

Física IV

Introdução à Física Moderna

Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva

O Efeito Compton

Einstein, em 1919, concluiu que um fóton de energia E se desloca em uma única direção (diferentemente de uma onda esférica) e é portador de um momento (linear):

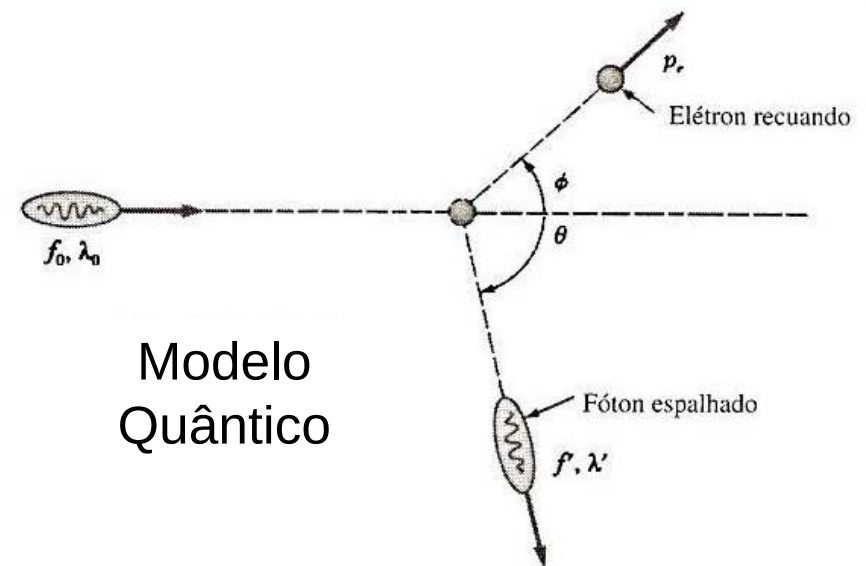
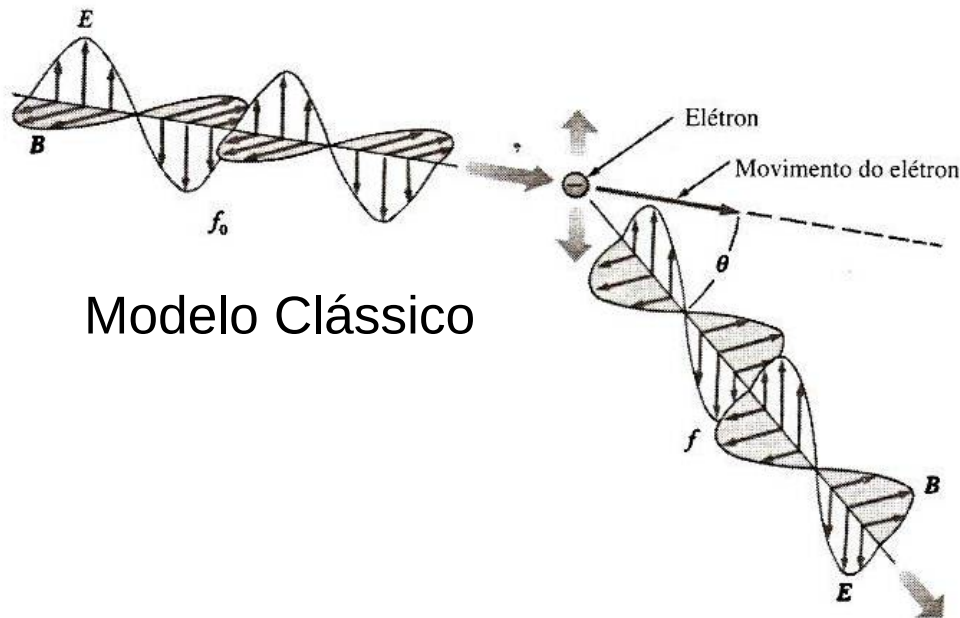
$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

Nas palavras de Einstein:

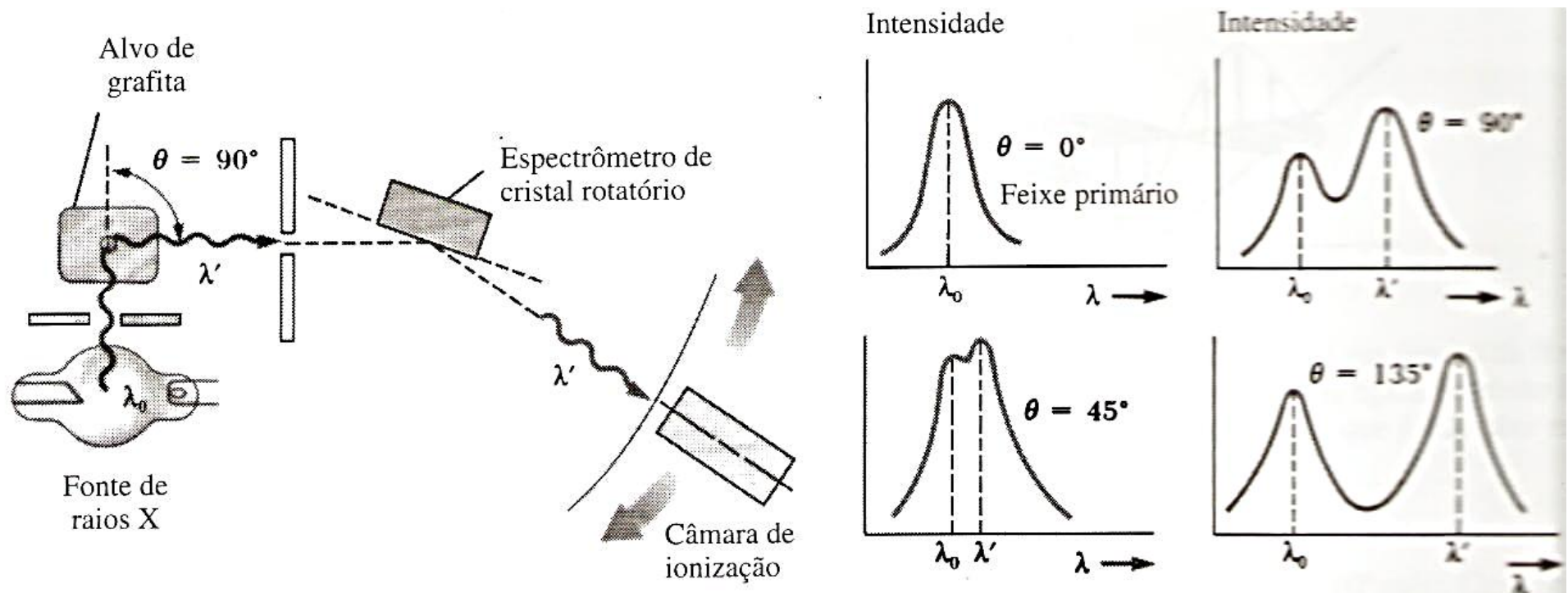
“Se um pacote de radiação provoca a emissão ou absorção de um pacote de energia hf por uma molécula, então há uma transferência de momento para a molécula (no valor hf/c), que será na direção do pacote quando houver absorção e na direção oposta à do pacote quando houver emissão”.

O Efeito Compton

Compton e Debye em 1923, independentemente um do outro, ampliaram mais ainda a ideia de Einstein sobre o momento. Perceberam que o espalhamento de fótons de raios X por elétrons poderia ser explicado considerando-se os fótons como partículas puntiformes, com energia hf e momento hf/c , e conservando-se a energia e o momento do par fóton-elétron na colisão.



- Classicamente esperaríamos somente um pico de $\lambda = \lambda_0$ da radiação incidente, o que não ocorre.
- A explicação é baseada no fato do fóton carregar momento linear ($\vec{p}$) e energia (E).



Na sua análise, Compton previu que o pico deslocado deveria depender do ângulo de espalhamento θ conforme:

Equação do deslocamento Compton $\rightarrow \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$

onde, m_e é a massa do elétron.

$$\lambda_c \equiv \frac{h}{m_e c} \approx 2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$$

é o *comprimento de onda de Compton* da partícula espalhada.

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

Exemplo

Energia e momento de um fóton

Calcular a energia e o momento de um fóton de comprimento de onda de 700 nm.

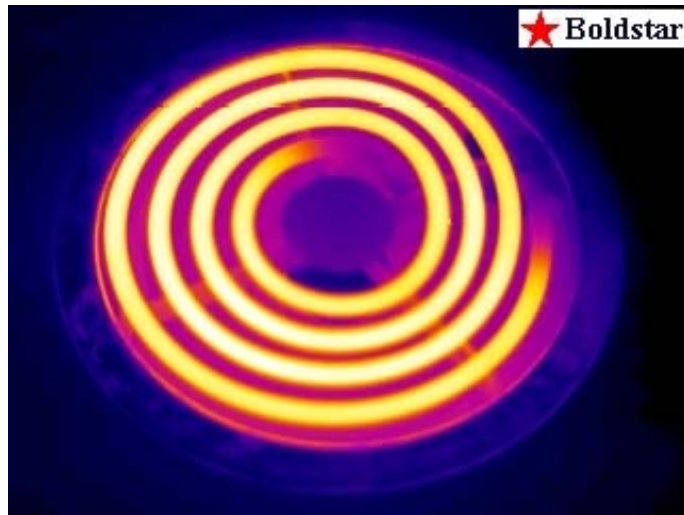
Exemplo

Espalhamento Compton a 45°

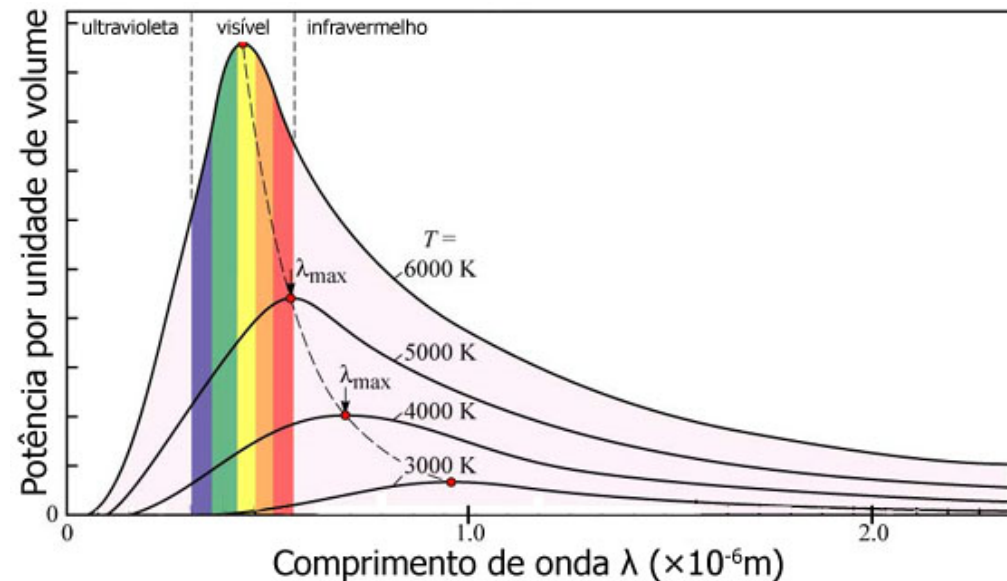
Um feixe de raios X de comprimento de onda $\lambda_0 = 0,20 \text{ nm}$ é espalhado por um alvo. Os raios X espalhados são observados sob ângulo de 45° em relação ao feixe incidente. Calcular o comprimento de onda dos raios X espalhados sob este ângulo.

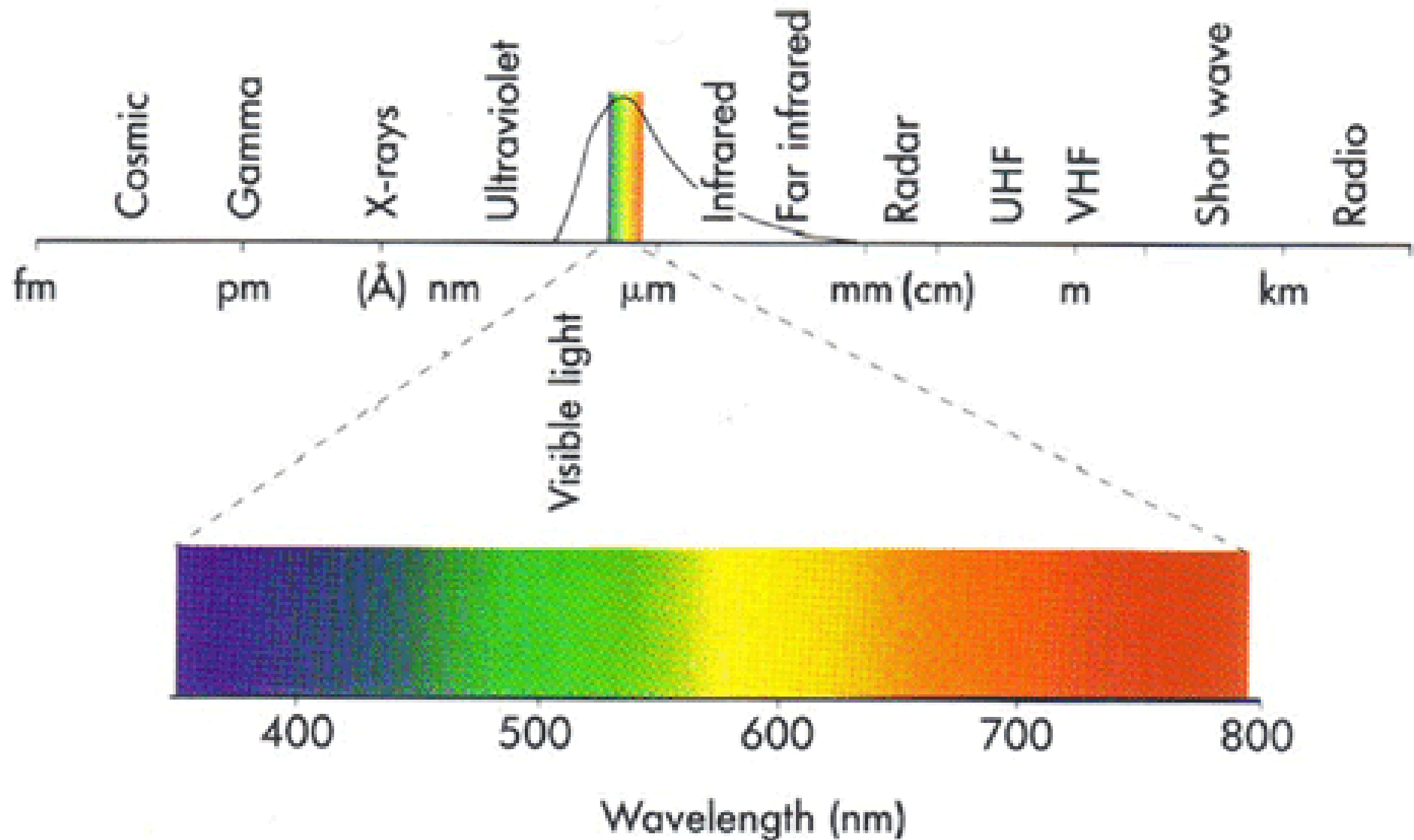
Espectros atômicos

Toda substância a uma certa temperatura emite radiação térmica, caracterizada por uma distribuição contínua de comprimentos de onda. A forma da distribuição depende da temperatura e das propriedades da substância.

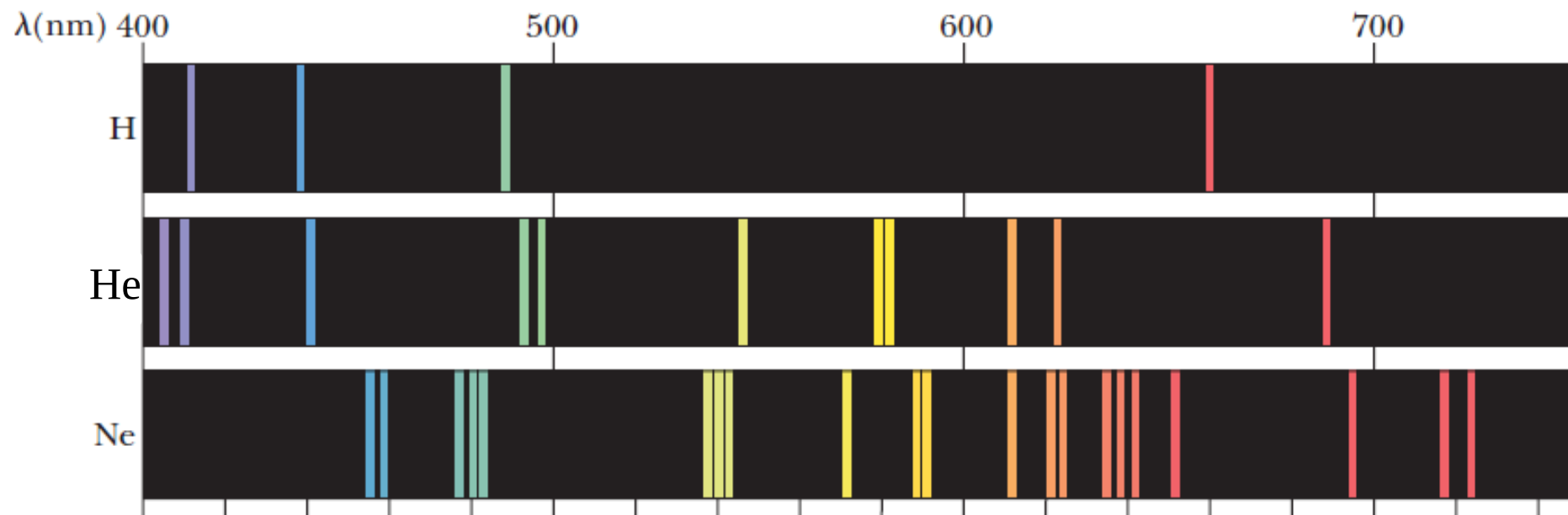


Material aquecido emite
no visível

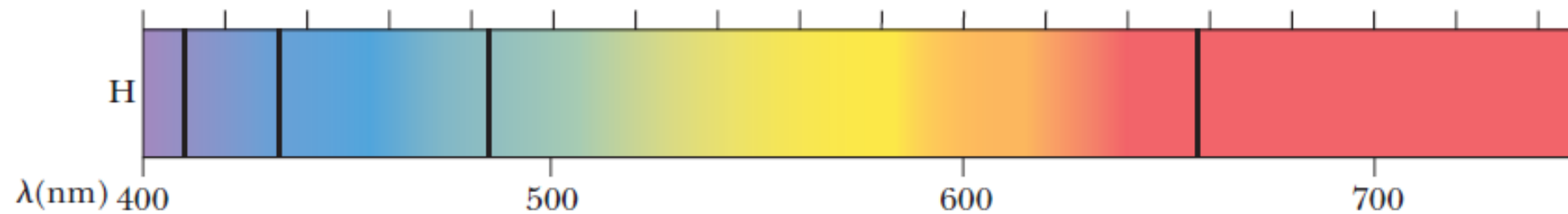




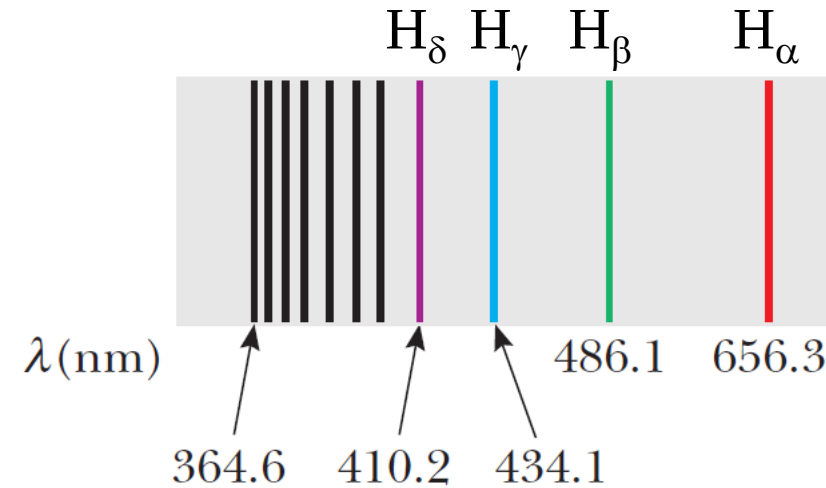
Espectro de emissão



Espectro de absorção



A série de Balmer das
raias espectrais do
hidrogênio



Série de Balmer:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

$$R_H = 1,0973732 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

(Constante de Rydberg)

Outras séries espectrais para o hidrogênio foram descobertas:

Série de Lyman: $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, 5, \dots$

Série de Paschen: $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, 7, \dots$

Série de Brackett: $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 5, 6, 7, 8, \dots$

Série de Pfund: $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 6, 7, 8, 9, \dots$

O modelo quântico de Bohr para o átomo



NIELS BOHR, Danish Physicist
(1885–1962)

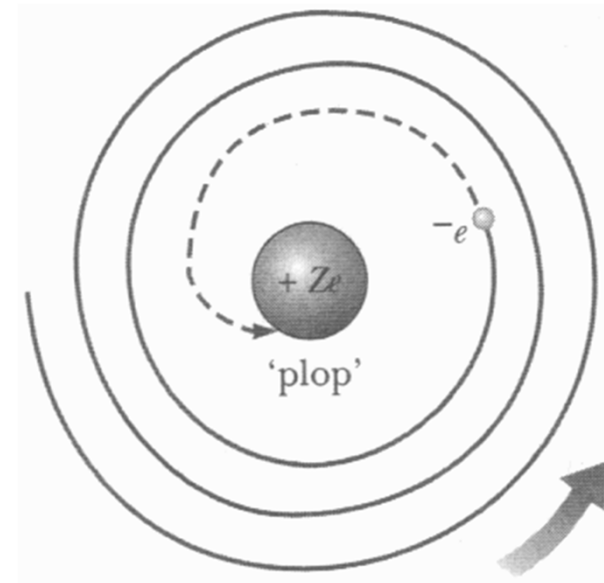
No início do século XX, os cientistas estavam perplexos ante ao fracasso da física clássica em explicar as características dos espectros atômicos.

- Por que o hidrogênio só emite certas raías na região do espectro visível?
- Por que o hidrogênio só absorve as raías que têm os comprimentos de onda que emite?

O átomo na “Antiga” Mecânica Quântica

- Rutherford então propôs um modelo no qual toda a carga positiva dos átomos, que comportaria praticamente toda a sua massa, estaria concentrada numa pequena região do seu centro: **o núcleo**. Os elétrons, então, ficariam orbitando em torno deste núcleo: Modelo “**planetário**”.

Entretanto, estes elétrons em órbita estariam acelerados (aceleração centrípeta). Assim, segundo o eletromagnetismo, deveriam **emitir energia na forma de radiação eletromagnética**, até colapsarem para o núcleo!



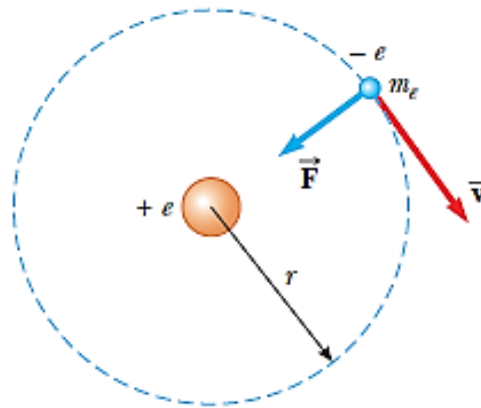
A teoria de Bohr era uma combinação de ideias:

- Da teoria quântica original de Planck
- Da teoria de fótons de luz, de Einstein
- Do modelo atômico de Rutherford

O modelo de átomo de Bohr tem aspectos clássicos e também postulados revolucionários.

As ideias básicas da teoria de Bohr para o átomo de hidrogênio são as seguintes:

1) **O elétron se move em órbitas circulares em torno do próton**, sob influência da força de atração coulombiana do núcleo.
(Mecânica Clássica)



2) **Somente certas órbitas são estáveis**. Estas órbitas estáveis são aquelas nas quais o elétron não irradia. Então, a energia está fixa, ou estacionária, e a mecânica clássica pode ser usada para descrever o movimento do elétron.

3) A radiação é emitida pelo átomo quando o elétron “salta” de um estado estacionário inicial, com energia maior, para um estado com menor energia. Este “salto” não pode ser visualizado ou tratado classicamente. Em particular, a frequência f do fóton emitido no salto é independente da frequência do movimento orbital do elétron. A frequência da luz emitida está relacionada com a variação da energia do átomo e é dada pela fórmula de Planck-Einstein

$$E_i - E_f = h f$$

E_i é a energia do estado inicial

E_f a energia do estado final

$$E_i > E_f$$

4) O tamanho das órbitas permitidas do elétron é determinado pela condição quântica adicional imposta ao momento angular orbital do elétron. Ou seja, as órbitas permitidas são aquelas nas quais o momento angular orbital do elétron é um múltiplo inteiro de $\hbar$

$$mvr = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$(\hbar = h/2\pi)$$

Níveis de Energia e comprimentos de onda permitidos

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m k e^2} \longrightarrow \text{O raio das órbitas estacionárias}$$

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m k e^2} = 0,0529 \text{ nm} \longrightarrow \text{A órbita com } n = 1 \text{ tem o menor raio, é o chamado raio de Bohr}$$

$$E_n = -\frac{k e^2}{2 a_0} \left(\frac{1}{n^2} \right)$$

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

Quantização da energia

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$

- O **estado fundamental**, $n = 1$, tem a energia: $E_1 = -13,6eV$
- O primeiro **estado excitado**, $n = 2$, tem a energia: $E_2 = -\frac{E_1}{2^2} = -3,4eV$

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} eV$$

Juntamente com o terceiro postulado de Bohr, permite que se calcule a frequência do fóton emitido quando o elétron salta de uma órbita mais externa para uma órbita mais interna:

Frequência:

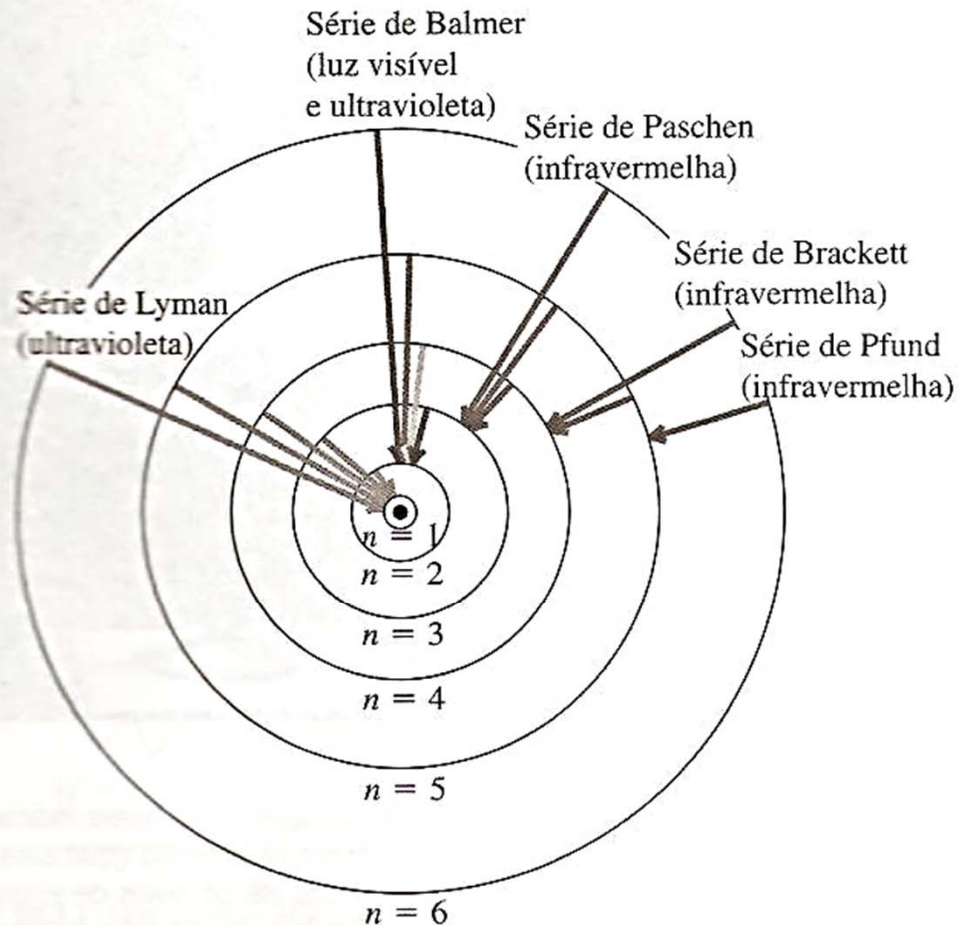
$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{ke^2}{2a_0h} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Comprimento
de onda:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{ke^2}{2a_0hc} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

(a) Órbitas 'permitidas' para um elétron no modelo de Bohr do átomo de hidrogênio (não em escala). As transições responsáveis por algumas das linhas das diversas séries são indicadas por setas.



(b) Diagrama dos níveis de energia do hidrogênio, mostrando algumas transições correspondentes às diferentes séries.

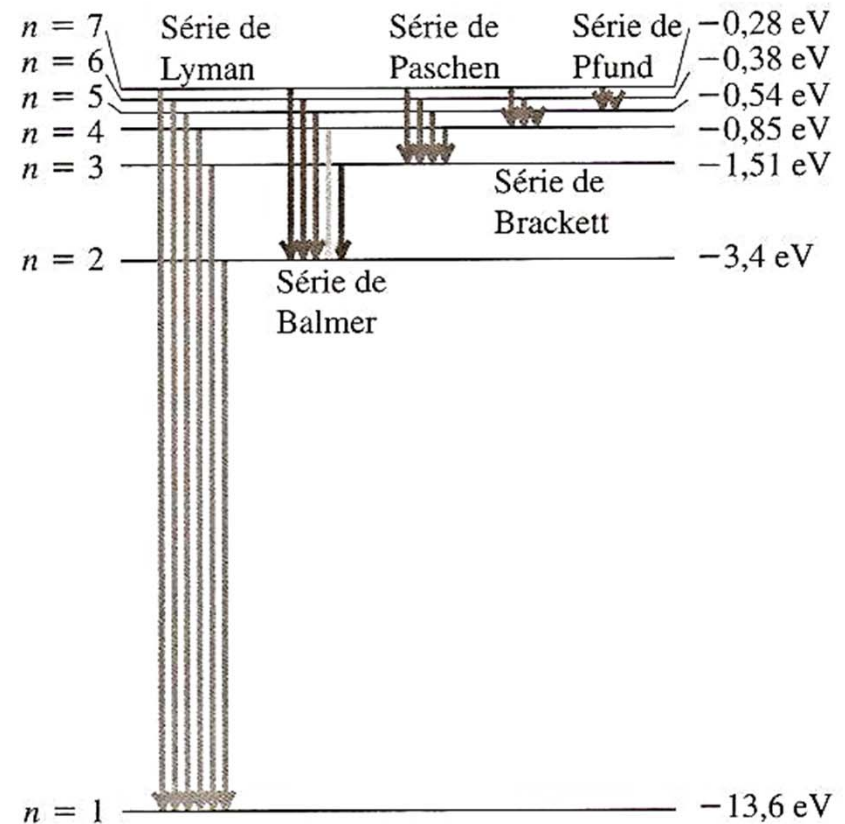


Figura 38.9 Duas formas de representar os níveis de energia do átomo de hidrogênio e transições entre as diferentes séries.

Bohr generalizou imediatamente o seu modelo para o hidrogênio e aplicou-o a outros elementos em que todos os elétrons, exceto um, tivessem sido removidos.

Elementos ionizados como: He^+ , Li^{++} e Be^{+++}

Carga do núcleo $+Ze$

$$\longrightarrow r_n = n^2 \frac{a_0}{Z}$$

$$\longrightarrow E_n = -\frac{ke^2}{2a_0} \left(\frac{Z^2}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Exemplo

Raias espectrais da estrela ζ -Puppis

As misteriosas raias observadas por Pickering, em 1896 no espectro da estrela ζ -Puppis, ajustam-se à formula empírica

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{(n_f/2)^2} - \frac{1}{(n_i/2)^2} \right)$$

Mostre que estas raias podem ser explicadas pela teoria de Bohr como originando-se do He^+ .

Exemplo

Uma transição eletrônica no hidrogênio

O elétron, no átomo de hidrogênio, faz uma transição do estado de energia $n = 2$ para o estado fundamental (correspondente a $n = 1$).

Ache o comprimento de onda e a frequência do fóton emitido.

Qual o comprimento de onda do fóton emitido quando o elétron faz uma transição do estado $n = 3$ para o estado $n = 1$?

Exemplo

Série de Balmer para o hidrogênio

A série de Balmer para o átomo de hidrogênio corresponde a transições eletrônicas que terminam no estado de número quântico $n = 2$.

- (a) Achar o comprimento de onda do fóton de maior comprimento de onda emitido e determinar sua energia.
- (b) Achar o comprimento de onda do fóton de menor comprimento de onda emitido e determinar sua energia.