

Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 14

Professora: Mazé Bechara

AVISO importante

TÓPICO III: Modelos atômicos, as primeiras regras de quantização e o caráter dual da matéria

GUIA NA PÁGINA DA DISCIPLINA

Aula 14 – Competição entre os processos da interação do fóton com partículas da matéria.

Espectros de absorção e emissão atômica e modelo atômico.

1. A competição entre vários processos dos que mais ocorrem na interação da radiação eletromagnética, raios-X e raios- γ , com a matéria.
2. Outras questões relativas a fenômenos que mostram o caráter corpuscular ou fotônico da radiação eletromagnética. A competição entre vários processos dos que mais ocorrem na interação da radiação eletromagnética, raios-X e raios- γ , com a matéria.
3. Evidências experimentais da existência de estrutura (constituintes) nos átomos (até aqui na disciplina e na história da Física no início dos anos 1900).
4. Os espectros de linha de **matéria gasosa** – espectros de emissão e de absorção de radiação eletromagnética (REM) **dos átomos** – o que são, **condições para serem observados** e porque se entende serem espectros dos átomos.

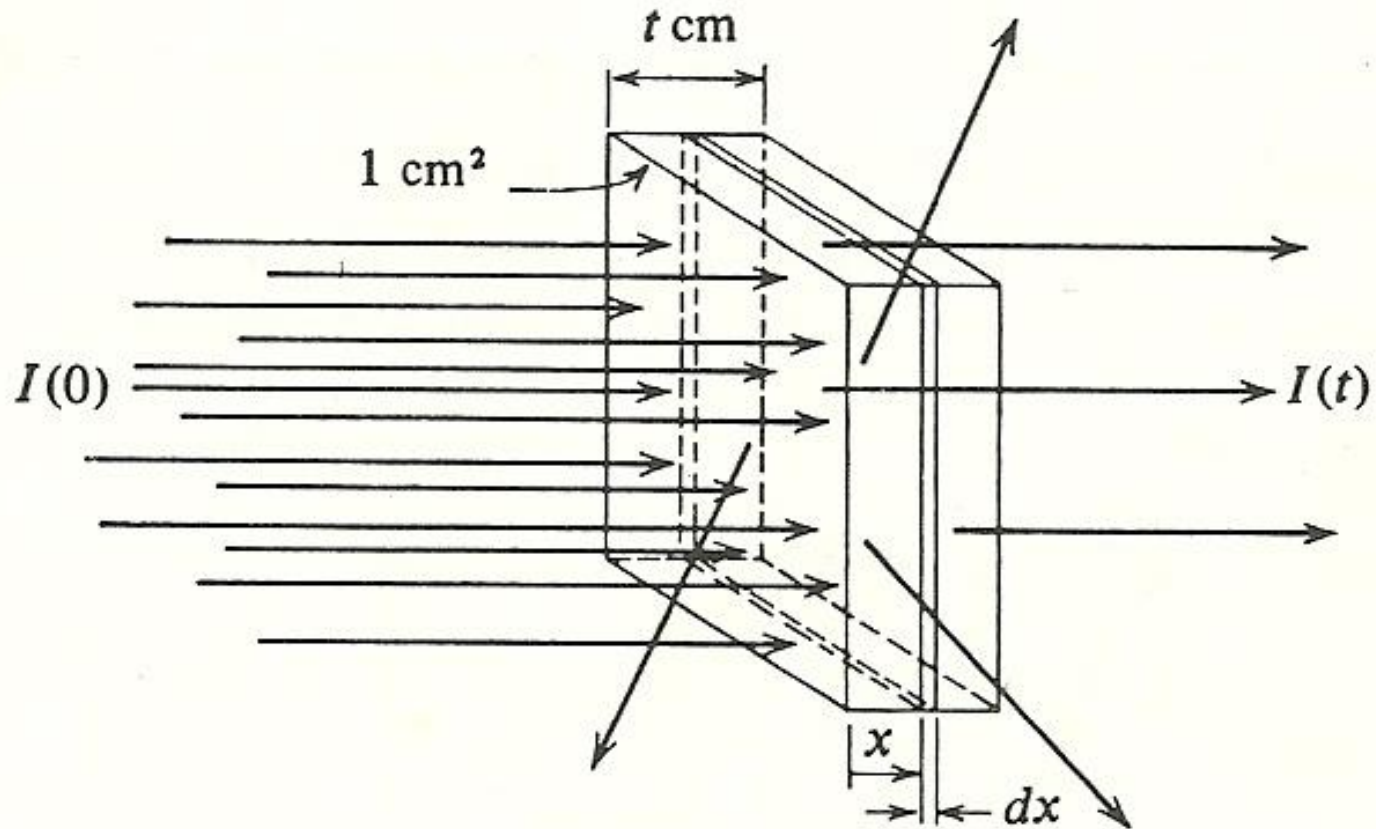
(a) Características dos espectros da absorção e da emissão.

Aniquilação de matéria - Aplicação

Um par elétron-pósitron forma o chamado átomo positrônico. Este átomo é instável e desaparece decaindo em dois fótons.

- a) Determine a(s) direção(ões) entre os dois fótons criados; a energia e o comprimento de onda de cada um dos fótons, **no referencial do centro de massa do átomo positrônico.**
- b) Este átomo poderia decair em um único fóton segundo este sistema de referência? E em três? Justifique.
- c) Se este **átomo estiver em movimento** de velocidade constante em relação a um laboratório, **sua resposta ao item (b) seria diferente?** Justifique. Os comprimentos de onda seriam os mesmos? E a direção entre os dois fótons criados? Justifique.

- Fig. do Eisberg - Resnick



Um feixe de fótons passando através de uma lâmina.

Os processos que roubam intensidade do feixe na matéria são os de maior probabilidade de ocorrer (maior seção de choque): efeito fotoelétrico, espalhamento (a qualquer ângulo de um pouco mais do que zero a 180 graus) e a produção de pares. O que passa é o feixe transmitido - não absorvido e nem desviado pela matéria.

Conservação da energia do feixe

$$I_{\text{inc}} = I_{\text{transm}} + I_{\text{absorv}} + I_{\text{esp}}$$

- **Intensidade transmitida** = Intensidade da radiação que não interagiu ou “espalhada” a zero graus.
- **Intensidade absorvida** = Intensidade dos fótons absorvidos por elétrons ligados fazendo o efeito fotoelétrico (EF) + os absorvidos por núcleos e que produziram pares de partículas (PR).
- **Intensidade de Espalhamento (E)** = intensidade dos fótons que se desviaram da direção incidente (inclusive a 180 graus ou refletidos) ou que fizeram os espalhamento Thomson (com mesmo comprimento de onda) e Compton (com comprimento de onda maior).

A intensidade da radiação atravessando a matéria

- **Resultado experimental da intensidade na posição x no interior da matéria, quando o feixe tem a direção x :**

$$I(x) = I(0)e^{-\Lambda x}$$

Λ é chamado de **comprimento de atenuação** do feixe. Sua unidade é de inverso de comprimento.

$$\Lambda = \rho\sigma_T = \rho(\sigma_{FE} + \sigma_E + \sigma_{PR})$$

ρ é a densidade volumétrica da matéria e σ_τ é a seção de choque total (que tem dimensão de área) para "roubar" intensidade do feixe incidente.

Aqui foram considerados os processos mais prováveis (de maior seção de choque): efeito fotoelétrico (EF), espalhamento com mesmo ou diferente comprimento de onda (E), e a produção de pares (PR). O que não é desviado e nem absorvido por interação com a matéria é o feixe transmitido.

O número de fótons através da matéria

- O pequeno número de fótons $dN_f(x)$ que “desaparecem” do total $N_f(x)$ de fótons do feixe na posição entre x e $x+dx$ no interior matéria, depende da densidade de matéria ρ e da seção de choque total σ_T relacionada à probabilidade de ocorrerem os processos que “roubam” (sinal -) os fótons do feixe por interação de fótons com a matéria:

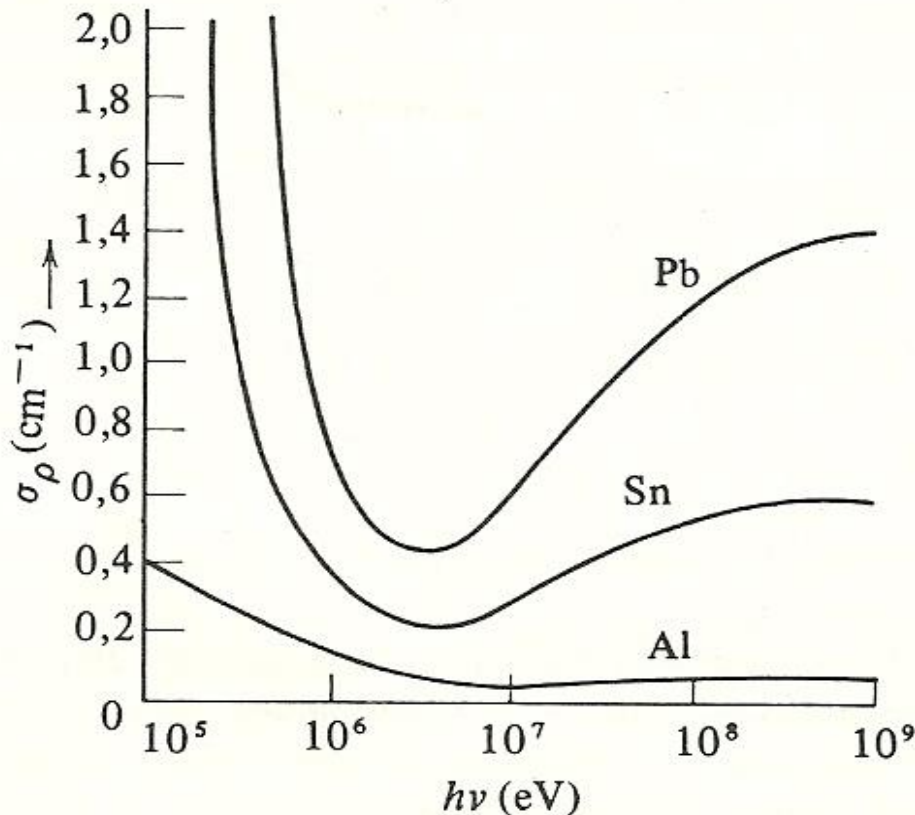
$$dN_f(x) = -N_f(x)\rho\sigma_T dx$$

$$N_f(x) = N_f(0)e^{-\rho\sigma_T x} = N_f(0)e^{-\rho(\sigma_{EF} + \sigma_E + \sigma_{PR})x}$$

- Os processos com maiores probabilidades (seções de choque) foram os considerados aqui: efeito fotoelétrico (EF), espalhamento Thomson e Compton (E) e a produção de pares (PR)

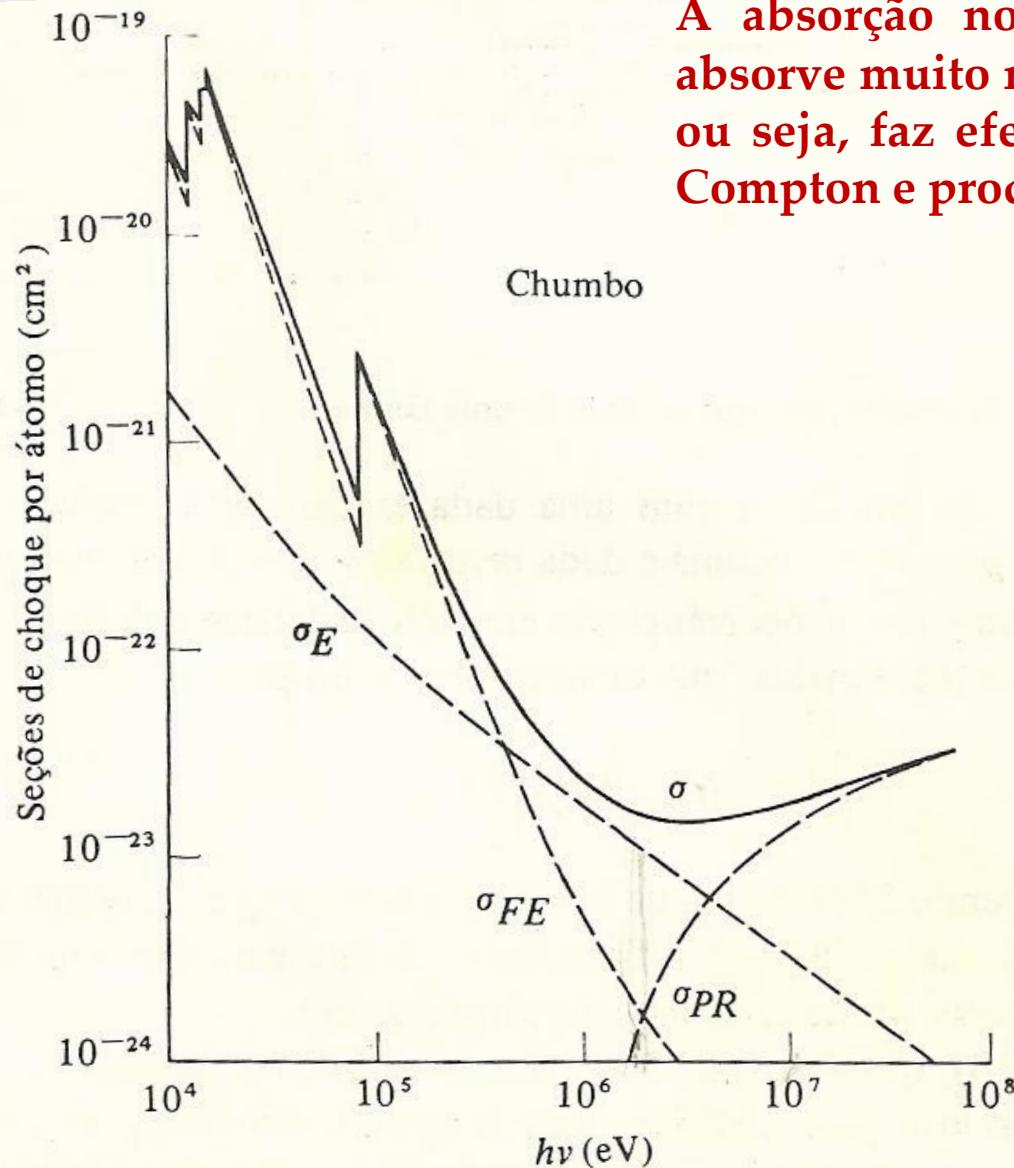
Coeficientes de atenuação da radiação com raios-X e raios- γ

Há um efeito da densidade mas há outros da estrutura da matéria – as curvas não tem formas idênticas



Os coeficientes de atenuação para vários átomos num dado intervalo de energia dos fótons.

A absorção no elemento que absorve muito raios-X e raios- γ , ou seja, faz efeito fotoelétrico, Compton e produção de pares.

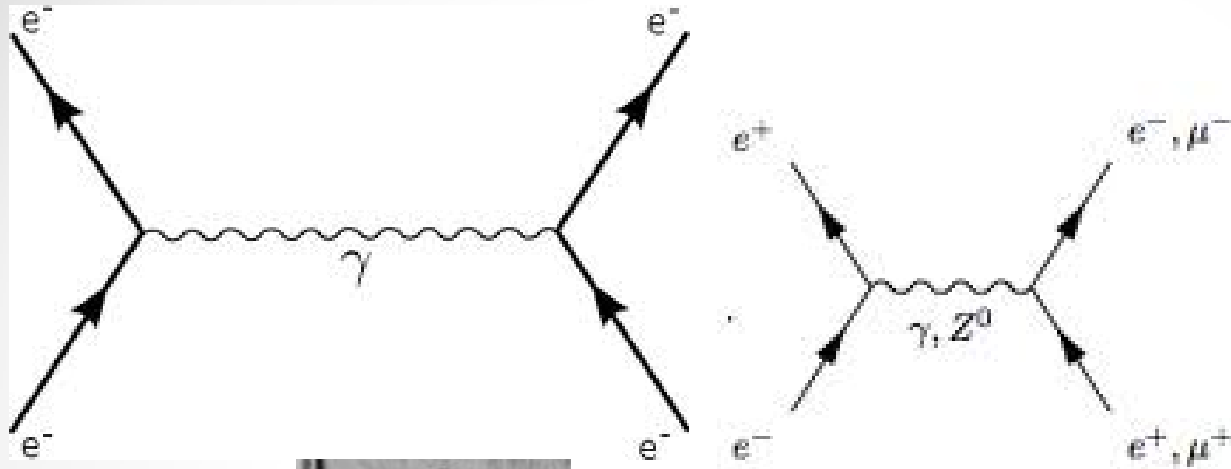


As seções de choque de espalhamento, fotoelétrica, de produção de pares, e total para um átomo de chumbo.

A teoria da interação do fóton com as partículas da matéria

- Os processos relativos à interação de fótons com a matéria, seja de espalhamento, seja de absorção, seja a criação e aniquilação deles, é necessário uma teoria que permita a existência de fótons e que o número deles, assim como o de partículas na matéria, não se conservem.
- Esta teoria é **a eletrodinâmica quântica (QED - Quantum ElectroDynamics do nome em inglês)**. Iniciada por Dirac (Nobel de Física com Schroedinger em 1933) na década de 20, depois desenvolvida por **Schwinger** e por **Feynman** (na década e 1950), este último viabilizando os cálculos com seus famosos diagramas, o que deu a estes dois últimos e ao **Tomonaga**, o **prêmio Nobel de Física em 1965**.

QED - prêmio Nobel de Física – 1965: Schwinger , Feynman e Tomonaga



Acima: Diagramas de Feynman, e o próprio na década de 1970

Ao lado:, Schwinger, Tomonaga e Feynman em 1965
: A equação básica da QED (só para impressionar!!!)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} ,$$



Questão 42 do guia ao tópico II

Parte 1 do Tópico III: estrutura atômica ou o átomo não é átomo (indivisível)

1. Átomos podem “emitir” partículas com carga $-e$ e massa 2000 vezes menor que a massa do H – os elétrons - quando interagem com radiação eletromagnética. Também é possível ionizar positivamente os elementos químicos.
2. O espectro de emissão de raios X por matéria (sólida) quando bombardeada por elétrons livres com energias cinéticas da ordem ou maiores do que keV tem uma estrutura fina, praticamente monocromática, que mostra regularidade com o número atômico Z .

Moral da história: se há cargas diferentes que fazem dos átomos neutros, os átomos são compostos de outras partículas. Não é indivisível. É “constituente fundamental” da matéria, mas não é exatamente uma “partícula elementar”, ou seja, sem estrutura interna.

Espectros atômicos

As interações entre átomos são desprezíveis nos gases, diferentemente da matéria líquido e a sólida.

Por isto para se observar as absorções de radiação eletromagnética (REM) pelos átomos, que revelem a estrutura interna destes átomos, são mais facilmente observados em matéria gasosa monoatômica. São chamados de espectros de absorção atômica.

Analogamente, quando nos referirmos as emissões de REM pelos átomos, estaremos tratando da emissão de amostra de gases monoatômicos, que ocorre em certas circunstâncias, descontada a radiação emitida por efeito de temperatura. Estes são chamados de “espectros de emissão” dos átomos.

Espectros de absorção atômica

Fazendo um feixe de radiação eletromagnética de espectro contínuo atravessar uma amostra de gás de elemento puro (monoatômico, portanto), e observando o feixe após atravessar a matéria, se observa que algumas frequências (comprimentos de onda) muito específicos, são “roubados” do feixe incidente, ou seja, são absorvidos pela amostra, enquanto grande parte do espectro contínuo é transparente para a amostra, ou seja, passa sem interagir com a amostra.

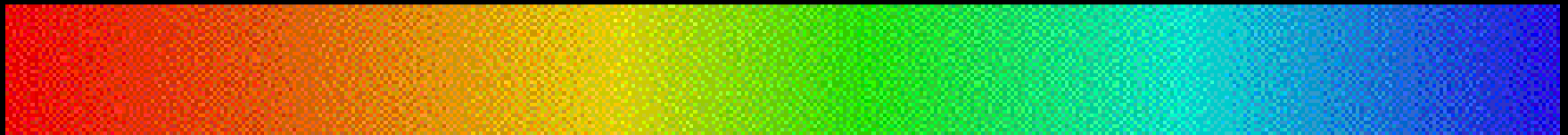
Este **espectro** tem aspecto de “falta de linhas” (monocromáticas), por isto é dito que o espectro de absorção atômica é um **“espectro de linhas”**.

Espectros de emissão atômica

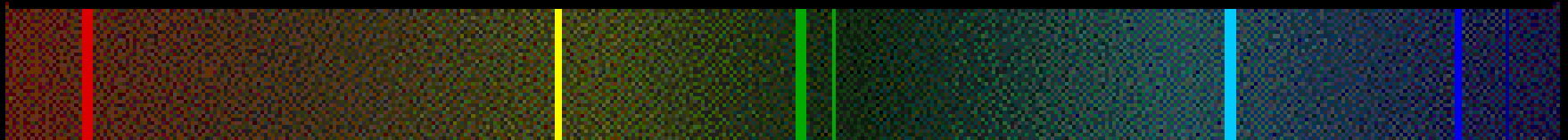
Matéria gasosa monoatômica depois de bombardeada por REM de espectro contínuo ou de receber um feixe de partículas com energias cinéticas “importantes” **emitem “espectros de linhas”, ou seja, intensidade de estrutura fina, com vários comprimentos de onda bem definidos (praticamente várias emissões monocromáticas), são os espectros de emissão atômica.**

Um espectro visível e contínuo de REM, um espectros de emissão e um de absorção por átomos de um elemento.

Continuous Spectrum



Emission Spectrum



Absorption Spectrum

