

Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 17

Professora: Mazé Bechara

Aula 17 – O Modelo Atômico de Bohr

1. O experimento de Rutherford e a dimensão do núcleo atômico.
2. A questão da estabilidade atômica nesse modelo. As hipóteses de Bohr para a estrutura do átomo e das transições entre estados atômicos.
3. Determinações no contexto do modelo: raios, velocidades e energias do movimento do elétron (único) em relação ao núcleo em cada estado atômico. Comparação com os resultados experimentais.

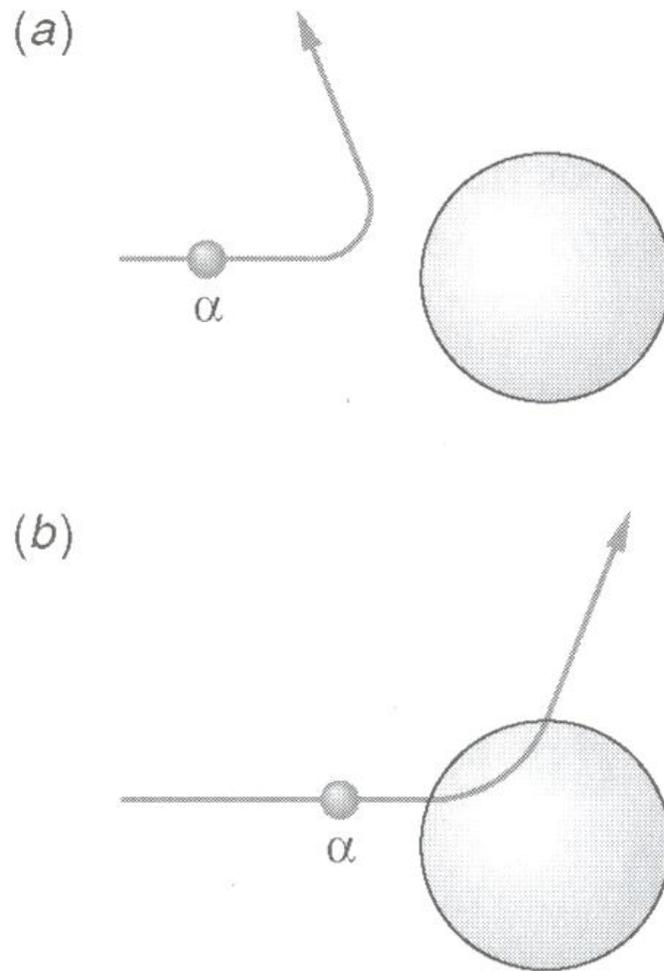
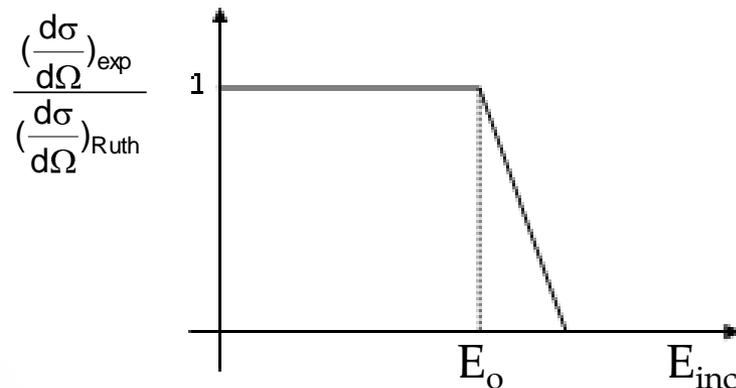


Fig. 4-13 (a) Se a partícula α não penetra no núcleo, este pode ser considerado uma carga pontual. (b) Se a partícula α tem energia suficiente para penetrar no núcleo, a lei de espalhamento de Rutherford deixa de ser válida, já que parte da carga do núcleo não é “vista” pela partícula durante o espalhamento.

Observação importante sobre o espalhamento de Rutherford experimental:

Em experimentos de Rutherford no qual se varia a energia das partículas incidentes, a partir de certo valor E_0 (que depende das condições de interação - partícula incidente, núcleo espalhador, energia incidente e ângulo de espalhamento) o resultado experimental não concorda com a previsão de Rutherford. De forma genérica e esquemática o comportamento é aproximadamente o seguinte:



A secção de choque experimental

$$\frac{d\sigma_{\text{exp}}}{d\Omega} = \frac{\frac{dN_{\text{exp}}(\theta)}{dt}}{[N_N I_o] \left(\frac{dA_{\text{det}}}{d^2} \right)}$$

$$N_N = \rho_{\text{alvo}} \frac{dA_{\text{feixe}} \Delta x_{\text{alvo}} N_o}{M_{\text{alvo}}}$$

$$I_o = \frac{i}{Z_{\text{feixe}} e dA_{\text{feixe}}}$$

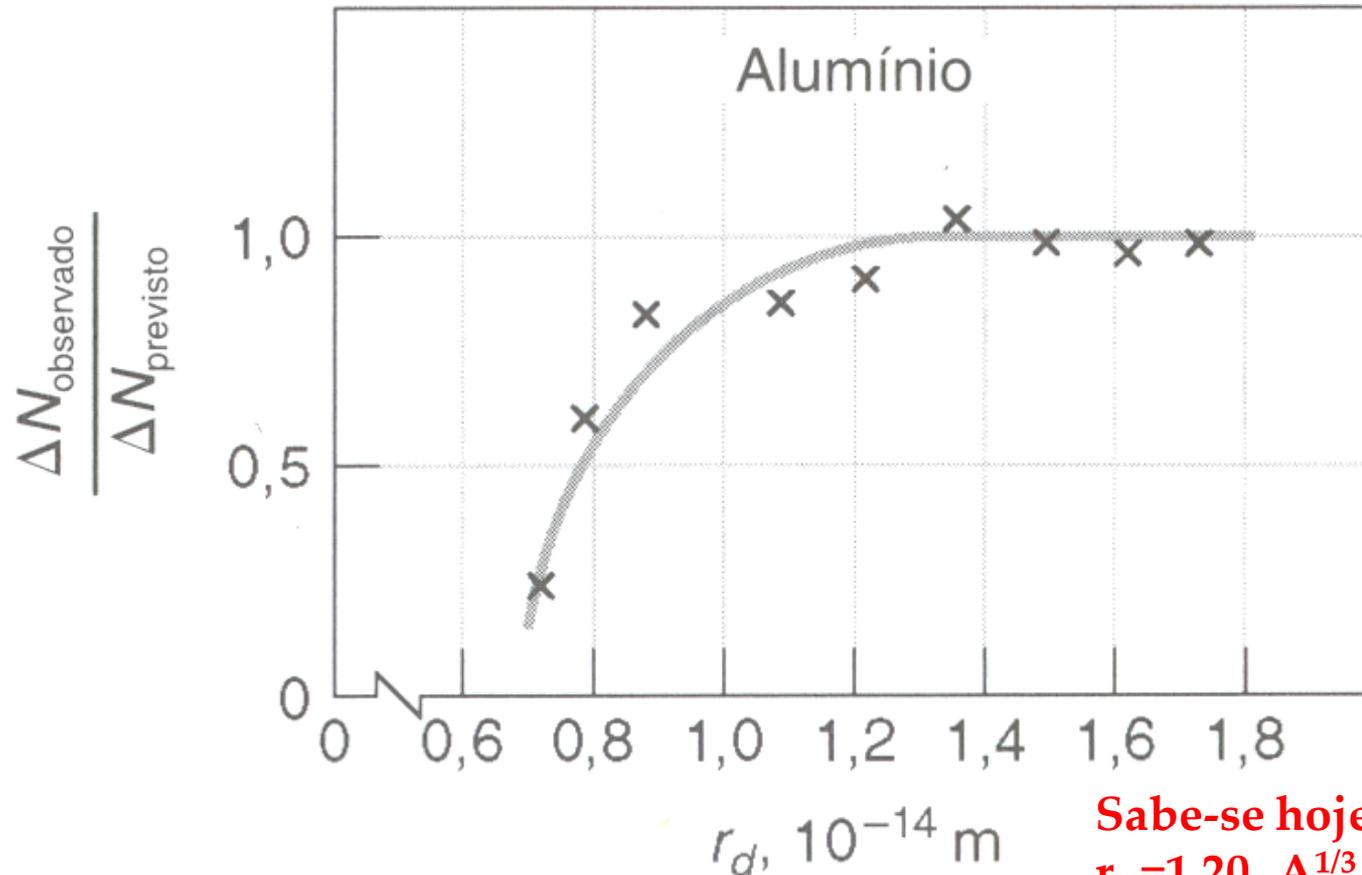
$$d\Omega_{\text{exp}} = \frac{dA_{\text{det}}}{d^2}$$

Observação importante sobre o espalhamento de Rutherford experimental:

Interpretação: para energias maiores do que E_0 a partícula incidente chega a distâncias menores do que a soma dos dois raios nucleares que interagem, e a interação eletromagnética deixa de ser inversamente proporcional à distância. Pode também haver outro tipo de interação, e de fato há a interação nuclear, no caso das partículas incidente e espalhadora serem núcleos.

Assim, a energia incidente E_0 está associada ao parâmetro de impacto que permite a máxima aproximação entre a partícula espalhada e o núcleo espalhador (mínima distância entre partícula incidente e o núcleo) ou seja:

$$r_{\min} = 2r_N = \frac{1}{2} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi \epsilon_0 E_0} \left(1 + \frac{1}{\text{sen} \frac{\theta}{2}} \right)$$



Sabe-se hoje que:
 $r_N = 1,20 A^{1/3} 10^{-15} \text{ m} = 1,20 A^{1/3} \text{ fm}$

Fig. 4-14 Resultados obtidos pelo grupo de Rutherford para o espalhamento de partículas α (para um ângulo fixo) em função de r_d , calculado a partir da energia cinética das partículas α usando a Eq. 4-11.

Observação importante sobre o espalhamento de Rutherford experimental:

Questão: Faça cálculo de r_{min} para o caso de colisão frontal ($\theta = \pi$) a partir da conservação da energia.

Estes experimentos permitiram estimar o raio do núcleo como da ordem de 10^{-15}m , ou seja, 100.000 vezes menor do que o raio do átomo.

Uma comparação futebolística

Se o núcleo tiver a dimensão da cabeça de um alfinete, ou seja, um raio de $1,5\text{mm}=1,5\times 10^{-3}\text{m}$, o átomo teria a dimensão de $1,5\times 10^2\text{m}=150\text{m}$, que é aproximadamente a dimensão de um campo de futebol.

Aula de Física também é CULTURA

DIMENSÕES DO CAMPO DE FUTEBOL

Um campo de futebol é retangular e deve ter um comprimento mínimo de 90 m e o máximo de 120 m. A largura deverá ser de 45 m no mínimo e de 90 m no máximo.

DIMENSÕES DOS CAMPOS para JOGOS INTERNACIONAIS

Quando uma equipe tem de participar num jogo de uma competição internacional, o comprimento do campo deve ser de 100 m no mínimo e de 110 m no máximo.

Neste tipo de jogos, a largura do recinto de jogo deverá ter um mínimo de 64 m e um máximo de 75 m.

Aplicação de Rutherford- *refaça*

Um feixe de partículas alfa com 1nA e energia cinética de $6,0\text{MeV}$ incide perpendicularmente sobre uma fina folha de prata ($M=108$, $Z=47$, $\rho=10,5\times 10^6\text{g/m}^3$) de $1\mu\text{m}$ de espessura. Um detetor de partículas alfa com 5mm^2 de área é colocado a 2cm de distância do centro da folha.

- (a) Determine a seção de choque diferencial de Rutherford deste espalhamento a 180° e 90° . **Respostas: $0,32\times 10^{-28}\text{ m}^2$ e $1,3\times 10^{-28}\text{ m}^2$.**
- (b) Supondo que este espalhamento segue o resultado teórico de Rutherford, determine o número de partículas que devem entrar no detetor por segundo quando o detetor está colocado a 180° e a 90° da direção incidente. **Respostas: 72,3 e 289,4 part./segundo**
- (c) Determine a máxima aproximação entre uma alfa espalhada a 180° e o núcleo espalhador. **Resposta da conta - Faça: $2,3\times 10^{-14}\text{m}$.**
- (d) A resposta ao item (c) sustenta a hipótese inicial que a única interação é a repulsão coulombiana no espalhamento a 180° ? E a 90° ? Justifique.
- (e) Compare a densidade atômica com a nuclear da prata.

Resultados da mecânica clássica no caso de interação coulombiana repulsiva

A energia incidente E_{inc} está associada ao parâmetro de impacto que permite a máxima aproximação entre a partícula espalhada e o núcleo espalhador (mínima distância entre partícula incidente e o núcleo) a cada ângulo de espalhamento θ .

A relação matemática é a seguinte:

$$r_{\min} = D_{\max} = \frac{1}{2} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi \epsilon_0 E_{inc}} \left(1 + \frac{1}{\text{sen} \frac{\theta}{2}} \right)$$

Observe que a máxima aproximação, ou valor da mínima distância entre alfa e núcleo se dá na colisão frontal na qual a trajetória é uma reta: $b=0$, $\theta=180$ graus, $L=0$.

A instabilidade no átomo de Rutherford

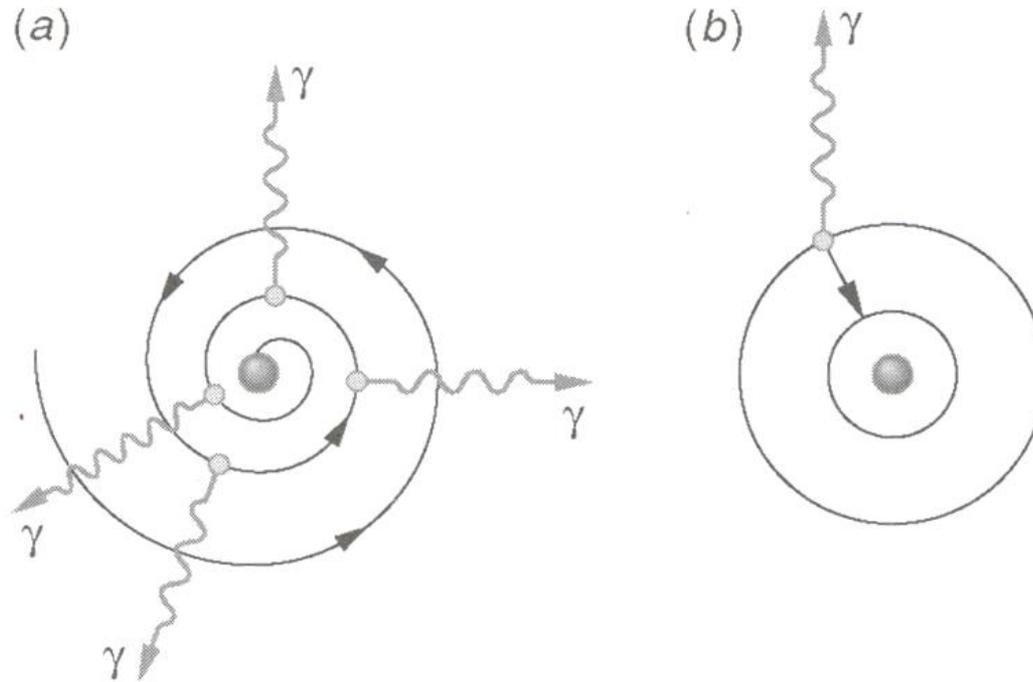


Fig. 4-15 (a) No modelo clássico do átomo, o elétron descreve uma espiral em direção ao núcleo porque está constantemente irradiando energia. (b) No modelo de Bohr, o elétron só irradia energia quando executa uma transição para uma órbita de raio menor.

**Niels Henrik David Bohr (1885 –1962) Físico
dinamarquês - Prêmio Nobel de Física em 1922.**



Hipóteses do Bohr para a estrutura Atômica dando a volta na instabilidade atômica

1. Os átomos são compostos por um núcleo muito menor do que o átomo (que $\sim 10^{-15}\text{m}$; $1\text{fm} = 10^{-5}\text{Å}$) com carga $+Ze$ e concentra 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 ($10^{-10}\text{m} = 1\text{ angstrom}$) por meio de interações coulombianas atrativas.
2. Cada elétron tem órbita circular em torno do núcleo, a trajetória de mínima energia segundo a mecânica clássica newtoniana.

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, **permanecem (por um tempo) nestas órbitas permitidas sem emitir radiação eletromagnética.**

Hipóteses do Bohr para a estrutura e atômica

5. Somente a órbita de menor energia está em equilíbrio estável.
6. As outras órbitas permitidas formam o conjunto de estados chamados excitados, que são instáveis, significando que depois de algum tempo em uma destas órbitas o átomo passa espontaneamente para um estado de menor energia até chegar ao estado fundamental.

Hipóteses de 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 o valor exato da energia que precisa para cada transição, da energia cinética de outra partícula.

As energias envolvidas nas transições atômicas

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

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

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

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

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

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

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

Obs. 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.

Órbita circular da atração coulombiana

elétron ($-e$) e um núcleo ($+Ze$)

- **Determinações em sala de aula:**
- (a) **raio, velocidade e energia** sem quantização do momento angular L (**física newtoniana**);
- (b) Idem na física newtoniana com quantização do momento angular L , conforme proposta de Bohr:

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

Modelo de Bohr - resultados – (re)faça

- Os raios do movimento relativo:

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

- As velocidades:

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

- As energias:

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

A emissão do átomo de H – (re)faça

- Os comprimentos de onda emitidos (e absorvidos):

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

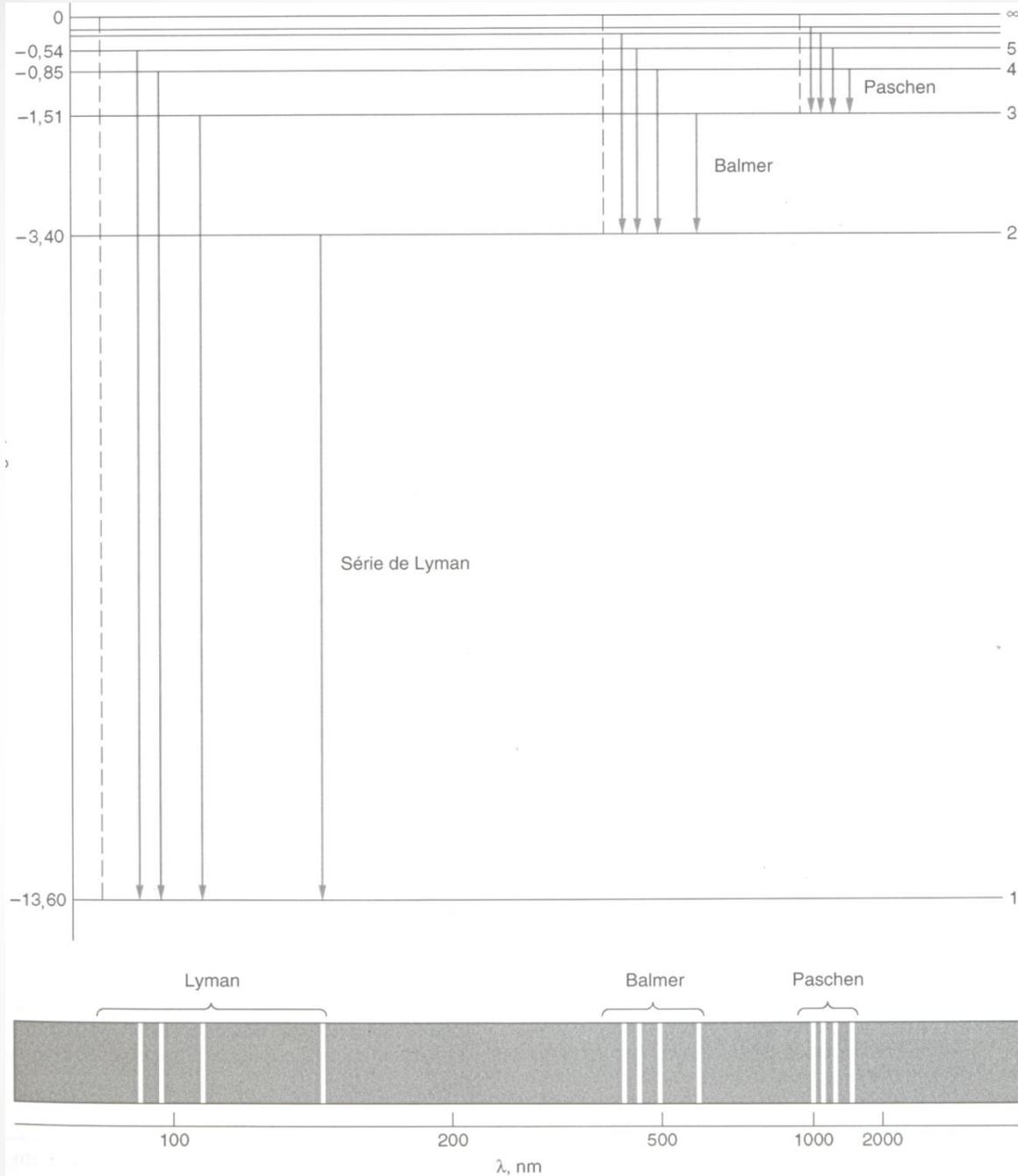
$$n = 1, 2, 3, \dots > n'$$

$n' = 1$ Série de Lyman

$n' = 2$ Série de Balmer

$n' = 3$ Série de Paschen....

- **Em acordo com a emissão e absorção experimental**



Apêndice

Nomes e conceitos na Física Atômica

Conceitos Importantes na Física Atômica

1. **Estado Atômico:** uma dada situação de estrutura do átomo, ou seja, a dinâmica do núcleo e dos elétrons e as grandezas físicas deste estado dinâmico. Entre essas grandezas do estado dinâmico estão as seguintes grandezas físicas com valores constantes: a **energia e o momento angular que 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 grande parte dos átomos).
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, por concepção, de acordo com a natureza física, 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

- 4. Espectro 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. No modelo de Bohr para o hidrogênio há um único número quântico, n , que é chamado de número quântico principal.

Conceitos Importantes na Física Atômica

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); absorção de fótons, para citar alguns 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.**