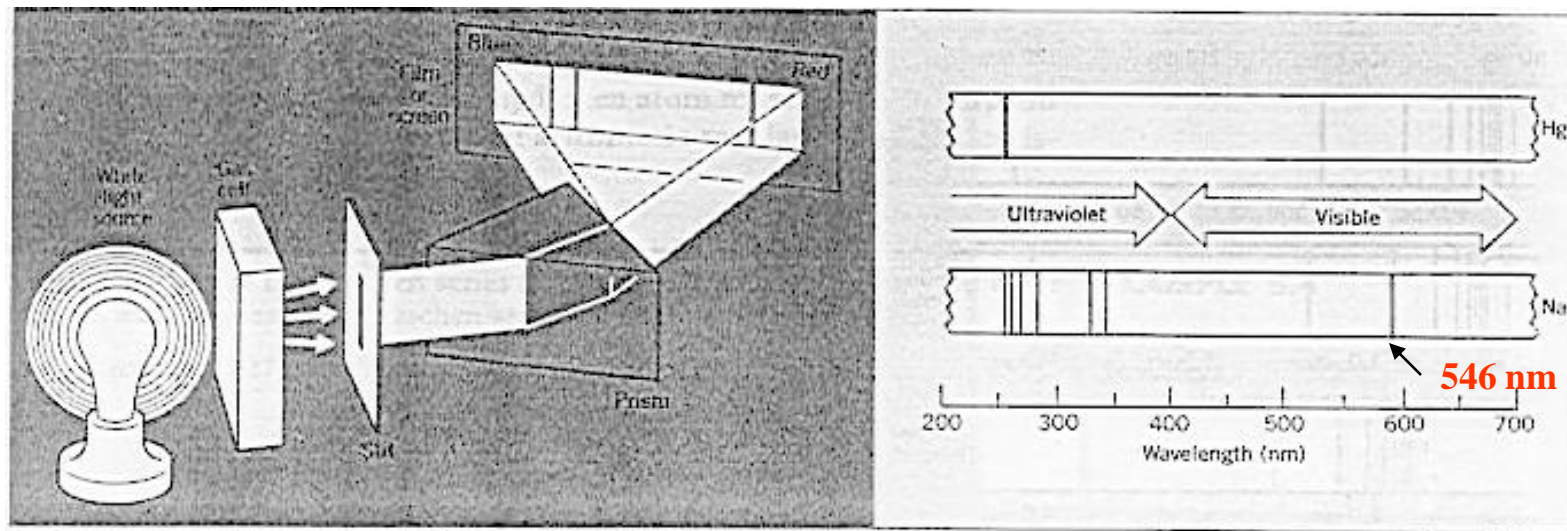


**FIGURE 6.17** Apparatus for observing line spectra. Light is emitted when an electric discharge is created in a tube containing a vapor of an element. The light passes through a dispersive medium, such as a prism or a diffraction grating, which displays the individual component wavelengths at different positions. Sample line spectra are shown for mercury and sodium in the visible and near ultraviolet.

## Espectros de Emissão

# LINHAS ESPECTRAIS



**FIGURE 6.18** Apparatus for observing absorption spectra. A light source produces a continuous range of wavelengths, some of which are absorbed by a gaseous element. The light is dispersed, as in Figure 6.17. The result is a continuous "rainbow" spectrum, with dark lines at wavelengths where the light was absorbed by the gas.

## Espectros de Absorção

# SÉRIES ESPECTRAIS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO DO HIDROGÊNIO

$$\lambda = \lambda_{\text{lim}} \left[ \frac{n^2}{n^2 - n_0^2} \right]$$

$p/n \rightarrow \infty$

$n_0 = 1$

91.18 nm

Lyman

90 nm 100 nm 110 nm 120 nm

Lyman (ultraviolet)

Espectro de absorção

$n_0 = 2$

364.5 nm

Balmer

400 nm 500 nm 600 nm

Balmer (visible)

Espectros de emissão

$n_0 = 3$

820.6 nm

Paschen

0.5  $\mu\text{m}$  1.0  $\mu\text{m}$  1.5  $\mu\text{m}$  2.0  $\mu\text{m}$

Paschen (infrared)

$n_0 = 4$

1458.8 nm

Brackett

1.0  $\mu\text{m}$  2.0  $\mu\text{m}$  3.0  $\mu\text{m}$  4.0  $\mu\text{m}$

Brackett (infrared)

$n_0 = 5$

2279.4 nm

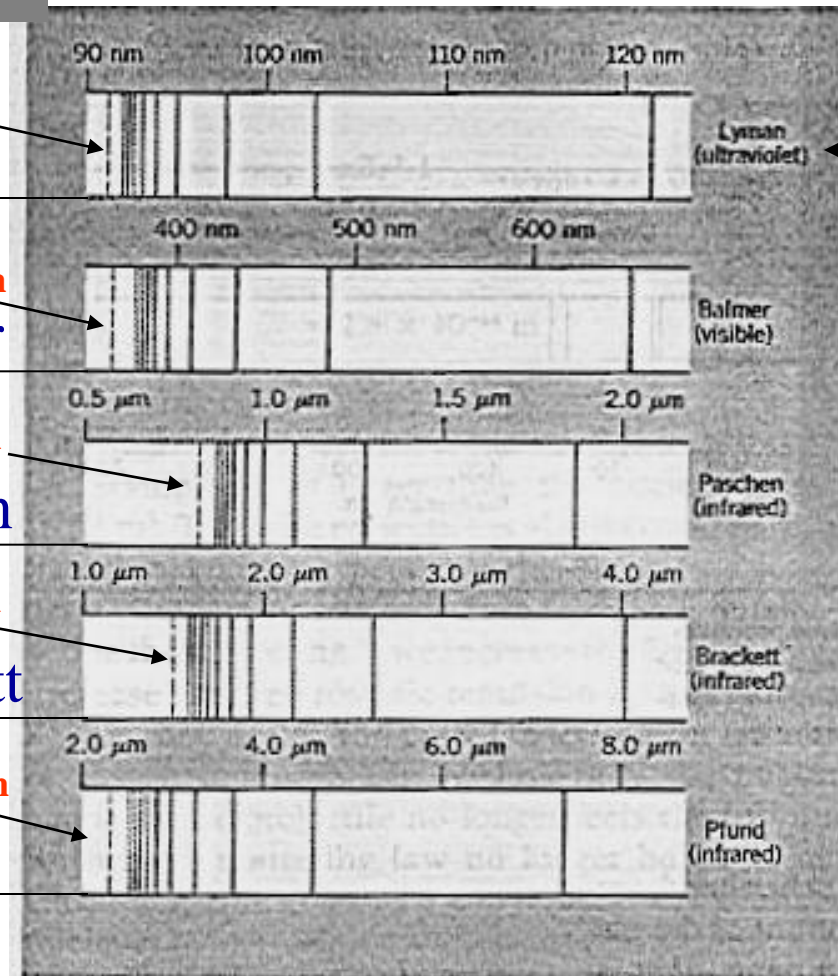
Pfund

2.0  $\mu\text{m}$  4.0  $\mu\text{m}$  6.0  $\mu\text{m}$  8.0  $\mu\text{m}$

Pfund (infrared)

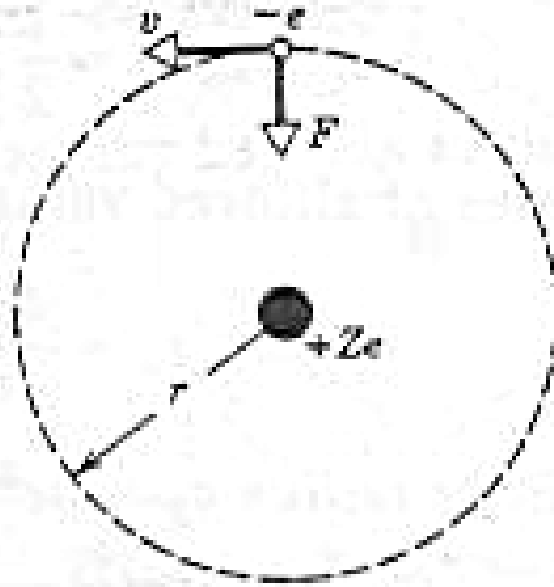
$$n_0^2 / R_H$$

Cte de Rydberg  
1/(91.18 nm)



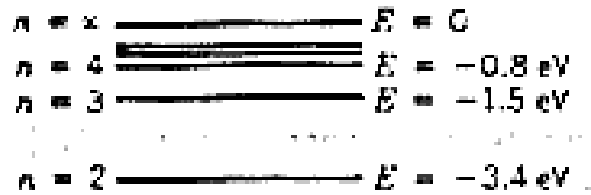
**FIGURE 6.19** Emission and absorption spectral series of hydrogen. Note the regularities in the spacing of the spectral lines. The lines get closer together as the limit of each series (dashed line) is approached. Only the Lyman series appears in the absorption spectrum; all series are present in the emission spectrum.

# MODELO DO ÁTOMO DE BOHR



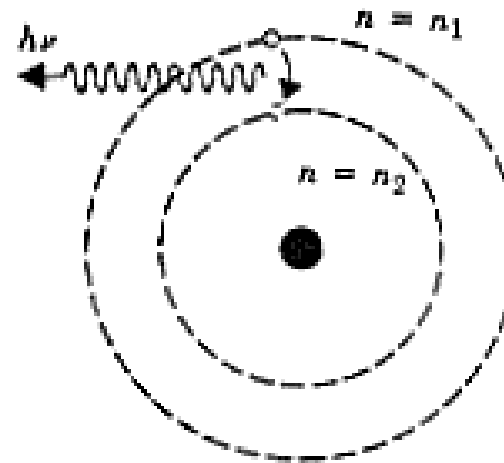
**FIGURE 6.20** The Bohr model of the atom ( $Z = 1$  for hydrogen).

# NÍVEIS DE ENERGIA



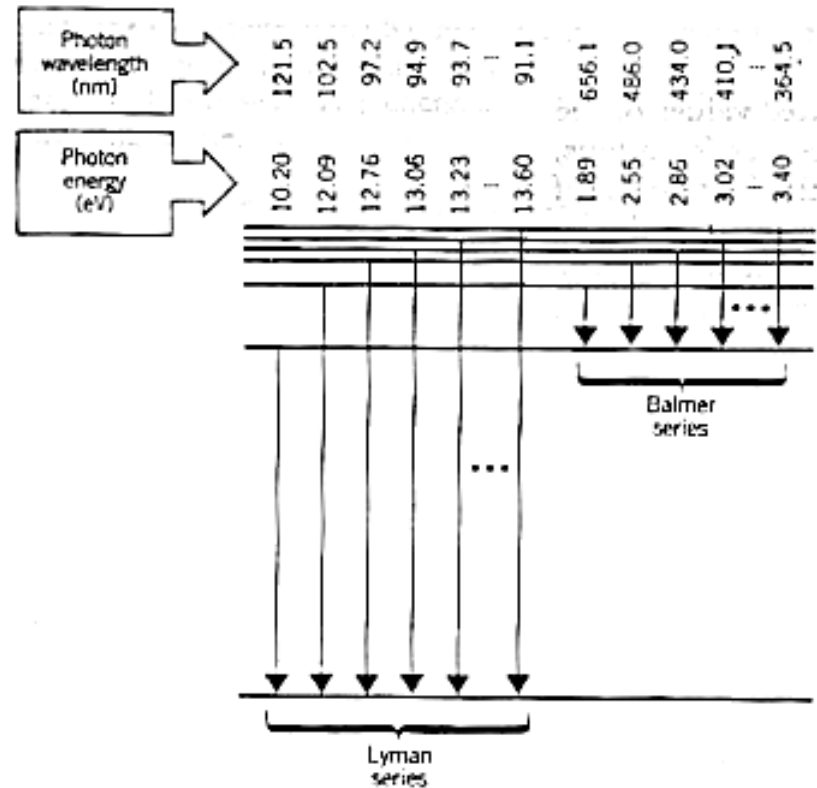
**FIGURE 6.21** The energy levels of atomic hydrogen.

# EMISSÃO DE UM FÓTON



**FIGURE 6.22** An electron jumps from the state  $n_1$  to the state  $n_2$  and emits a photon.

# TRANSIÇÕES DAS SÉRIES DE LYMAN E BALMER



**FIGURE 6.23** The transitions of the Lyman and Balmer series in hydrogen.

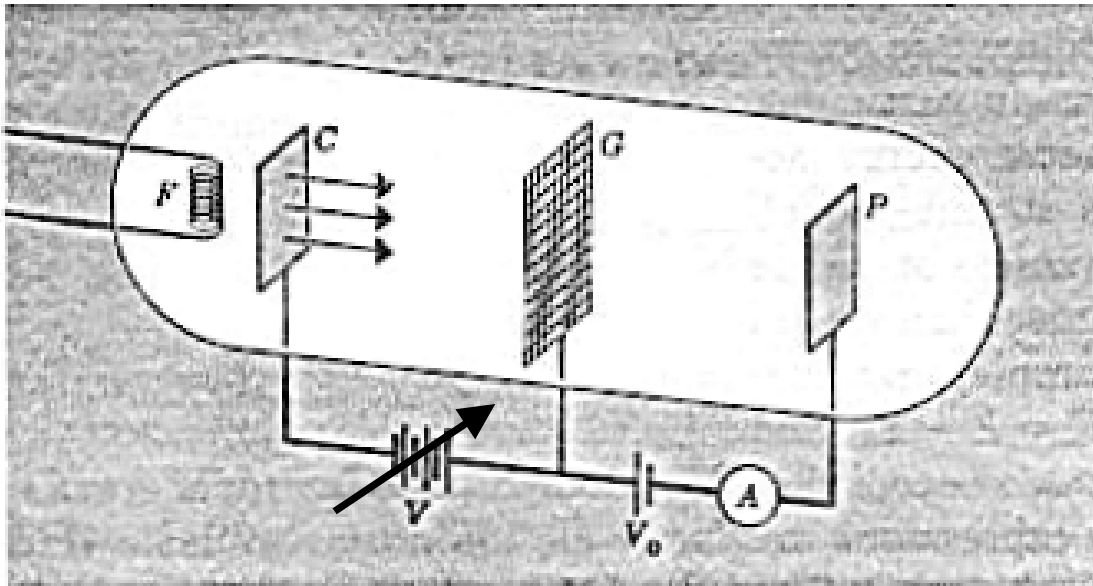
# EXP. DE FRANCK-HERTZ

Tubo c/ H atômico

V aceleram os elétrons emitidos por C

Passam por G e são levemente desacelerados entre G e P

Elétrons que chegam em P formam a corrente I



ELÉTRONS COLIDEM C/ OS  
ÁTOMOS DE H → DEPENDENDO  
DA ENERGIA DO ELÉTRON →  
**ÁTOMO DE H PODE FAZER  
UMA TRANSIÇÃO P/ UM  
NÍVEL EXCITADO**

# EXP. DE FRANCK-HERTZ

Aumentando  $V \rightarrow$  inicialmente  $I \uparrow$   
até que  $qV = 10,2 \text{ eV}$   
(*acima do estado fundamental*)

Elétron colide inelasticamente c/ o átomo de H

EXCITAÇÃO DO H ( $n=2$ )  
 $10.2\text{eV} = -3.4\text{eV} - (-13.6\text{eV})$

Elétron perde energia  $\rightarrow I \downarrow$

Aumentando  $V \gg 10.2\text{V} \rightarrow I \uparrow$   
até que  $qV = 12,1 \text{ eV}$   
(*acima do estado fundamental*)

Elétron colide inelasticamente c/ o átomo de H

EXCITAÇÃO DO H ( $n=3$ )  
 $12.1\text{eV} = -1.5\text{eV} - (-13.6\text{eV})$

Elétron perde energia  $\rightarrow I \downarrow$

Picos em  $I$  continuam até  $13.6 \text{ eV}$

$P/ V > 13.6 \text{ V} \rightarrow$  podem ocorrer excitações em colisões inelásticas sequenciais,  
começando em  $20.4\text{eV}$  ( $2 \times 10.2\text{eV}$ )

Ocorrem picos de  $I$  p/ múltiplos e combinações de picos iniciais ( $< 13.6 \text{ V}$ )  
( $2 \times 12.1\text{eV}$  de  $n_1$  para  $n_2$  ou  $2 \times 12.8\text{eV}$  de  $n_1$  para  $n_3$ )

Se um aumento de  $I$  é observado p/ uma tensão  $V \rightarrow$  este mesmo aumento será observado em  $2V, 3V$  ou  $4V$

# EXP. DE FRANCK-HERTZ

Aumentando  $V \rightarrow$  inicialmente  $I \uparrow$   
 até que  $qV = 10,2 \text{ eV}$   
 (acima do estado fu

Aumentando  $V \gg 10.2V \rightarrow I \uparrow$   
 até que  $qV = 12,1 \text{ eV}$   
 (acima do estado fundamental)

Elétron colide inelasticame

inelasticamente c/ o átomo de H

EXCITAÇÃO DO

EXCITAÇÃO DO H ( $n=3$ )

$10.2\text{eV} = -3.4\text{eV} - (-13.6\text{eV})$

$12.1\text{eV} = -1.5\text{eV} - (-13.6\text{eV})$

Elétron perde energia

elétron perde energia  $\rightarrow I \downarrow$

Pico

$P/V > 13.6 \text{ V} \rightarrow p$

elásticas sequenciais,

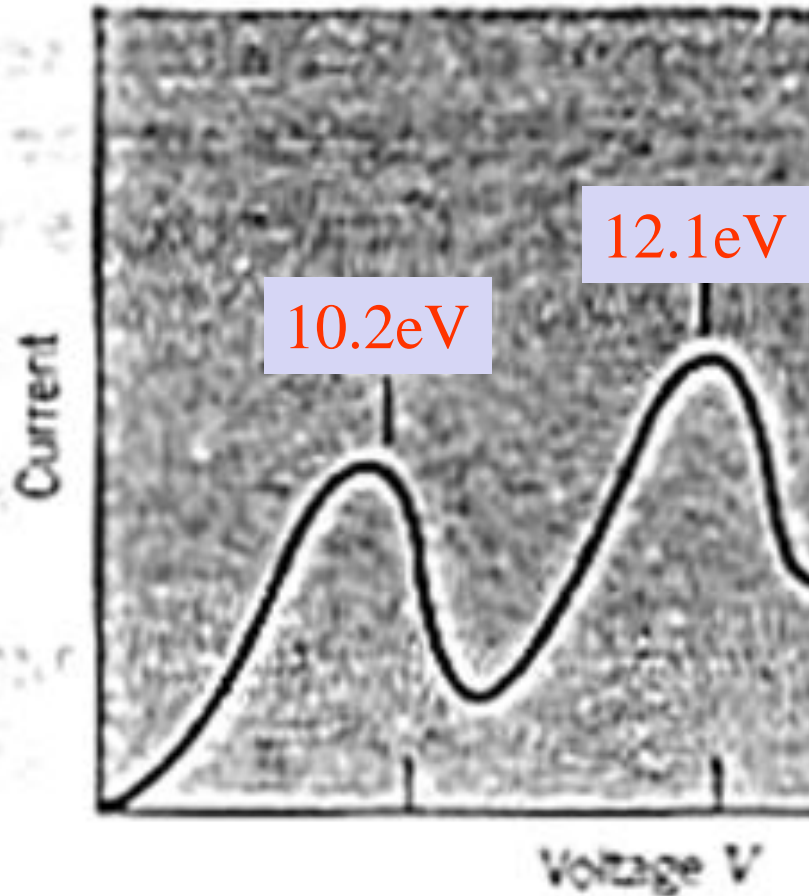
Ocorrem picos de  $I$

( $2 \times 1$

picos iniciais ( $< 13.6 \text{ V}$ )

$n_1$  para  $n_3$ )

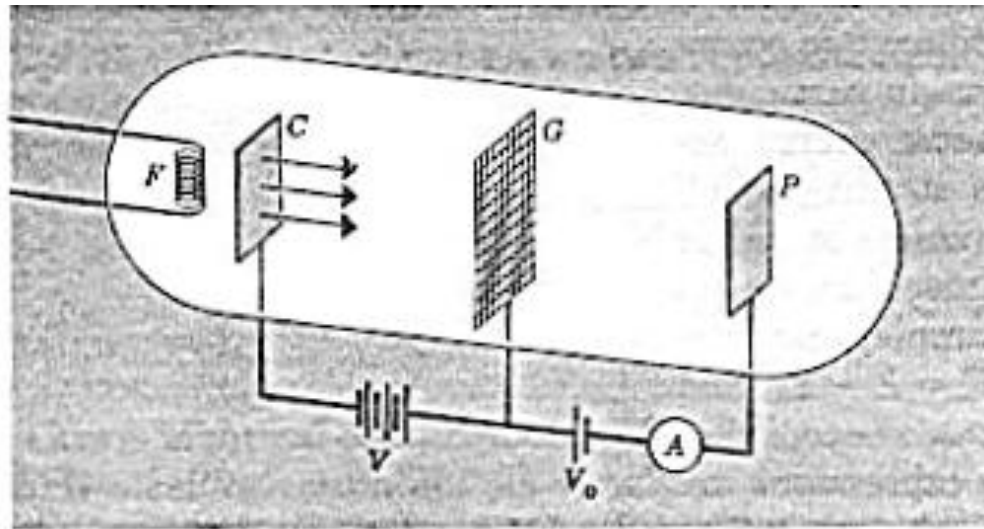
Se um aumento de  $I$  é observado p/ uma tensão  $V \rightarrow$  este mesmo aumento será observado em  $2V, 3V$  ou  $4V$



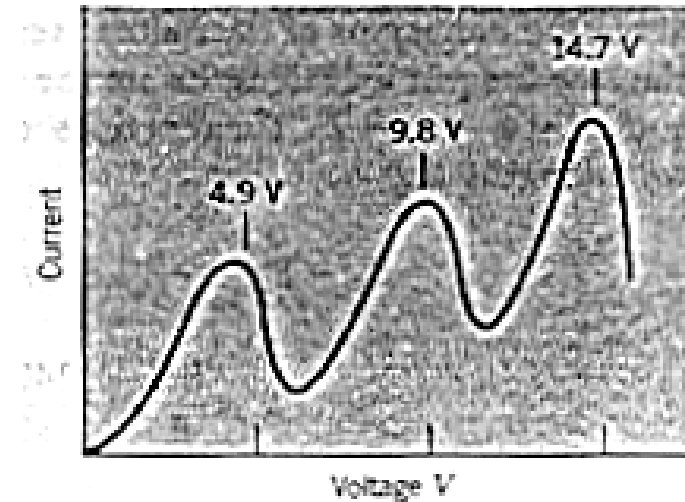


## EXP. DE FRANCK-HERTZ

- Vapor de Hg → tubo
- Excitação para  $E=4.9\text{eV}$  acima do estado fundamental e múltiplos



**FIGURE 6.24** Franck-Hertz apparatus. Electrons leave the cathode C, are accelerated by the voltage  $V$  toward the grid G, and reach the plate P where they are recorded on the ammeter A.



**FIGURE 6.25** Result of Franck-Hertz experiment using mercury vapor. The current drops at  $V = 4.9\text{ V}$ ,  $V = 9.8\text{ V}$  ( $= 2 \times 4.9\text{ volts}$ ),  $V = 14.7\text{ V}$  ( $= 3 \times 4.9\text{ V}$ ).

- $\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240\text{ eVnm}}{4.9\text{ eV}} = 253\text{ nm} \rightarrow \text{UV} \rightarrow \text{coincide com linha forte de emiss\~ao};$
- Confirma evid\~encia de n\~iveis de energia discretos dos estados de el\~etrons e princ\~ipios gerais do modelo at\~omico de Bohr.

Dilema: elétron irradia ou não?

Princípio da correspondência de Bohr

No domínio **clássico** valem as leis da **M.C.**

No domínio **atômico** valem as leis da **M.Q.**

Onde os dois domínios se sobrepõem,  
ambas as leis devem dar o mesmo  
resultado

## Deficiências do Modelo de Bohr

- Proposto uma década antes da teoria de De Broglie e do princípio da incerteza de Heisenberg

- Modelo é incorreto ou **incompleto**

Aplica-se apenas a átomos ou íons c/  
um único elétron (não considera força  
entre elétrons)

- O espectro de emissão tem algumas linhas compostas ou muito próximas, algumas c/ intensidade mais forte que outras

**Bohr não explica!**

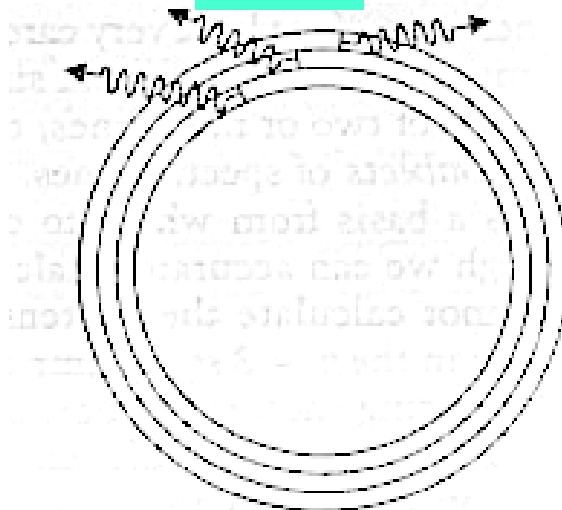
- **Viola o princípio da incerteza** ( $\Delta r \cdot \Delta p \approx \hbar$ ) → em cada estado  $r_n$  e  $p_n$  são bem determinados →  $\Delta r = 0$  e  $\Delta p = 0$

Transição de  $n \rightarrow n-1$ :

$$f = \frac{me^4}{64\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3} \left[ \frac{1}{(n-1)^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

$$f = \frac{me^4}{64\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3} \left[ \frac{2n-1}{n^2(n-1)^2} \right]$$

Bohr



• Se  $n \uparrow \uparrow \rightarrow n-1 \approx n$  e  $2n-1 \approx 2n$

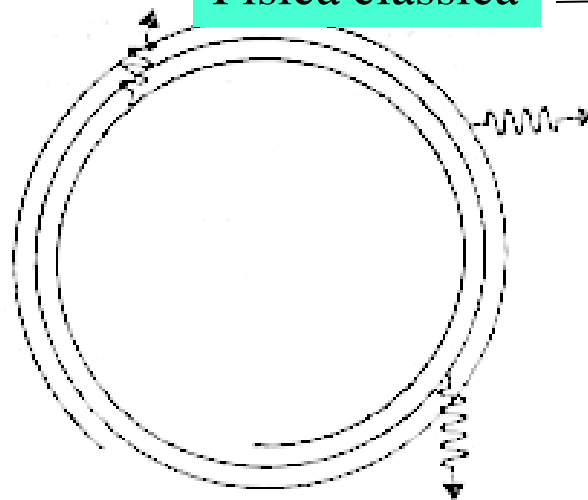
$$f \approx \frac{me^4}{64\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3} \left[ \frac{2n}{n^4} \right]$$

$$f \approx \frac{me^4}{32\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3} \left[ \frac{1}{n^3} \right]$$

•  $p/r_n \rightarrow 0 \rightarrow n \rightarrow 0$

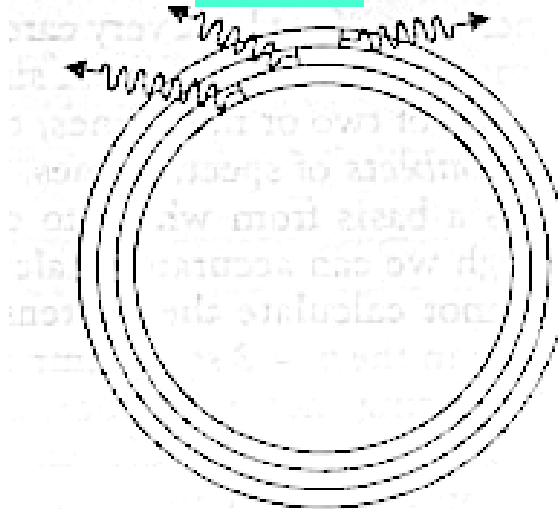
Elétron deve ter  
comportamento quântico

Física clássica

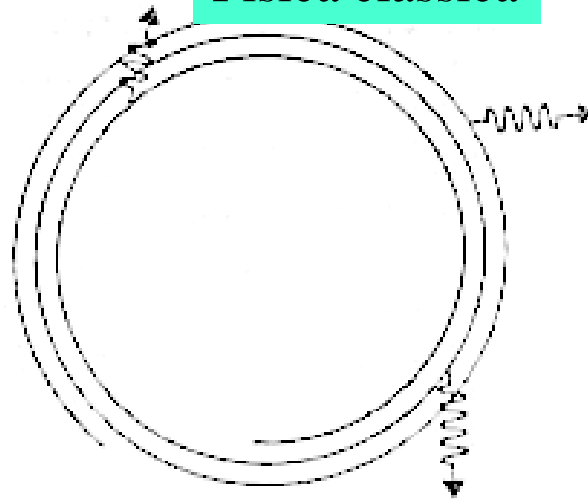


**FIGURE 6.26** [Top] A large quantum atom. Photons are emitted in discrete transitions as the electron jumps to lower states. [Bottom] A classical atom. Photons are emitted continuously by the accelerated electron.

## Bohr



## Física clássica



**FIGURE 6.26** [Top] A large quantum atom. Photons are emitted in discrete transitions as the electron jumps to lower states. [Bottom] A classical atom. Photons are emitted continuously by the accelerated electron.

- $f = f_{\text{rotação}} \rightarrow \text{irradia}$
- $T = \frac{2\pi r}{v} \rightarrow \text{órbita circular}$
- $v = \sqrt{2K/m}$
- $T = \frac{\pi r \sqrt{2m} \sqrt{8\pi\epsilon_0 r}}{e}$
- $f = \frac{1}{T} = \frac{e}{\sqrt{16\pi^3 \epsilon_0 m r^3}}$

- Substituindo  $r=r_n$   
Onde:  $r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} n^2$

$$f = \frac{me^4}{32\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left[ \frac{1}{n^3} \right]$$

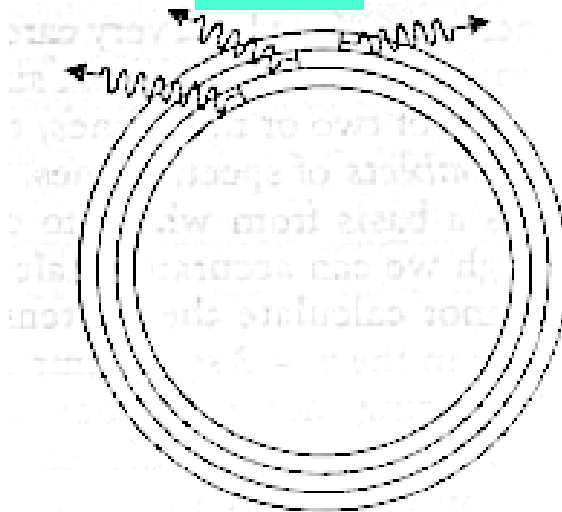
- $p/r_n \approx mm \rightarrow$   
 $n \rightarrow 10^2 \rightarrow 10^4$   
Elétron deve ter  
comportamento clássico

Transição de  $n \rightarrow n-1$ :

$$f = \frac{me^4}{64\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left[ \frac{1}{(n-1)^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

$$f = \frac{me^4}{64\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left[ \frac{2n-1}{n^2(n-1)^2} \right]$$

## Bohr



• Se  $n \uparrow \uparrow \rightarrow n-1 \approx n$  e  $2n-1 \approx 2n$

$$f \approx \frac{me^4}{64\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left[ \frac{2n}{n^4} \right]$$

$$f \approx \frac{me^4}{32\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left[ \frac{1}{n^3} \right]$$

•  $p/r_n \rightarrow 0 \rightarrow n \rightarrow 0$

Elétron deve ter comportamento quântico

•  $f = f_{\text{rotação}} \rightarrow \text{irradia}$

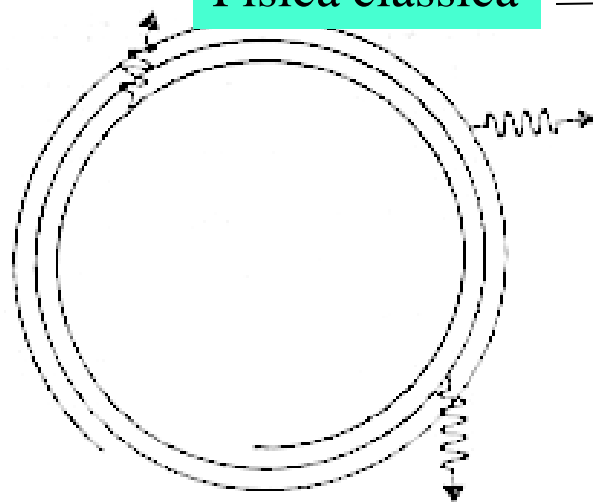
•  $T = \frac{2\pi r}{v} \rightarrow \text{órbita circular}$

•  $v = \sqrt{2K/m}$

•  $T = \frac{\pi r \sqrt{2m} \sqrt{8\pi\epsilon_0 r}}{e}$

•  $f = \frac{1}{T} = \frac{e}{\sqrt{16\pi^3 \epsilon_0 m r^3}}$

## Física clássica



• Substituindo  $r=r_n$

Onde:  $r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} n^2$

$$f = \frac{me^4}{32\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left[ \frac{1}{n^3} \right]$$

•  $p/r_n \approx mm \rightarrow n \rightarrow 10^2 \rightarrow 10^4$

Elétron deve ter comportamento clássico

FIGURE 6.26 [Top] A large quantum atom. Photons are emitted in discrete transitions as the electron jumps to lower states. [Bottom] A classical atom. Photons are emitted continuously by the accelerated electron.