

# EL3004-Circuitos Electrónicos Analógicos

## Clase No. 1: Introducción

Marcos Diaz

Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE)  
Universidad de Chile

Septiembre, 2011

## 1 Motivación e Historia

## 2 Desarrollo Histórico

- Radiación de cuerpo negro
- El efecto fotoeléctrico
- El átomo de Bohr

## 3 Resumen de la Clase #1

# Capítulo I

## Introducción



# Un poco de historia



(a)



(b)

**Figura:** (a) Bardeen, Shockley, y Brattain en los laboratorios Bell. Brattain y Bardeen inventaron el BJT en 1947. (b) El primer BJT de germanio. En nuestros días electrónica es responsable (aprox.) del 10% del PIB del mundo.

# Un poco de historia

---

1874	Braun inventa el rectificador de estado solido	1963	Se forma la IEEE de IRE y AIEE.
1906	DeForest inventa el tubo de triodo de vacio.	1968	Primer OpAmp comercial.
1907-1927	Primer circuito de radio desarrollado de diodos y triodos.	1970	Dennard inventa la celula de transistor DRAM en IBM.
1925	Lilienfeld patenta el dispositivo de efecto de campo.	1971	Aparece el microprocesador Intel 4004.
1947	Bardeen y Brattain inventan el transistor bipolar en los laboratorios Bell.	1974	Aparece el microprocesador 8080.
1952	En Texas Instruments comienza la producción comercial de BJTs	1978	Primera memoria comercial de 1-kilobit.
1956	Bardeen, Brattain y Shockley reciben el Premio Nobel.	1984	Aparece el chip de memoria de Megabit.
1958	El circuito integrado (IC) es desarrollado por Kilby y Noyce.	2000	Alferov, Kilby, y Kromer comparten el premio Nobel.
1961	Aparece el primer IC comercial (Fairchild semiconductor).		

---

# Un poco de historia



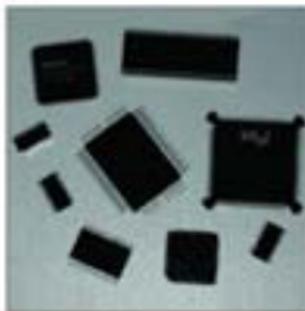
1940



1950



1960



1970

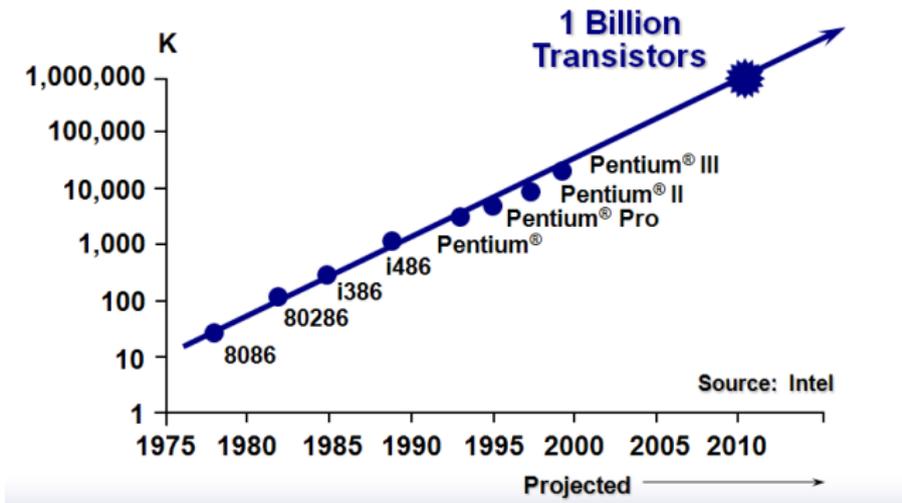
**Arriba-Iz:** Tubos de vacío, **Arriba-Der:** Transistores discretos, **Abajo-Iz:** Circuitos integrados de pequeña (SSI) y mediana escala (MSI) y **Abajo-Der:** Circuitos integrados de gran escala (VLSI).

# Un poco de historia

- El circuito integrado fue inventado en 1958.
- La producción mundial de transistores se ha doblado cada año, en los últimos 20 años.
- Cada año, se producen mas transistores que en todos los años anteriores combinados.
- Aproximadamente  $10^{18}$  transistores fueron producidos en el año 2002.
- Hay aproximadamente 50 transistores por cada hormiga del mundo.

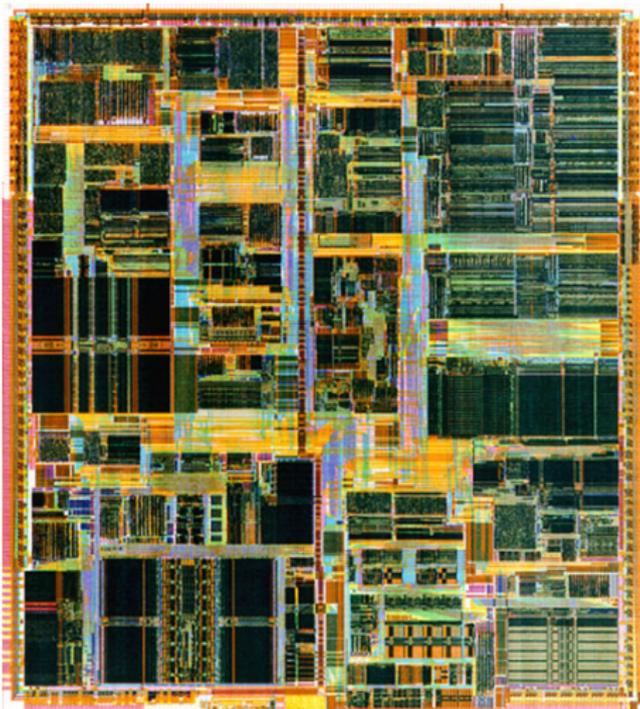
**Fuente:** Presentación de Gordon Moore en la Conferencia International de Circuitos de Estado Solido del año 2003.

# Un poco de historia



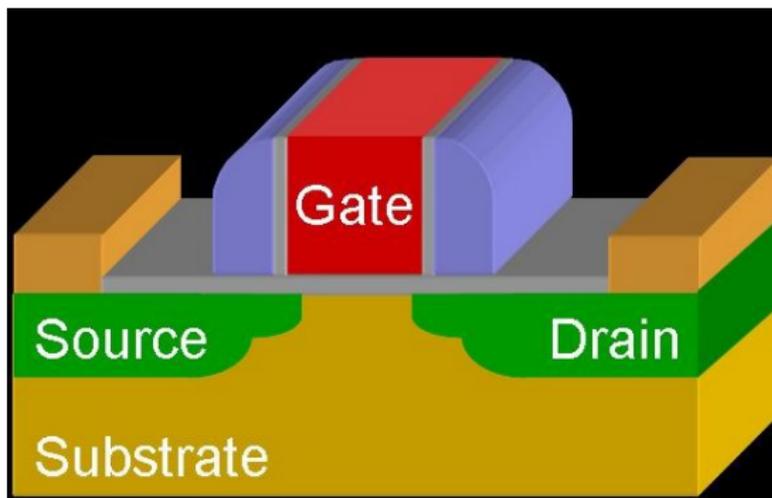
# Un poco de historia

## Procesador Pentium IV de Intel



# Capítulo II

## Física de Semiconductores



# Mecánica Clásica

Los modelos de mecánica, presentado por Newton:

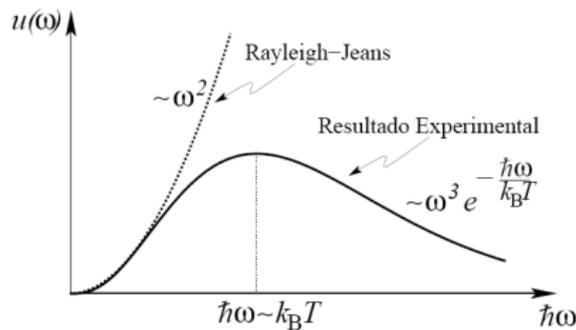
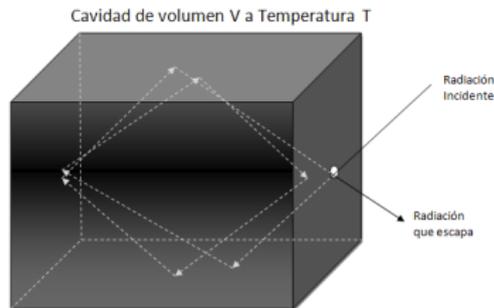
$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}, \quad (1)$$

y de electromagnetismo, resumido en las ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathcal{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{\partial \mathcal{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathcal{D}(\mathbf{r}, t) &= \rho(\mathbf{r}, t) \\ \nabla \times \mathcal{H}(\mathbf{r}, t) &= \mathcal{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathcal{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathcal{B}(\mathbf{r}, t) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

# Radiación de Cuerpo Negro

## Problema de la mecánica clásica



- $E = hf$  [J], con  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  [J s]

- $E = \hbar\omega$  [J]

donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la radiación,  $2\pi f$ , y  $\hbar$  es igual a  $h/2\pi$ . Por lo tanto la energía total del radiador de cuerpo negro existe sólo en estados discretos:

$$0, \hbar\omega, 2\hbar\omega, 3\hbar\omega, \dots n\hbar\omega.$$

# Radiación de Cuerpo Negro

## Problema de la mecánica clásica

$$u(\omega) = \underbrace{\frac{\omega^2 V}{\pi^2 c^3}}_{n(\omega)} \bar{E}_\omega,$$

donde  $c$  la velocidad de la luz y  $V$  el volumen de la caja.

$$\frac{\exp(-E/k_B T) dE}{\int_0^\infty \exp(-E'/k_B T) dE'}.$$

Usando este resultado podemos evaluar el valor promedio de la energía  $\bar{E}_\omega$ , obteniendo

$$\bar{E}_\omega = \frac{\int_0^\infty E \exp(-E/k_B T) dE}{\int_0^\infty \exp(-E'/k_B T) dE'} = -\frac{d}{d\mu} \left[ \log \int_0^\infty e^{-\mu\epsilon} d\epsilon \right] = -\frac{d}{d\mu} \log \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu},$$

donde  $\mu \equiv (k_B T)^{-1}$  y  $k_B$  es la **constante de Boltzmann**. Con este resultado se obtiene para la densidad de energía la expresión

$$u(\omega) = \frac{\omega^2 V k_B T}{\pi^2 c^3}, \quad (3)$$

la cual es denominada la fórmula de Rayleigh-Jeans.

# Radiación de Cuerpo Negro

## Problema de la mecánica clásica

**Problema:** energía continua. **Solución** (Max Planck): cuantificación de la energía en fotones o **quanta**, donde la energía de un fotón es:

$E = nhf$ , donde  $f$  = frecuencia,  $h$  constante y  $n =$  número cuántico  $\in \mathbb{N}^*$ , así para calcular  $\bar{E}_\omega$  hay que usar sumatorias, en lugar de integrales

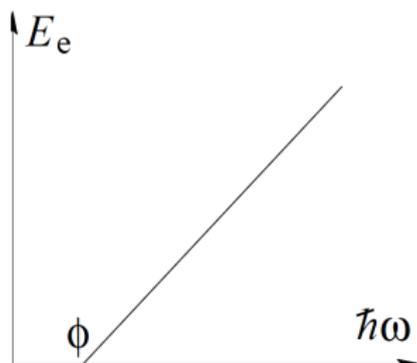
$$\begin{aligned} \bar{E}_\omega &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nhf e^{-\frac{nhf}{k_B T}}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{nhf}{k_B T}}} = -hf \frac{d}{d\mu'} \left[ \log \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\mu'} \right]_{\mu' = \frac{hf}{k_B T}} \\ &= \frac{hf}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} = \begin{cases} k_B T & \text{si } \frac{hf}{k_B T} \ll 1, \text{ Rayleigh-Jeans} \\ hf e^{-\frac{hf}{k_B T}} & \text{si } \frac{hf}{k_B T} \gg 1, \text{ Ley empírica de Wien.} \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

Esta es la distribución de Plank. Usando la ecuación anterior se obtiene una densidad de energía que esta en completo acuerdo con los resultados experimentales:

$$u(\omega) = \frac{\omega^2 V}{\pi^2 c^3} \left( \frac{hf}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \right), \text{ si } h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ [J s]}$$

# Efecto Fotoeléctrico

Cuando luz de alta frecuencia se hace incidir sobre una placa metálica, electrones escapan de ella.



Problemas:

- No hay emisión si  $f < f_0$
- La intensidad de la luz no incide en la energía de los electrones.
- $\#e^-$  depende de la intensidad de la luz.
- Todos los electrones tienen igual energía cinética.
- Si hay emisión de electrones esto ocurre de inmediato.

Esto no puede ser explicado con el modelo clásico

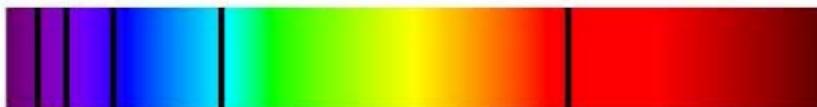
Solución (Einstein):

- $E = n\hbar\omega$
- $E_e = \hbar\omega - \phi$  (Ver Fig.)

# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Evidencia Experimental

Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum

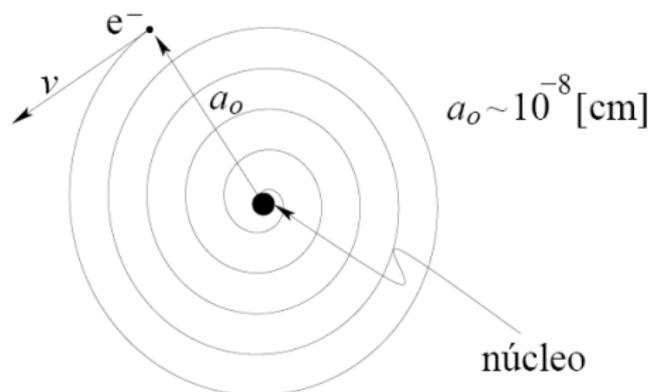


From: <http://www.solarobserving.com/halpha.htm>

# Espectro del átomo de Hidrógeno

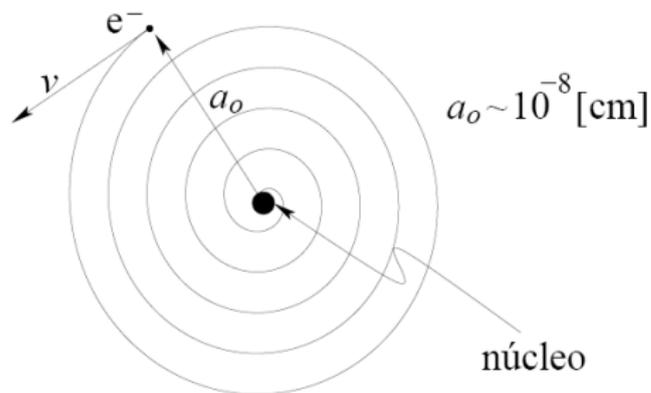
## Explicación Clásica

$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{m_e v^2}{r}$$



# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Explicación Clásica



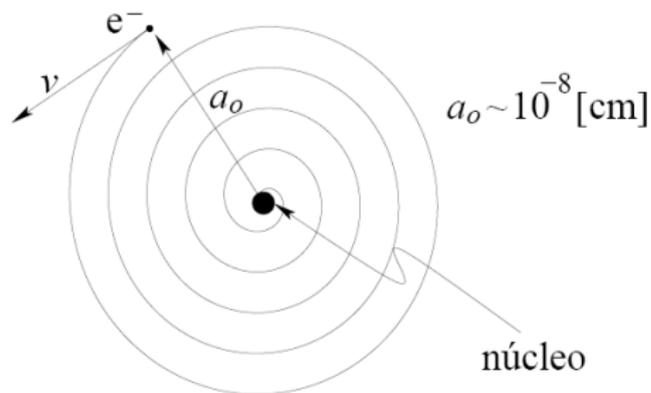
$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{m_e v^2}{r}$$

$$U = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$K = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Explicación Clásica



$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{m_e v^2}{r}$$

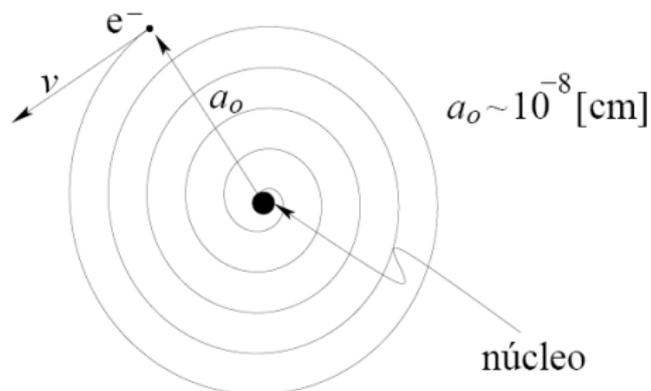
$$U = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$K = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$E = -\frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (5)$$

# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Explicación Clásica



$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{m_e v^2}{r}$$

$$U = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$K = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$E = -\frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (5)$$

$$f = -\frac{v}{2\pi r}$$

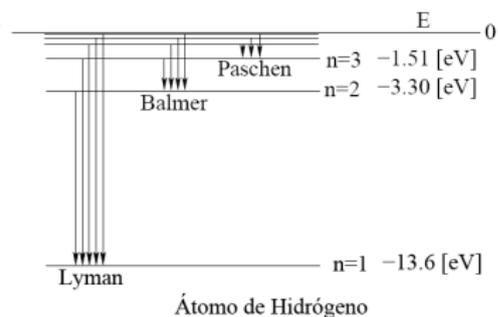
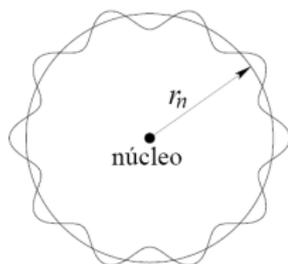
$$f = -\frac{q}{4\sqrt{\pi^3 \epsilon_0 m_e r^2}}$$

# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Solución

$$E_1 - E_2 = hf_{12} \quad (6)$$

Orbita electrónica como onda estacionaria

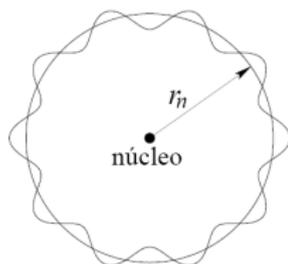


# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Solución

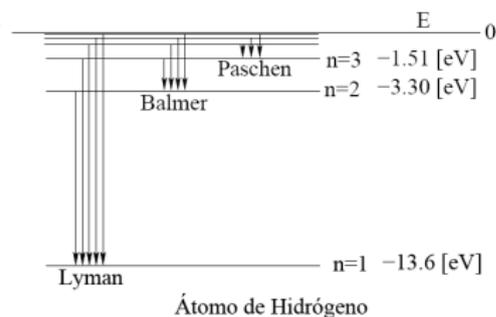
$$E_1 - E_2 = hf_{12} \quad (6)$$

Orbita electrónica como onda estacionaria



**Hipotesis:** Momento angular cuantizado

$$L = m_e vr = n\hbar \quad \text{donde } n = 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

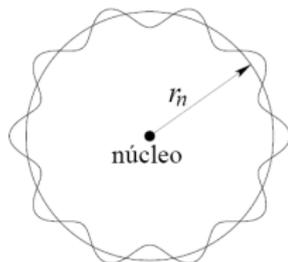


# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Solución

$$E_1 - E_2 = hf_{12} \quad (6)$$

Orbita electrónica como onda estacionaria

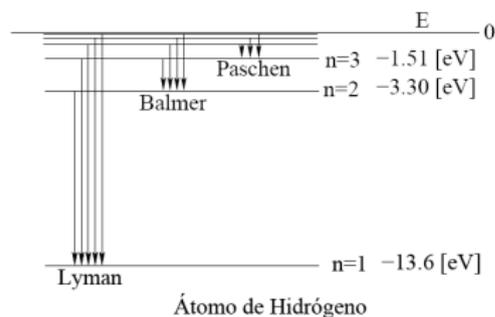


**Hipotesis:** Momento angular cuantizado

$$L = m_e v r = n \hbar \quad \text{donde } n = 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

$$v^2 = \frac{2q^2}{8m_e \pi \epsilon_0 r} = \frac{n^2 \hbar}{m_e^2 r^2} \quad (8)$$

$$r_n = \frac{4\pi n^2 \hbar^2 \epsilon_0}{q^2 m_e} = \frac{n^2 h \epsilon_0}{\pi q^2 m_e} \approx 0,05 n^2 [nm] \quad (9)$$

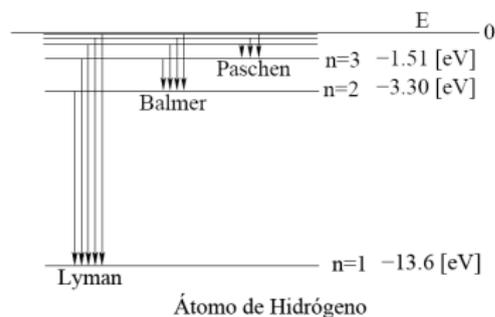
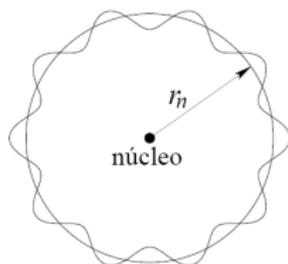


# Espectro del átomo de Hidrógeno

## Solución

$$E_1 - E_2 = hf_{12} \quad (6)$$

Orbita electrónica como onda estacionaria



**Hipotesis:** Momento angular cuantizado

$$L = m_e v r = n \hbar \quad \text{donde } n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$v^2 = \frac{2q^2}{8m_e \pi \epsilon_0 r} = \frac{n^2 \hbar}{m_e^2 r^2} \quad (8)$$

$$r_n = \frac{4\pi n^2 \hbar^2 \epsilon_0}{q^2 m_e} = \frac{n^2 h \epsilon_0}{\pi q^2 m_e} \approx 0,05 n^2 [\text{nm}] \quad (9)$$

Usando el radio y la Ec. (5) se obtiene,

$$E_n = -\frac{q^2}{8\pi \epsilon_0} \frac{\pi q^2 m_e}{n^2 h^2 \epsilon_0} = -\frac{m_e q^4}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2} \approx -\frac{13,6}{n^2} [\text{eV}] \quad (10)$$

# Resumen Clase #1

- Experimentos que mostraron las limitaciones de la mecánica clásica
  - Radiación de cuerpo negro
  - Efecto Fotoeléctrico
  - Spectro del átomo de Hidrógeno
- Cuantización de la energía (Fotón) ( $E = n\hbar\omega$   $n = 1, 2, 3 \dots$ )
- Colapso de la luz (comportamiento de partícula de la luz)
- Resumen de constantes y unidades:
  - Constante de Plank,  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  [J s]
  - Constante de Boltzmann,  $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$  [J/K]
  - Masa del electrón,  $m_e = 9,1094 \times 10^{-31}$  [kg]
  - Carga eléctrica del electrón,  $q = -1,6022 \times 10^{-19}$  [C]
  - Permitividad del vacío,  $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$  [F/m]
  - $1[eV] = 1,6022 \times 10^{-19}$  [J]