

Instituto de Física
USP

Física V - Aula 22

Professora: Mazé Bechara

AVISO

1. Já se encontra na página da disciplina o TEC 3 para ser entregue até 9/5.

Aula 22– O Modelo Atômico de Bohr

1. **As hipóteses do modelo de Bohr para a estrutura e as transições atômicas.**
2. **Determinações de um elétron interagindo com o núcleo no modelo de Bohr : raios, velocidades e energias permitidos no movimento relativo em cada estado atômico.**
3. **O átomo de hidrogênio – resultados do modelo. Comparação com os resultados experimentais.**
4. **Aplicações**

Niels Henrik David Bohr



"Technology has advanced more in the last thirty years than in the previous two thousand. The exponential increase in advancement will only continue. Anthropological Commentary The opposite of a trivial truth is false; the opposite of a great truth is also true."

Niels Bohr

Hipóteses do Bohr para a estrutura Atômica

1. Os átomos são compostos por um **núcleo muito menor** do que o **átomo com carga $+Ze$** no qual se concentra a maior parte da massa do átomo. Este núcleo interage com os **Z elétrons**, ao seu redor dentro das dimensões atômicas ($\sim 10^{-10}\text{m}=1\text{angstrom}$), **por meio de interações coulombianas (carga-carga) atrativas**.
2. Cada elétron tem **órbita circular** em torno do núcleo, a trajetória de mínima energia segundo a mecânica clássica newtoniana para potencial atrativo inverso à distância no movimento relativo. (Relembre o potencial efetivo de Mecânica para forças centrais).

Hipóteses do Bohr para a estrutura Atômica

3. Diferentemente do que é observado no universo físico macroscópico, **só são permitidas** aos elétrons **as trajetórias circulares com o módulo de momento angular orbital quantizado da seguinte forma:**

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

4. Diferentemente do que diz o eletromagnetismo clássico, os elétrons, apesar de acelerados, **são estáveis (não emitem radiação eletromagnética...por um tempo)** nestas órbitas permitidas.

Hipóteses do Bohr para a estrutura Atômica

5. **Somente a órbita de menor energia está em equilíbrio estável – o estado fundamental do átomo. (Base experimental)**
6. **A outras órbitas permitidas formam o conjunto de estados chamados excitados, que na verdade são permitidas mas instáveis, significando que depois de algum tempo típico das órbitas, o átomo passa espontaneamente para um estado de menor energia até chegar ao estado fundamental. (Base experimental)**
7. **A energia do átomo é a soma das energias dos elétrons.**

Hipóteses do Bohr para as transições Atômicas

1. As transições atômicas , ou seja, de um estado possível para outro, ocorrem em “saltos” e um estado a outro. Não se pense em trajetória intermediária entre uma e outra órbita como o observado no mundo macroscópico.
2. As transições para estados de menor energia ocorrem espontaneamente com a emissão de um fóton em cada transição.
3. Para ir de um estado de menor para outro de maior energia o átomo precisa receber energia de um sistema externo.
4. Se receber energia de REM um átomo absorve um fóton para cada transição atômica.
5. Quando interage com partículas, um átomo absorve energia cinética no valor exato da energia que precisa para cada transição.

A “correção” à instabilidade no átomo nucleado de Rutherford proposta por Bohr

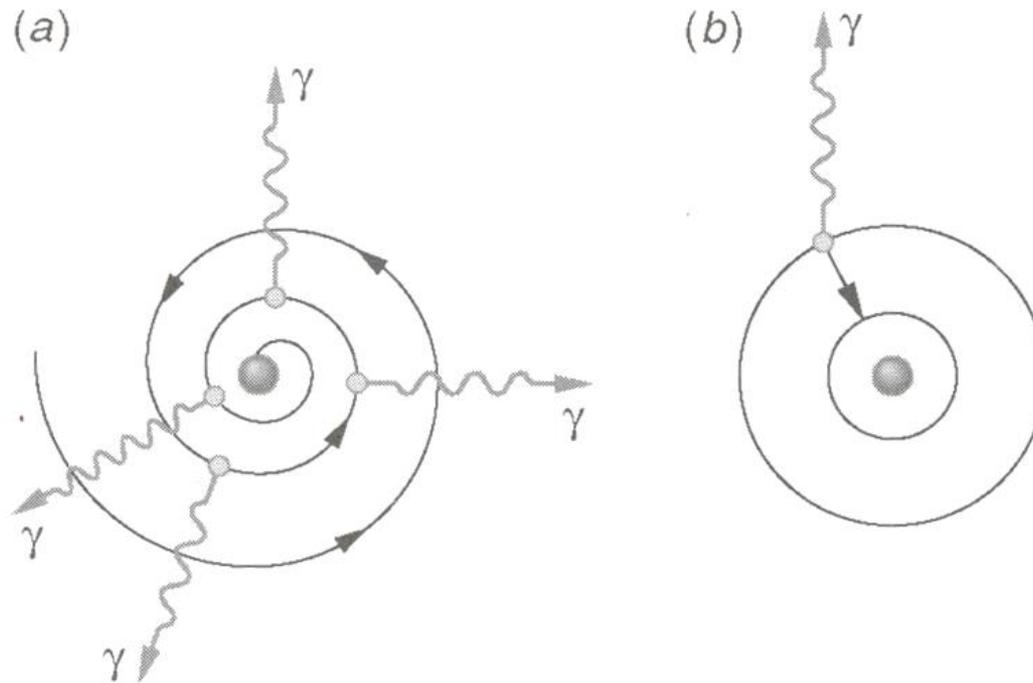


Fig. 4-15 (a) No modelo clássico do átomo, o elétron descreve uma espiral em direção ao núcleo porque está constantemente irradiando energia. (b) No modelo de Bohr, o elétron só irradia energia quando executa uma transição para uma órbita de raio menor.

Figura do Tipler & Llewellyn

As energias nas transições atômicas

1. O decaimento de um estado de maior para outro de menor energia com emissão de um fóton obedecendo a conservação de energia:

$$h\nu = E_n - E_{n'}$$

$$(E_n > E_{n'})$$

2. Na absorção de radiação eletromagnética, para cada transição o átomo absorve um fóton com a conservação de energia:

$$h\nu = E_n - E_{n'}$$

$$(E_n < E_{n'})$$

3. Quando absorve energia cinética de partícula para uma transição, absorve exatamente a diferença de energia entre os dois estados.

Obs importantes.

1. Há um recuo do átomo em cada uma das transições, para conservar o momento linear na interação.
2. A energia do átomo associado a este momento linear é desprezível (massa grande do átomo) na conservação de energia, quando se trata de interação com fótons.

Resultados do modelo de Bohr

- Os raios do movimento relativo:

$$r_n = \frac{n^2}{Z} \left[\hbar^2 \frac{4\pi\epsilon_0}{e^2 \mu} \right] = \frac{n^2}{Z} r_{n=1} = \frac{n^2}{Z} r_B = \frac{n^2}{Z} 0,529 \text{ \AA}$$

- Observe que o raio depende da massa reduzida, e que o átomo de H no estado fundamental tem raio de 0,529 angstroms
- **As velocidades do movimento relativo:**

$$v_n = \frac{Z}{n} \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \right] = \frac{Z}{n} v_{n=1} = \frac{Z}{n} 2,186 \times 10^6 \frac{m}{s}$$

- Observe que as velocidades independem da massa reduzida, e que os valores envolvidos são “altos”, comparados com as velocidades no mundo macroscópico, mas são não relativísticos.
- Observe também que: $v_1/c=1/137$, é chamada de constante de estrutura fina, por razões que ficarão claras posteriormente.

Resultados do modelo de Bohr

- **As energias do movimento relativo de um elétron-e e de um núcleo +Ze:**

$$E_n = -\frac{Z}{2} \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right] = -\frac{Z^2}{n^2} \frac{\mu}{2\hbar^2} \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right]^2 = -\frac{Z^2}{n^2} E_1 = -\frac{Z^2}{n^2} 13,60 eV$$

- Observe que a energia de um elétron por interação com um núcleo +Ze cresce com Z^2 .
- Este fato torna as energias atômicas dos átomos pesados (soma das energias de todos os elétrons ligados ao núcleo) muito menores (mais negativas) do que as energias do hidrogênio, mesmo levando em conta que há um papel da repulsão coulombiana (energias positivas) entre os elétrons.

As transições atômicas no H

- O processo: um fóton de energia hc/λ é emitido na transição do estado de energia $E_{n'}$ para E_n conservando a energia no processo, ou seja:

$$hc/\lambda = E_n - E_{n'}$$

- Os comprimentos de onda emitidos (e absorvidos):

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{hc} [E_n - E_{n'}] = \frac{1}{hc} \left[\frac{\mu}{2\hbar^2} \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right]^2 \left\{ \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right\} \right] = +R_H \left\{ \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right\}$$

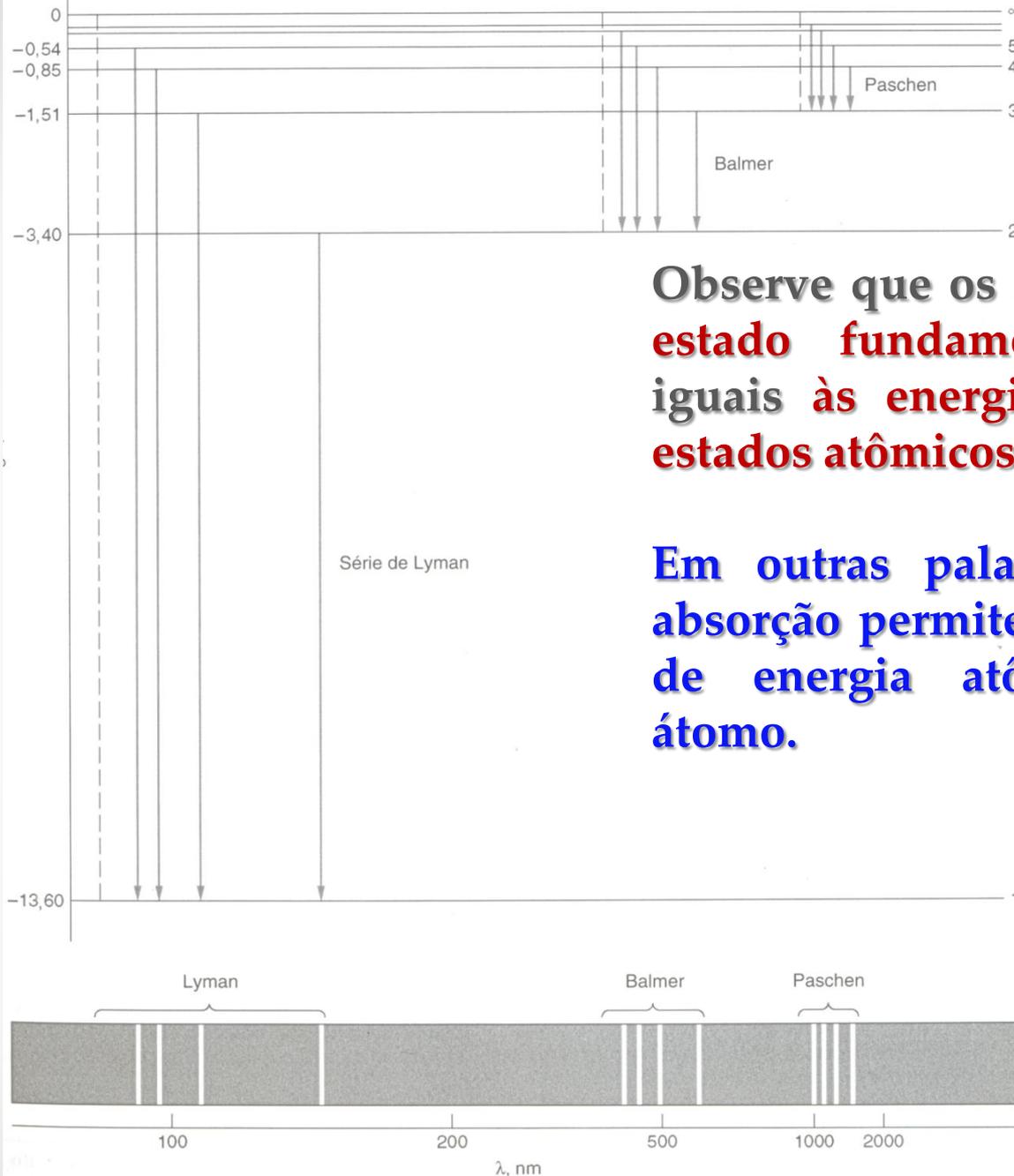
$$n = 1, 2, 3, \dots > n'$$

$$n' = 1 \text{ Série de Lyman}$$

$$n' = 2 \text{ Série de Balmer}$$

$$n' = 3 \text{ Série de Paschen....}$$

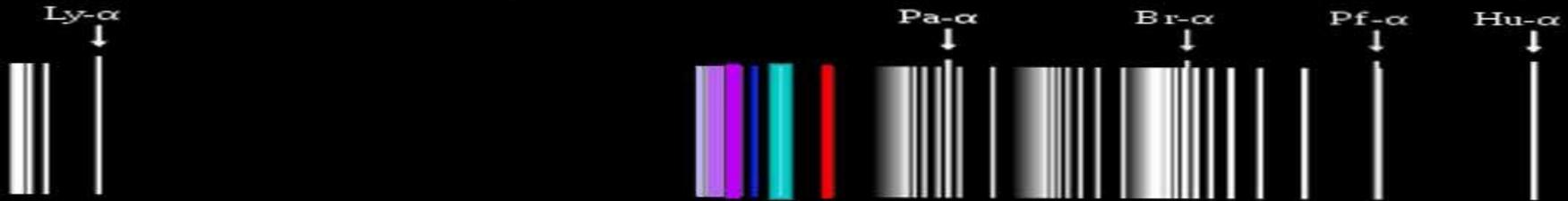
- Em acordo com a emissão e absorção observadas



Observe que os fótons absorvidos no estado fundamental têm energias iguais às energias de excitação dos estados atômicos.

Em outras palavras, o espectro de absorção permite conhecer o espectro de energia atômica de qualquer átomo.

As várias séries de emissão do H. A visível (aos olhos humanos) foi a primeira observada. É a série de Balmer.



$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, \dots > n'$$

n=1 – série de Lyman

n=2 – série de Balmer (pioneira - visível)

n=3 – série de Paschen

n=4 – série de Pfund

R_H = constante de Rydberg (para o hidrogênio) = $1,096776 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$

Transições no modelo de Bohr - Aplicação

Um átomo de H no estado cuja energia de ionização é de $+0,85\text{eV}$ faz uma transição para o estado com energia de excitação de $10,20\text{eV}$. Adote as hipóteses do modelo de Bohr e os seus resultados para o átomo de hidrogênio.

- (a) Determine a energia do átomo no estado inicial e no estado final da transição. Diga a que estados excitados do átomo de H estes estados se referem, e qual é o momento angular orbital de cada estado. Justifique. **Resp. $E=-0,85\text{eV}$, 3º estado excitado, $L=4\hbar$; $E=-3,40\text{eV}$, 1º estado excitado $L=1\hbar$.**
- (b) Descreva o processo da transição atômica. Determine a frequência e o comprimento de onda da REM emitida na transição. Este comprimento de onda é visível? E de qual das séries do átomo de H? Justifique. **Resp: $\nu=2,55\text{eV}/h=6,17\times 10^{14}\text{Hz}$; $\lambda=4875\times 10^{-10}\text{m}=4875$ angstroms (visível)**
- (c) Escreva as equações de energia e momento linear na transição do item anterior. Há conservação destas grandezas? Justifique.
- (d) Haverá necessariamente outras transições após a primeira? Se sua resposta for positiva, explicita quais transições em um diagrama de energia atômica do H. Indique neste diagrama as energias e os momentos angulares orbitais de cada estado.

Conceitos Importantes na Física Atômica

1. **Estado Atômico:** uma dada situação de estrutura do átomo, ou seja, **da dinâmica do núcleo e dos elétrons**. Entre as grandezas do estado dinâmico estão: **a energia e o momento angular que usualmente definem o particular estado atômico**.
2. **Estado Fundamental (EF):** **o estado do átomo (núcleo e seus elétrons) no qual a energia é mínima**. Neste estado, o átomo é estável por concepção, de acordo com o fato que na natureza existe um estado natural estável (para átomos estáveis).
3. **Estados Excitados:** os estados atômicos **com energias maiores que a do EF**. O estado com energia mais próxima do EF é chamado de **1º estado excitado**, o seguinte **2º** e assim sucessivamente. Um átomo no estado excitado está em equilíbrio instável. Isto significa que depois de um tempo típico do estado, o átomo espontaneamente muda para um estado de menor energia.

Conceitos Importantes na Física Atômica

1. **Estado Atômico:** uma dada situação de estrutura do átomo, ou seja, **da dinâmica do núcleo e dos elétrons**. Entre as grandezas do estado dinâmico estão: **a energia e o momento angular que usualmente definem o particular estado atômico**.
2. **Estado Fundamental (EF):** **o estado do átomo (núcleo e seus elétrons) no qual a energia é mínima**. Neste estado, o átomo é estável por concepção, de acordo com o fato que na natureza existe um estado natural estável (para átomos estáveis).
3. **Estados Excitados:** os estados atômicos **com energias maiores que a do EF**. O estado com energia mais próxima do EF é chamado de **1º estado excitado**, o seguinte **2º** e assim sucessivamente. Um átomo no estado excitado está em equilíbrio instável. Isto significa que depois de um tempo típico do estado, o átomo espontaneamente muda para um estado de menor energia.

Conceitos Importantes na Física Atômica – cont.

4. **Diagrama de níveis de energia atômica:** gráfico com **escala vertical em energia e linhas horizontais representando as energias (constantes) dos estados atômicos**. Cada um destes estados têm outras grandezas físicas bem definidas.
5. **Energia de excitação de um estado atômico:** **diferença (positiva) entre a energia de um estado excitado e a energia do estado fundamental**. Esta energia é igual a energia que o átomo absorve para ir do estado fundamental ao estado excitado específico e, naturalmente, igual a energia do fóton emitido quando este estado excitado decai diretamente para o estado fundamental.
6. **Números quânticos:** **são números inteiros que quantizam grandezas físicas**. O número quântico n é chamado de **número quântico principal** (posteriormente aparecerão outros).

Conceitos Importantes na Física Atômica – cont.

7. **Transição atômica: situação na qual um átomo está mudando de um estado (atômico) para outro. A transição para um estado de menor energia ocorre espontaneamente**, sendo que a diferença de energia é emitida obrigatoriamente em forma de fóton, segundo o modelo de Bohr e o entendimento atual da Física. Estas transições também chamadas de decaimentos são espontâneas e explicam o **espectro de emissão atômica**.

Obs. 1: Pode haver transição de um estado de menor para outro de maior energia desde que o átomo receba energia de outro sistema para fazer tal transição com conservação de energia, não sendo assim uma transição espontânea.

Obs. 2: Os átomos podem receber energia de várias formas: energia cinética de um elétron ou outra partícula livre) e de absorção de fótons, para citar dois exemplos. O último caso explica o fato do espectro de absorção ser o “negativo” do espectro de emissão atômica.

Conceitos Importantes na Física Atômica - cont.

8. **No caso do átomo de hidrogênio, que tem um único elétron, o valor (negativo) da energia de ligação é a energia do estado atômico. O valor positivo dessa energia é a energia de ionização do átomo naquele estado.**
9. **Energia de ligação de um elétron no átomo: o negativo do valor mínimo de energia (positiva) que deve ser dada ao elétron ligado, para que ele se desligue da força (atrativa) que o prende ao átomo.**
10. **Nas tabelas a energia de ionização do átomo, que é a mínima energia (positiva) que deve ser dada ao átomo para ionizá-lo uma vez, quando no estado fundamental. Portanto, ele é o módulo da energia de ligação do elétron menos ligado do átomo no estado fundamental.**