

Física Moderna

2012

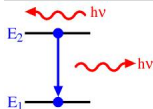
Simon Casassus Astronomía, Universidad de Chile

<http://www.das.uchile.cl/~simon>

- I Relatividad Especial
- II Introducción a la Mecánica Cuántica

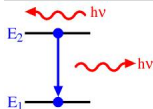
El desarrollo de la Mecánica Cuántica

- 1900 Radiación de cuerpo negro (Planck).
- 1905 Efecto fotoeléctrico y cuantas de energía (Einstein).
- 1905 Movimiento Browniano y tamaño atómico (Einstein).
- 1907 Calor específico de los sólidos y cuantización de la energía térmica (Einstein).
- 1911 Núcleo atómico (Rutherford).
- 1913 Modelo atómico (Bohr).
- 1916 Emisión estimulada y formación de líneas espectrales (Einstein).
- 1924 Dualidad onda-partícula (de Broglie).
- 1925 Principio de incerteza (Heisenberg).
- 1926 Mecánica ondulatoria (Schrödinger).
- 1928 Spin del electrón (Dirac).



Parte II

Mecánica Cuántica



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

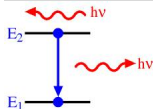
Dualidad onda-partícula

Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula

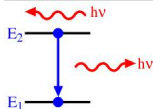
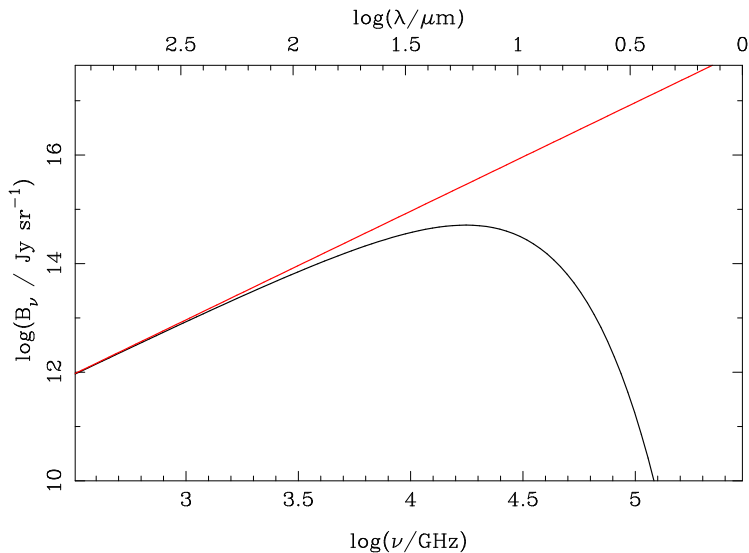
Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

1.1-Radiación de cuerpo negro



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

1.1-Radiación de cuerpo negro

- Densidad de estados de modos normales (\vec{E}, \vec{B}) en un volumen \mathcal{V} :

$$N(\nu) = \frac{4\pi\nu^2}{c^3} \mathcal{V}$$

- 2 grados de libertad de polarización por modo, cada uno con $kT/2 \Rightarrow$ la densidad de energía es:

$$\rho(\nu) = kTN(\nu) \Rightarrow \text{catástrofe UV.}$$

- Planck hip1: sacar promedio por modo cambiando $\int \rightarrow \sum$,

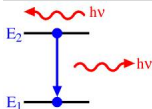
$$\langle U \rangle = \int P(U) U dU \rightarrow \sum P(U) U, \text{ con } U = n\mathcal{U}.$$

- Planck hip2:

$$\mathcal{U} = h\nu.$$

- Experimento da $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J s.

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2 \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]}.$$



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p), (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Propiedades de la función de Planck

- Ley de Wien:

$$\left. \frac{dB_\nu}{d\nu} \right|_{\nu_{\max}} = 0 \Rightarrow \frac{h\nu}{kT} \approx 4,965,$$

$$\boxed{\frac{\lambda_{\max}}{\text{cm}} \frac{T}{\text{K}} = 0,29,} \text{ con } \lambda_{\max} = c/\nu_{\max}. \text{ OJO: } B_\lambda d\lambda = B_\nu d\nu.$$

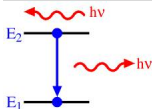
- Ley de Stefan-Boltzmann:

$$\int B_\nu d\nu = B(T) = \frac{2h}{c^2} \left(\frac{kT}{h} \right)^4 \overbrace{\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx}^{\pi^4/15},$$

$$\boxed{B(T) = aT^4,} \text{ con } \sigma = a\pi = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}. \text{ Notar que } \pi B(T) \text{ es el flujo por unidad de \u00e1rea.}$$

- Ley de Rayleigh-Jeans:

$$\lim_{h\nu \ll kT} B_\nu = \frac{2\nu^2}{c^2} kT \text{ caso cl\u00e1sico, } h \rightarrow 0.$$



El desarrollo del quantum

Radiaci\u00f3n de cuerpo negro

- Efecto fotoel\u00e9ctrico
- Movimiento browniano
- Calor espec\u00edfico de los s\u00f3lidos

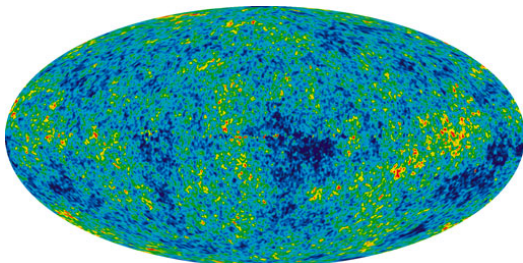
Teor\u00eda at\u00f3mica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mec\u00e1nica ondulatoria

- Dualidad onda-part\u00edcula
- Principio de superposici\u00f3n
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuaci\u00f3n de Schr\u00f3dinger
- Soluciones de la ecuaci\u00f3n de Schr\u00f3dinger

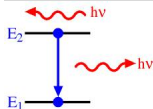
Ejemplo: radiación de fondo



$$\underbrace{\frac{8}{3}\pi G \frac{\rho}{H}}_{\Omega_m} \pm \underbrace{\frac{1}{a^2 R^2 H}}_{\Omega_R} + \underbrace{\frac{\Lambda}{H^2}}_{\Omega_\Lambda} = 1,$$

$$\Omega_\Lambda \sim 0,7 \quad \Omega_R = 0, \quad \Omega_m \sim 0,3,$$

sólo 2% de Ω_m es contribuido por bariones.



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

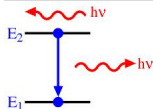
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula

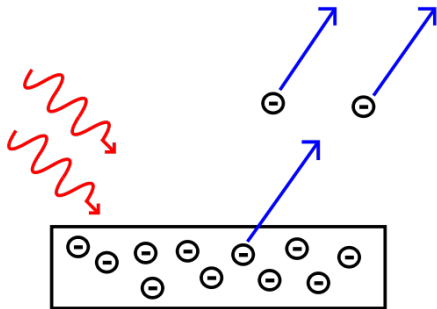
Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

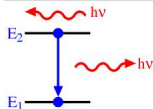
Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

1.2-Efecto fotoeléctrico



Radiación UV extrae electrones. En el caso de un metal, se puede usar la placa conductora iluminada como elemento de un condensador



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula

Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

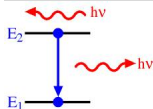
Dualidad onda-partícula

Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula

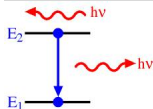
Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

1.3-Movimiento browniano



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula

Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

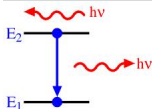
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

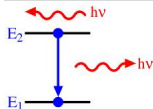
Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

1.4-Calor específico de los sólidos



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro

Efecto fotoeléctrico

Movimiento browniano

Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula

Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

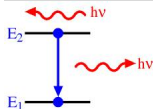
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

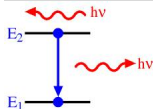
Radioactividad natural

Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Ejemplo: datación ^{14}C



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

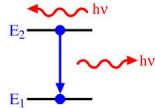
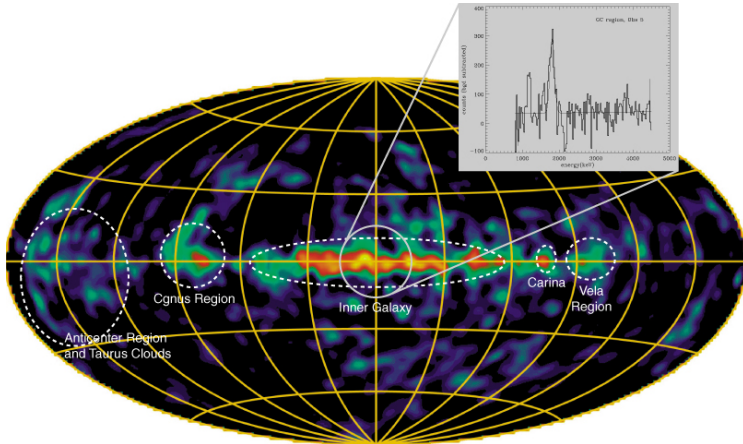
Radioactividad natural

- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Ejemplo: irradiación temprana del sistema solar.



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

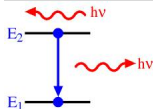
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

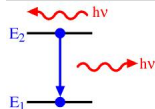
Modelo de Bohr

Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

2.2-Experimento de Rutherford



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

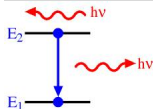
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Modelo planetario

Decaimiento radiativo en $\sim 10^{10}$ s.



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural

Experimento de Rutherford

- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

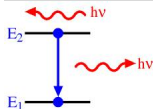
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

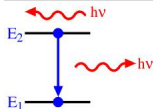
Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Espectroscopía

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m > n, (m, n) \in \mathbb{N},$$

$$R_H = 109677,576 \text{ cm}^{-1}.$$



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford

Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

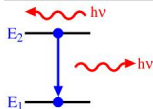
Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Modelo de Bohr

- 1 Existen estados estacionarios para electrones en equilibrio dinámico, según mecánica clásica pero sin irradiar.
- 2 Si electrón pasa de estado E_n a E_m emite/absorbe $h\nu_{nm} = E_m - E_n$.
- 3 Niveles de energía:
 - 1: Las frecuencias de transición están dadas por la fórmula de Balmer
 - o
 - 2: sólo son permitidas órbitas con $L = mvr = nh/2\pi$.
- 4 Principio de correspondencia, si $n \rightarrow \infty$ se recupera física clásica.

Tarea: demostrar que los Postulados 3.2 y 3.1 son equivalentes.

Tarea: comparar frecuencia clásica con frecuencia cuántica (en función del radio de la órbita).



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Regla de cuantización de Sommerfeld-Wilson

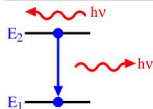
- ¿Qué relación existe entre cuantización de Planck ($E_n = nh\nu$) y Bohr ($L_n = n\hbar$)?
- Problema de Bohr: falla para átomos grandes.

Extensión del modelo de Bohr por Sommerfeld-Wilson:

$$\oint pdq = nh \text{ para variable cíclicas.}$$

- Orbitas ciculares: $L \leftrightarrow \theta \Rightarrow$

$$\oint Ld\theta = 2\pi L = nh$$



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p), (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

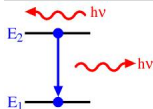
Ejemplo cuantización de S.-W.: Oscilador armónico

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2 q^2, \text{ es constante de movimiento,}$$

$$\Leftrightarrow \frac{q^2}{2E/(m\omega^2)} + \frac{p^2}{2mE} = 1.$$

Familias de elipses con $a^2 = 2E/(m\omega^2)$ y $b^2 = 2mE$,

$$\text{S.-W.} \Rightarrow \oint pdq = \pi ab = nh, \Rightarrow E_n = nh\nu \text{ Planck-Einstein.}$$



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr

Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Bohr, S.-W., y átomos grandes

Consideremos Lagrangiano de Coulomb en esféricas:

$$L = \frac{1}{2} m \dot{r}^2 + \frac{1}{2} m r^2 \dot{\theta}^2 + \frac{e^2}{r} = L(r, \dot{r}, \dot{\theta}).$$

θ cíclica $\rightarrow \oint p_{\theta} d\theta = n_{\theta} h \rightarrow p_{\theta} = n_{\theta} \hbar$. En r ,

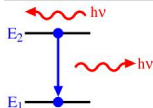
$$p_r = \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = m \dot{r} \rightarrow \oint p_r dr = n_r h.$$

n_{θ} , n_r son enteros independientes, i.e. existen DOS números cuánticos para órbitas elípticas.

Tarea:

$$E(n) = -\frac{me^2}{2\hbar^2 n^2}, \text{ con } n = n_{\theta} + n_r \text{ \# número cuántico principal,}$$

$$a = (n_r + n_{\theta})^2 \frac{\hbar^2}{me^2} = \frac{n^2 K^2}{me^2}, \quad b = n_{\theta}(n_r + n_{\theta}) \frac{\hbar^2}{me^2} = n_{\theta} \frac{nK^2}{me^2}.$$



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

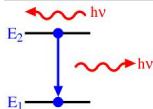
- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Parches de parches....

- Pb. nuevo: se observan menos líneas en espectro que lo predecido por $E_n - E_m = h\nu$. Hay transiciones que no existen para átomos con $Z > 1$. Se parcha teoría con *reglas de selección*.
- $E(n_\theta, n_r) \rightarrow$ pueden haber varios valores de n_r, n_θ dato $E \rightarrow$ estados cuánticos degenerados.
- Si se introduce \vec{B} externo, se levanta degeneración:
 - Nivel degenerado conduce a un número impar de niveles $\rightarrow 0 \leq l < n$ y $L_z = m\hbar$ con $m = -l, -l + 1, \dots, l - 1, l$ (y resulta que $|L|^2 = l(l + 1)\hbar^2$).
 - Nivel no degenerado igual se divide en DOS, con $m \sim s_z = (-\frac{1}{2}, \frac{1}{2})\hbar$.



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza $(x, p), (t, E)$
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

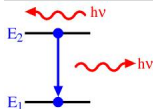
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

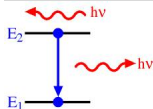
Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr

Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

2.4-Coeficientes de Einstein



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr

Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

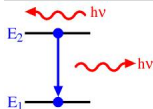
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

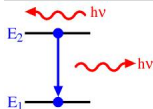
Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

3.1-Dualidad onda-partícula



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

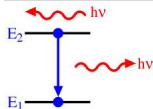
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza $(x, p), (t, E)$
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

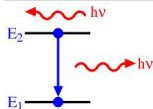
Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza $(x, p), (t, E)$
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

3.2-Principio de superposición



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza $(x, p), (t, E)$
- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

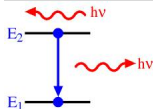
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza $(x, p), (t, E)$
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

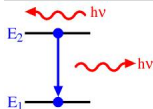
Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza $(x, p), (t, E)$
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Difracción de electrones



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

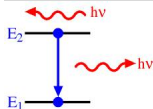
Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición

Incerteza $(x, p), (t, E)$

- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Paquetes de ondas



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición

Incerteza (x, p) , (t, E)

- Ecuación de Schrödinger
- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

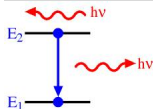
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza $(x, p), (t, E)$
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

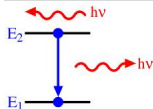
Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza $(x, p), (t, E)$

Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

3.4-Ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

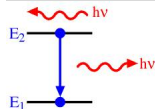
Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza $(x, p), (t, E)$

Ecuación de Schrödinger

- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Corriente de probabilidad



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

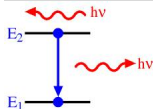
Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza $(x, p), (t, E)$

Ecuación de Schrödinger

- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Ecuación de Klein-Gordon



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza $(x, p), (t, E)$

Ecuación de Schrödinger

- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Plan

1 El desarrollo del quantum

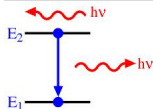
Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

2 Teoría atómica

Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

3 Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger
Soluciones de la ecuación de Schrödinger



El desarrollo del quantum

Radiación de cuerpo negro
Efecto fotoeléctrico
Movimiento browniano
Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

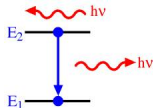
Radioactividad natural
Experimento de Rutherford
Modelo de Bohr
Coeficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

Dualidad onda-partícula
Principio de superposición
Incerteza (x, p) , (t, E)
Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Efecto tunel



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

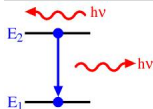
- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger

- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Átomo de hidrógeno



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

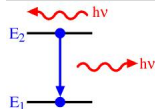
- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger

- Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Pozo de potencial infinito



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

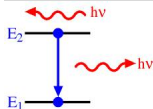
- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger

Oscilador armónico



El desarrollo del quantum

- Radiación de cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Movimiento browniano
- Calor específico de los sólidos

Teoría atómica

- Radioactividad natural
- Experimento de Rutherford
- Modelo de Bohr
- Coefficientes de Einstein

Mecánica ondulatoria

- Dualidad onda-partícula
- Principio de superposición
- Incerteza (x, p) , (t, E)
- Ecuación de Schrödinger

Soluciones de la ecuación de Schrödinger