

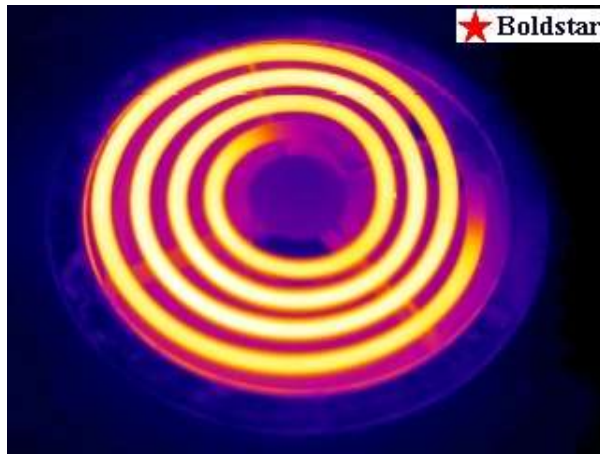
## Física Experimental IV

# A radiação do corpo negro e a constante de Planck

**Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva**

# *A radiação do corpo negro e as hipóteses de Planck*

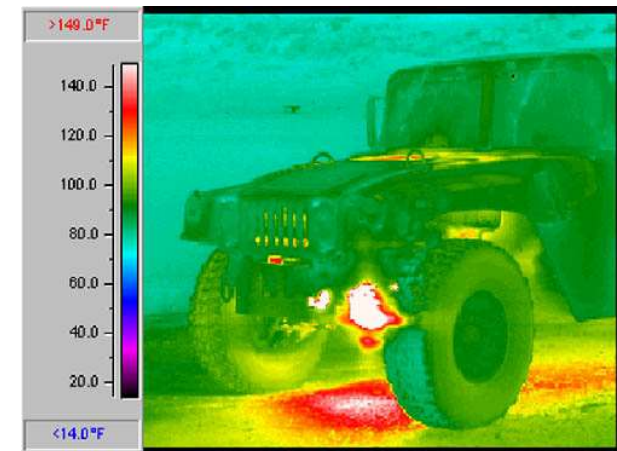
Um corpo, em qualquer temperatura emite radiação, algumas vezes denominada radiação térmica.



Material aquecido emite no visível

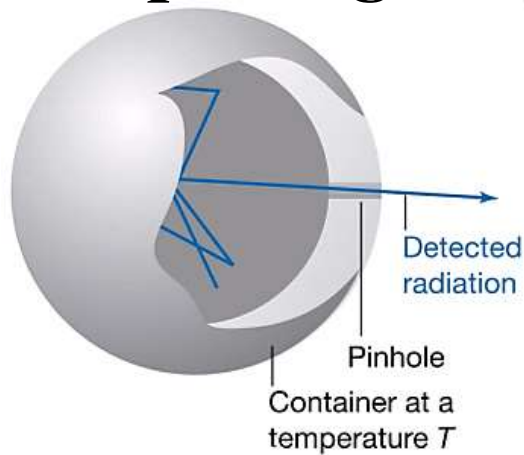
As características desta radiação dependem da temperatura e das propriedades do corpo.

O estudo minucioso da radiação térmica mostra que ela consiste em uma **distribuição contínua de comprimentos de onda**, que vão do infravermelho, passam pelo visível e chegam à parte ultravioleta do espectro.



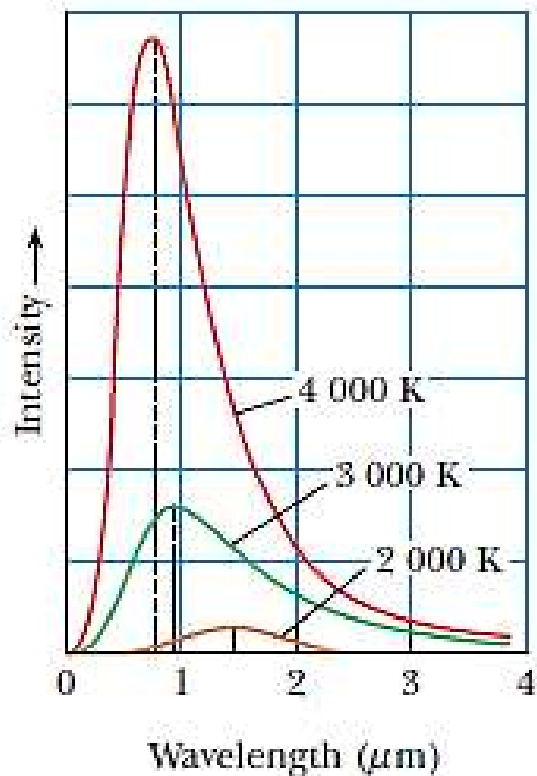
Material em baixa temperatura emite na região do infravermelho

# Corpo Negro



O problema fundamental da teoria clássica era o entendimento da distribuição de comprimentos de onda observada na radiação emitida de um corpo negro.

**Um corpo negro é um sistema ideal que absorve toda a radiação incidente sobre ele.**

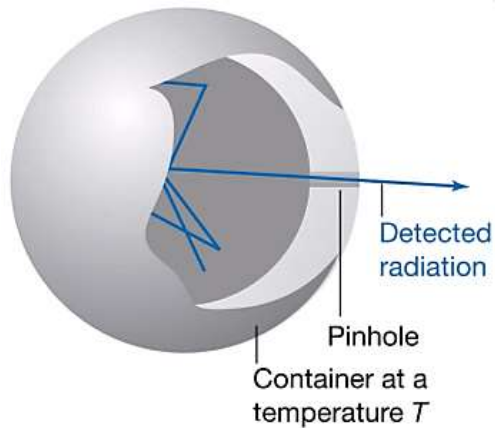


A natureza da radiação emitida depende somente da temperatura das paredes da cavidade.

A energia irradiada varia com o comprimento de onda e com a temperatura.

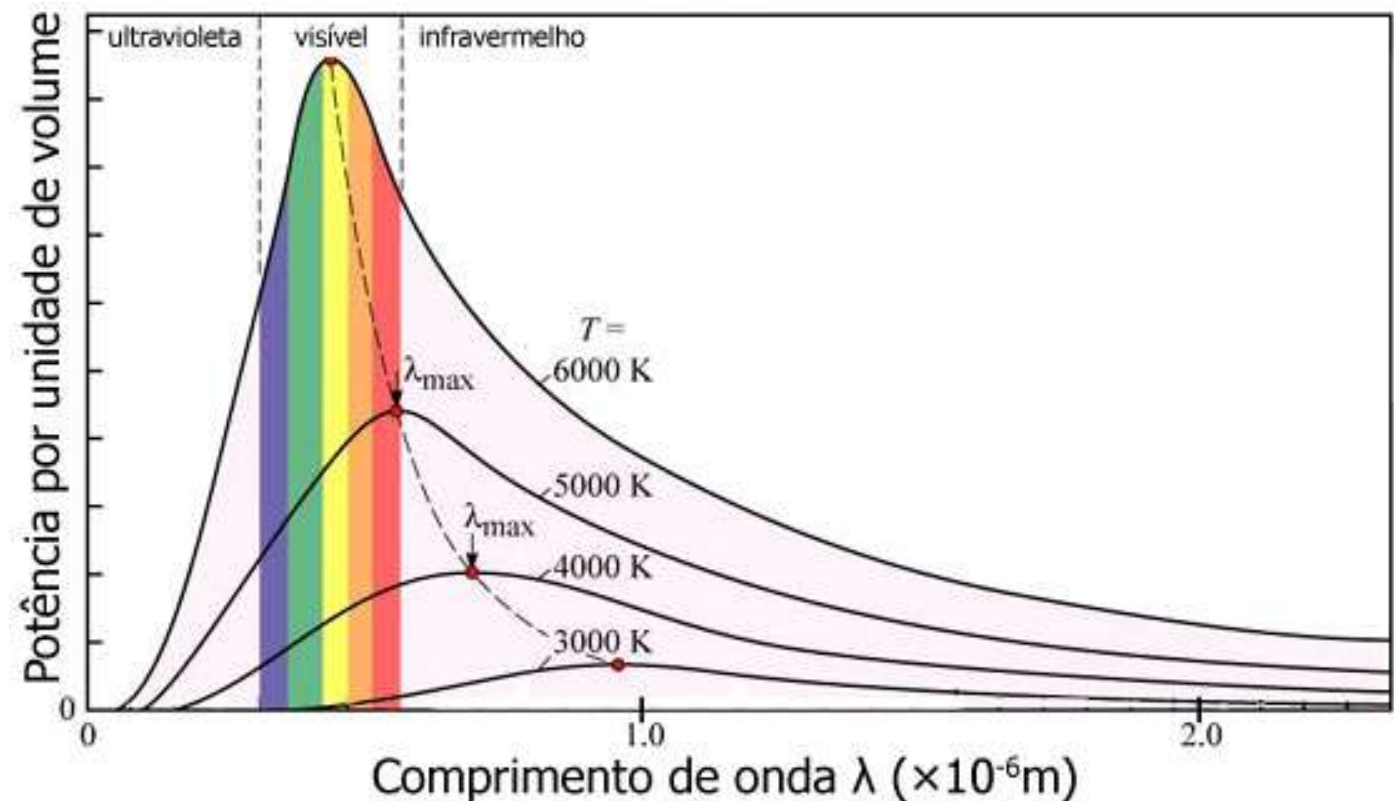
Com a elevação da temperatura, o pico da distribuição se desloca para os comprimentos de ondas menores.

## Corpo Negro



### Lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} T = 0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$$



## *Exemplo:*

### **Radiação térmica do corpo humano**

A temperatura da pele é, aproximadamente, de 35°C. Qual o comprimento de onda da radiação emitida pela pele?

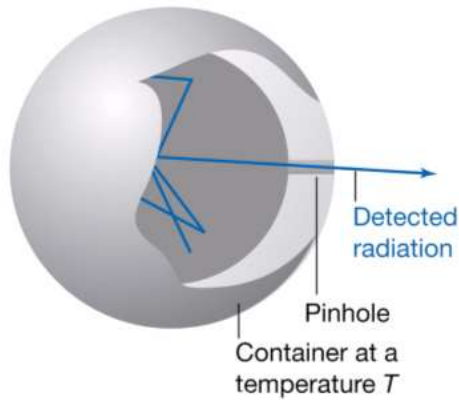
Lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = 0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}}{(35 + 273) \text{ K}} = 9,40 \mu\text{m}$$

Esta radiação está na região do infravermelho do espectro.

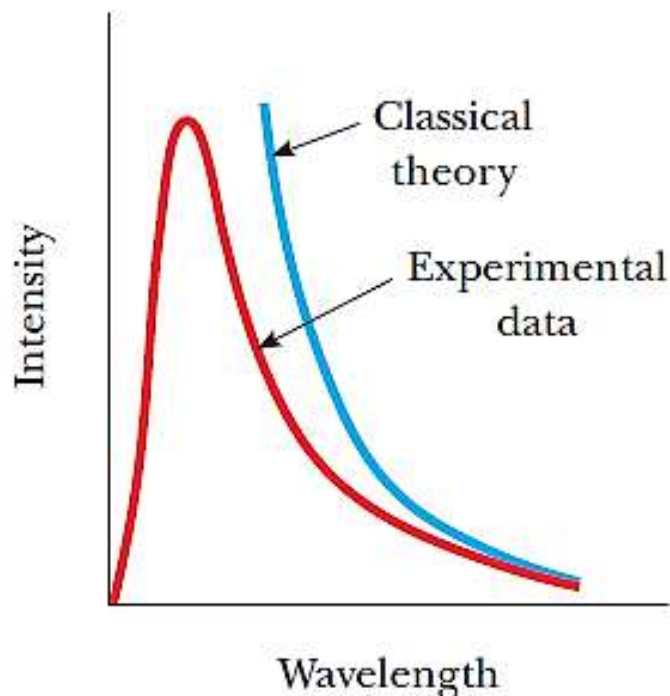
# Corpo Negro



O resultado de um cálculo baseado no modelo clássico, **Teoria de Rayleigh-Jeans**, mostra que:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

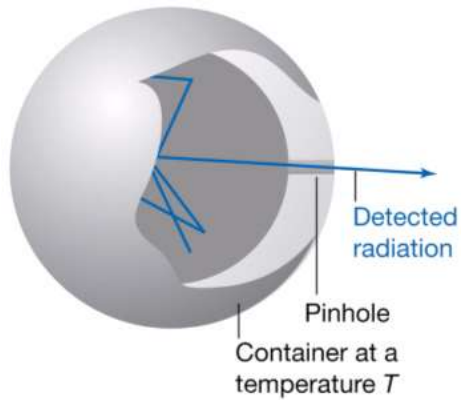
## Catástrofe do Ultravioleta



onde,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$   
(Constante de Boltzmann)

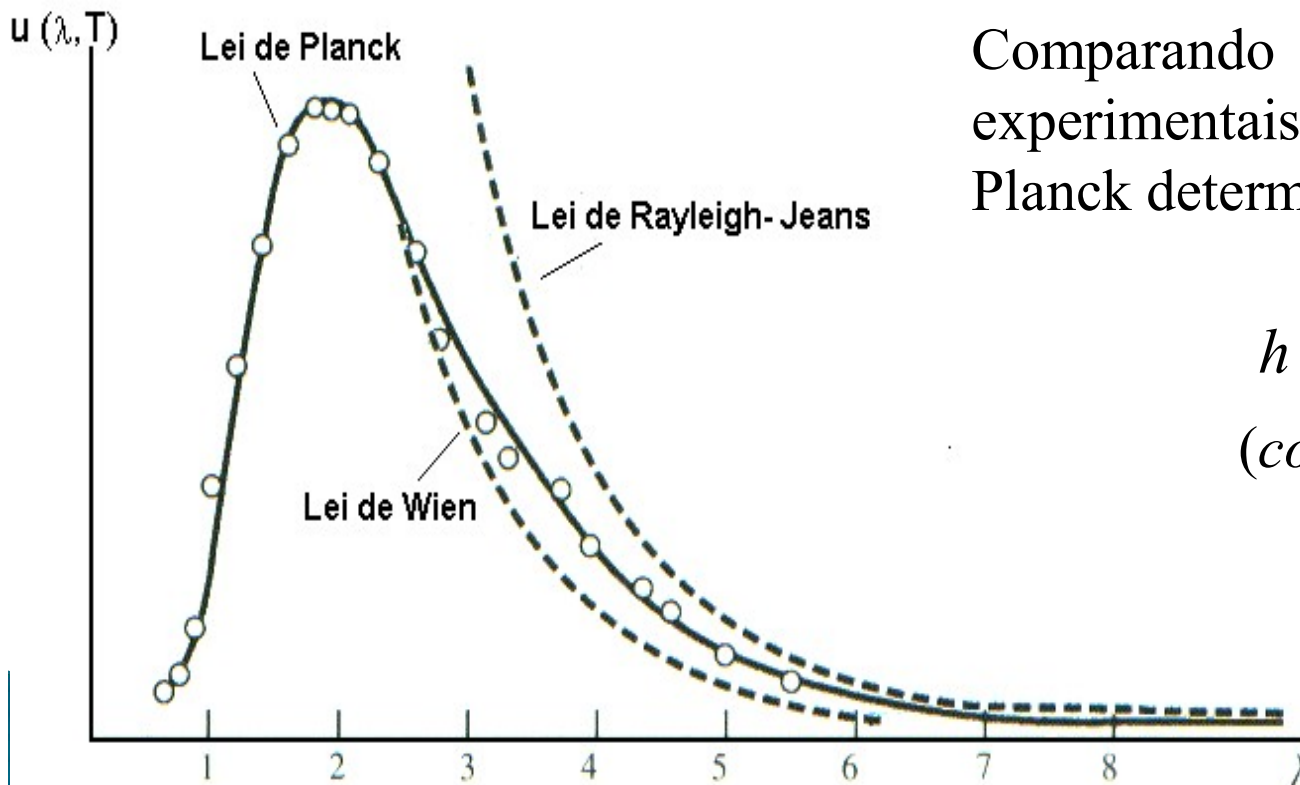
A lei de Rayleigh-Jeans concorda com os resultados experimentais para longos comprimentos de onda

# Corpo Negro



Planck postulou a expressão (*lei da radiação de Planck*):

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left( e^{hc/\lambda k_B T} - 1 \right)}$$

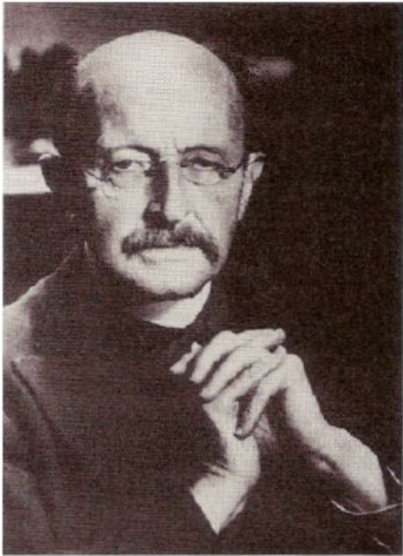


Comparando esta expressão com resultados experimentais para várias temperaturas, Planck determinou o valor de  $h$  como:

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

(*constante de Planck*)

# *Os Postulados de Planck e suas implicações*



Max Planck, por descobrir que a energia é quantizada, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918.

Como foi visto, em 1900, Max Planck desenvolveu um modelo matemático para a emissão de radiação eletromagnética, que se ajustava perfeitamente aos dados experimentais.

Para isso, teve de admitir que a emissão de energia não era contínua. No modelo de Planck, a radiação era emitida e absorvida em pequenos pacotes de energia, denominados *quanta*, donde o nome teoria dos *quanta*, ou **teoria quântica**.



# *Os Postulados de Planck e suas implicações*

1. Planck considerou que, na superfície do corpo negro, existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes). As partículas oscilantes, que emitem radiação, podem ter apenas determinadas quantidades de energia, com **valores discretos**:

$$E_n = n h f$$

onde,  $n$  = um número inteiro positivo (**número quântico**)

$f$  = a frequência de vibração das moléculas

$h = 6,626.10^{-34}$  J.s (constante de Planck)

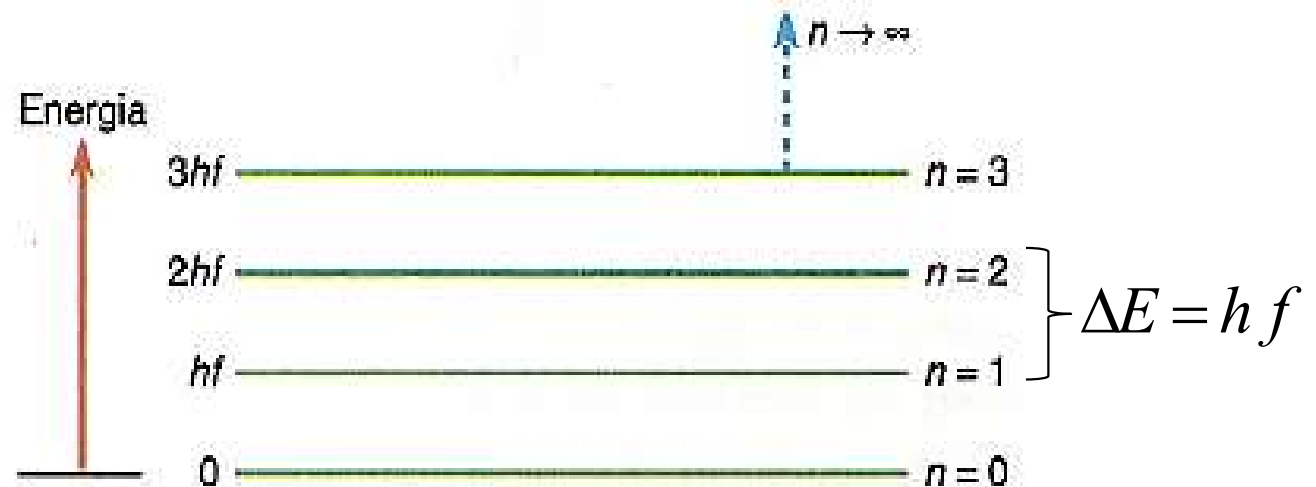
2. Planck também considerou que as moléculas **emitem ou absorvem energia em unidades discretas de energia luminosa, os quanta** (ou fótons).

$$E = h f$$

Por exemplo:

- De  $n = 2$  para  $n = 1$ , emite uma porção discreta de energia igual a  $hf$ , que é a diferença entre  $2hf$  e  $1hf$ .
- De  $n = 1$  para  $n = 2$ , absorve uma porção discreta de energia  $hf$ .

Portanto, a emissão e a absorção de energia também se dão em quantidades quantizadas.



## *O Postulado de Planck:*

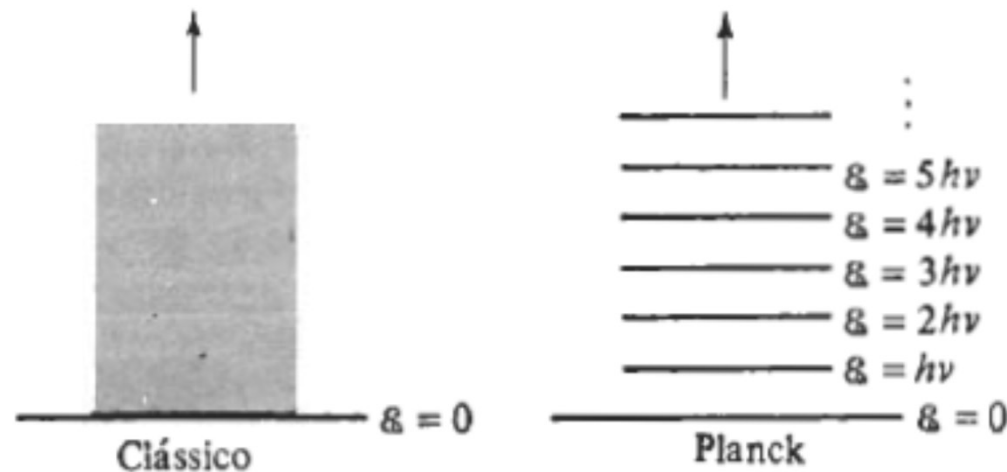
A energia total  $E$  de qualquer entidade física cuja única “*coordenada*” execute oscilações harmônicas simples (isto é, seja expressa por uma função senoidal do tempo) pode assumir tão somente valores que satisfaçam a relação

$$E_n = n h f$$

onde,  $n =$  um número inteiro positivo (*número quântico*)

$f =$  a frequência de vibração das moléculas

$h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$  (*constante de Planck*)



# *Início da Física Moderna*

Vários fenômenos, não podiam ser compreendidos nos quadros da física clássica

- a radiação do corpo negro
- o efeito fotoelétrico
- a emissão de raias espectrais nítidas pelos átomos em uma descarga em gás

Uma outra revolução ocorreu na física entre 1900 e 1930, no período em que acolheu um modelo novo e mais geral chamado de **mecânica quântica**.

Esta nova abordagem teve muito êxito na explicação do comportamento dos átomos, das moléculas e dos núcleos.

- Além disso, a teoria quântica se reduz à física clássica ao ser aplicada aos sistemas macroscópicos.

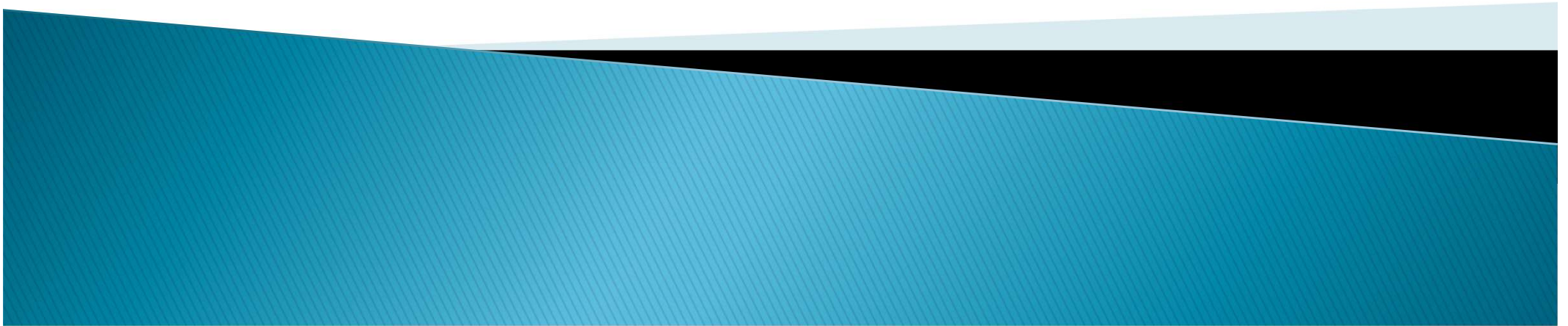
Nosso próximo experimento:

## ***Determinação experimental da constante de Planck***

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

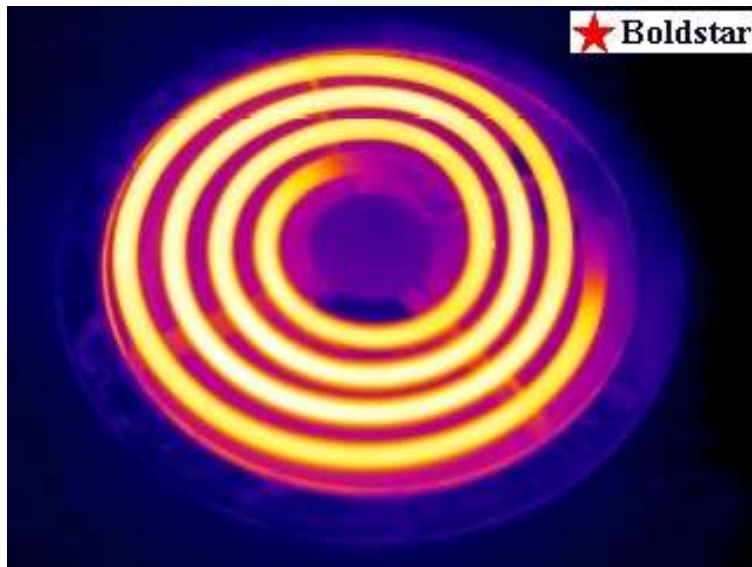
*(constante de Planck)*

# Espectros atômicos



# *Espectros atômicos*

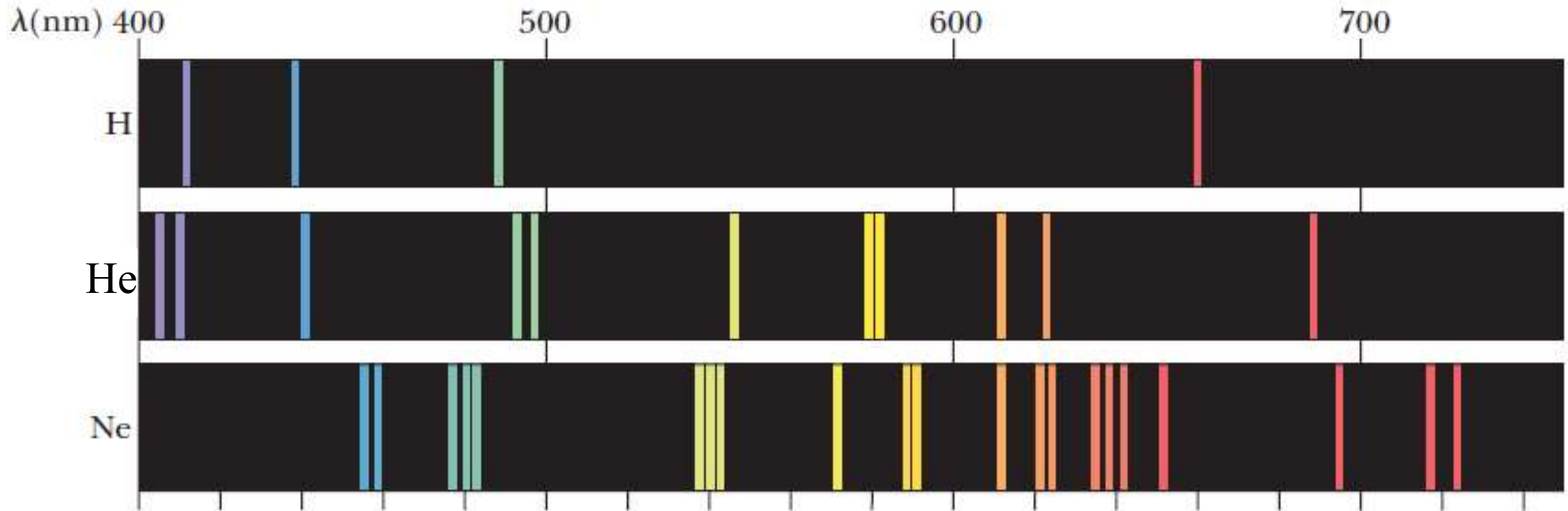
Toda substância a uma certa temperatura emite radiação térmica, caracterizada por uma distribuição contínua de comprimentos de onda. A forma da distribuição depende da temperatura e das propriedades da substância.



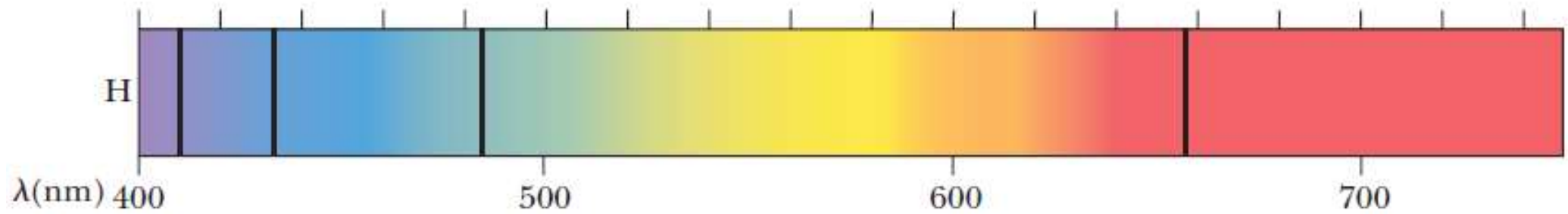
Material aquecido emite  
no visível

Um gás rarefeito sujeito a uma descarga elétrica emite um **espectro de linhas**, que difere da distribuição contínua.

# Espectro de emissão

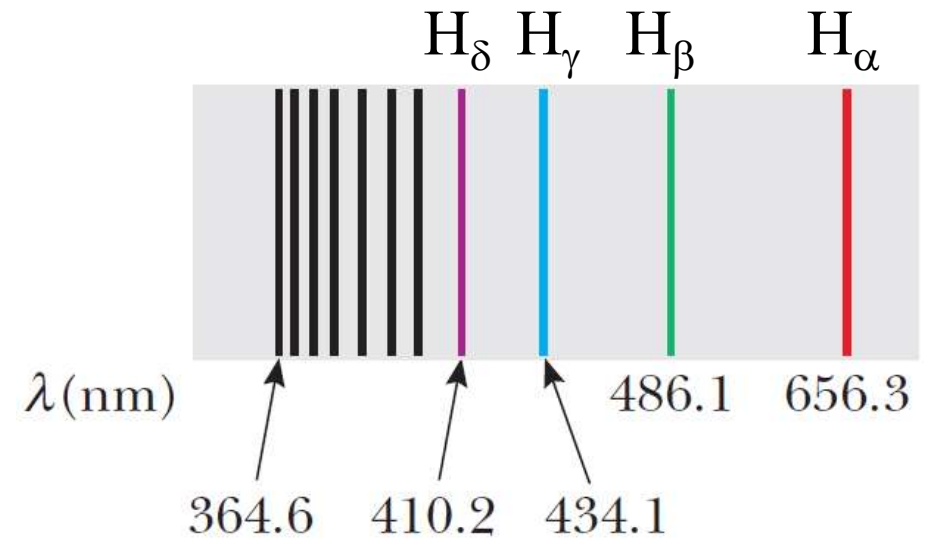


# Espectro de absorção





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)

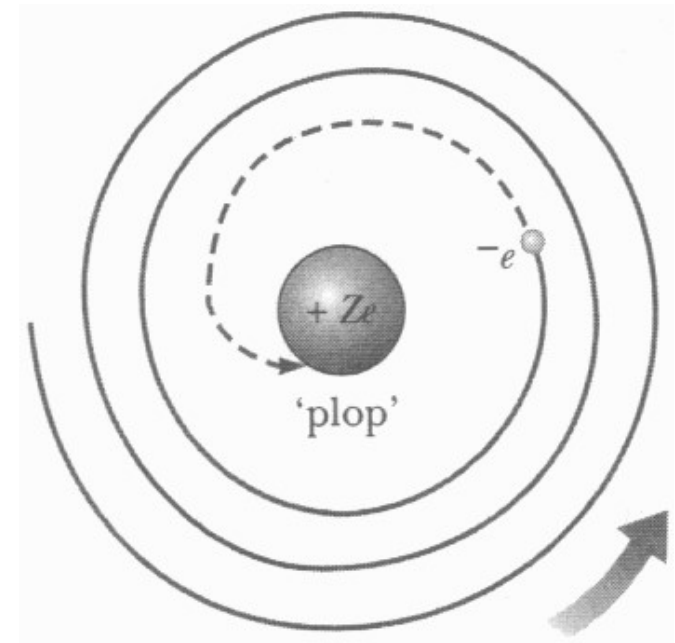
No início do século XX, os cientistas estavam perplexos ante ao fracasso da física clássica em explicar as características dos espectros atômicos.

- Por que o hidrogênio só emite certas raias na região do espectro visível?
- Por que o hidrogênio só absorve as raias 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:

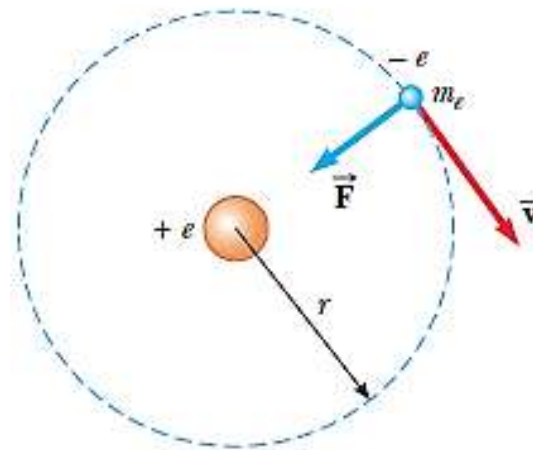
- Da teoria quântica original de Planck
- Da teoria de fótons de luz, de Einstein
- Do modelo atômico de Rutherford

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 movimento angular orbital do elétron. Ou seja, as órbitas permitidas são aquelas nas quais o movimento 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

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

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

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

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

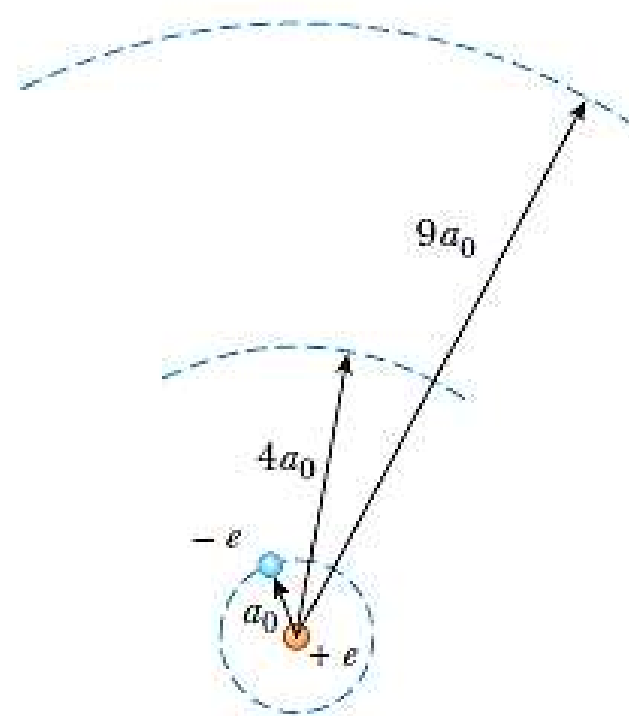
$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

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:

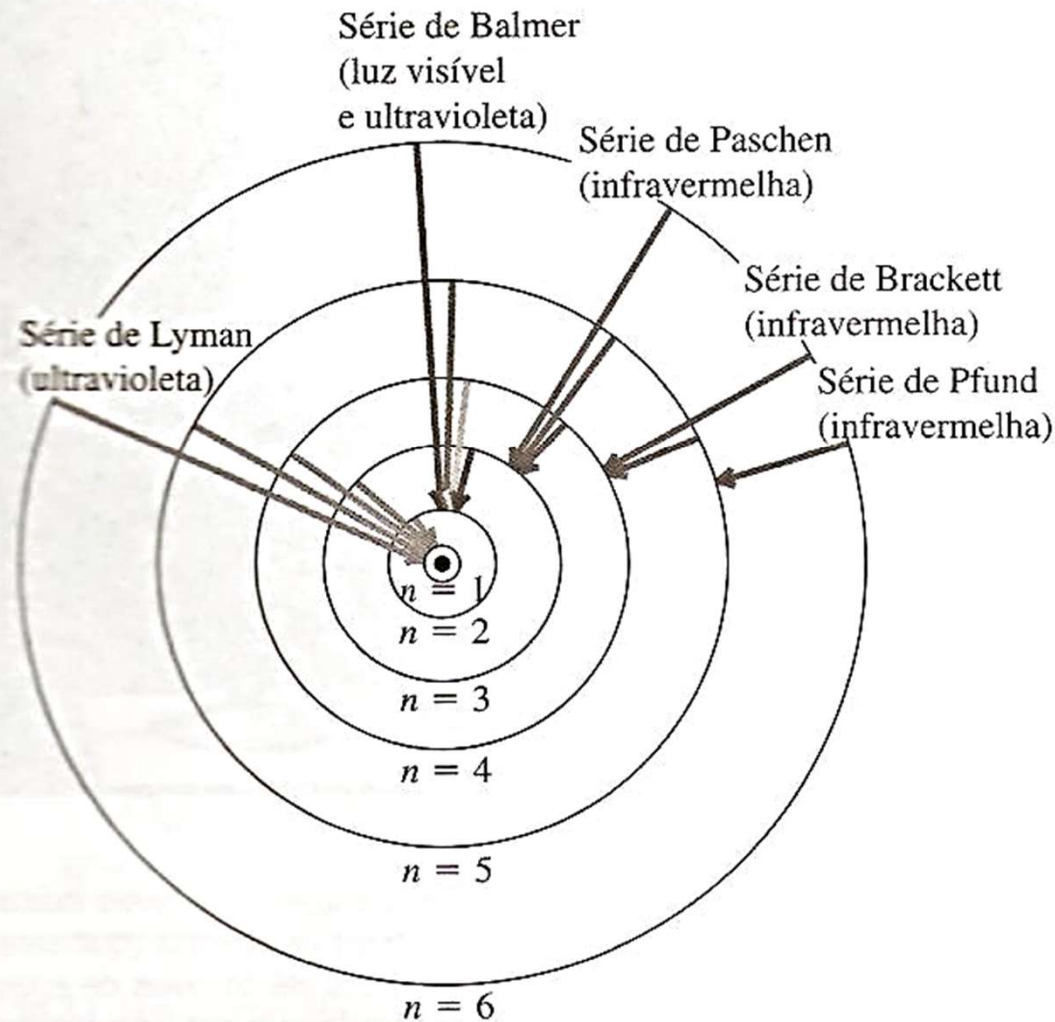
$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{ke^2}{2a_0h} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

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.

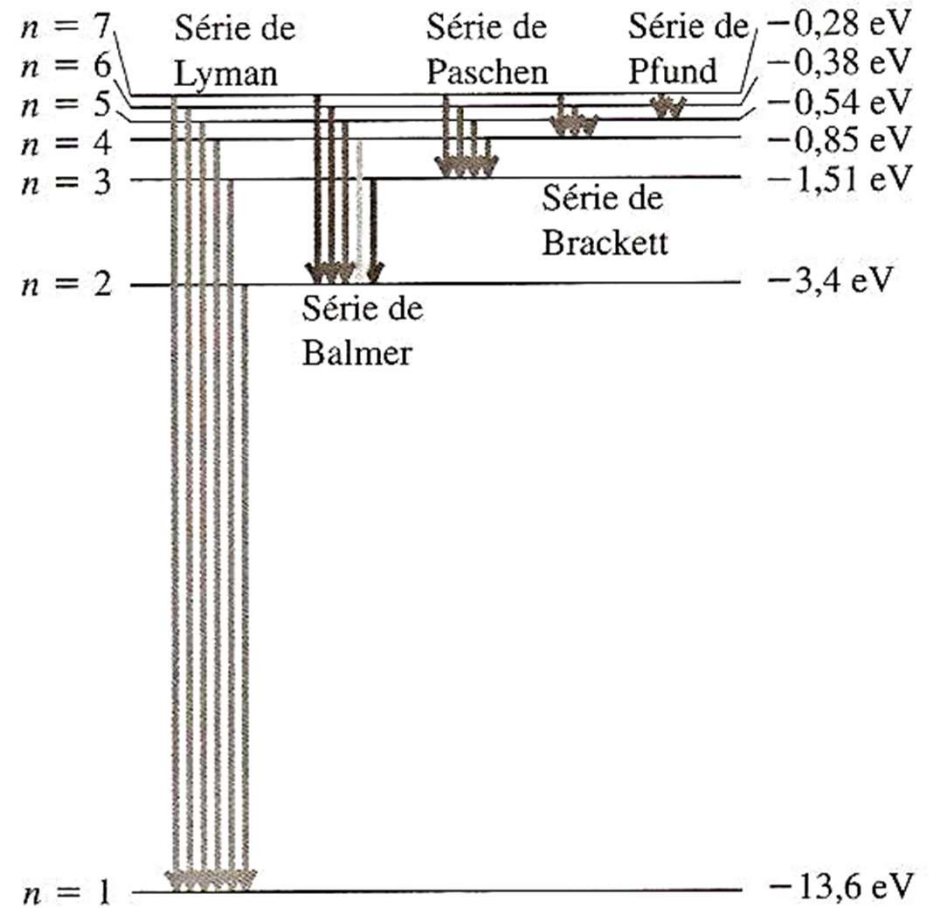


Figura 38.9 Duas formas de representar os níveis de energia do átomo de hidrogênio e transições entre as diferentes séries.

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:  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$  e  $\text{Be}^{+++}$

Carga do núcleo  $+Ze$

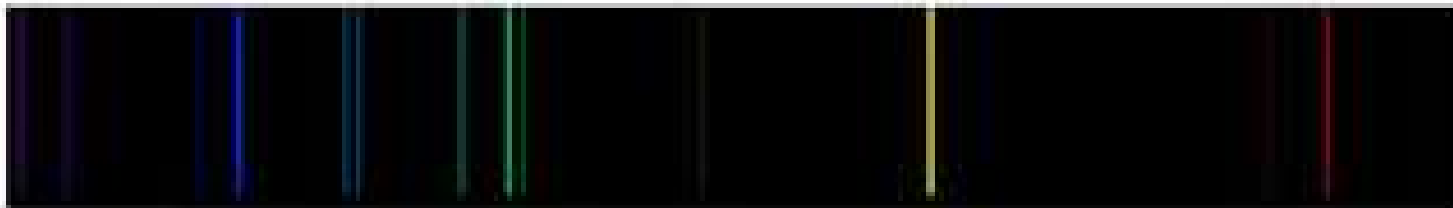
$$\longrightarrow r_n = n^2 \frac{a_0}{Z}$$

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

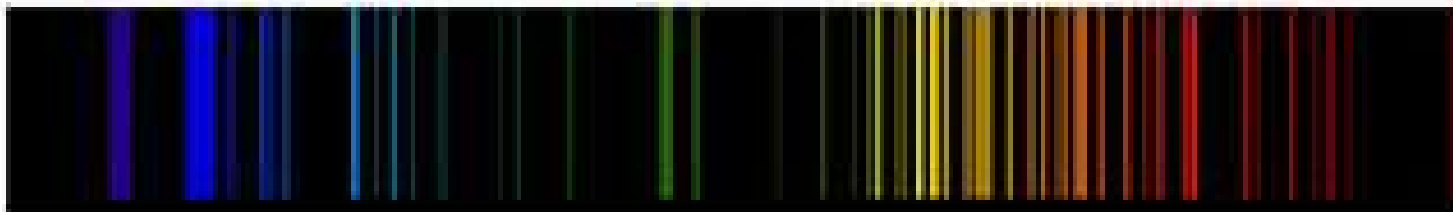
# Espectro de emissão



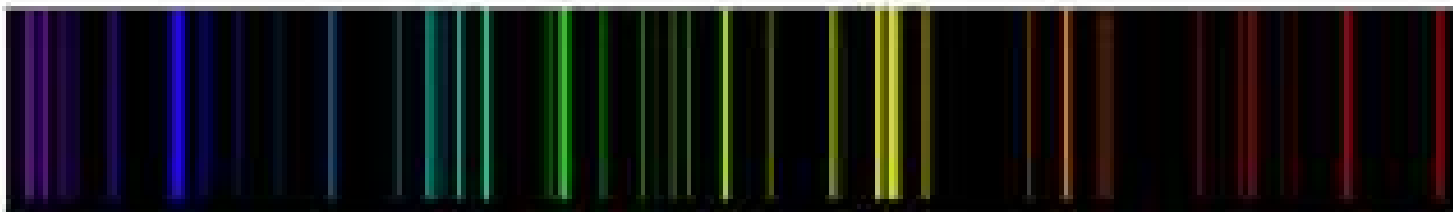
**Hidrogênio**



**Hélio**



**Neônio**



**Mercúrio**