

# ORÍGENES DE LA FÍSICA CUÁNTICA

A finales del siglo XIX se pensaba que la física CLÁSICA (electromagnetismo, termodinámica, mecánica) era suficiente para la descripción del universo físico.

\* 1900: Max Planck ("teoría de la ley de distribución de energías del espectro normal")

Dicho trabajo constituye quizás el nacimiento de la física CUÁNTICA  $\Rightarrow$  Generalización de la física clásica que incluye las leyes clásicas como casos particulares.

± extiende la física al dominio de regiones de dimensiones pequeñas.

± en el estudio de la radiación térmica se introduce la constante de Planck  $h \Rightarrow$  concepto cuántico de energía DISCRETA

\* 1905: Albert Einstein  $\Rightarrow$  Dualidad de la luz como onda y partícula

Energía luminosa estaba cuantizada: la luz se propagaba en paquetes discretos y no en forma ondulatoria como suponía la física clásica.

La luz se comporta en algunas ocasiones como onda pero en otras como partícula

Las dos aportaciones anteriores se pueden considerar como el origen de la llamada física moderna

### Radiación de cuerpo negro

Modo de transferencia de energía relacionado con la variación de temperatura  $\Rightarrow$  radiación térmica

Temperatura  $\Rightarrow$  movimiento aleatorio de las moléculas

Radiación emitida debido al movimiento térmico

Ejemplo: Radiación emitida por el sol y que alcanza la parte superior de la atmósfera

Potencia radiada o emitida por un objeto a través de su superficie A

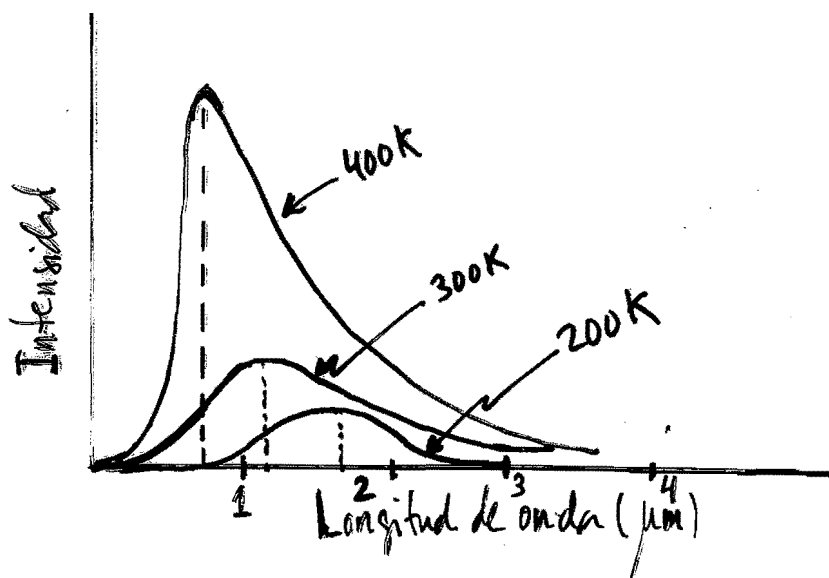
$$P = \sigma A e T^4$$

$\epsilon$   $\equiv$  emisividad. Varía entre 0 y 1 dependiendo de las propiedades de la superficie

$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \Rightarrow$  constante de Stefan-Boltzmann

Resultado clásico: distribución continua de longitudes de onda del espectro de la radiación emitida por el objeto

No se podía entender la dist. de longitudes de onda emitidas por radiación del cuerpo negro (sistema ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre dicho cuerpo)



Intensidad de la radiación del cuerpo negro en función de la longitud de onda para tres temperaturas distintas

4

Intensidad varía con long. onda y T según datos experimentales

① Potencia emitida crece con T

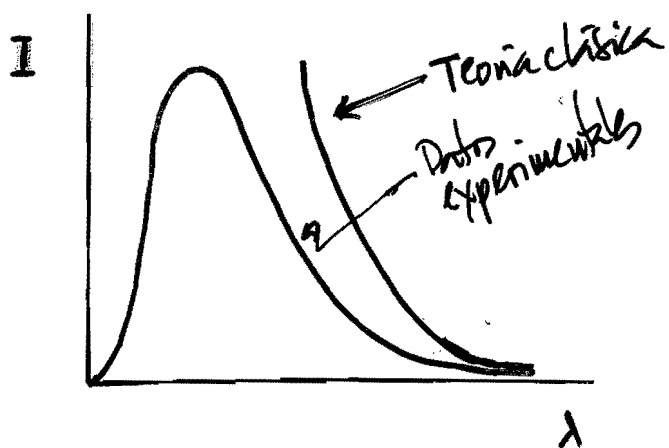
$$P \propto T^4 \quad \text{con } e=1 \quad (\text{cuerpo negro})$$

② Máximo en long. de onda  $\lambda$  se desplaza hacia valores de  $\lambda$  más pequeños a medida que T aumenta

Ley de desplazamiento de Wien (ley empírica)

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

Primeros intentos para explicar la radiación del cuerpo negro mediante la física clásica fallaron



Para  $\lambda$  largas, teoría clásica proporciona buen acuerdo con exp.

Para  $\lambda$  cortas, diferencias importantes entre teoría y experimento  $\Rightarrow$  CATÁSTROFE ULTRAVIOLETA

Modelo de Planck  $\Rightarrow$  Existen osciladores en la superficie del cuerpo negro, relacionados con las cargas de las moléculas

Hipótesis: • Energía de osciladores está CUANTIZADA. Es decir, sólo son posibles ciertos valores DISCRETOS de energía

$$E_n = n h f$$

$n \equiv$  número entero positivo (número cuántico)

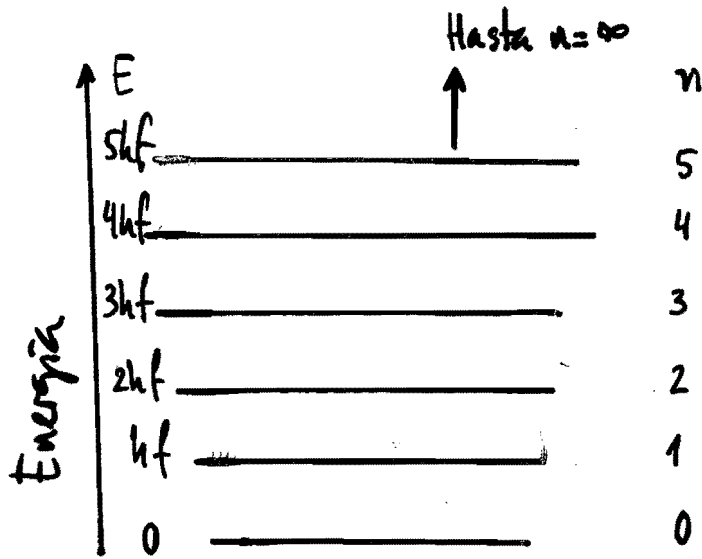
$f \equiv$  frecuencia de oscilación del oscilador

$h \equiv$  constante de Planck

Energías posibles:  $0, hf, 2hf, 3hf, \dots \Rightarrow$  Estados CUÁNTICOS

- Osciladores emiten o absorben energía en cantidades DISCRETAS. Al emitir o absorber dichas cantidades de energía realizan una transición desde un estado cuántico a otro

Diferencia total de energía entre estado inicial y final de la transición es emitida como un único CUANTO de radiación



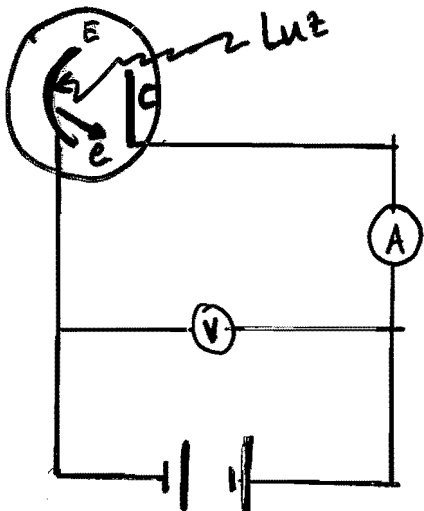
### Niveles cuánticos de energía y transiciones permitidas

### EFFECTO FOTO ELÉCTRICO

Radiación cuerpo negro: primer fenómeno en ser explicado con un modelo cuántico.

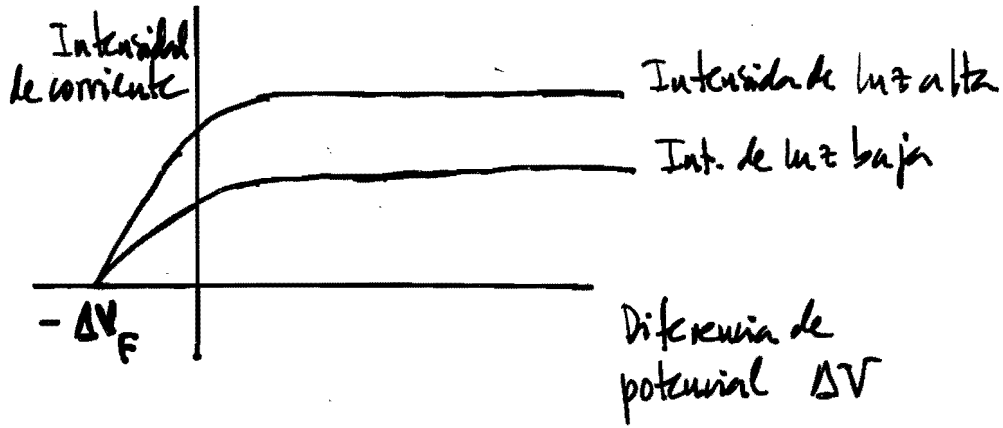
A finales del siglo XIX, algunos fenómenos o experimentos NO podían ser explicados por la hipótesis de que la luz era una ONDA. El más destacable: Efecto fotoeléctrico

Descubierto por Hertz: electrones despedidos de un metal cuando su superficie es expuesta a la luz.



Placa de metal E conectada al polo negativo de batería.  
 Placa de metal C se mantiene a potencial positivo  
 Luz incide sobre E → Amperímetro mide corriente → Flujo de electrones e entre E y C

Corriente procede de e emitidos por placa E (emisor) y recibidos por la placa positiva (colector)



Gráfica de un experimento fotoeléctrico: Intensidad de corriente en función de  $\Delta V$  entre E y C para dos intensidades de luz distintas

Para valores grandes y positivos de  $\Delta V \Rightarrow$  corriente alcanza un valor máximo ("plateau")

Si  $\Delta V < 0 \Rightarrow$  corriente disminuye ya que muchos electrones emitidos por E son repelidos por C (carga negativa)

Energía cinética umbral para llegar a C:  $e|\Delta V|$

Si  $\Delta V = \Delta V_F$  (potencial de frenado)  $\Rightarrow$  ningún e llega a C, intensidad nula.

8

Sistema aislado: campo eléctrico entre placas y un electrón emitido desde E con E. cinética máxima

Supongamos que  $e^-$  se detiene exactamente al llegar a C

$$E_1 = E_2 \Rightarrow E_{c1} + E_{p1} = E_{c2} + E_{p2}$$

1: instante en que  $e^-$  sale del metal

2: instante en que  $e^-$  se detiene

$$E_{c_{\max}} + 0 = 0 + (-e)(-\Delta V_F)$$

$$E_{c_{\max}} = e \Delta V_F$$

Podemos medir experimentalmente  $E_{c_{\max}}$  a partir de la medida del voltaje para el que la corriente se anula.

## Propiedades del efecto fotoeléctrico

- 1) Dependencia de la energía cinética de fotoelectrones con intensidad de la luz

Predicción clásica: A medida que la luz es más intensa,  $e^-$  salen con mayor energía cinética

Resultado experimental: energía cinética máxima es INDEPENDIENTE de intensidad



2) Tiempo entre incidencia de luz y emisión de  $e^-$

Predicción clásica: Para luz de intensidad débil  
 $\Rightarrow$  tiempo perceptible

Resultado experimental: electrones son emitidos por la superficie casi instantáneamente ( $\leq 10^{-9}$  s después de incidir la luz, incluso para intensidades bajas)

3) Dependencia de emisión de electrones con frecuencia de la luz

Predicción clásica: Deberían emitirse  $e^-$  para cualquier frecuencia de la radiación incidente. La energía se transmite al metal con independencia de la frecuencia

Resultado experimental: NO se emiten  $e^-$  si la frecuencia de luz incidente es menor que la frecuencia umbral  $f_0$  (característica del material iluminado). O sea, no se emiten  $e^-$  por debajo de  $f_0$  con independencia de la intensidad de la luz.

4) Dependencia de la energía cinética con frecuencia de la luz

Predicción clásica: La energía cinética sólo debe depender de la intensidad de la luz

Resultado experimental: la  $E_{\text{máx}}$  de electrones aumenta con frecuencia

Predicciones clásicas son erróneas

Teoría de Einstein (1905) para efecto fotoeléctrico

Hipótesis: La luz (o cualquier onda electromagnética) de frecuencia  $f$  está formada por trazo de cuantos (fotones), independientemente de la fuente de radiación

$$E_{\text{fotón}} = hf$$

Cada fotón se mueve a la velocidad de la luz  $c$

$$|\vec{c}| = c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Modelo de Einstein: Transferencia de energía se realiza a través de sucesos (proceso no continuo) que involucran un fotón y un electrón

Cuando se emite un  $e^-$  desde la superficie del metal posee la energía cinética

$$E_{c, \text{máx}} = hf - \phi$$

$hf$   $\equiv$  energía del fotón incidente

$\phi$   $\equiv$  función trabajo del metal. Energía o trabajo necesario para sacar al  $e^-$  del metal. Es la energía MÍNIMA necesaria para que  $e^-$  pase por superficie del metal y escape a las fuerzas atractivas que lo fijan al metal

Si el  $e^-$  colisiona con otros electrones o iones del metal cuando es emitido  $\Rightarrow E_c < E_{max}$

Modelo de fotones explica resultados experimentales

1) Dependencia de energía con intensidad de la luz  
 $E_{max}$  sólo depende de  $f$  y  $\phi$ . Si aumenta intensidad, aumenta el número de  $e^-$  emitidos pero su energía cinética no cambia.

2) Tiempo transcurrido entre absorción y emisión  
Emisión casi instantánea consistente con modelo de fotones.

3) Dependencia de emisión con frecuencia

Para que se observe emisión  $\Rightarrow$  Energía de fotón debe ser mayor que  $\phi$ . No hay efecto fotoeléctrico por debajo de frecuencia umbral

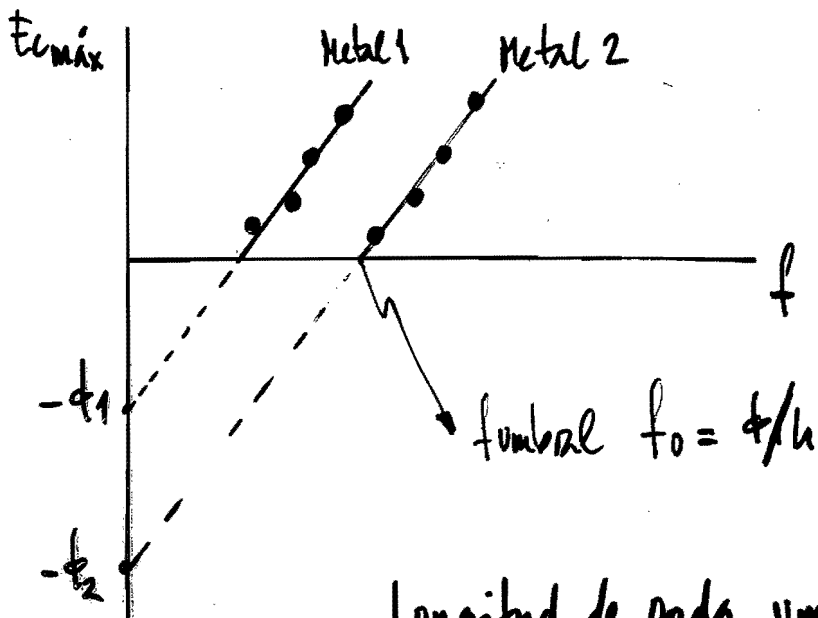
Si  $E_{cmax} = 0 \Rightarrow hf_{umbral} = \phi$

4) Dependencia de  $E_c$  con frecuencia

$E_{cmax} \propto f$

Dependencia lineal

Resultados experimentales confirman la teoría de Einstein



Longitud de onda umbral

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{c}{\phi/h} = \frac{hc}{\phi}$$

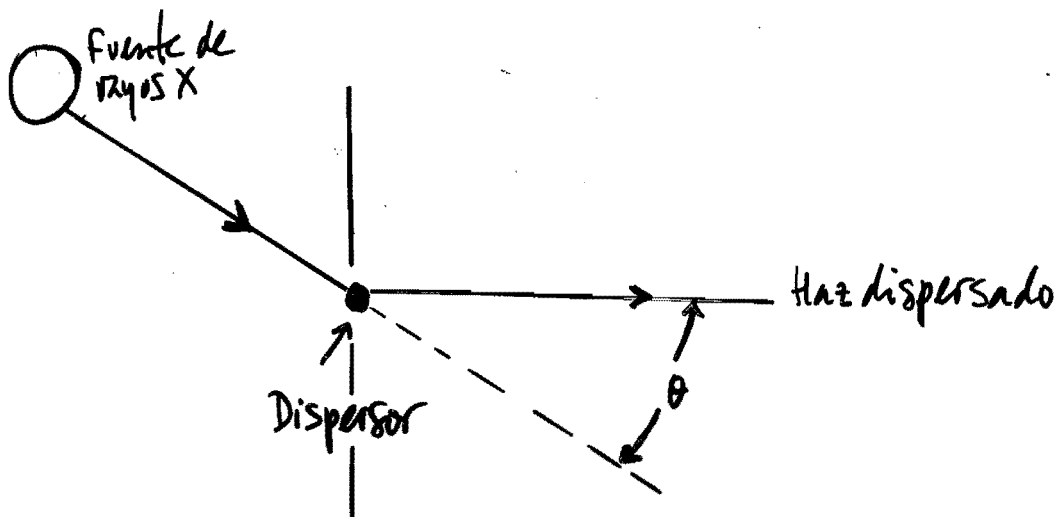
Si  $\lambda > \lambda_0 \Rightarrow$  No hay emisión de fotoelectrones

Ejemplo: Fotones de la región del visible del espectro electromagnético no son lo suficientemente energéticos para extraer fotoelectrones de superficies metálicas.

Rayos X o rayos  $\gamma$  energéticos (emitidos por núcleos radiactivos) sí pueden extraer e<sup>-</sup> internos (E<sub>fotón</sub> ~ 10<sup>6</sup> eV)

# Efecto Compton

1923 : confirmación experimental (Compton)



Haz de rayos X de  $\lambda$  incide sobre blanco de grafito. Para varios ángulos de dispersión medía intensidad de rayos X dispersados como función de  $\lambda$

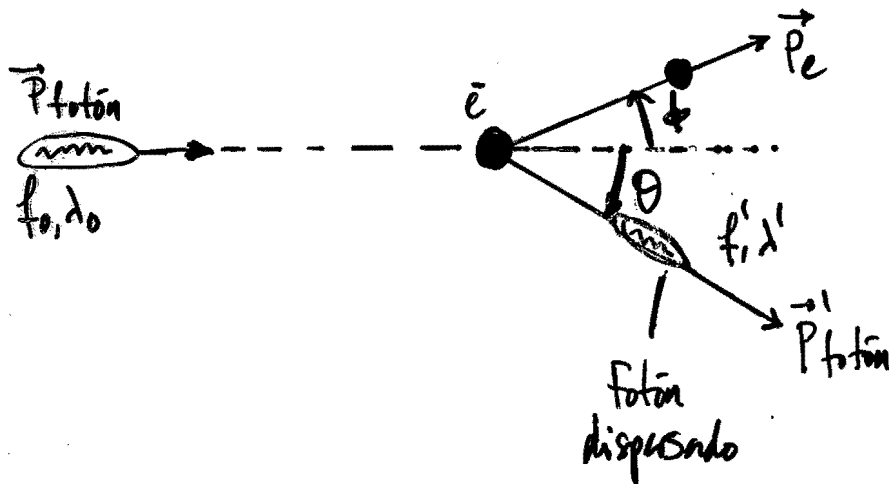
Predicción clásica : Onda dispersada debe tener la misma frecuencia y longitud de onda que la onda incidente.

Sorpresa : Rayos X dispersados tienen picos de intensidad para DOS longitudes de onda : una con  $\lambda$  (idéntica a la incidente) y otra  $\lambda' > \lambda$ .

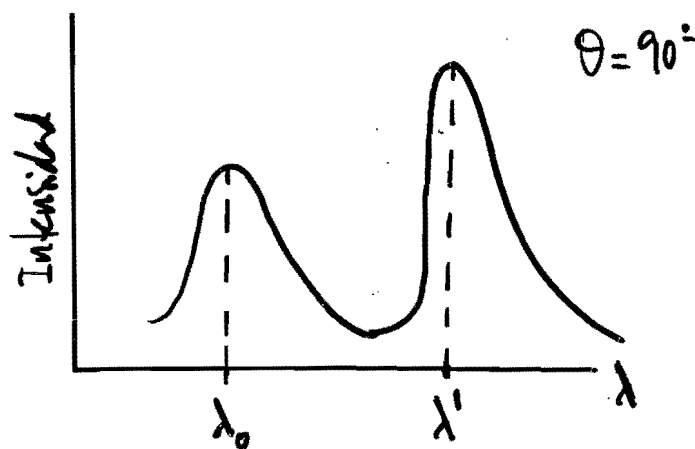
Corrimiento de Compton  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$   
Varía con  $\theta$

Interpretación de Compton: Haz de rayos X es una colección de fotones cada uno de ellos con energía  $E = hf$ .

Fotones chocan con  $e^-$  libres del blanco dispersor de manera similar a la colisión entre bolas de billar.



Modelo clásico:  $e^-$  es empujado en la dirección de propagación del rayo X por la presión de la radiación



Máximo en  $\lambda_0$ : Dispersión con  $e^-$  ligados al átomo objetivo

Máximo en  $\lambda'$ : Dispersión de rayos X con  $e^-$  libres

(15)

Predicción de Compton:

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Ecuación del desplazamiento de Compton

Longitud de onda de Compton

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m} = 0,00243 \text{ \AA}$$

Ejemplo: efecto Compton debe ser tenido en cuenta por los técnicos de rayos X que trabajan en hospitales y laboratorios radiológicos. Los rayos X dirigidos hacia el cuerpo del paciente sufren una dispersión de Compton por los electrones del cuerpo.

## Fotones y ondas electromagnéticas

Auerdo entre teoría de Einstein y el efecto Compton  $\Rightarrow$   
Luz está compuesta de partículas de energía  $hf$   
y momento lineal  $h/\lambda$

Sin embargo, la luz en ciertos casos muestra propiedades  
ondulatorias: interferencia y difracción

¿Cuál de los dos modelos es el correcto?

¿Luz es onda o partícula? Depende del fenómeno  
que se observe se puede explicar mejor (o únicamente)  
con el modelo de fotones o modelo ondulatorio

Conclusión: La luz (o cualquier onda electromagnética)  
tiene DOBLE naturaleza: muestra características  
de onda y de corpúsculo. Ambos modelos se  
complementan.

## Propiedades ondulatorias de las partículas

La materia (partículas) también tiene una doble  
naturaleza !!

L. de Broglie (1923): Todas las formas de materia  
tienen características ondulatorias y corpusculares



En el caso de un fotón, la relación entre energía y momento es  $p = E/c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. Pero  $E = hf = hc/\lambda$ , entonces

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{\lambda c} = \frac{h}{\lambda}$$

La longitud de onda del fotón  $\lambda$  puede obtenerse a partir de su momento lineal  $p$ . De Broglie extendió esta relación a cualquier partícula material:

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

Longitud de onda de De Broglie de una partícula

Experimento de Davisson & Germer (1927): Midió la longitud de onda de los electrones. Acordó con las ideas de De Broglie

Modelo de partícula cuántica: las entidades tienen características corpusculares y ondulatorias. Debemos elegir uno de los dos comportamientos para entender cada fenómeno determinado.

# Principio de incertidumbre

Al Medir posición o velocidad de una partícula, aparecen incertidumbres experimentales en las medidas.

Mecánica Clásica : NO hay límite que impida mejorar los aparatos de medida para alcanzar el nivel de precisión deseado.

Puedo realizar dichas medidas con un error arbitrariamente pequeño

Mecánica Cuántica : Es imposible realizar mediciones simultáneas de la posición y momento lineal de una partícula con INFINITA precisión.

(1927) Ppo de incertidumbre de Heisenberg :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$\Delta x \equiv$  incertidumbre (error) en la medida de la posición

$\Delta p_x \equiv$  incertidumbre en la medida del momento

"Es físicamente imposible medir simultáneamente de modo exacto la posición y momento de una partícula"

Incertidumbres inevitables en  $\Delta x$  y  $\Delta p_x$  no se deben a imperfecciones de instrumentos de medida sino a la naturaleza CUÁNTICA de la materia.

\* Consideremos partícula en que conocemos exactamente  $\lambda \Rightarrow \lambda = h/p \Rightarrow$  conocemos momento con absoluta precisión

Pero, onda con una sola longitud de onda existe en todos los puntos del espacio y su forma no varía de una región a otra. ¿Dónde está la partícula que representa dicha onda?

Todos los puntos de la onda son iguales: no hay región privilegiada del espacio para situar la partícula  
 $\Rightarrow$  incertidumbre infinita en la posición

\* Incertidumbre en  $p \Rightarrow$  partícula representada por una combinación de longitudes de onda (paquete de ondas)  $\Rightarrow$  podemos decir que la partícula está dentro del paquete de ondas  $\Rightarrow$  hemos ganado información acerca de la posición

Forma alternativa del Ppo: En términos de energía y tiempo

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Podemos violar el ppo de conservación de la energía hasta un valor  $\Delta E$  mientras lo hagamos durante un  $\Delta t$  que umpla el Ppo de incertidumbre

### Interpretación probabilística de la Mecánica Cuántica

Partícula tiene una onda asociada. Amplitud de la onda asociada a la partícula  $\Rightarrow$  amplitud de probabilidad o función de onda  $\psi$

$|\psi|^2 = \psi^* \psi > 0$  y  $\in \mathbb{R} \Rightarrow$  probabilidad de encontrar la partícula en un punto dado en el instante  $t$

$\swarrow$   
 complejo conjugado

Función de onda contiene toda la información sobre la partícula

(1928) Max Born: interpretación probabilística de  $\psi$

Función de onda  $\psi$  varía en el espacio y el tiempo  
 $\Rightarrow$  ecuación de onda de Schrödinger

Los conceptos en Mec. Cuántica se desarrollaron a partir de conceptos clásicos. Cuando se aplican conceptos cuánticos a sistemas macroscópicos, los resultados son idénticos a los de la Física Clásica.

Ambas teorías coinciden cuando la longitud de onda de De Broglie es muy pequeña comparada con las dimensiones del sistema.

Todas las propiedades físicas de una partícula (como su energía o momento) pueden obtenerse a partir de  $\psi$ .

Por ejemplo, la posición media (valor esperado) de  $x$

$$\langle x \rangle \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* x \psi dx$$

Valor esperado de  $f(x)$ :  $\langle f(x) \rangle \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* f(x) \psi dx$

(1926) Schrödinger: Partícula de masa  $m$  limitada a moverse sobre el eje  $x$  e interactuando con el entorno mediante función de energía potencial  $V(x)$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + U\psi = E\psi$$

Ec. Schrödinger  
independiente de  $t$

$E \equiv$  energía total del sistema (partícula y entorno)

Si uno resuelve dicha ecuación puede obtener las energías de los estados permitidos. Dicha ecuación ha resultado muy eficaz para explicar el comportamiento de sistemas atómicos y nucleares donde la Física clásica falla.

Además al aplicar la Mecánica cuántica a objetos macroscópicos, los resultados son coherentes con los de la Física clásica.