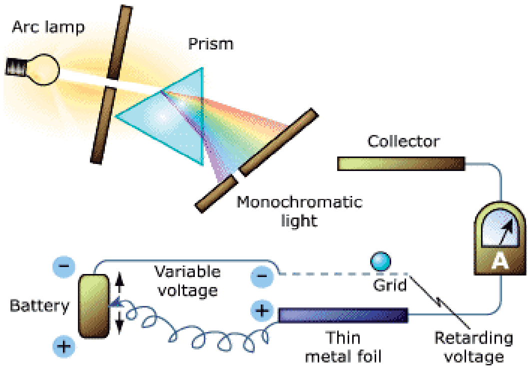
Tema 11
Mecánica cuántica



IES Padre Manjón
Prof: Eduardo Eisman

11. Mecánica cuántica: índice

CONTENIDOS	
1. La crisis de la física clásica · 2. Antecedentes de la mecánica cuántica · 3. Nacimiento y principios de la mecánica cuántica · 4. Consecuencias de la mecánica cuántica · 5. Aplicaciones. El láser	
CRITERIOS DE EVALUACIÓN	**ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE**
5. Analizar las fronteras de la física a finales del s. XIX y principios del s. XX y poner de manifiesto la incapacidad de la física clásica para explicar determinados procesos.	5.1. Explica las limitaciones de la física clásica al enfrentarse a determinados hechos físicos, como la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico o los espectros atómicos.
6. Conocer la hipótesis de Planck y relacionar la energía de un fotón con su frecuencia o su longitud de onda.	6.1. Relaciona la longitud de onda o frecuencia de la radiación absorbida o emitida por un átomo con la energía de los niveles atómicos involucrados.
7. Valorar la hipótesis de Planck en el marco del efecto fotoeléctrico.	7.1. Compara la predicción clásica del efecto fotoeléctrico con la explicación cuántica y realiza cálculos: trabajo de extracción y la energía cinética
8. Aplicar la cuantización de la energía al estudio de los espectros atómicos e inferir la necesidad del modelo atómico de Bohr.	8.1. Interpreta espectros sencillos, relacionándolos con la composición de la materia.
9. Presentar la dualidad onda-corpúsculo como una de las grandes paradojas de la física cuántica.	9.1. Determina las longitudes de onda asociadas a partículas en movimiento a diferentes escalas.
10. Reconocer el carácter probabilístico de la mecánica cuántica en contraposición con el carácter determinista de la mecánica clásica.	10.1. Formula de manera sencilla el principio de incertidumbre Heisenberg y lo aplica a casos concretos como los orbítales atómicos.
11. Describir las características fundamentales de la radiación láser, los principales tipos, su funcionamiento y sus principales aplicaciones.	11.1. Describe las características de la radiación láser comparándola con la radiación térmica.

1. La crisis de la física clásica

- **Las partículas son entes físicos** con masa definida que pueden poseer carga eléctrica. Su comportamiento está descrito por las **leyes de la mecánica clásica de Newton.**

- **Las ondas son entes físicos** que al propagarse, transportan energía y cantidad de movimiento. Experimentan fenómenos como la reflexión, refracción, difracción y polarización, y quedan explicados en la **teoría ondulatoria de Huygens y en la teoría electromagnética de Maxwell.**

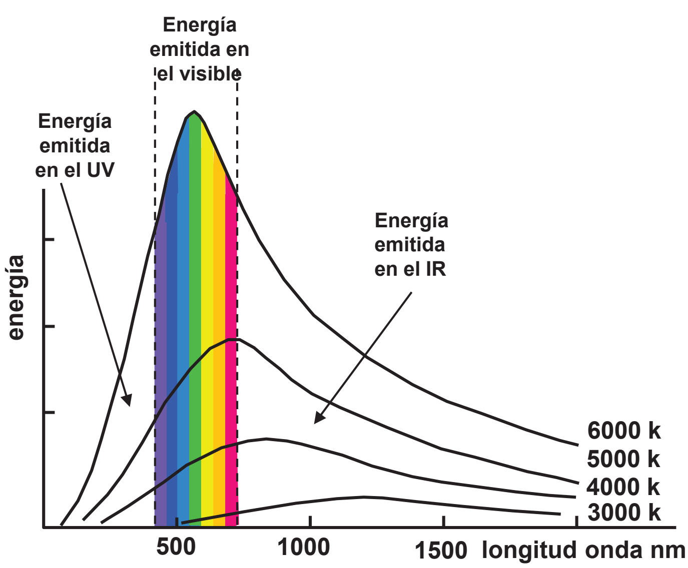
- **La mecánica de Newton y la teoría electromagnética de Maxwell,** (física clásica) son insuficientes para explicar el comportamiento de los átomos y de las partículas subatómicas.

- Tres hechos, obligan a revisar la física clásica y propician el nacimiento de la **Física Cuántica:**
  - **La radiación térmica del cuerpo negro.**
  - **El efecto fotoeléctrico.**
  - **El carácter discontinuo de los espectros atómicos.**

- Entre 1925 y 1927, **Böhr, Heisenberg, Schröedinger, Born** y otros, desarrollaron una nueva teoría denominada **Mecánica Cuántica** que describe el comportamiento de unos **entes cuánticos** que sustituyen a las partículas y a las ondas.

2.1 La radiación del cuerpo negro y la hipótesis de Planck

- **La radiación térmica de un cuerpo** es la energía electromagnética que emite debido a su temperatura.
- Cuando la temperatura aumenta, la radiación emitida se hace más intensa.
- **Cuerpo negro** es aquél que absorbe todas las radiaciones que le llegan y, en consecuencia es también un emisor ideal. Emite energía en todas las longitudes de onda, formando un **espectro continuo de emisión.**



- Kirchoff demostró que el **espectro de emisión de un cuerpo negro depende solo de la temperatura.**
- Las curvas de emisión de energía son experimentales.
- El cuerpo emite energía, en todas las longitudes de onda, dependiendo de la temperatura.
- Para cada temperatura, existe una longitud de onda para la cual la energía emitida es máxima.
- Cuando crece la temperatura del cuerpo, el máximo de emisión de energía, se obtiene a longitudes de onda más cortas.

2.1 La radiación del cuerpo negro y la hipótesis de Planck

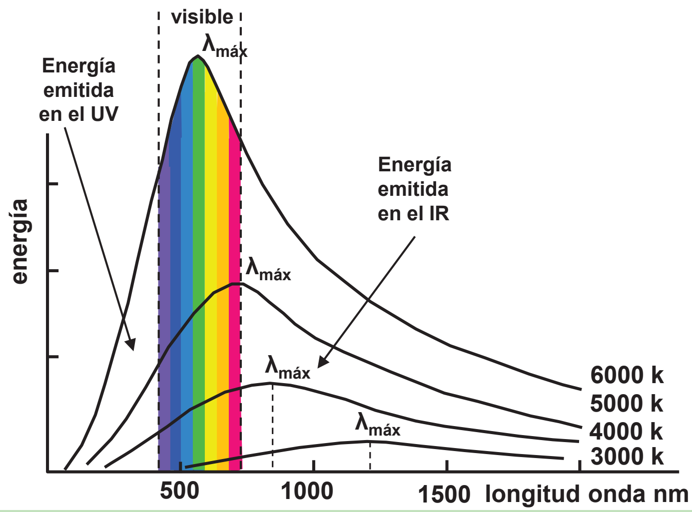
- La radiación del cuerpo negro se ajusta a las siguientes leyes experimentales:
- **Ley de Wien:** el producto de la longitud de onda correspondiente al máximo de emisión por la temperatura absoluta es constante.

$$\lambda_{máx}.T = 2{,}9.10^{-3}\ m.K$$

- La $\lambda_{máx}$ (energía emitida es máxima) disminuye al aumentar la temperatura, es decir, el pico del espectro se deslaza a la izquierda.
- **Ley de Stefan-Boltzmann:** la energía total emitida por un cuerpo (área total bajo cada curva), por unidad de superficie y tiempo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

$$E_{total} = \sigma T^4$$

σ es la constante de de Stefan-Boltzmann



- Según la teoría clásica la energía debería disminuir de forma continua, al aumentar la longitud de onda.
- Es decir para longitudes de onda cortas, región del UV, la energía emitida sería grande, y sin embargo, según la gráfica tiende a cero.
- Este hecho recibe el nombre de **catástrofe del ultravioleta.**

2.1 Hipótesis de Planck

- **Max Planck** intenta, sin conseguirlo, obtener una ecuación que explique la emisión de energía de un cuerpo negro, en función de la frecuencia, a partir de las ideas de la época de que la energía era algo continuo y de carácter ondulatorio.
- **Hipótesis de Planck:** en 1900, Max Planck, postula que la energía emitida por un cuerpo negro no es continua, se emite en forma de paquetes o cuantos:
- **La energía emitida (cuanto de energía) por los osciladores atómicos no puede tomar cualquier valor sino que es múltiplo entero de una constante h multiplicada por la frecuencia del oscilador:**

$$E = n h f$$

n es un número entero

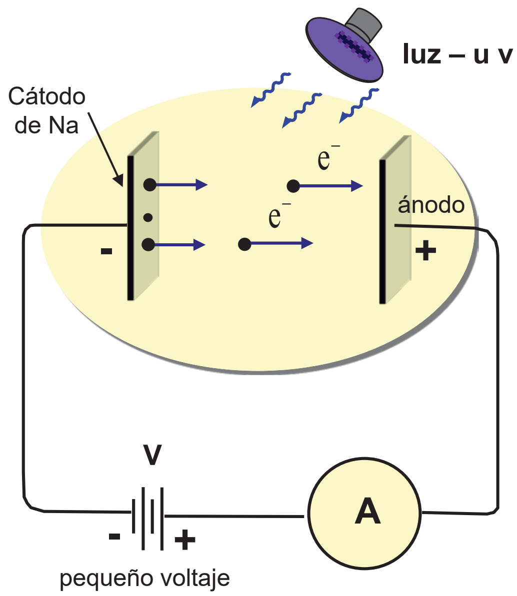
h constante de Planck = 6,625·10^{-34} J·s

f es la frecuencia del oscilador

- Para Planck los átomos se comportan como osciladores y cada uno de ellos oscila con una frecuencia dada. **El número de osciladores de baja frecuencia es muy superior al de osciladores de alta frecuencia.**
- A partir de esta hipótesis de que la energía no es algo continuo, sino formada por paquetes o cuantos de energía se obtiene la ley de la radiación del cuerpo negro y se justifica correctamente su espectro de emisión. Esta idea se aplicará después a la naturaleza de la luz.
- Las ideas de Planck no fueron aceptadas fácilmente. En aquella época se consideraba que los fenómenos físicos debían ser continuos y no se aceptaba la discontinuidad de Planck.

2.2 Efecto fotoeléctrico

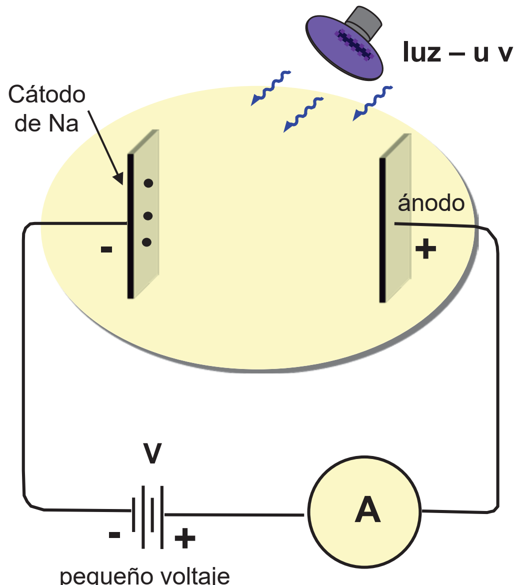
- **Efecto fotoeléctrico:** cuando sobre la superficie de un metal incide luz (radiación electromagnética) de frecuencia adecuada se produce la emisión de electrones.
- En los metales alcalinos (Li, Na..) el efecto fotoeléctrico se presenta con luz visible, en los demás metales con radiación ultravioleta (de mayor frecuencia, y por lo tanto de mayor energía).

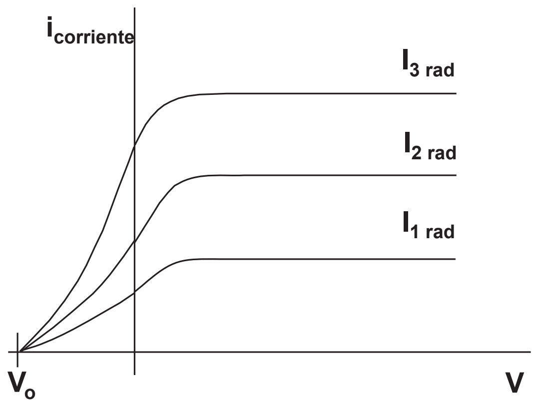


- El dispositivo para estudiar el **efecto fotoeléctrico** es una cápsula de cuarzo o vidrio con una ventana de cuarzo por ser transparente a la luz UV. Dentro se hace el vacío.
- Entre el cátodo y el ánodo se establece una pequeña ddp V, y al iluminar el cátodo se produce la emisión de electrones, una corriente eléctrica que se dirige al ánodo, y que es detectada por el amperímetro.
  - Ver educaplus efecto fotoeléctrico

2.2 Efecto fotoeléctrico

- Cuando se estudia la intensidad de corriente , en función de las distintas intensidades luminosas I_1 , I_2 ….que llegan al cátodo se obtiene la gráfica:





- Intensidad de corriente fotoeléctrica en función de la ddp cátodo-ánodo, para distintas intensidades de luz.

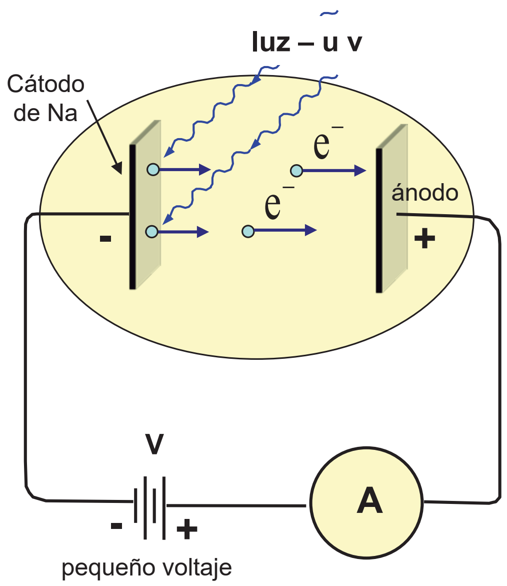
- Detenemos los electrones emitidos cambiando la polaridad del cátodo-ánodo. La corriente eléctrica decrece y se anula para un mismo valor del potencial, potencial de corte o frenado V_o, independiente de la intensidad de luz, pero dependiente de la frecuencia de la radiación.
- El potencial de corte nos permite calcular la velocidad máxima con la que los electrones escapan del cátodo:

$$\boxed{\frac{1}{2} m_{e^-} v^2_{máx} = e V_o}$$

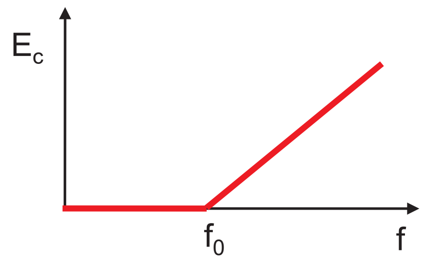
V_o es el potencial fotovoltaico, potencial de frenado o de corte.

2.2 Efecto fotoeléctrico

- El estudio experimental del efecto fotoeléctrico conduce a las siguientes conclusiones:



- La emisión de electrones es instantánea cuando la radiación tiene suficiente frecuencia.
- Para cada metal, existe una frecuencia umbral f_o , por debajo de la cual no se produce la emisión de electrones, sea cual sea la intensidad de la luz.
- La energía cinética de los electrones depende de la frecuencia de la radiación, no de su intensidad.
- Si aumentamos la frecuencia por encima de la umbral, aumenta la energía cinética máxima de los electrones.



- La intensidad de la corriente (número de electrones arrancados) es directamente proporcional a la intensidad de la luz que llega al metal.

o Para la Física clásica, las ondas transportan la energía de modo continuo, por tanto el efecto fotoeléctrico debería depender de la intensidad, y sin embargo se observa que el fenómeno no depende de la cantidad de energía que llega sino de su frecuencia.

2.2 Efecto fotoeléctrico: teoría de Einstein

- **Teoría de Einstein:** En 1905 A. Einstein explicó el efecto fotoeléctrico aplicando a la luz las ideas de Planck sobre la radiación térmica: **la luz se propaga transportando la energía en forma de paquetes o cuantos de luz, cada paquete se comporta como una partícula de luz pequeña a la que llamó fotón, cuya energía viene dada:**

$$E_{fotón} = h\, f_{fotón}$$

- **Según Einstein** la energía de la radiación que llega al metal sirve para arrancar los electrones del metal, (trabajo de extracción), y si hay suficiente energía, para comunicarle a los electrones un energía cinética, de acuerdo con la expresión:

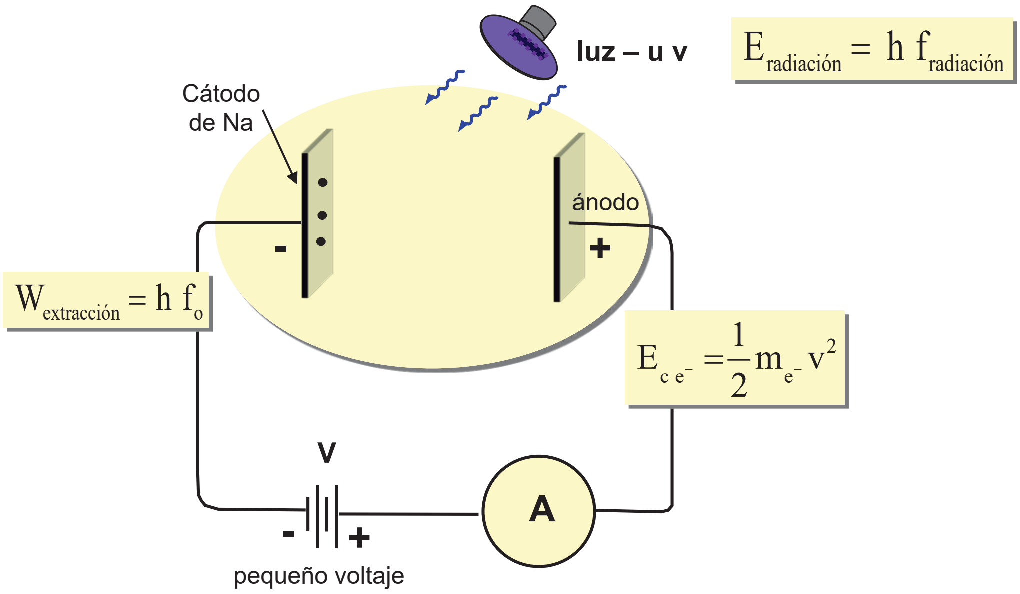
$$E_{radiación} = W_{extracción} + E_{c\,e^-} \quad \Rightarrow \quad h\,f_{radiación} = h\,f_o + \frac{1}{2} m_{e^-} v^2$$

- **El efecto fotoeléctrico se explica como un:**
- Simple choque entre partículas, fotones y electrones, por eso es instantáneo.
- Cuanta más energía tengan los fotones, con mayor velocidad saldrán los electrones arrancados.
- Por debajo de la frecuencia umbral, la radiación (fotones), no tiene energía suficiente para arrancar electrones: no hay efecto fotoeléctrico.
- Cuanta más intensidad (más fotones) tenga la luz incidente, más choques y más electrones se pueden arrancar del metal.

2.2 Efecto fotoeléctrico: teoría de Einstein

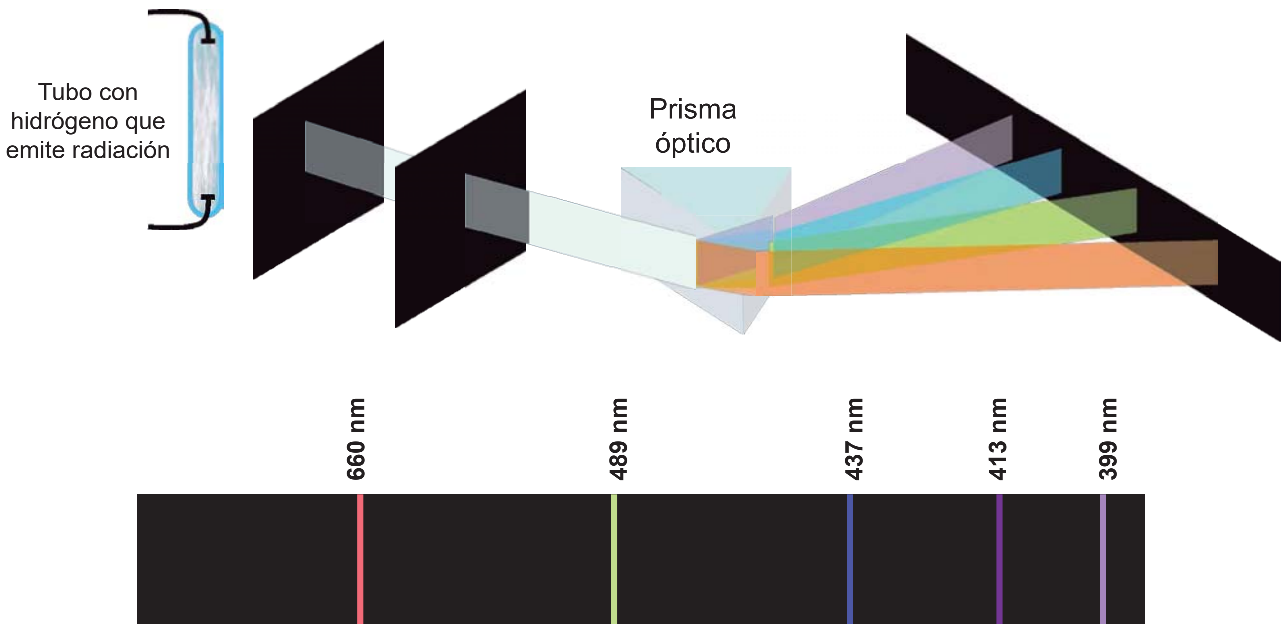
- **Según la teoría de Albert Einstein:**

$$E_{radiación} = W_{extracción} + E_{c\,e^-} \Rightarrow h\,f_{radiación} = h\,f_o + \frac{1}{2} m_{e^-} v^2$$



2.3 Los espectros atómicos

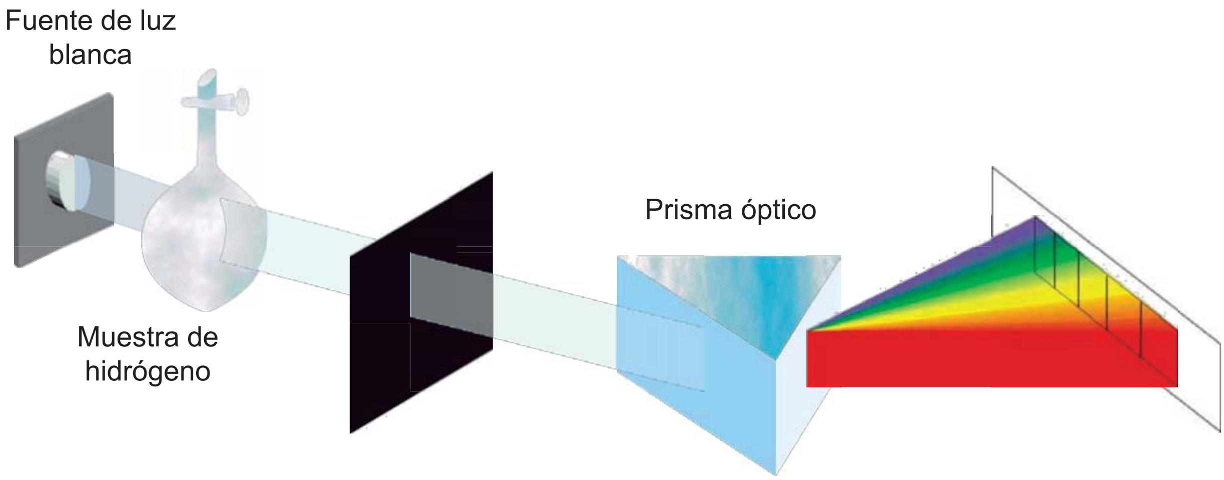
- **Espectro de emisión del átomo de hidrógeno**
- Los espectros de emisión se obtienen al descomponer las radiaciones de un cuerpo previamente excitado.

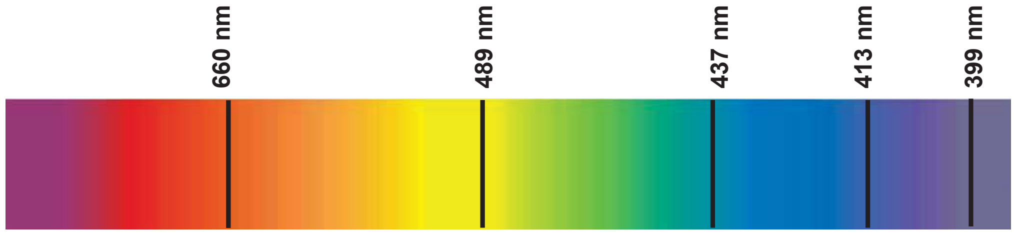


- Los espectros emitidos por gases calentados son espectros discontinuos, formados por rayas luminosas, **características de cada elemento.**
- El primer espectro que se analizó fue el del átomo de Hidrógeno.

2.3 Los espectros atómicos

- **Espectro de absorción del átomo de hidrógeno**





- Los espectros de absorción discontinuos se obtienen al intercalar un gas entre la fuente de luz y el prisma. Se observan bandas o rayas oscuras situadas en la misma longitud de onda que sus espectros de emisión.

2.3 Los espectros atómicos

- En 1885, un maestro de escuela suizo, Johann Jacob **Balmer** estudiando la **zona visible** del espectro de emisión del átomo de hidrógeno, encontró una expresión que permitía predecir dónde salen las rayas.

$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right]$$

- λ es la longitud de onda de la raya
- **R** es la **constante de Rydberg,** vale $1{,}097\cdot10^{7}\ m^{-1}$
- **n** es un número entero mayor que 2

- Posteriormente se descubrió que el **hidrógeno presenta rayas en el ultravioleta y el infrarrojo,** por lo que obtuvieron una expresión más general

$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] \qquad siendo: n_2 > n_1$$

Serie	n_1	n_2	zona
Lyman	1	2, 3, 4, …	Ultravioleta
Balmer	2	3, 4, 5, …	Visible
Paschem	3	4, 5, 6, …	Infrarrojo
Bracket	4	5, 6, 7, …	Infrarrojo
Pfund	5	6, 7, 8, …	Infrarrojo

¿A qué se deben estas líneas que aparecen en los espectros?

- **Niels Bohr** (1913) propuso un modelo de átomo de hidrógeno donde los niveles de energía están cuantizados. A cada nivel le corresponde un **número entero n llamado número cuántico principal.**

2.4 Modelo atómico de Bohr

- En 1913 el físico danés Niels Bohr propone un modelo de átomo basado en los siguientes postulados:

- 1er Postulado: Los electrones giran en torno al núcleo en órbitas circulares estables, donde al moverse no pierden energía **(órbitas estacionarias).**

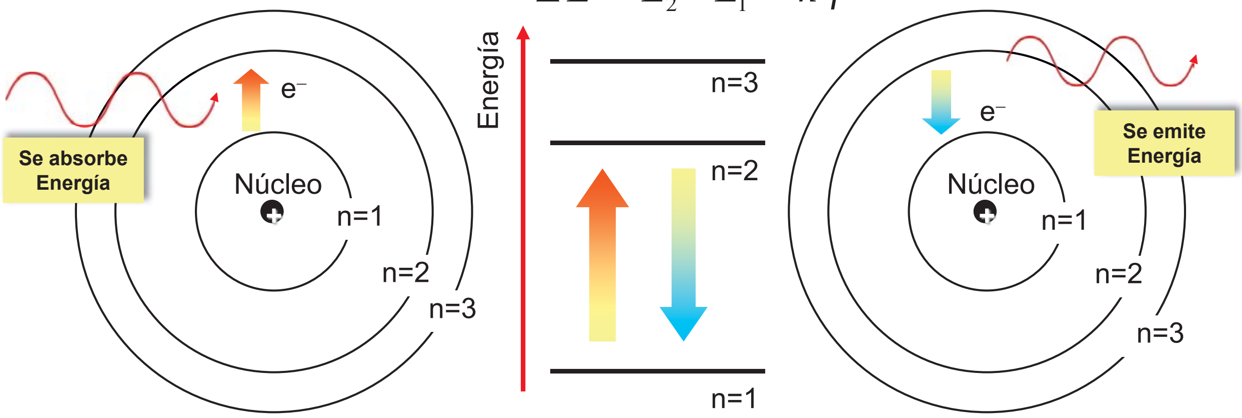
- 2º Postulado: Sólo son posibles aquellas órbitas en las que el electrón tiene un momento angular que es múltiplo entero de h/2π.

$$L = m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

n es el número cuántico principal

- 3er Postulado: Cuando el electrón pasa de una órbita a otra, absorbe o emite energía en forma de cuantos o fotones cuya cantidad es:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\, f$$



2.4 Modelo atómico de Bohr

- **Radio de las órbitas permitidas:**
- La fuerza de atracción electrostática entre el núcleo y el electrón del átomo de hidrógeno es una fuerza centrípeta:

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{m_e v^2}$$

- Teniendo en cuenta el 2º postulado de Bohr: $v = n\frac{h}{2\pi m_e r}$
- Radios de las órbitas permitidas: $\boxed{r = n^2 \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = 0{,}53.10^{-10}\ n^2\ (m)}$

- **Energía de las órbitas permitidas:**
- La energía de un electrón en su órbita será la suma de la energía cinética más la energía potencial:

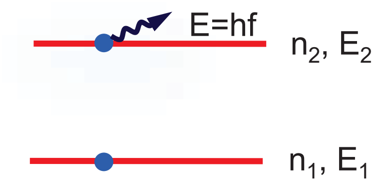
$$E_T = E_c + E_P = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

- Sustituyendo la velocidad y el radio obtenidos anteriormente, se obtiene la energía total de un electrón en una órbita de Bohr :

$$\boxed{E_T = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} = -\frac{13{,}6}{n^2}\ (eV)}$$

2.4 Modelo atómico de Bohr

- **Energía emitida por un electrón al pasar de una órbita de energía superior a otra inferior.**



$$E_{emitida} = E_2 - E_1 = -\frac{m_e\, e^4}{8\,\varepsilon_0^2\, n_2^2\, h^2} - \left(-\frac{m_e\, e^4}{8\,\varepsilon_0^2\, n_1^2\, h^2}\right)$$

$$E_{emitida} = \frac{m_e\, e^4}{8\,\varepsilon_0^2\, h^2}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

- De acuerdo con el 3er postulado de Bohr, la energía se emite en forma de cuantos o fotones $E_{fotón} = hf$ y será:

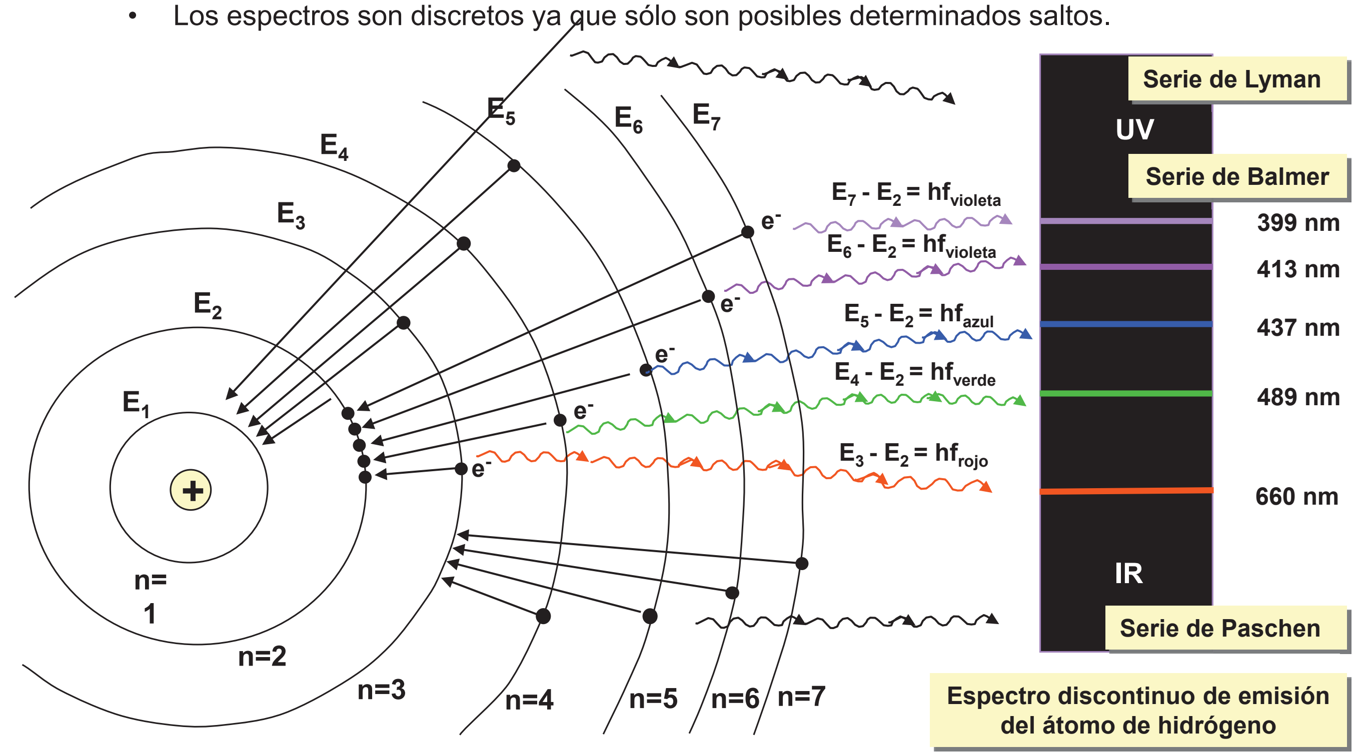
$$h\,f = h\frac{c}{\lambda} = \frac{m_e\, e^4}{8\,\varepsilon_0^2\, h^2}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e\, e^4}{8\,\varepsilon_0^2\, h^3 c}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)}$$

- Al sustituir los valores de las constantes, se obtiene la **constante de Rydberg.**

2.4 ¿Cómo se producen los espectros discontinuos según Bohr?

- **Los espectros atómicos confirman el modelo atómico de Bohr y son una prueba evidente de la cuantización de la energía.**
- Las órbitas están cuantizadas, solo son posibles determinados saltos del electrón.
- Cada salto origina un fotón de una determinada frecuencia: una raya en el espectro.
- Los espectros son discretos ya que sólo son posibles determinados saltos.



Espectro discontinuo de emisión del átomo de hidrógeno

2.4 Cálculo de la longitud de onda de algunas rayas espectrales

- Calcula la longitud de onda de la primera y la segunda raya de la serie de Balmer para el hidrógeno. ¿Cuál es la diferencia de energía de los niveles en los que se produce la transición electrónica que las origina?.

- **En la serie de Balmer n_1 = 2.** Para la primera raya, n_2 = 3; la segunda, n_2= 4, etc.

$$\frac{1}{\lambda_1} = R\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}09.10^7\,m^{-1}\left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right] \Rightarrow \lambda_1 = 6{,}60.10^{-7}\,m = 660\,nm$$

$$\frac{1}{\lambda_2} = R\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}09.10^7\,m^{-1}\left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right] \Rightarrow \lambda_2 = 4{,}89.10^{-7}\,m = 489\,nm$$

- Diferencia de energía entre los niveles cuya transición origina la primera raya es:

$$\Delta E_{3\to 2} = h.\frac{c}{\lambda_1} = 6{,}625.10^{-34}\ J.s.\frac{3.10^8\ m.s^{-1}}{660.10^{-9}\ m} = 3{,}01.10^{-19}\,J\ =\ 1{,}88\ eV$$

- Diferencia de energía entre los niveles cuya transición origina la segunda raya es:

$$\Delta E_{4\to 2} = h.\frac{c}{\lambda_2} = 6{,}625.10^{-34}\ J.s.\frac{3.10^8\ m.s^{-1}}{489.10^{-9}\ m} = 4{,}04.10^{-19}\,J\ =\ 2{,}53\ eV$$

2.5 Modelo mecánico cuántico: de las órbitas a los orbitales

- El modelo atómico actual es el denominado **modelo mecánico-cuántico**,
- El modelo sustituye la idea de que los electrones giran en torno al núcleo en unas órbitas determinadas por **zonas donde la probabilidad de encontrar al electrón es máxima.**

- Según la mecánica cuántica, cada nivel de energía principal **n,** posee subniveles que se designan con los números **0, 1, 2, … (n-1), a los que corresponden las letras s, p, d, f.**
- Además los subniveles pueden presentar distintas orientaciones y los electrones ocupan esas zonas girando en un sentido o en el contrario.

Números cuánticos	**Valores**	**Representa**
Principal n	n = 1,2,3,…	Nivel de energía
Secundario o azimutal l	l = 0,1,2,… (n-1)	Subnivel de energía
Magnético m	+l … 0 …-l	Orientación del subnivel
Spin s	± 1/2	Giro del electrón sobre sí mismo

- Un **orbital atómico** es la zona del espacio en la que hay mayor probabilidad de encontrar un electrón con una determinada energía.
- En cada orbital caben como máximo dos electrones con el spin (giro) contrario.

3.1 Nacimiento y principios de la mecánica cuántica

- **Situación de partida (principios de los años 20):**
- La luz, en los fenómenos de difracción, interferencia y polarización, muestra una **naturaleza ondulatoria.**
- La luz, en los fenómenos de emisión del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y la formación de espectros y otros, muestra una **naturaleza corpuscular (fotones).**

- **Bases de la Mecánica Cuántica**
- Hipótesis de Louis de Broglie (1924).
- El principio de indeterminación de Heisenberg.
- La función de probabilidad de Schrödinger.

- ¿Por qué los electrones se mueven en órbitas estacionarias de energía?
- ¿Por qué tienen comportamiento de onda?
- ¿Cómo conocer la energía que posee un electrón y la posición de éste si según el principio de incertidumbre nunca lograremos medirlo?

- **La mecánica clásica no puede dar respuesta a estos interrogantes**

3.2 Nacimiento y principios de la mecánica cuántica

- La Teoría Cuántica de Planck y la Relatividad de Einstein.

Max Planck
Físico alemán 1858-1947

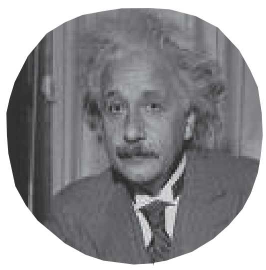
- Según la Teoría Cuántica de Max Planck, la energía de un fotón depende de la frecuencia luminosa y viene dada por la ecuación:

$$E_{fotón} = h.f_{fotón} = h.\frac{c}{\lambda_{fotón}}$$

Constante de Planck:
$h = 6{,}625.10^{-34}$ J.s

- Según A. Einstein la energía relativista de un fotón:

$$E_{fotón} = m.c^2$$



Albert Einstein
Físico alemán 1879-1955

- Igualando energías: $h.\frac{c}{\lambda_{fotón}} = m.c^2 \Rightarrow \lambda = \frac{h}{m.c}$

- Ecuación que relaciona una magnitud corpuscular, la masa; con una magnitud ondulatoria, la longitud de onda.

3.3 Dualidad onda - partícula: Hipótesis de De Broglie

- **Louis De Broglie,** en 1924, pensando en la simetría de la naturaleza y, teniendo en cuenta la dualidad onda-corpúsculo de la luz, postuló que **la materia tiene naturaleza ondulatoria:** toda partícula (electrón, protón, etc) lleva asociada una onda, cuya longitud de onda (λ) y frecuencia (f) vienen dadas por las expresiones:

$$\lambda = \frac{h}{m.v} \qquad f = \frac{E}{h}$$


Louis De Broglie
Físico francés

- m la masa, v la velocidad y E la energía de la partícula.
- Las partículas "pequeñas" llevan asociadas "ondas significativas"; mientras que las partículas "grandes", llevan asociadas ondas "no significativas.

- Toda partícula material en movimiento tiene un comportamiento ondulatorio.

- Las ondas de De Broglie son **ondas de materia,** no tiene naturaleza mecánica, ni electromagnética, no se originan en ningún fenómeno físico (vibración, compresión, etc).
- Estas ondas vienen definidas por una **función de onda Ψ(x,y,z,E).**
- A partir de este postulado, Schrödinger estudia el estado del electrón del átomo de hidrógeno.

3.4 Cálculo de la longitud de onda asociada a distintas partículas

- Calcula la longitud de onda de De Broglie asociada, a las siguientes partículas:
  a) Una persona de 70 kg, moviéndose a 2 m/s.
  b) Un electrón de $9,1.10^{-31}$ kg de masa, moviéndose a 1000 m/s

- La longitud de onda de De Broglie asociada a la persona vale:

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6,625.10^{-34}\,J.s}{70\,kg.2\,m.s^{-1}} = 4,7.10^{-36}\,m$$

- Mucho menor que el tamaño, no ya de la persona, sino de los núcleos de los átomos. Luego sus efectos ondulatorios serán imperceptibles.

- La longitud de onda de De Broglie asociada al electrón vale:

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6,625.10^{-34}\,J.s}{9,1.10^{-31}\,kg.1000\,m.s^{-1}} = 7,2.10^{-7}\,m$$

- Unas 130000 veces mayor que el radio de la primera órbita de Böhr, luego producirá fenómenos ondulatorios que impedirán la localización del electrón en un espacio del orden de su longitud de onda.

3.5 Principio de Indeterminación de Heisenberg

- **Principio de Indeterminación de Heisenberg:**
- Es imposible en un instante dado, determinar simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula (el momento lineal de ésta).

- No es una limitación debida a la medida, sino a la propia naturaleza de la materia.

$$\Delta x . \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad \text{Principio de Heisenberg}$$

- Δx es la imprecisión en la medida de la posición.
- Δp es la imprecisión en la medida del momento lineal.

Heisenberg 1901-1976

- Por tanto si conocemos exactamente dónde está el electrón ($\Delta x = 0$), no sabremos su momento lineal o su velocidad ($\Delta p \to \infty$) y viceversa.
- El Principio de Incertidumbre es una consecuencia de la dualidad onda-partícula de la radiación y la materia.

- La mecánica cuántica sustituye los modelos clásicos que situaban los electrones girando en órbitas alrededor del núcleo por **zonas llamadas orbitales en las que la probabilidad de que se encuentre el electrón es elevada.**

3.6 Ecuación de Schrödinger. Función de onda

- A partir de la hipótesis de De Broglie y considerando que el movimiento del electrón es análogo a un sistema de ondas estacionarias,
- En 1926, Erwin Schrödinger desarrolla una teoría según la cual las **propiedades corpusculares y ondulatorias** de la materia no son mas que aspectos distintos de una misma realidad.
- **Schrödinger llegó a una ecuación de onda para el átomo de hidrógeno**

$$\psi\left(x, y, z, E\right) = 0 \quad \text{Ecuación de Schödinger}$$

E. Schrödinger 1887-1962

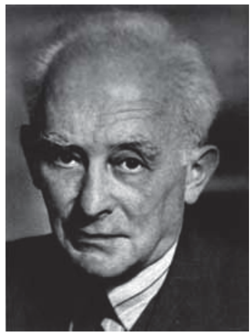
- **ψ recibe el nombre de función de onda,** es función de las coordenadas cartesianas y de la energía del electrón.
- Esta ecuación es puramente teórica y al resolverla se obtienen las soluciones propuestas en el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld.

- La **ecuación de onda de Schrödinger,** describe el comportamiento y la energía de las partículas submicroscópicas.
- Es una función análoga a las leyes de Newton para los sólidos macroscópicos que incorpora tanto el carácter de partícula (en función de la masa) como el carácter de onda en términos de una **función de onda ψ**

3.7 Ecuación de Schrödinger. Función de onda

- **La función de probabilidad de Schrödinger**
- **Max Born** sugirió que lo que tenía sentido físico real no era la función de onda, sino su cuadrado.
- Según esta interpretación, la **probabilidad de encontrar un electrón en un elemento de volumen *dV*** viene dada por:

$$|\Psi|^2 \, dV$$



Max Born 1882-1970

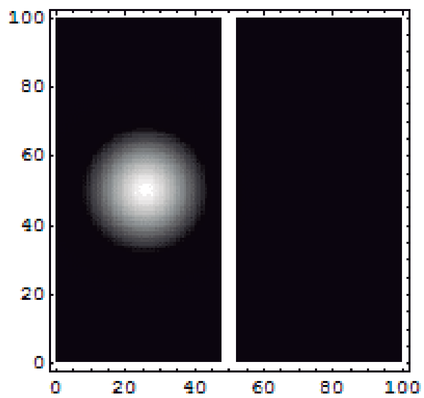
- La función de onda debe cumplir:

$$\int_v |\Psi|^2 \, dV = 1$$

- Cuando se cumple esta condición se dice que la función de onda se encuentra "normalizada".
- **Al cuadrado del valor absoluto de la función de onda, Ψ^2, se la llama densidad de probabilidad.**
- Nos da la probabilidad de encontrar la partícula descrita por la función ψ en un punto y un instante dado, obteniéndose lo que se denomina **nube de probabilidad o densidad electrónica para el electrón del átomo de hidrógeno.**
- Esto aplicado a los electrones en los átomos llevó al concepto de **Orbital.**

4.1 Consecuencias de la mecánica cuántica

- Se sustituye la idea de trayectorias precisas (órbitas) de Bohr por zonas de máxima probabilidad de hallar el electrón (**orbital**).
- Se modifica el concepto de electrón como "partícula cargada negativamente", que carece de sentido.
- Debemos acostumbrarnos a hablar de **rastro electrónico** más que de electrón.
- **Efecto túnel**
- Reflexión y "tunelado" de un electrón dirigido hacia una barrera potencial. El punto resplandeciente moviéndose de derecha a izquierda es la sección reflejada del wavepacket. Un vislumbre puede observarse a la derecha de la barrera. Esta pequeña fracción del wavepacket atraviesa el túnel de una forma imposible para los sistemas clásicos. También es notable la interferencia de los contornos entre las ondas de emisión y de reflexión.

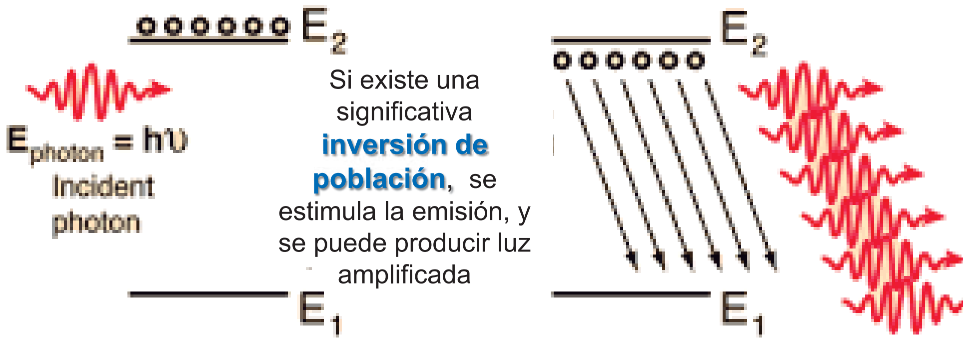


5.1 Aplicaciones de la mecánica cuántica: el laser

- **L**ight **a**mplification by **s**timulated **e**misión of **r**adiation: luz amplificada por emisión estimulada de radiación.
- Es un dispositivo que produce un **haz intenso de luz de una sola frecuencia, estando todas las ondas en fase, es decir es luz coherente.**

- Un láser típico es un sólido transparente (rubí) o un tubo lleno de gas con espejos en ambos extremos, uno de ellos semiplateado que permita salir parte de la luz.
- La distancia entre los espejos es un múltiplo entero de semilongitudes de onda de la luz encerrada en el láser, para que de lugar a una onda estacionaria.

- Mediante una fuente externa de energía se produce la inversión de la población de átomos del estado normal al excitado.
- La acción laser comienza cuando un fotón inicia la emisión estimulada.



Los fotones que se originan por emisión estimulada, tienen la misma frecuencia, **luz monocromática**, y se emiten en fase produciendo **luz coherente**

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

1. Calcular la energía cinética con que se expulsa un electrón de un metal, sabiendo que el trabajo de extracción es 3,6 eV y que se hace incidir una radiación de 10^{-7} m de longitud de onda.

Datos: h = $6{,}625.10^{-34}$ J.s; c = 3.10^{8} m/s; e- = $1{,}6.10^{-19}$ C; 1A = 10^{-10} m; 1 nm = 10^{-9} m; m_{e-} = $9{,}1.10^{-31}$ kg.

- Aplicando la teoría de Albert Einstein sobre el Efecto Fotoeléctrico:

$$E_{Rad} = hf_{Rad} = h\frac{c}{\lambda_{Rad}} = W_{Ext} + E_{ce}$$

$$E_{Rad} = 6{,}625.10^{-34}\ Js.\frac{3.10^{8}\ ms^{-1}}{10^{-7}\ m} = 1{,}99.10^{-18}\ J = 12{,}4\,eV$$

$$W_{Extrac} = 3{,}6\,eV.1{,}6.10^{-19}\,C(eV)^{-1} = 0{,}58.10^{-18}\ J$$

- Luego la energía cinética con que se expulsan los electrones:

$$E_{ce} = 1{,}99.10^{-18}\ J - 0{,}58.10^{-18}\ J = 1{,}41.10^{-18}\,J = 8{,}8\,eV$$

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

2. Incide sobre un metal una onda electromagnética de 3000 Å; la energía cinética máxima de los electrones emitidos es de 2 eV. Calcular: a) la energía del fotón incidente; b) el trabajo de extracción del metal; c) el potencial de frenado.

- Energía del fotón incidente, cuya longitud de onda es 3000 Å:

$$E_{fotón} = h.f_{fotón} = h.\frac{c}{\lambda_{fotón}} = \frac{6,625.10^{-34}\ J.s}{3000.10^{-10}\ m} = 6,625.10^{-19}\ J\ .\frac{1}{1,6.10^{-19}\ C.e^{-1}} = 4,14\,eV$$

- El trabajo de extracción se calcula por diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía máxima de los electrones arrancados:

$$W_{Extrac} = E_{fot} - E_{c\,max\,e} = 4,14\,eV - 2\,eV = 2,14\,eV$$

- El potencial de frenado tiene que detener los electrones, por lo tanto:

$$e\ V_{0(pot.\,frenado)} = E_{c\,max\,e^-} \quad \Rightarrow \quad V_0 = \frac{E_c}{e} = \frac{3,2.10^{-19}\ J}{1,6.10^{-19}\ C} = 2V$$

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

3. Sobre una superficie de potasio incide luz de 50 nm emitiéndose fotoelectrones. Sabiendo que la longitud de onda umbral para el potasio es de 750 nm, calcular:
a) trabajo de extracción de los electrones en el potasio.
b) energía cinética máxima de los electrones emitidos al iluminar con luz de 50 nm.

- Energía de la radiación (luz) de 50 nm:

$$E_{Rad} = h.f_{Rad} = h.\frac{c}{\lambda_{Rad}} = 6,625.10^{-34}\ J.s.\frac{3.10^{8}\ m.s^{-1}}{50.10^{-9}\ m} = 3,98.10^{-18}\ J \quad \Rightarrow \quad 24,87eV$$

- El trabajo de extracción de los electrones se calcula a partir de la frecuencia umbral:

$$W_{Extrac} = h.f_0 = h.\frac{c}{\lambda_0} = 6,625.10^{-34}\ J.s.\frac{3.10^{8}\ m.s^{-1}}{750.10^{-9}\ m} = 2,65.10^{-19}\ J \quad \Rightarrow 1,66\,eV$$

- Por diferencia entre ambas energías, calculamos la energía máxima de los electrones emitidos al iluminar el potasio con luz de 50 nm:

$$E_{c\,máx\,e} = E_{Rad} - W_{ext} = 3,98.10^{-18} - 2,65.10^{-19} = 3,72.10^{-18}\ J \quad \Rightarrow \quad 23,21eV$$

4. Dar en MeV la energía necesaria para que un fotón pueda materializarse en un electrón y un positrón.

- Se supone que el fotón está en reposo, sino tendríamos que tener en cuente su energía cinética:

$$E_{fotón} = E_{e^-} + E_{e^+} = m_0.c^2 + m_0.c^2 = 2m_0.c^2 \Rightarrow$$

$$2.9{,}1.10^{-31}\,kg.(3.10^8\,m.s^{-1})^2 = 1{,}64.10^{-13}\,J = 1{,}02\,MeV$$

5. ¿Qué longitud de onda deba tener una radiación electromagnética si uno de los fotones del haz presenta la misma cantidad de movimiento que un electrón que se mueve con v = 2.10^5 m/s?. b) si el electrón está parado, ¿tiene sentido esto último?. Datos: m_e = $9{,}1.10^{-31}$ kg.

- A partir de la dualidad Onda-Partícula de Louis De Broglie toda partícula en movimiento lleva asociada una onda cuya longitud de onda:

$$\lambda_{fotón} = \frac{h}{p_{e^-}} = \frac{h}{m_{e^-}.v_{e^-}} = \frac{6{,}625.10^{-34}\,J.s}{9{,}1.10^{-31}\,kg.2.10^5\,m.s^{-1}} = 3{,}64.10^{-9}\,m$$

- Si el electrón está parado no existe esa dualidad partícula – onda.

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

6. Un metal, para el que la longitud de onda umbral de efecto fotoeléctrico es λ_o = 275 nm, se ilumina con luz de λ = 180 nm. a) Explique el proceso en términos energéticos; b) calcule la longitud de onda, la frecuencia y energía cinética de los fotoelectrones emitidos.

- Hacemos un balance de energía a partir de la teoría.de Albert Einstein:

$$E_{fot} = h.f_{fot} = h.\frac{c}{\lambda_{Rfot}} = 6{,}625.10^{-34}\,J.s.\frac{3.10^8\,m.s^{-1}}{180.10^{-9}\,m} = 1{,}1.10^{-18}\,J \Rightarrow 6{,}88\,eV$$

$$W_{Ext} = h.f_0 = h.\frac{c}{\lambda_0} = 6{,}625.10^{-34}\,J.s.\frac{3.10^8\,m.s^{-1}}{275.10^{-9}\,m} = 0{,}72.10^{-18}\,J \Rightarrow 4{,}5\,eV$$

$$E_{c\,máx\,e^-} = E_{fot} - W_{ext} = 1{,}1.10^{-18} - 0{,}72.10^{-18} = 0{,}38.10^{-18}\,J = \frac{1}{2}.m_{e^-}.v_{e^-}^2 \Rightarrow v_{máx\,e^-} = 9{,}14.10^5\,m.s^{-1}$$

- Las ondas asociadas a los fotoelectrones son **Ondas de materia** cuya longitud de onda λ y frecuencia f vienen dadas por las ecuaciones

$$\lambda_{foto\,e^-} = \frac{h}{m_{e^-}.v_{e^-}} = \frac{6{,}625.10^{-34}\,J.s}{9{,}1.10^{-31}\,kg.9{,}14.10^5\,m.s^{-1}} = 7{,}96.10^{-10}\,m$$

$$f_{foto\,e^-} = \frac{E}{h} = \frac{3{,}84.10^{-19}\,J}{6{,}625.10^{-34}\,J.s} = 5{,}8.10^{14}\,s^{-1}\,(Hz)$$

7. Se irradia Cu con luz visible (400 nm – 700 nm). Sabiendo que la función de trabajo en el Cu es 4,4 eV, determinar: a) ¿habrá emisión de fotoelectrones?; b) la energía cinética de los mismos si se irradia con una longitud de onda de 200 nm.

- A partir del trabajo de extracción calculamos la longitud de onda umbral:

$$W_{Ext} = h.\frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow 4,4\,eV.1,6.10^{-19}\,C.e^{-1} = 6,625.10^{-34}\,J.s.\frac{3.10^8\,m.s^{-1}}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_0 = 2,82.10^{-7}\,m = 282\,nm$$

- Si irradiamos Cu con luz visible, la longitud de onda será mayor de 282 nm y **no habrá emisión de electrones.**

Cuando llegan fotones de λ = 220 nm, que es menor que λ_o=282 nm, si habrá efecto fotoeléctrico y a partir de la energía de esa radiación podremos calcular la energía cinética de los fotoelectrones arrancados:

$$E_{rad} = h.\frac{c}{\lambda_{Rad}} = 6,625.10^{-34}\,J.s.\frac{3.10^8\,m.s^{-1}}{200.10^{-9}\,m} = 9,94.10^{-19}\,J = 6,2\,eV$$

$$E_{c\,e^-} = E_{rad} - W_{Ext} = 6,2\,eV - 4,4\,eV = 1,8\,eV$$

8. Una superficie de Ni se irradia con luz ultravioleta de longitud de onda 200 nm. La función de trabajo del Ni es 5,01 eV. Calcular: a) la ddp que debe aplicarse para detener totalmente los electrones emitidos; b) la energía de los mismos si la ddp se reduce a un cuarto del valor anterior.

- Energía de la radiación ultravioleta de longitud de onda 200 nm:

$$E_{fot.UV} = h.\frac{c}{\lambda_{fot.UV}} = 6,625.10^{-34}\,J.s.\frac{3.10^8\,m.s^{-1}}{200.10^{-9}\,m} = 9,94.10^{-19}\,J = 6,21\,eV$$

- La energía cinética de los electrones emitidos:

$$E_{c\,e^-} = E_{fot.UV} - W_{ext.Ni} = 6,21\,eV - 5,01\,eV = 1,20\,eV$$

- El trabajo (eV_o) que se realiza al aplicar la ddp, para detener los electrones, tiene que anular su energía cinética:

$$E_{c\,e^-\,emitidos} = e.V_0 = 1,2\,eV \Rightarrow V_0 = 1,2\,V$$ Es el potencial de detención

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

9. La llama amarilla de una lámpara de sodio emite fotones de 550 nm. Calcular: a) la energía de los mismos; b) ¿se emitirán electrones de un metal cuya función de trabajo es de 1,9 eV al iluminarlo con luz de sodio?.

- La energía de los fotones amarillos de la lámpara de sodio es:

$$E_{fot.amarillo} = h.f_{fot.a} = h.\frac{c}{\lambda_{fot.a}} = 6,625.10^{-34}\ J.s.\frac{3.10^{8}\ m.s^{-1}}{550.10^{-9}\ m} = 3,6.10^{-19}\ J = 2,25\,eV$$

- Como la energía de los fotones amarillos de la lámpara de sodio es mayor que el trabajo de extracción, si se emiten electrones, es decir, si habrá efecto fotoeléctrico.
  - Fin del ejercicio

- Al conocer la longitud de onda, se puede calcular la frecuencia de esos fotones:

$$f_{foton\ amarillo} = \frac{c}{\lambda_{fot.a}} = \frac{3.10^{8}\ m.s^{-1}}{550.10^{-9}\ m} = 5,45.10^{14}\ Hz$$

- A partir del trabajo de extracción, se sabe la frecuencia umbral:

$$W_{ext\,Metal} = 1,9\,eV.1,6.10^{-19}\ C.e^{-1} = 3,04.10^{-19}\ J = h.f_0 \quad \Rightarrow \quad f_0 = 4,59.10^{14}\ Hz$$

- Cómo la frecuencia del fotón amarillo (5,45.1014 Hz) que emite la lámpara de sodio es mayor que la frecuencia umbral (4,59.1014 Hz) de ese metal, si se emiten electrones.

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

10. Determinar la longitud de onda, la frecuencia y la cantidad de movimiento de un fotón de 200 MeV de energía, e indicar en que zona del espectro se halla.

- Pasamos energía del fotón de MeV a Julios, para poder calcular su frecuencia y su longitud de onda:

$$E_{fotón} = 200\,MeV = 200.10^{6}\ eV.1,6.10^{-19}\,C.e^{-1} = 3,2.10^{-11}\ J$$

$$f_{fotón} = \frac{E}{h} = \frac{3,2.10^{-11}\ J}{6,625.10^{-34}\ J.s} = 4,83.10^{22}\ s^{-1}$$

$$\lambda_{fotón} = \frac{c}{f} = \frac{3.10^{8}\ m.s^{-1}}{4,83.10^{22}\ s^{-1}} = 6,21.10^{-15}\,m$$

- Por su frecuencia o longitud de onda ese fotón se encuentre en el **límite de los Rayos Cósmicos.**

- A partir de la relación de De Broglie, se calcula su cantidad de movimiento:

$$\lambda_{fotón} = \frac{h}{p} \Rightarrow p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,625.10^{-34}\ J.s}{6,21.10^{-15}\,m} = 1,067.10^{-19}\,kg.m.s^{-1}$$

11. Una superficie metálica emite electrones de 3 eV de energía cinética al incidir sobre ella una radiación ultravioleta de 150 nm de longitud de onda. Determinar: a) el trabajo de extracción del metal; b) ¿se producirá efecto fotoeléctrico si hacemos incidir una radiación de 250 nm?.

- Energía de la radiación Ultravioleta de 150 nm:

$$E_{Rad.UV} = 6,625.10^{-34}\,J.s\,\frac{3.10^{8}\,m.s^{-1}}{150.10^{-9}\,m} = 13,25.10^{-19}\,J = 8,28\,eV$$

- El trabajo de extracción se calcula por diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía de los electrones arrancados:

$$W_{Extrac} = E_{rad.UV} - E_{c\,e^-} = 8,28\,eV - 3\,eV = 5,28\,eV$$

- A partir del trabajo de extracción se calcula la longitud de onda umbral:

$$W_{extrac} = 5,28\,eV.1,6.10^{-19}\,C.e^{-1} = 625.10^{-34}\,J.s\,\frac{3.10^{8}\,m.s^{-1}}{\lambda_o} \Rightarrow \lambda_o = 235\,nm$$

- Si incide una radiación de mayor longitud de onda, 250 nm, que la umbral 235 nm, no hay efecto fotoeléctrico.

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

12. Para extraer un electrón de un átomo de un metal es necesaria una energía de 3,5 eV, la que se suministra mediante una radiación electromagnética que lo ilumina. a) ¿Cuál será la frecuencia por debajo de la cual es imposible la extracción?; b) ¿a qué dominio del espectro pertenecerá?.

- A partir del trabajo de extracción calculamos la frecuencia umbral:

$$W_{Extrac} = 3,5\,eV.1,6.10^{-19}\,C.e^{-1} = 5,6.10^{-19}\,J = h.f_0$$

$$f_0 = \frac{W_{extrac}}{h} = \frac{5,6.10^{-19}\,J}{6,625.10^{-34}\,J.s} = 8,45.10^{14}\,Hz$$

- La longitud de onda umbral, que no necesitamos, vale:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_o} = \frac{3.10^{8}\,m.s^{-1}}{8,45.10^{14}\,Hz} = 3,55.10^{-7}\,m = 355\,nm$$

- **Por debajo de la frecuencia umbral $f_o = 8,45.10^{14}$ Hz no se extrae el electrón, es decir, no hay efecto fotoeléctrico.**
- Esa radiación pertenece al dominio del ultravioleta.

13. ¿Cuál será la longitud de onda y la frecuencia de la primera raya de la serie de Balmer ($n_1 = 2$, $n_2 = 3$) en el espectro del átomo de hidrógeno?.
Dato: Constante de Rydberg = $1{,}09.10^7\ m^{-1}$.

- A partir de la ecuación de los espectros atómicos, se calcula la longitud de onda de la primera raya del espectro:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}09.10^7\,m^{-1}\left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right] \Rightarrow \lambda = 6{,}58.10^{-7}\,m = 658\,nm$$

- La frecuencia correspondiente es: $f_0 = \dfrac{c}{\lambda_o} = \dfrac{3.10^8\,m.s^{-1}}{6{,}58.10^{-7}\,Hz} = 4{,}56.10^{14}\,Hz$
- La energía correspondiente a esta emisión:

$$E = h.f_0 = 6{,}625.10^{-34}\,J.s.4{,}56.10^{14}\,Hz = 3{,}021.10^{-19}\,J = 1{,}89\,eV$$

14. Un electrón salta desde un nivel de energía más externo a otro más interno entre los que existe una diferencia de energía de $1{,}5.10^{-15}$ J. ¿Absorbe o emite esa energía?. ¿Cuál es la frecuencia de la radiación?.

- En el salto, la diferencia de energía entre ambos niveles, se emite en forma de onda electromagnética, es decir un fotón, de frecuencia:

$$f_{radiación} = \frac{E_1 - E_2}{h} = \frac{1{,}5.10^{-15}\,J}{6{,}625.10^{-34}\,J.s} = 2{,}26.10^{18}\,Hz\,(s^{-1})$$

15. Calcular la longitud de onda de De Broglie asociada a las partículas:
a) Un neutrón que se mueve a la velocidad de 20 km/s.
b) Un electrón acelerado mediante una diferencia de potencial de 104 V.

- La longitud de onda asociada al neutrón vale:

$$\lambda_{neutrón} = \frac{h}{m.v} = \frac{6{,}625.10^{-34}\,J.s}{1{,}675.10^{-27}\,kg.2.10^4\,m.s^{-1}} = 1{,}98.10^{-11}\,m$$

- Cuando el electrón se acelera mediante una diferencia de potencial, el trabajo eléctrico que se hace sobre él se transforma en energía cinética:

$$W_{eléctrico} = q_e.V = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow mv = \sqrt{2mq_eV}$$

- La longitud de onda asociada al electrón vale:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mq_eV}} = \frac{6{,}625.10^{-34}\,J.s}{\sqrt{2.9{,}1.10^{-31}\,kg.1{,}6.10^{-19}\,C.10^4\,V}} = 1{,}23.10^{-11}\,m$$

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

16. Un electrón se mueve con una velocidad de 4.000 km/s. Si la incertidumbre en el conocimiento de la velocidad es del 3%.
¿cuál es la incertidumbre en la posición del electrón?.

- La incertidumbre en el conocimiento del momento lineal del electrón será:

$$\Delta p = m.\Delta v = 9,1.10^{-31}\,kg.0,03.4.10^{6}\,m.s^{-1} = 1,1.10^{-25}\,kg.m.s^{-1}$$

- Según el Principio de Heisenberg la incertidumbre en la posición del electrón valdrá:

$$\Delta x.\Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad \text{Principio de Heisenberg}$$

$$\Delta x \geq \frac{h}{2\pi.\Delta p} \geq \frac{6,63.10^{-34}\,J.s}{6,28.1,1.10^{-25}\,kg.m.s^{-1}} \geq 9,6.10^{-10}\,m$$

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

17. Calcular la longitud de onda, la frecuencia y la zona del espectro de ondas electromagnéticas de cada una de las primeras rayas de las series de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett y Pfund.

Serie	n_1	n_2	$\lambda.10^{-7}$ m	$f.10^{14}$ Hz	Zona
Lyman	1	2	1,22 (122 nm)	24,6	UV
Balmer	2	3	6,60 (660 nm)	4,5	Visible
Paschem	3	4	18,80 (1880 nm)	1,6	IR
Bracket	4	5	40,70 (4070 nm)	0,7	IR
Pfund	5	6	75,00 (7500 nm)	0,4	IR

- Las longitudes de onda de cada raya se calculan por la ecuación de los espectros atómicos.

6. Mecánica cuántica. Ejercicios

18. Un átomo de plomo se mueve con una energía cinética de 10^7 eV.
a) Determine el valor de la longitud de onda asociada a dicho átomo.
Datos. h = $6{,}62.10^{-34}$ J.s ; 1u = $1{,}66.10^{-27}$ kg ; m(Pb) = 207u .

- La energía cinética del átomo de plomo, nos permite calcular su velocidad:

$$Ec_{at.Pb} = 10^7 eV.1{,}6.10^{-19} C.e^{-1} = \frac{m.v^2}{2} = \frac{207u.1{,}66.10^{-27} kg.u^{-1}.v^2}{2} \Rightarrow v = 3{,}05.10^6 m.s^{-1}$$

- Ahora podemos calcular la longitud de onda asociada a dicho átomo de plomo:

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6{,}625.10^{-34} J.s}{207u.1{,}66.10^{-27} kg.u^{-1}.3{,}05.10^6 ms^{-1}} = 6{,}3.10^{-16} \ muy \ \ pequeña$$

19. ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie para un electrón de energía cinética 100 eV.
Datos. h = $6{,}62.10^{-34}$ J.s ; m_e = $9{,}1.10^{-31}$ kg ; q_e = $1{,}6.10^{-19}$ C.

- La energía cinética del electrón, nos permite calcular la velocidad con que se mueve:

$$E_c = 100eV.1{,}6.10^{-19} C.e^{-1} = \frac{9{,}1.10^{-31} kg.v^2}{2} \Rightarrow v = 5{,}93.10^6 m.s^{-1}$$

- Ahora podemos calcular la longitud de onda asociada al electrón:

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6{,}625.10^{-34} J.s}{9{,}1.10^{-31} kg.5{,}93.10^6 ms^{-1}} = 1{,}23.10^{-10} m$$

7. Cuestiones de mecánica cuántica

1. Comentar las siguientes afirmaciones: a) La teoría de Planck de la radiación emitida por un cuerpo negro afirma que la energía se absorbe o emite en cuantos de valor E = hυ . b) De Broglie postuló que, al igual que los fotones presentan un comportamiento dual de onda y partícula, una partícula presenta también dicho comportamiento dual.

2. Comentar las siguientes afirmaciones: a) El número de fotoelectrones emitidos por un metal es proporcional a la intensidad del haz luminoso incidente. b) La energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos por un metal aumenta con la frecuencia del haz de luz incidente.

3. a) Enunciar la hipótesis de De Broglie. ¿Depende la longitud de onda asociada a una partícula que se mueve con una cierta velocidad, de su masa?. b) Comentar el significado físico y las implicaciones de la dualidad onda-corpúsculo.

4. a) Indicar por qué la existencia de una frecuencia umbral para el efecto fotoeléctrico va en contra de la teoría ondulatoria de la luz. b) Si una superficie metálica emite fotoelectrones cuando se ilumina con luz verde, razonar si los emitirá cuando sea iluminada con luz azul.

5. a) Explicar brevemente en qué consiste el efecto fotoeléctrico. b) ¿Tienen la misma energía cinética todos los fotoelectrones emitidos?

6. a) Explicar la hipótesis de De Broglie de dualidad onda-corpúsculo. b) Explicar por qué no suele utilizarse habitualmente la idea de dualidad al tratar con objetos macroscópicos.

7. a) ¿Qué entiendes por dualidad onda corpúsculo?. b) Un protón y un electrón tienen la misma velocidad, ¿serán iguales las longitudes de onda de De Broglie de ambas partículas?.

9. Un protón se acelera desde el reposo mediante una diferencia de potencial de 50 kV. a) Hacer un análisis energético del problema y calcular la longitud de onda de De Broglie asociada a la partícula. b) ¿Qué diferencia cabría esperar si en lugar de un protón la partícula acelerada fuera un electrón? Datos: h = $6{,}63.10^{-34}$ J.s , e = $1{,}6.10^{-19}$ C ; me = $9{,}1.10^{-31}$ kg ; mp = $1{,}7.10^{-27}$ kg.

10. El cátodo de una célula fotoeléctrica se ilumina simultáneamente con dos radiaciones monocromáticas: l_1 = 228 nm y l_2 = 524 nm. El trabajo de extracción de un electrón de este cátodo es 3,40 eV. a) ¿Cuál de las dos radiaciones produce efecto fotoeléctrico? Razonar la respuesta. b) Calcular la velocidad máxima de los electrones emitidos. ¿Cómo variaría dicha velocidad al duplicar la intensidad de la radiación luminosa incidente?. Datos: : h; e ; m_e ; c .

11. Sea una célula fotoeléctrica con fotocátodo de potasio, de trabajo de extracción 2,22 eV. Mediante un análisis energético del problema, contestar razonadamente a las siguientes preguntas: a) ¿Se podría utilizar esta célula fotoeléctrica para funcionar con luz visible? (El espectro visible está comprendido entre 380.10^{-9} m y 780.10^{-9} m). b) En caso afirmativo, ¿cuánto vale la longitud de onda asociada a los electrones extraidos con luz visible?
Datos: : h = $6{,}63.10^{-34}$ J.s , e = $1{,}6.10^{-19}$ C ; me = $9{,}1.10^{-31}$ kg ; c = 3.10^{8} m.s^{-1} .

12. Un material fotográfico suele contener bromuro de plata, que se impresiona con fotones de energía > $1{,}7.10^{-19}$ J. a) Cuál es la frecuencia y la longitud de onda del fotón que es justamente capaz de activar una molécula de bromuro de plata? b) La luz visible tiene una longitud de onda comprendida entre 380.10^{-9} m y 780.10^{-9} m. Explicar el hecho de que una luciérnaga, que emite luz visible de intensidad despreciable, pueda impresionar una película fotográfica, mientras que no puede hacerlo la radiación procedente de una antena de televisión que emite a 100 MHz, a pesar de que su potencia es de 50 kw. Datos: : h = $6{,}63.10^{-34}$ J.s , c = 3.10^{8} m.s-1 .

13. Un haz de luz de longitud de onda 546.10^{-9} m penetra en una célula fotoeléctrica de cátodo de cesio, cuyo trabajo de extracción es 2 eV. a) Explicar las transformaciones energéticas en el proceso de fotoemisión y calcular la energía cinética máxima de los electrones emitidos. b) ¿qué ocurriría si la longitud de onda incidente en la célula fotoeléctrica fuera doble de la anterior?. Datos: h ; e ; c .

14. Un átomo de plomo se mueve con una energía cinética de10^{7} eV. a) Determinar el valor de la longitud de onda asociada a dicho átomo. b) Comparar dicha longitud de onda con las que corresponderían, respectivamente, a una partícula de igual masa y diferente energía cinética y a una partícula de igual energía cinética y masa diferente. Datos: h = $6{,}63.10^{-34}$ J.s ; 1u = $1{,}66.10^{-27}$ kg ; m_{Pb} = 207 u .

15. Al absorber un fotón se produce en un átomo una transición electrónica entre dos niveles separados por un energía de 12.10^{-19} J. a) Explicar, energéticamente, el proceso de absorción del fotón por el átomo. ¿Volverá espontáneamente el átomo a su estado inicial?. b) Si el mismo fotón incidiera en la superficie de un metal cuyo trabajo de extracción es de 3 eV, ¿se producirá emisión fotoeléctrica? Datos: : h = $6{,}63.10^{-34}$ J.s , e = $1{,}6.10^{-19}$ C ; me = $9{,}1.10^{-31}$ kg .