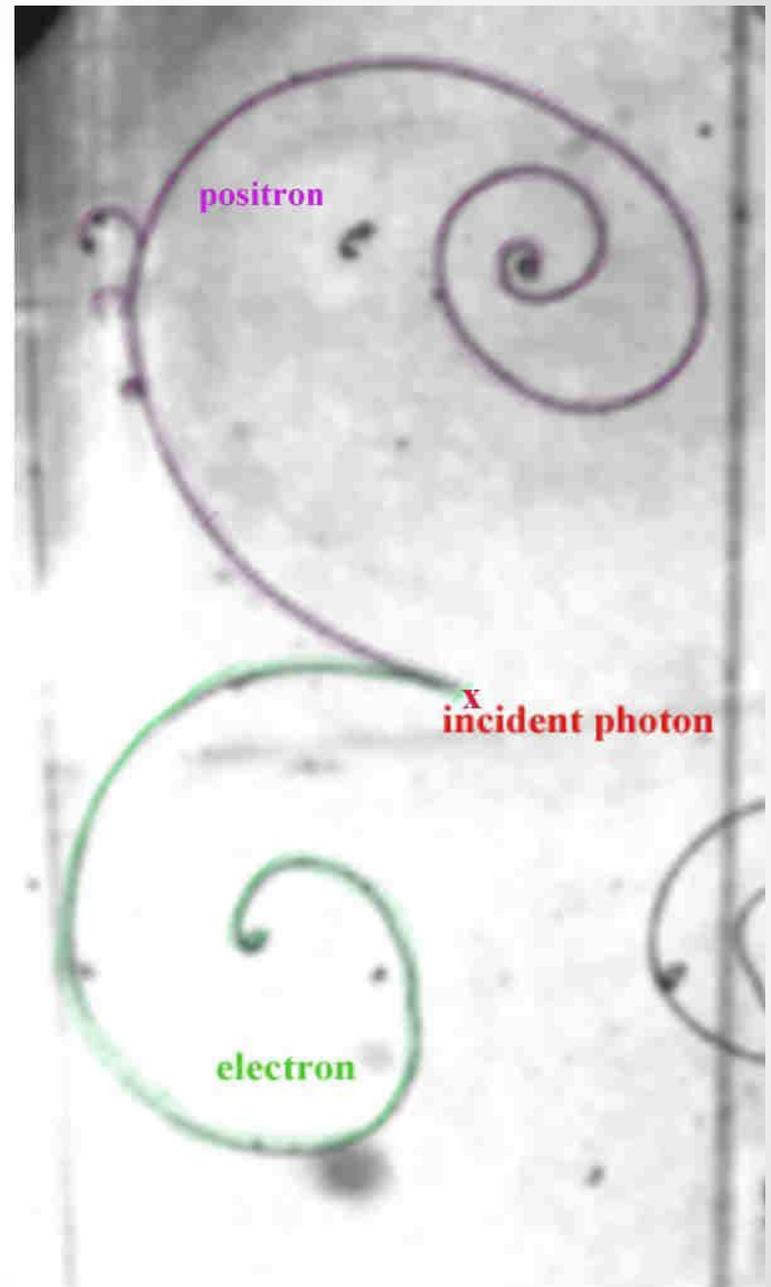
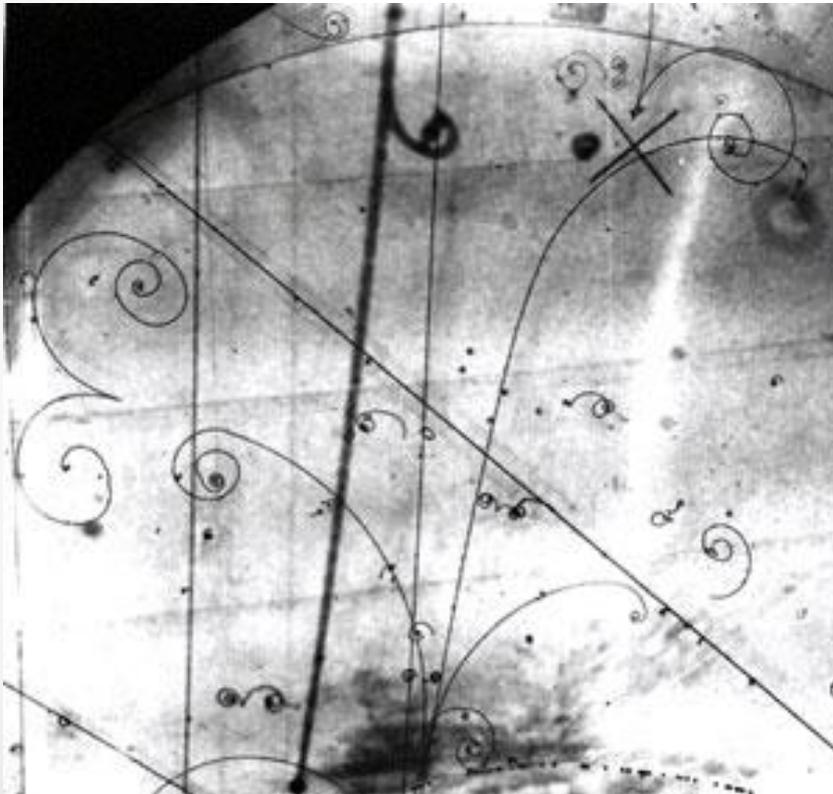
1. A existência de antimatéria foi prevista por **Dirac em 1928** por entender que a energia da partícula relativística em função do momento linear e energia interna, deveria contemplar os dois sinais da raiz quadrada.
2. O **par elétron-pósitron** foi observado pela 1ª vez na **radiação cósmica por 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

*“Do nada” (uauh!) apareceram trajetórias de duas partículas de cargas iguais mas de sinais opostos e com massa idêntica à do elétron, mas velocidades diferentes.*



# *Os raios-X interagindo com a matéria*

- **E qual é a mínima energia do fóton para criar um par de partícula-antipartícula, dentre as que você conhece? Por que?**
- **Qual é o comprimento de onda e a frequência deste fóton com esta energia mínima?**