



# Termodinâmica e Estrutura da Matéria

## Aula 20 – Física Quântica

**Carlos A. Santos Silva**

Professor Associado Convidado

Cátedra WS – Energia

Departamento de Física

[carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt](mailto:carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt)



# Sumário

- Radiação do corpo negro e a lei de Planck
- Efeito fotoelétrico.
- Efeito dual
- Laboratório 3

# RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

# Radiação

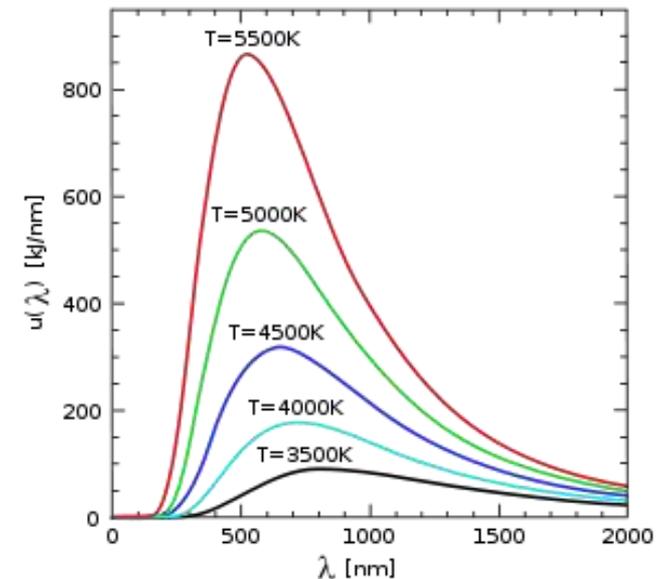
# Radiação: Lei de Stefan-Boltzman (Aula 22)

- A energia radiada por um objeto depende da sua temperatura

– Energia radiada ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$$\ddot{q} = \varepsilon\sigma T^4$$

- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$
- $0 < \varepsilon < 1$  (emissividade do corpo)
- O espectro da energia radiada é **contínuo** e depende do comprimento de onda  $\lambda$



# Temperatura e energia cinética dos gases (Aula 5)

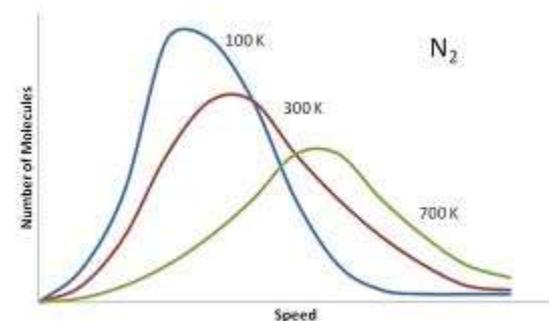
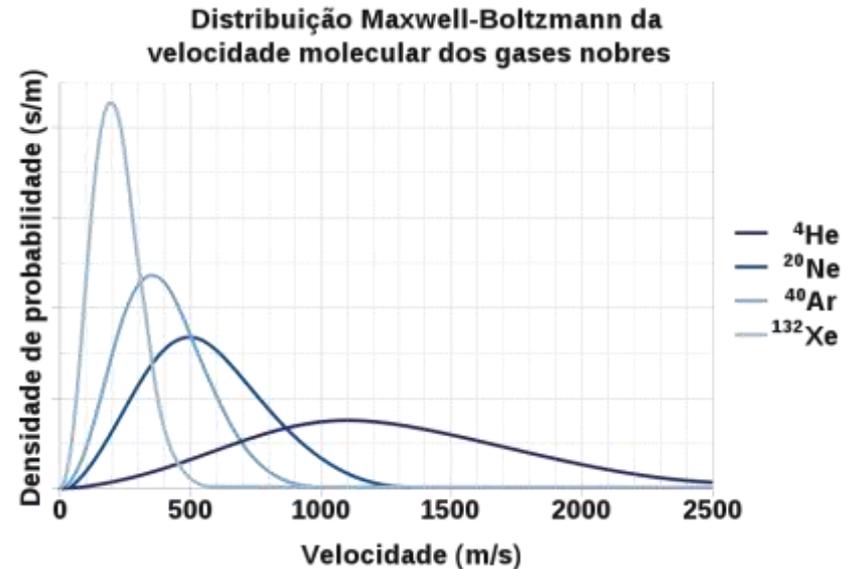
- Temperatura é uma medida da energia cinética do sistema
  - Para um sistema com gases perfeitos:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}RT$$

# A distribuição de Maxwell-Boltzmann

- A distribuição de **Maxwell-Boltzmann** descreve a velocidade partículas de um gás para uma determinada temperatura T
  - Quanto maior   a temperatura, maior   a probabilidade de o gás ter estados de maior energia

$$P = \exp\left(\frac{E}{kT}\right)$$

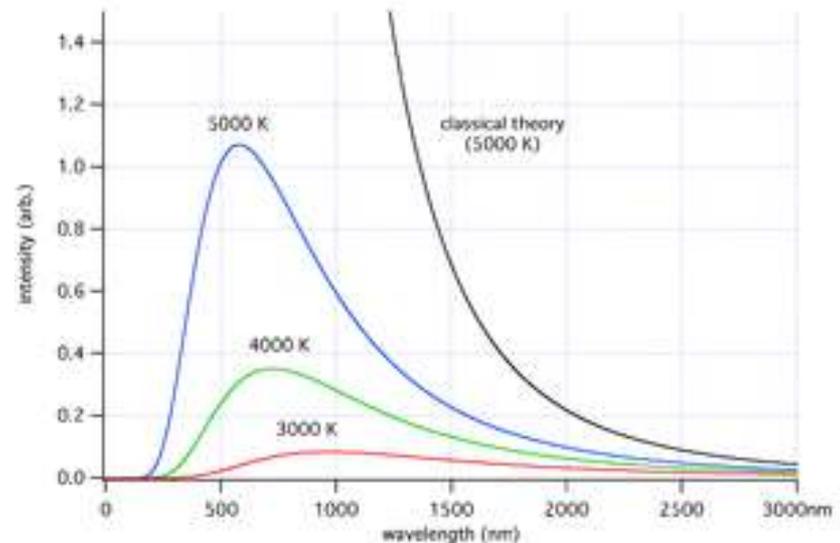


# A catástrofe do Ultravioleta

- A física clássica não conseguiu prever a potência radiada por um corpo negro para uma determinada frequência de forma correta:

$$W(\lambda) \sim (kT) \frac{1}{\lambda^4}$$

- Para  $\lambda \rightarrow 0$ , então  $W \rightarrow \infty$ , o que não é verificado experimentalmente



# Lei de Plank

- Para resolver o problema, Plank propôs que

1. A energia deveria depender da frequência

$$E = hf$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{Js}$$

$$U(f, T) = \frac{2\pi hf^3}{c^2 \left( e^{\frac{hf}{kt}} - 1 \right)}$$

2. As energias possíveis, para uma dada frequência, variam por saltos (*quanta*)

- Resolve o problema da catástrofe do ultravioleta
- Está de acordo com a lei de Wien
- Está de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann

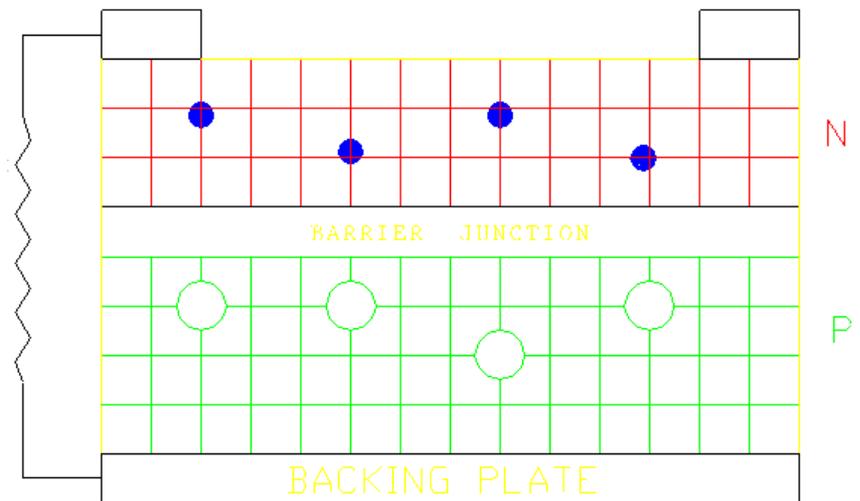
# Quanta de energia / fóton

- Partícula elementar de transporte de energia e tem uma dupla natureza:
  - Onda (radiação eletromagnética)
  - Partícula (quanta)

# EFEITO FOTOELÉCTRICO

# Definição

- Efeito observado por Herzt em 1887, que reparou que ao iluminar um bloco de zinco com luz ultravioleta este ficava eletrizado:
  - Os eletrões absorvem radiação
  - Libertam-se dos átomos



# Características

- A velocidade dos eletrões depende apenas da frequência da radiação incidente sobre a superfície metálica e não da sua intensidade
- O aumento da intensidade da luz faz variar o número de eletrões emitidos
- Se a frequência da luz desce abaixo de um determinado valor (que depende do material), deixa de haver emissão de eletrões

# Efeito não é explicável pela teoria clássica

- O efeito só ocorre para determinadas frequências (ultravioleta, X ou gama)
  - Para frequências visíveis ou abaixo, não se verifica
- Einstein sugeriu que se considerássemos a natureza corpuscular da luz (fotão), o efeito podia ser explicado
  - Permitia fazer a determinação experimental da constante de Plank
    - Laboratório 3
  - *Foi este estudo que deu o nobel a Einstein, e não a teoria da relatividade*

# Formulação

- Energia do fóton

$$E = hf$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{Js}$$

- Energia mínima para libertar eletrões

- Função de trabalho

$$E_0 = W = hf_0$$

- Energia cinética de um eletrão por ação de um fóton

$$E_c = h(f - f_0)$$

- Só existe efeito fotoelétrico se  $f > f_0$

# Efeito de Compton

- Em 1924, Compton verificou que ao incidir radiação X de frequência  $f$  era desviado (refratado) com uma frequência que dependia do ângulo de incidência

$$hf = hf^r + \frac{1}{2}mv^2$$

- O choque entre o fóton e o electrão é equivalente ao choque de duas bolas de bilhar

- Fóton funciona como uma partícula, com  $p = \frac{h}{c}$
- O fóton tem massa nula



# EFEITO DUAL

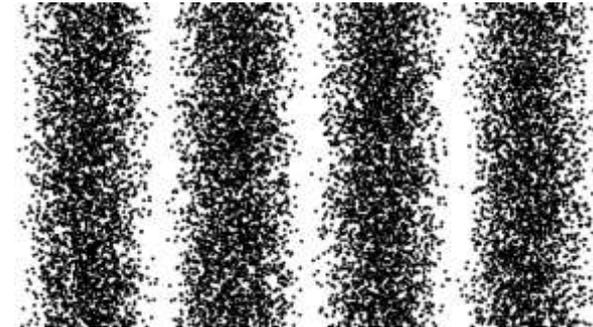
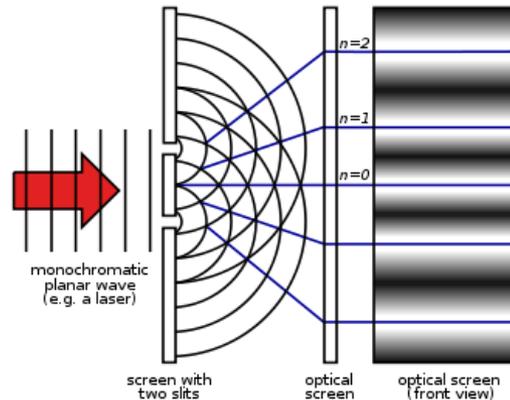
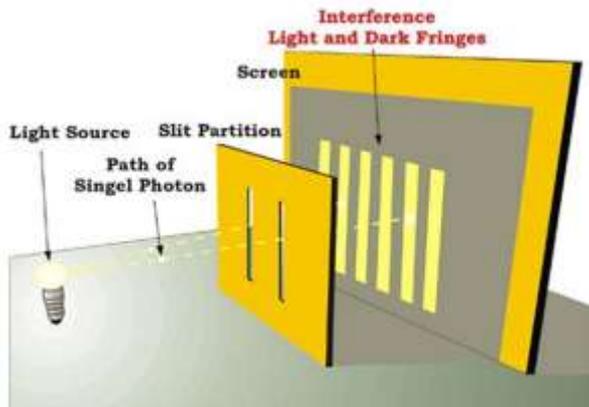
# Ondas de matéria

- Assim como se demonstrou que a luz (onda) se comporta como matéria (fotão), Louis de Broglie propôs que
  - as partículas de matéria poderiam ter um comportamento ondulatório
    - A cada partícula material corresponde uma onda associada cujo o comprimento de onda é dado por

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

# A matéria como luz

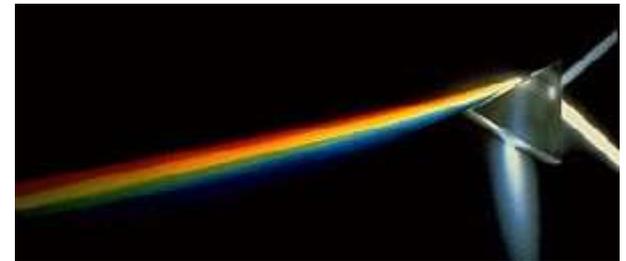
- O efeito de um feixe de electrões deveria apresentar o mesmo comportamento que um feixe de luz



# Espectros atômicos

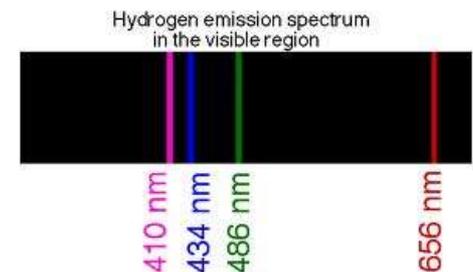
- A espectroscopia é o estudo da emissão e absorção de luz pela matéria
  - Utiliza-se uma luz de vários comprimentos de onda

- Luz elétrica através de um prisma



- Os gases têm então espectros atômicos de acordo

com  $\frac{1}{\lambda_n} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ,  $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$



# Espectrometria

