

## 11. INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA RELATIVISTA Y A LA FÍSICA CUÁNTICA.

Desarrollamos la unidad de acuerdo con el siguiente hilo conductor:

1. ¿Qué limitaciones presenta la física clásica en el ámbito de las velocidades próximas a la de la luz? La mecánica relativista.

1.1. La teoría especial o restringida de la relatividad. Postulados y consecuencias.

2. ¿Qué limitaciones presenta la física clásica en el ámbito del micromundo? La mecánica cuántica.

2.1. El efecto fotoeléctrico y la explicación de Einstein.

2.2. El concepto de fotón. La dualidad onda-corpúsculo. La hipótesis de De Broglie.

2.3. El principio de indeterminación de Heisenberg.

2.4. La función de ondas de Schrödinger y su interpretación probabilística.

APÉNDICE: Aplicaciones de la Física Moderna.

### 1. ¿QUÉ LIMITACIONES PRESENTA LA FÍSICA CLÁSICA EN EL ÁMBITO DE LAS VELOCIDADES PRÓXIMAS A LA DE LA LUZ? LA MECÁNICA RELATIVISTA.

La mecánica clásica permite interpretar la mayor parte de los movimientos que realiza un cuerpo, tanto si actúa una fuerza sobre él como si no; incluso puede prever los efectos que tendrán las fuerzas en el movimiento del cuerpo.

Definimos el movimiento de un cuerpo como el cambio de su posición con el paso del tiempo, respecto a un sistema que se toma como referencia. Tanto el movimiento como el reposo, al depender del sistema de referencia, son conceptos relativos; así, una casa está en reposo en relación a la Tierra y en movimiento en relación al Sol.

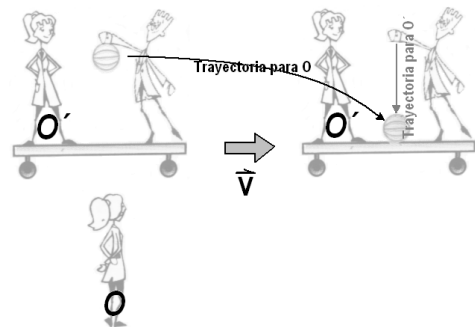
Para describir el movimiento la mecánica clásica considera el espacio y el tiempo como magnitudes absolutas e independientes de cualquier otro factor.

La mecánica clásica afirma que las leyes físicas que describen el movimiento de un cuerpo son las mismas para observadores inerciales, esto es, observadores distintos que se desplazan unos respecto a otros con velocidad constante (**principio de relatividad de Galileo**) (figura 1). Esto lleva a que es imposible conocer si un sistema de referencia está en reposo absoluto o se mueve con movimiento rectilíneo uniforme.

Sin embargo, el principio de relatividad de Galileo no se cumple en las experiencias en las que interviene la luz. Según la teoría electromagnética de Maxwell, la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , es de 300.000 km/s, la máxima velocidad a la que se pueden propagar las radiaciones electromagnéticas.

Pero la transformación galileana de la velocidad, respaldada por numerosas experiencias cotidianas, nos lleva a que si un observador imaginario viajase en la misma dirección y sentido opuesto al de la luz, la velocidad de la luz le parecería mayor, es decir, se podría superar el límite de velocidad establecido por la teoría electromagnética. La experimentación da la razón a la teoría de Maxwell:

- Por un lado, aprovechando que la Tierra se desplaza a una gran velocidad en su movimiento orbital (unos 30 km/s), Albert Michelson y Edward Morley, en 1887, compararon la velocidad de un haz de luz monocromática en dirección del movimiento orbital terrestre con la de otro haz perpendicular a él, esperando encontrar alguna diferencia entre los valores de las velocidades (figura 2). De existir esta ligera diferencia de velocidad, los haces de luz llegarían al anteojo con un ligero desfase de tiempo y darían lugar a un patrón de interferencia. Tras numerosas repeticiones del



Los observadores inerciales  $O$  y  $O'$  perciben trayectorias distintas pero la ley física que rige el movimiento del balón es la misma.

Las coordenadas entre uno y otro sistema de referencia pueden transformarse con facilidad:  $x' = x - vt$ ;  $y' = y$ , suponiendo que  $t' = t$ . La distancia entre dos puntos es invariable para dos sistemas inerciales.

La velocidad varía al pasar de un sistema inercial a otro. Para el observador  $O$ :  $v_x = v$ ;  $v_y = -gt$ . Para el observador  $O'$ :  $v'_x = 0$ ;  $v'_y = -gt$ , suponiendo que  $t' = t$ .

La aceleración (y por tanto la fuerza causante del movimiento) es la misma en los sistemas inerciales. Para el observador  $O$ :  $a_x = 0$ ;  $a_y = -g$ . Para el observador  $O'$ :  $a'_x = 0$ ;  $a'_y = -g$ .

Figura 1

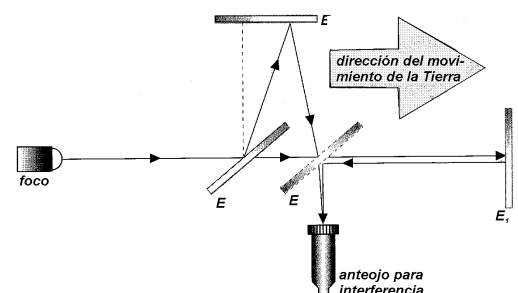


Figura 2

experimento, los resultados fueron negativos. En consecuencia, la luz viaja siempre con la misma velocidad con respecto al observador, sea cual sea la rapidez y dirección en que éste se mueva.

- Por otro lado, al acelerar electrones en tubos de vacío, estas partículas alcanzan velocidades muy elevadas debido a su pequeña masa. De acuerdo con el principio de conservación de la energía mecánica, en ausencia de fuerzas disipativas, debe cumplirse que:  $\Delta E_c = -\Delta E_p = -q \cdot \Delta V$ ; suponiendo que los electrones parten del reposo y dada su

carga negativa ( $-e$ ):  $\frac{m_e \cdot v^2}{2} = e \cdot \Delta V$ , con lo que:  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e}{m_e} \cdot \Delta V} = cte \cdot \sqrt{\Delta V}$ , de

donde se espera una dependencia lineal entre  $v$  y  $\sqrt{\Delta V}$  (figura 3), dependencia lineal que no se observa. La curva experimental indica que la velocidad se estabiliza, llegando a alcanzar un valor muy próximo al de la luz, pero sin llegar a él en ningún caso.

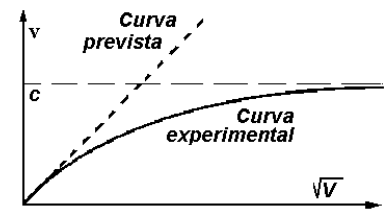


Figura 3

Ante el conflicto planteado por los resultados experimentales, no cabe otra postura científica que la de revisar la validez de las leyes de la mecánica clásica en el ámbito de las velocidades próximas a las de la luz. Éste fue el camino seguido en 1905 por Albert Einstein cuando presentó la teoría especial o restringida de la relatividad.

### 1.1. LA TEORÍA ESPECIAL O RESTRINGIDA DE LA RELATIVIDAD. POSTULADOS Y CONSECUENCIAS.

Un problema fundamental en Física a finales del siglo XIX era que las leyes del electromagnetismo variaban al cambiar de sistema de referencia, violándose el principio de relatividad de Galileo, que era la base de la mecánica de Newton. Así, observadores en movimiento relativo obtendrían diferentes resultados al estudiar los fenómenos electromagnéticos.

Para conciliar las leyes del electromagnetismo y las leyes de la mecánica newtoniana, Albert Einstein enuncia en 1905 su Teoría Especial (o Restringida) de la Relatividad, que se basa en los dos postulados siguientes:

**1° Principio de relatividad:** Todas las leyes de la Física deben ser las mismas en los sistemas de referencia inerciales, es decir, para observadores diferentes que se mueven con velocidad constante unos respecto de otros.

*Este postulado implica que ninguna experiencia física puede distinguir un cuerpo en reposo de un cuerpo en movimiento rectilíneo uniforme. Pero además, dado que las leyes que describen los fenómenos físicos (mecánicos o electromagnéticos) no cambian al pasar de un observador inercial a otro, lleva a la necesidad de un segundo postulado probado experimentalmente.*

**2° Principio de constancia de la velocidad de la luz:** La velocidad de la luz (y de cualquier otra onda electromagnética) presenta un valor absoluto en cualquier sistema inercial, independientemente del movimiento relativo entre la fuente emisora de radiación y el observador.

*La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s, y constituye una velocidad máxima que no se puede superar.*

La aplicación conjunta de estos postulados conduce a algunas conclusiones (aparentemente absurdas, aunque en perfecta armonía con los datos experimentales de los que disponemos) que nos obligan a cambiar las concepciones clásicas de espacio, tiempo, masa y energía:

- El espacio y el tiempo no son magnitudes independientes, absolutas y universales, sino medidas relativas y ligadas entre sí que varían según la velocidad del observador respecto al fenómeno observado (figura 4).

Cada observador mide sus propios espacios y tiempos, de forma que:

- El espacio medido por un observador en movimiento respecto al fenómeno observado es menor que el medido por un observador en reposo (contracción del espacio).
- El tiempo medido por un observador en movimiento respecto al fenómeno observado es mayor que el medido por un observador en reposo (dilatación del tiempo). Esto implica que dos sucesos simultáneos para un observador pueden no serlo para otro (figura 5).

- La masa medida por un observador en movimiento respecto al fenómeno observado es mayor que la medida por un observador en reposo<sup>1</sup>. Este hecho explica que nada material pueda alcanzar la velocidad de la luz; solamente entes sin masa, como los fotones, pueden moverse a esa velocidad límite.

El trabajo con electrones en los aceleradores de partículas confirma que los electrones con velocidades próximas a la de la luz tienen una masa mayor que los electrones más lentos. Este hecho, inexplicable para la mecánica clásica, está totalmente de acuerdo con la física relativista.

<sup>1</sup> No ocurre esto con la carga eléctrica, que se muestra como una invariante relativista.

Imagina un “reloj de luz”, constituido por un cilindro transparente en cuya base inferior hay un emisor de luz y en cuya base superior colocamos un detector.

a) Dos observadores en reposo respecto al reloj de luz, medirían que un destello luminoso ha recorrido la distancia  $H$  a la velocidad de la luz  $c$  en un tiempo  $t_0$ , al que llamamos tiempo propio ( $t_0 = H/c$ ).

b) Sin embargo, si un observador permanece en reposo respecto al reloj de luz ( $O_1$ ) y otro observador inercial se mueve respecto a él ( $O_2$ ) (por ejemplo, porque se mueva el reloj de luz, junto con  $O_1$ , con una velocidad constante  $v$ ), el observador  $O_1$  seguirá midiendo el tiempo propio  $t_0$ , pero el observador  $O_2$  medirá que el mismo destello recorre la distancia  $AB$  (mayor que  $H$ ) a la velocidad de la luz  $c$  en un tiempo distinto  $t$  ( $t = AB/c$ ), tiempo en el que el emisor de luz y el observador  $O_1$  han recorrido la distancia de la varilla  $l_0$  (medida según el observador  $O_2$ , en reposo respecto a la varilla, por lo que se llama longitud propia:  $l_0 = v \cdot t$ ).

¿Cómo determinar la relación que existe entre  $t$  y  $t_0$ ? Aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo rectángulo  $AA'B'$ :  $(AB)^2 = l_0^2 + H^2$ ; o sea:  $(c \cdot t)^2 = (v \cdot t)^2 + (c \cdot t_0)^2$ ; de donde resulta que:  $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . El observador  $O_2$ , en movimiento respecto al suceso, medirá un tiempo mayor que  $O_1$ , en reposo respecto al suceso (dilatación del tiempo; su reloj parece andar más rápido).

¿Qué distancia  $l$  mide de la varilla el observador  $O_2$ , en movimiento respecto a ella? El observador  $O_1$  medirá  $l = v \cdot t_0$ . Como  $O_2$ , en reposo respecto a la varilla, mide  $l_0 = v \cdot t$ , resulta que:  $\frac{l}{l_0} = \frac{t_0}{t}$ ; o sea:  $l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . El observador  $O_2$ , en movimiento respecto al suceso, medirá una longitud menor que  $O_1$ , en reposo respecto al suceso (contracción de la longitud o del espacio).

Figura 4

**LA IDEA DE SIMULTANEIDAD PIERDE SU SENTIDO, PUES DOS SUCESOS PUEDEN SER SIMULTÁNEOS PARA UN OBSERVADOR Y NO SERLO PARA OTRO.**

Dos observadores ( $O_1$  y  $O_2$ ) se mueven entre sí con velocidad  $v$  (p.ej. dos vagones,  $AB$  y  $A'B'$ , en vías paralelas).

$O_1$  dice que  $O_2$  se mueve con velocidad  $v$  mientras que  $O_2$  dice que  $O_1$  se mueve con velocidad  $-v$ . Ambos puntos de vista son correctos según el principio de relatividad y las descripciones que ambos observadores realicen de los fenómenos físicos serán equivalentes.

Supongamos ahora dos sucesos: la llegada de dos rayos a los extremos de los vagones.

Si  $O_1$  y  $O_2$  están en el punto medio de cada vagón, ¿serán simultáneos estos sucesos para los dos observadores? Está claro que si son simultáneos para uno de los observadores no lo pueden ser para el otro.

**LA PARADOJA DE LOS GEMELOS**

Dos gemelos, uno de los cuales es un astronauta que hace un viaje de ida y vuelta por la galaxia a velocidades próximas a las de la luz. A la vuelta del viaje, el gemelo viajero es más joven que el que se quedó en casa. Qué tanto más joven depende de las velocidades relativas que intervienen: si el que viaja mantiene una rapidez igual a  $0,50 \cdot c$  durante un año (según el reloj de a bordo), en la Tierra pasarán 1,15 años; si la rapidez es  $0,87 \cdot c$ , habrán pasado 2 años en la Tierra.

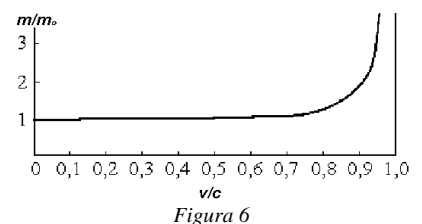
Se podría demostrar que, independientemente del marco de referencia que escojamos, el gemelo que queda en Tierra envejece más.

Figura 5

Einstein, para explicar este fenómeno y preservar la validez de las leyes fundamentales de la mecánica clásica (ecuación fundamental de la dinámica, principios de conservación de la energía o de la cantidad de movimiento), dedujo que la masa de la partícula debía expresarse en la forma:  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , donde  $m_0$  es la

masa propia, la que mediría un observador con respecto al cual la partícula está en reposo. De ese modo, la expresión relativista de la cantidad de movimiento sigue siendo:  $\vec{p} = m \vec{v}$ , aunque ahora  $m$  es la masa relativista, que varía con la velocidad (figura 6).

Observa que cuando la velocidad se aproxima a la de la luz, la masa se hace infinitamente grande, lo que implica que haría falta una fuerza infinita para acelerar un cuerpo hasta la velocidad de la luz, razón por la



que ningún cuerpo con masa puede alcanzar dicha velocidad.

- La masa y la energía son equivalentes, son manifestaciones de una misma cosa, lo que lleva a que el conjunto masa-energía de un sistema cerrado debe conservarse. Atendiendo al principio de equivalencia masa-energía,  $E \equiv m \cdot c^2$ , una pequeña variación de masa (un defecto o disminución, como ocurre en la fisión y fusión nuclear) implica una inmensa variación de energía (una liberación, siguiendo el ejemplo).

Einstein, tras un tratamiento matemático algo complejo, llegó a evaluar que la variación de energía cinética de una partícula se relaciona con su variación de masa relativista en la forma:  $\Delta E_c = \Delta m \cdot c^2$ . Si suponemos que la velocidad inicial de la partícula es cero con respecto a un sistema de referencia dado y que finalmente es  $v$ , podemos escribir:  $E_c = (m - m_0) \cdot c^2 = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2 = E - E_0$ , donde  $E_0$  representa la energía en reposo, un valor constante para cada partícula, y  $E$  representa la energía total relativista ( $E = E_0 + E_c$ ).

La famosa ecuación de Einstein ( $E = m \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ), la “ecuación del siglo XX”, sin temor a exage-

rar, ilustra el llamado **principio de equivalencia entre la masa y la energía**; indica que masa y energía son dos aspectos del mismo fenómeno y cuantifica en qué medida una variación de masa dará lugar a una variación de energía, y viceversa. Entre sus consecuencias, advertir que el elevado valor de la velocidad de la luz ocasiona que una pequeña variación de masa suponga una liberación de gran cantidad de energía (aproximadamente, 1 g de masa equivale a  $9 \cdot 10^{13}$  J).

En base al principio de equivalencia masa-energía, expresar la energía en reposo de una partícula en MeV (recuerda:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ) o su masa en  $\text{MeV}/c^2$  es equivalente y evita los inconvenientes de trabajar en kg. Por ejemplo, para un protón:  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \Rightarrow E_{0p} = m_p \cdot c^2 = 1,504 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 938,3 \text{ MeV} \Rightarrow m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$

Las conclusiones que se derivan de la Teoría Especial de la Relatividad son sorprendentes<sup>2</sup>, pero no afectan a nuestra vida cotidiana, pues su ámbito de aplicación es el mundo de las velocidades próximas a la de la luz (incluso a las elevadas velocidades de las naves en órbita, los efectos relativistas son mínimos).

A.1. Resuelve las siguientes actividades:

A.1.1. Piensa en dos gemelos de 30 años. Uno de ellos, astronauta, emprende un viaje espacial de ida y vuelta a Marte ( $d_{T-M} = 1,52 \text{ UA}$ ;  $1 \text{ UA} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ) con una rapidez media de 70 km/s, la mayor rapidez que alcanzan las naves actuales. ¿Qué diferencia de edad existe entre los gemelos al acabar el viaje? ¿Qué podemos concluir?

A.1.2. El período de semidesintegración de una partícula elemental es de  $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . ¿Cuál será el período medido si dicha partícula fuese acelerada hasta alcanzar velocidades de  $0,70 \cdot c$  con respecto al observador? ¿Cuánto se ha alargado su vida?

A.1.3. Un electrón se mueve a una velocidad de  $0,80 \cdot c$ . ¿Cuál será su masa para un observador con su misma velocidad (se mueve con el electrón)? ¿Y para un observador en reposo (el electrón se mueve respecto al observador)?

A.1.4. A partir de las masas en reposo del electrón y del neutrón (en kg), determina sus energías en reposo (en MeV).

A.1.5. Un electrón tiene una energía en reposo de 0,51 MeV. Si el electrón se mueve con una velocidad de  $0,8c$ , determina su masa relativista, su cantidad de movimiento y su energía total.

A.1.6. ¿Qué fue de la expresión clásica:  $E_c = mv^2/2$ ? La teoría especial de la relatividad debe dar lugar a la expresión clásica cuando la velocidad es pequeña: es lo que se denomina el principio de correlación. Comprueba que se cumple dicho principio representando en una misma gráfica cómo varía la energía cinética de un cuerpo con su velocidad en los casos clásico y relativista.

DATOS ÚTILES EN LA RESOLUCIÓN DE ACTIVIDADES	
Carga eléctrica elemental ( $e$ )	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Masa del electrón en reposo ( $m_e$ )	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Masa del protón o neutrón en reposo ( $m_p, m_n$ )	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Unidad de masa atómica ( $u$ )	$1/N_A = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Velocidad de la luz en el vacío ( $c$ )	$3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Constante de Planck ( $h$ )	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

## 2. ¿QUÉ LIMITACIONES PRESENTA LA FÍSICA CLÁSICA EN EL ÁMBITO DEL MICRO-MUNDO? LA MECÁNICA CUÁNTICA.

<sup>2</sup> Aquí hemos comentado sólo la teoría especial o restringida. La **teoría general de la relatividad**, publicada por Einstein en 1916, tras ocho años de intenso trabajo, incluye todos los sistemas de referencia, los inerciales y los no inerciales (acelerados). El punto de partida de la relatividad general es el principio de equivalencia; establece que un observador no tiene ninguna forma de distinguir si se encuentra en un campo gravitatorio uniforme o si se desplaza aceleradamente. Los cuerpos pesados deforman el espacio-tiempo cuatridimensional, curvando así las trayectorias de los objetos en sus proximidades. La primera consecuencia sorprendente es que la luz se curva en presencia de un campo gravitatorio, hecho comprobado en 1919 por Eddington durante un eclipse solar. Hoy día, tras casi un siglo de comprobaciones experimentales, la teoría de la relatividad de Einstein está claramente asentada.

Años antes de que Einstein publicara su teoría especial de la relatividad, se venía observando el fracaso de la física clásica para explicar fenómenos relacionados con la emisión y absorción de ondas electromagnéticas por la materia. Entre ellos cabe citar la radiación continua de cuerpos sólidos y líquidos calientes (la radiación térmica de los cuerpos incandescentes), la radiación discontinua de los gases (los espectros atómicos) y el efecto fotoeléctrico (la liberación de electrones por superficies iluminadas).

Max Planck, en 1900, descubrió que la radiación térmica de los cuerpos incandescentes era explicable sólo si la luz (energía radiante) podía ser emitida o absorbida en paquetes discretos, los **cuantos**, siendo la energía de cada cuanto proporcional a la frecuencia de la radiación:  $E = h \cdot \nu_0$ , en donde  $h$  es la constante de Planck, de valor  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s, que determina la cuantización de la energía.

En un principio, la noción del cuanto no fue bien acogida por la comunidad científica. Pero el joven Einstein, todavía un desconocido en los círculos científicos, publica en 1905 un revolucionario artículo donde demuestra que la hipótesis cuántica de Planck explica satisfactoriamente el efecto fotoeléctrico. Por su parte, Niels Bohr, en 1913, explica el porqué de los espectros atómicos discontinuos haciendo uso de las ideas de Planck en su modelo atómico de órbitas estacionarias. Es a partir de entonces cuando empieza a tomarse en consideración la naturaleza cuántica de las radiaciones electromagnéticas y, con ella, la naturaleza dual onda-corpúsculo de la luz.

Del trabajo desarrollado en los años veinte del pasado siglo por Louis de Broglie (1892-1987), Werner Karl Heisenberg (1901-1976), Erwin Schrödinger (1887-1961) y otros, nace la nueva mecánica del mundo atómico y subatómico: la mecánica cuántica.

## 2.1. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO Y LA EXPLICACIÓN DE EINSTEIN.

Una de las mayores ironías de la historia de la física fue el hecho de que el descubrimiento del efecto fotoeléctrico, que requería volver a considerar la naturaleza corpuscular de la luz, fuese una consecuencia del experimento que consagró la naturaleza ondulatoria electromagnética de la luz: el experimento de Hertz.

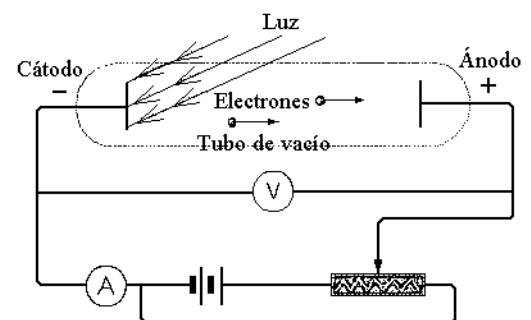
En 1887, Hertz observó que una chispa eléctrica saltaba con más facilidad entre dos electrodos unidos a un circuito si éstos estaban pulidos y eran iluminados con radiación de cierta frecuencia, fenómeno denominado hoy **efecto fotoeléctrico** (figura 7).

Todo metal se caracteriza por poseer electrones que pueden viajar libremente en su interior, pero que no pueden escapar a menos que se les suministre la energía necesaria para vencer la fuerza de atracción electrostática que los liga al átomo, energía denominada trabajo de extracción o función de trabajo ( $W$ ), característica de cada metal. En el efecto fotoeléctrico dicha energía es suministrada por la luz incidente sobre el metal.

De acuerdo con la física clásica, la energía que transporta una onda es proporcional al cuadrado de la amplitud y de la frecuencia y ambas magnitudes pueden variarse de forma continua (ver unidad 2, apartado 3.3). Así, cabe esperar que al fijar la frecuencia y aumentar la amplitud de la onda, la radiación alcance la intensidad suficiente para producir efecto fotoeléctrico. Sin embargo, los resultados experimentales contradicen esta predicción, pues:

- El efecto fotoeléctrico sólo tiene lugar si se ilumina el metal con una luz cuya frecuencia sea superior a una cierta frecuencia umbral  $\nu_0$ , característica de cada metal, sea cual sea la intensidad luminosa.
- Si la frecuencia se mantiene constante por encima de  $\nu_0$ , la corriente producida aumenta con la intensidad luminosa, pero la energía cinética máxima ( $E_c$ ) de los electrones arrancados del metal que constituyen la corriente, se mantiene constante. A partir de  $\nu_0$ , la  $E_c$  aumenta linealmente con la frecuencia  $\nu$  de la radiación (figura 8).
- La emisión de los electrones es prácticamente instantánea, incluso para intensidades muy bajas (la física clásica esperaba un tiempo mayor para absorber la radiación antes de alcanzar la energía cinética necesaria para la emisión).

En 1905 Einstein logró una explicación coherente del efecto fotoeléctrico aplicando la hipótesis cuántica de Planck a la luz. Según él, la energía de la luz y, en general, de las ondas electromagnéticas, no se reparte de un



El tubo de vacío contiene dos electrodos conectados a un circuito exterior. Cuando se ilumina el cátodo, algunos electrones captan la energía suficiente (trabajo de extracción) para escapar y llegar al ánodo, lo que da lugar a una corriente, que mide el amperímetro A.

La energía cinética máxima ( $E_{c \max}$ ) con la que salen los electrones de la placa metálica del cátodo para llegar al ánodo, puede determinarse invirtiendo el potencial entre las placas, para que se frenen los electrones. Si llamamos  $V_0$  al potencial o tensión de frenado (o de corte), o sea, aquel para el cual ya no llegan electrones al ánodo (o llegan con velocidad nula), por el principio de conservación de la energía debe cumplirse:  $\Delta E_c = -\Delta E_p = -q \cdot \Delta V$ ; en nuestro caso:  $E_c = e \cdot V_0$

Figura 7

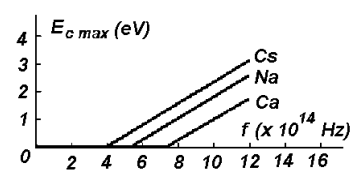


Figura 8

modo uniforme en todos los puntos de un frente de ondas, sino que se distribuye en “cuantos de energía” que posteriormente se llamarían **fotones**. Así, la luz ordinaria estaría formada por una infinidad de fotones de diferentes “tamaños energéticos” (según la frecuencia de la radiación,  $E = h \cdot \nu$ ). De este modo, Einstein volvió a introducir la naturaleza corpuscular de la luz en su interacción con la materia.

Los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico se explican si se supone que los electrones son arrancados del metal mediante choques individuales con fotones. No todos los fotones de luz incidente logran aportar la energía necesaria para el trabajo de extracción ( $W$ ); podemos aumentar la intensidad de la radiación (aumentar el número de fotones), pero, si éstos no tienen la energía suficiente siguen siendo incapaces de arrancar electrones. A partir de cierta frecuencia umbral  $\nu_0$ , característica para cada metal, los fotones de luz logran arrancar electrones de los átomos del metal ( $W = h \cdot \nu_0$ ); si la energía de los fotones incidentes ( $E = h \cdot \nu$ ) supera el trabajo de extracción, la diferencia energética se transforma en la energía cinética que adquieren los electrones una vez extraídos de la superficie metálica ( $E_c$ ); o sea:  $h \cdot \nu = h \cdot \nu_0 + E_c$ , llamada **ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico**<sup>3</sup>. Al aumentar ahora la intensidad de la radiación (aumentar el número de fotones), habrá más electrones arrancados, más corriente eléctrica, pero no aumentará la energía cinética de los mismos, pues depende únicamente de la frecuencia de la luz incidente y de la frecuencia umbral para cada metal.

El descubrimiento del efecto fotoeléctrico tuvo mucha importancia a nivel práctico y puso en nuestras manos los medios para mejorar las condiciones de vida material y cultural de la sociedad. Su aplicación en las **células fotoeléctricas** dio origen al cine sonoro y permitió crear aparatos que, sin la intervención del hombre, hacen sonar timbres de alarma, encienden luces de una calle o establecimiento comercial, abren puertas, cuentan las personas que entran o sale de un edificio, etc.

A.2. Resuelve las siguientes actividades:

A.2.1. Un láser de longitud de onda 630 nm tiene una potencia de 10 mW y un diámetro de haz de 1 mm. Calcula la intensidad del haz de luz y el número de fotones por segundo que viajan con el haz.

A.2.2. Explica qué es el efecto fotoeléctrico y describe la ecuación física que lo rige, aclarando el significado de cada término. ¿Qué teoría confirma sobre la naturaleza de la luz?

A.2.3. Un metal emite fotoelectrones cuando se ilumina con luz azul, pero no emite cuando se ilumina con luz amarilla. ¿Qué ocurrirá al iluminar con luz roja? ¿Y con luz ultravioleta?

A.2.4. Si se duplica la frecuencia de la radiación que incide sobre una placa de metal, ¿se duplica la energía cinética de los electrones extraídos?

A.2.5. La función de trabajo de una superficie limpia de sodio es 2,5 eV. ¿Cuál es la frecuencia fotoeléctrica umbral? ¿A qué tipo de onda electromagnética pertenece? ¿Emite electrones la superficie al ser iluminada con luz de 550 nm? Razona tu respuesta.

A.2.6. Sobre una superficie de potasio incide luz de 500 Å de longitud de onda ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ), emitiéndose fotoelectrones. Sabiendo que la longitud de onda umbral para el potasio es de 7500 Å, calcula: a) El trabajo de extracción de los electrones en el potasio. b) La energía cinética máxima de los electrones al iluminar con luz de 500 Å.

A.2.7. Cuando se ilumina el cátodo de una célula fotoeléctrica con luz monocromática de frecuencia  $1,2 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ , se observa el paso de una corriente que puede llegar a anularse aplicando un potencial de frenado de 2 V. a) ¿Cuál es la frecuencia umbral de ese cátodo? b) ¿Qué tensión habría que aplicar con tal de suprimir la corriente que se produzca cuando se ilumine la citada célula con luz monocromática de longitud de onda 150 nm?

A.2.8. El trabajo de extracción de un electrón de litio es de 2,31 eV.

a) ¿Se podría utilizar el litio en células fotoeléctricas para funcionar con luz visible (longitudes de onda, 380 nm a 775 nm)?

b) Al iluminar dicho metal con una radiación de frecuencia  $6,30 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  emite electrones y la superficie del metal adquiere un potencial positivo. Halla el potencial de frenado que debe adquirir con el tiempo para que cese el desprendimiento de electrones.

c) Al iluminar con luz visible, ¿cuánto vale la velocidad máxima de salida de los electrones?

A.2.9. Una radiación monocromática que tiene una longitud de onda en el vacío de 600 nm y una potencia de 0,54 W penetra en una célula fotoeléctrica de cátodo de cesio cuyo trabajo de extracción es de 2,0 eV. Determina: a) El número de fotones por segundo que viajan con la radiación. b) La longitud de onda umbral para el efecto fotoeléctrico con el cesio. c) La energía cinética de los electrones emitidos. d) La velocidad con que llegan los electrones al ánodo si se aplica una diferencia de potencial de 100 V. e) ¿Qué ocurriría si la longitud de onda incidente en la célula fotoeléctrica fuera el doble de la dada?

<sup>3</sup> Haciendo uso de la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico y del principio de conservación de la energía podemos llegar a que:  $h\nu = \frac{E_{cmax}}{\nu - \nu_0} = \frac{e \cdot V_0}{\nu - \nu_0}$ . En 1916, Robert A. Millikan, midiendo en un mismo metal los potenciales de frenado ( $V_0$ ) necesarios para distintas radiaciones incidentes de frecuencias conocidas, llegó a determinar el valor de la constante  $h$ , obteniendo el mismo valor que Planck había usado en su explicación de la radiación térmica de los cuerpos incandescentes. Es evidente que esa concordancia por dos métodos tan distintos no era fruto de la casualidad, por lo que la idea del fotón adquiría fortaleza.

A.2.10. Se desea construir una célula fotoeléctrica que emita electrones con una energía cinética de 3 eV, cuando incida sobre ella un haz de radiación ultravioleta de longitud de onda de 300 nm. Calcula la longitud de onda umbral del material a utilizar en la construcción de la célula. ¿Qué ocurriría si se utilizara un material con una longitud de onda umbral inferior a la calculada?

## 2.2. EL CONCEPTO DE FOTÓN. LA DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO. LA HIPÓTESIS DE DE BROGLIE.

Para explicar ciertos fenómenos de emisión y absorción de luz por la materia, entre ellos el efecto fotoeléctrico, Albert Einstein retomó en 1905 la teoría corpuscular de la naturaleza de la luz. Supuso que la energía de la radiación electromagnética no era continua sino discreta, de modo que una onda electromagnética de frecuencia  $\nu$ , se podía considerar compuesta por cuantos o corpúsculos que viajan a la velocidad de la luz, cada uno de los cuales posee una energía  $E = h \cdot \nu$  (donde  $h$  es la constante de Planck, de valor  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s) y un momento lineal  $p = E/c = h/\lambda$ . A estos cuantos se les llamó **fotones**.

La teoría de Einstein no invalida la teoría electromagnética de la luz. La física moderna tuvo que introducir la **dualidad onda-corpúsculo**, admitiendo que la luz posee simultáneamente cualidades ondulatorias y corpusculares. Cuando la luz interactúa con la materia se comporta como un chorro de partículas (fotones) con energía y momento lineal; cuando se propaga o experimenta fenómenos de difracción o interferencia, la luz se comporta como una onda caracterizada por su longitud de onda en el vacío o por su frecuencia.

Más tarde, Louis de Broglie propuso, por razones de simetría, que la materia también presenta la dualidad onda-corpúsculo, de forma que cualquier partícula tiene asociado un momento lineal (aspecto particular) y una longitud de onda (aspecto ondulatorio), relacionadas por la expresión:  $\lambda = h/p$ . La longitud de onda asociada es pequeñísima a escalas macroscópicas, de forma que el carácter ondulatorio de la materia sólo se manifiesta al nivel microscópico.

La propuesta de De Broglie fue confirmada experimentalmente por Davisson y Gemen en 1927, al observar la difracción e interferencia de electrones. El comportamiento ondulatorio del electrón se aprovecha en el microscopio electrónico para obtener imágenes de objetos inaccesibles.

## 2.3. PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN DE HEISENBERG.

Al establecer De Broglie una relación entre el aspecto corpuscular y el ondulatorio para todos los objetos físicos, las leyes clásicas de descripción del movimiento quedan invalidadas y exige nuevos conceptos y principios, es decir, una nueva mecánica que incluya la clásica como un caso particular.

En las situaciones cotidianas, macroscópicas, las distancias típicas son tremendamente mayores que las longitudes de onda de las partículas, por lo que el carácter ondulatorio de éstas no se aprecia; las leyes de la mecánica clásica, deterministas, son perfectamente aplicables: si se conoce el estado presente de un sistema y su ley de fuerzas, es posible predecir con exactitud el resultado de cualquier medida sobre el mismo. Sin embargo, en situaciones microscópicas, las dos longitudes anteriores (distancia y longitud de onda) son comparables con lo que se introduce cierta indeterminación en el movimiento de las partículas, por lo que éstas carecerán de una trayectoria absolutamente determinada.

El principio de indeterminación o de incertidumbre, formulado por Heisenberg en 1927, afirma que no se puede conocer simultáneamente y con precisión arbitraria ciertos pares conjugados de magnitudes físicas de un objeto, como por ejemplo la posición y la velocidad, o la energía y el tiempo. Formalmente, las relaciones de indeterminación se enuncian así:

El producto de las indeterminaciones en la medida de la posición y del momento lineal de una partícula es, como mínimo, igual a la constante de Planck dividida por $2\pi$ .	$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$
El producto de las indeterminaciones en la medida de la energía y del tiempo de una partícula es, como mínimo, igual a la constante de Planck dividida por $2\pi$ .	$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$

Implica que cuanto mayor es la precisión con que se mide una magnitud del par, menor es la precisión con la que se puede medir la otra. El principio no prohíbe la medida exacta de alguna de las variables por separado, sino de ambas simultáneamente.

El principio de indeterminación establece un límite fundamental que no tiene que ver con limitaciones técnicas del instrumento de medida ni con errores experimentales, sino que es inherente a la propia naturaleza y no puede evitarse de ninguna manera. Es una consecuencia de la dualidad onda-corpúsculo y de la interacción inevitable entre el observador y el fenómeno observado (por ejemplo, para ver un electrón hay que iluminarlo y al hacerlo se le comunica energía alterando su estado y modificando su posición).

El valor de la constante de Planck,  $h$ , es tan pequeño que el principio de indeterminación sólo tiene importancia a escala atómica y subatómica. Por ejemplo, un electrón dando vueltas alrededor de un protón en un átomo

de hidrógeno está localizado en una distancia del orden de  $0,5 \text{ \AA}$  ( $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ ); esto significa que como el electrón tiene una masa de  $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ , la indeterminación de su velocidad es del orden de  $10^6 \text{ m/s}$ , una fracción apreciable de lo que puede representar su velocidad total.

Para las medidas a escala macroscópica las desigualdades anteriores no suponen en la práctica ninguna restricción, con lo que funciona a la perfección la mecánica clásica. Piensa, por ejemplo, en un proyectil de  $10 \text{ kg}$  lanzado a una velocidad de  $100 \text{ m/s}$ ; si la velocidad del proyectil es conocida con una precisión del 1 por 1000, lo que es una gran precisión, tendríamos que  $\Delta v = 0,1 \text{ m/s}$ ; el principio de indeterminación supone entonces que la imprecisión teórica sobre la posición del proyectil es de unos  $10^{-34} \text{ m}$ , una distancia infinitamente menor que el tamaño de un núcleo atómico.

Tampoco se debe pensar que el principio de incertidumbre hace de la mecánica cuántica una teoría imprecisa. Por el contrario, su consideración en el micromundo permite cálculos precisos de las energías de los estados electrónicos de los átomos, los tiempos de vida media de los isótopos radiactivos,...

#### 2.4. LA FUNCIÓN DE ONDAS DE SCHRÖDINGER Y SU INTERPRETACIÓN PROBABILÍSTICA.

La dualidad onda-corpúsculo de De Broglie lleva a las relaciones de indeterminación de Heisenberg, que implican la imposibilidad del conocimiento simultáneo de magnitudes conjugadas (posición-momento lineal, energía-tiempo,...) en el mundo microscópico. Consecuencia de esto, el concepto de trayectoria que establecen las leyes de la física clásica deja de tener sentido en dicho mundo atómico y subatómico; deben eliminarse conceptos como el de órbita del electrón en torno al núcleo de los átomos.

La **mecánica cuántica** requiere de un nuevo formalismo matemático para describir el estado de un sistema microscópico y su evolución temporal, un formalismo que integre las propiedades corpusculares y ondulatorias como aspectos distintos de una misma realidad física, para la que no caben interpretaciones clásicas. Para esto, en 1926, Erwin Schrödinger define una **función de estado o función de ondas** ( $\psi(r,t)$ ), que contiene toda la información posible del sistema a describir; se obtiene de resolver una compleja ecuación de ondas ( $\hat{H}\Psi = E\Psi$ )<sup>4</sup>; en general, hay diversas funciones de estado posibles correspondientes a distintos valores de la energía que son soluciones de la ecuación.

El significado físico de la función de estado se aclaró un año después, cuando Max Born (1882-1970) realiza la **interpretación probabilística de la función de estado**, al afirmar que el cuadrado del valor absoluto de la función de estado,  $|\psi|^2$ , calculado en un punto y en un instante determinado, es una medida de la probabilidad de encontrar al sistema dado por  $\psi$  en ese punto y en ese instante. Para Born, las posiciones y las velocidades de un fotón o de un electrón, por ejemplo, son aleatorias y no puede decirse que tengan valores definidos, sino sólo que poseen ciertas probabilidades de exhibir unos determinados valores. **La mecánica cuántica es una teoría probabilística: predice las probabilidades de que ocurran determinados resultados.**

La aplicación de estas ideas mecano-cuánticas al estudio del átomo lleva a sustituir el concepto de órbita por el de orbital: un orbital viene dado por  $|\psi|^2$  y proporciona la probabilidad de poder encontrar al electrón a una determinada distancia del núcleo atómico.

Es frecuente escuchar que “la mecánica cuántica no hay quien la entienda”. Realmente, la base de la que parte esta nueva mecánica se revela, ya de por sí, como contradictoria para el sentido común: entidades que son ondas y partículas a la vez. Sin embargo, la excelencia de una teoría científica se pone de manifiesto en su capacidad de predicción y, en este sentido, la mecánica cuántica sigue, hoy por hoy, explicando insospechados efectos y fenómenos que tienen lugar en el mundo microscópico, a escala subatómica. Quizás el problema resida en que estamos demasiado acostumbrados a las percepciones físicas tangibles, y en el mundo subatómico nada es tangible.

Aunque parezca que no nos afecta, la mecánica cuántica abrió la puerta a nuevos progresos científicos y tecnológicos: las células fotoeléctricas, los microscopios electrónicos y de efecto túnel, los láser, la microelectrónica (base de los ordenadores, las telecomunicaciones, la robótica, la automatización, ...), la física nuclear (centrales, bombas, medicina nuclear,..., un ejemplo más del carácter productivo-destructivo en la aplicación de los conocimientos científicos por los seres humanos), los nuevos materiales (desarrollados por la química moderna), y un largo etcétera (*ver apéndice 2*).

<sup>4</sup> Aunque la ecuación de ondas de Schrödinger,  $\hat{H}\Psi = E\Psi$ , parece una ecuación sencilla, realmente no es así. Tras desarrollar  $\hat{H}$ , el operador matemático hamiltoniano, la ecuación de ondas adopta la forma:  $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h} (E - E_p) \Psi = 0$ , donde  $E$  es la energía total de la partícula

de un sistema atómico definida por la función de ondas  $\psi$  en las coordenadas de posición  $(x,y,z)$ ,  $E_p$  es la energía potencial de dicha partícula,  $m$  su masa y  $h$  la constante de Planck. Esta expresión, de complicadísima resolución para átomos y moléculas (hay que recurrir a métodos de resolución aproximados en el caso de átomos polieletrónicos, moléculas, ...), es la base del modelo mecano-cuántico de átomo, el modelo atómico válido en la actualidad.



**La física moderna (la mecánica cuántica y la relativista) es capaz de explicar el conjunto de los fenómenos físicos, desde la más pequeña escala a la mayor:** desde la estructura electrónica del átomo y del enlace químico, los sólidos y sus propiedades (conductividad, magnetismo,...), la estructura del núcleo y el mundo de las partículas elementales, hasta la evolución de las estrellas, las galaxias y el Universo.

A.3. Establece las diferencias más notables entre la física clásica y la moderna, así como los límites de validez de la física clásica.

**A. Final.** Realiza un resumen de las ideas más importantes aprendidas en esta unidad, así como un cuadro con las ecuaciones y fórmulas que has manejado a lo largo de la misma.

## APÉNDICE: APLICACIONES DE LA FÍSICA MODERNA.

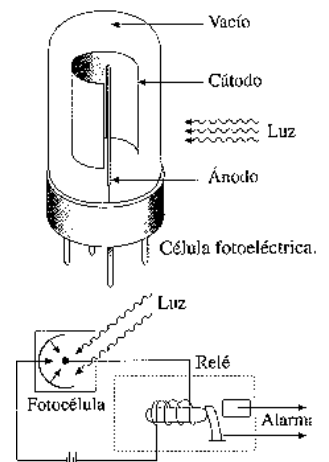
### 1. LA CÉLULA FOTOELÉCTRICA.

La célula fotoeléctrica o celda fotovoltaica es un dispositivo electrónico basado en el efecto fotoeléctrico. Consta de una ampolla de vidrio al vacío o con un gas inerte a baja presión, en cuyo interior encontramos un cátodo o emisor, recubierto de un metal fotosensible (de pequeño trabajo de extracción), y un ánodo o colector, una varilla metálica situada frente al emisor. Iluminando con luz de la frecuencia adecuada el cátodo emite electrones, los cuales son recogidos por el ánodo, dando origen a una corriente eléctrica.

La combinación de la célula fotoeléctrica con un relé permite construir multitud de dispositivos automáticos capaces de “ver” (alarmas antirrobo, semáforos de tráfico y puertas automáticas). Cuando la luz incide sobre el cátodo de la célula fotoeléctrica, la corriente eléctrica generada circula por el relé, manteniendo abierto el circuito exterior. Si se interrumpe la luz, cesa la corriente y se abre el relé, con lo que se pone en marcha algún dispositivo, por ejemplo, una señal de alarma.

Por medio de células fotoeléctricas se reproduce el sonido grabado en las películas de cine. Previamente se graba el sonido en la película: los sonidos se transforman mediante un micrófono en corrientes eléctricas y éstas, mediante una lámpara de neón, en luz de intensidad variable; la luz, que se hace pasar por una rendija muy fina, se proyecta sobre una banda lateral de la película cuyo ennegrecimiento varía según la intensidad luminosa. Para reproducir los sonidos, durante la proyección se hace pasar un rayo de luz a través de la parte donde éstos se grabaron en forma de rayas negras, las cuales debilitan el rayo proporcionalmente a su ennegrecimiento; tras sufrir estas variaciones de intensidad, el rayo se transforma mediante una célula fotoeléctrica en corrientes eléctricas de intensidad variable y éstas en sonidos mediante un altavoz.

Una variante de la célula fotoeléctrica, el fototubo multiplicador o fotomultiplicador, consiste en una serie de placas metálicas dispuestas de forma que la emisión fotoeléctrica se amplifica mediante una emisión eléctrica secundaria. El fototubo multiplicador es capaz de detectar radiaciones extremadamente débiles, por lo que es una herramienta esencial en el área de la investigación nuclear.



La célula fotoeléctrica permite abrir o cerrar el circuito automáticamente.

### 2. LA ELECTRÓNICA.

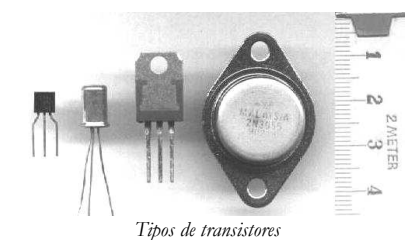
La Física cuántica ha permitido que la Electrónica experimentase un gran avance en la segunda mitad del siglo XX, pues su aplicación a los problemas de nivel molecular y al estudio de las redes cristalinas hizo que se desarrollase la Física del Estado Sólido y de los Materiales, con especial referencia al sector de los semiconductores y los superconductores.

Antes de la popularización de los transistores, en la década de 1950, todos los procesos electrónicos, tales como conformación de señales, detección, conmutación y amplificación se realizaban mediante válvulas termoiónicas. Estos dispositivos consumían mucha potencia para llevar a cabo su tarea, a causa de la necesidad de calentar el filamento y establecer altas tensiones anódicas. Asimismo, las fuentes de alimentación eran engorrosas, y otros elementos del circuito como condensadores y bobinas debían ser grandes para soportar las grandes diferencias de potencial de funcionamiento.

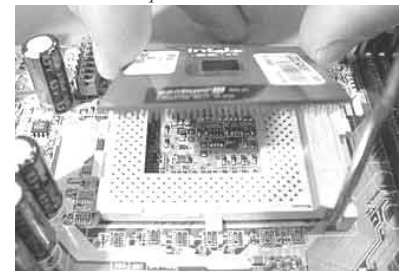
La invención del transistor gracias a los conocimientos sobre los semiconductores supuso un salto hacia la miniaturización de los componentes de los equipos y sus bajas diferencias de potencial de funcionamiento facilitaron la reducción de los otros componentes, mejorando la situación aún más. La carrera por la mejora condujo, a finales de la década de 1960, a la aparición del circuito integrado en forma de pastillas o chips de silicio, y así se originó la Microelectrónica, que ha revolucionado campos de tanta actualidad como la Robótica, la Informática y las Telecomunicaciones.

El comportamiento de los electrones en los semiconductores se explica por la teoría cuántica, mediante la denominada **teoría de bandas**. En efecto, al igual que sucede con las moléculas, cuando los átomos se unen para formar un sólido, la interacción de los electrones más externos provoca la deslocalización de las distribuciones de probabilidad electrónica por todo el cristal. Los niveles energéticos de dichos electrones, debido a sus interacciones, toman valores de energía que difieren muy poco entre sí, originando una serie de niveles prácticamente continuos (bandas). Entre dichas bandas existen zonas no permitidas energéticamente (bandas prohibidas).

La mecánica cuántica también explica el comportamiento de los superconductores, materiales que, al ser enfriados por debajo de cierta temperatura (denominada temperatura crítica) presentan una resistencia nula al paso de corriente eléctrica. Si la



Tipos de transistores



Microprocesador, agrupación de circuitos integrados

agitación térmica es suficientemente baja, algunos electrones quedan ligados formando pares (electrones con la misma celeridad pero sentido y espín opuestos) que se pueden mover con total libertad por el material.

### 3. EL LÁSER Y EL ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN EN DISCOS COMPACTOS (CD, DVD Y BD).

#### El láser, la consecución de luz coherente.

La palabra **láser** proviene de las iniciales de *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

La acción del láser se basa en la teoría cuántica aplicada al átomo. Aunque el primer láser fue inventado en 1958, el concepto de emisión estimulada fue adelantado por Einstein en 1917.

Un láser es un aparato que produce un rayo de luz coherente, es decir, un haz de fotones con la misma frecuencia, fase y dirección, con lo que se dispersa y se debilita muy poco (basta fijarse en lo que pequeña que es la circunferencia roja que produce un puntero láser de gas He-Ne; se mide la distancia Tierra-Luna enviando un haz de luz láser a la Luna, haz que se refleja en un panel de espejos de 60 cm de ancho colocado en la superficie lunar por la misión espacial Apolo XI en 1969, detectando el haz a su regreso a la Tierra).

Cada láser tiene una fuente de átomos, el medio activo (puede ser de un sólido, un líquido o un gas). El primer láser construido fue de cristal de rubí. Los átomos en el medio son excitados mediante una fuente de energía externa (queda claro, pues, que el láser es un aparato que consume energía, aprovechando para el efecto de emisión estimulada sólo el 1-2% de la energía aportada). Los átomos pasan de su estado fundamental a estados excitados absorbiendo fotones cuya energía  $h\nu$  se corresponde con la diferencia de energía entre dos estados electrónicos permitidos. Los átomos excitados pueden volver a un estado de menor energía de dos formas: espontáneamente, emitiendo un fotón, o también, cuando un fotón de la misma frecuencia alcanza al átomo excitado (es lo que se conoce como emisión estimulada; se emiten dos fotones en fase, con lo que se amplifica la luz emitida).

Como normalmente los electrones se encuentran en su estado fundamental, los fotones incidentes se absorberán. Para obtener luz amplificada por emisión estimulada debemos lograr: 1º, que la mayor parte de los átomos del medio activo estén excitados, para que la emisión predomine sobre la absorción (esto se conoce como inversión de la población); 2º, que el estado excitado sea metaestable, o sea, de duración superior a la habitual (más de  $10^{-8}$  s), para que la transición al estado inferior tenga lugar por emisión estimulada y no espontáneamente (en este caso los fotones no estarían en fase). En esta situación, un solo fotón de un átomo que experimente una desexcitación y choque con otro átomo excitado puede iniciar una reacción en cadena de emisiones estimuladas en fase, produciéndose luz coherente, en principio en cualquier dirección.

Llegados a este punto, si los fotones emitidos en fase se escapan, la muestra volverá rápidamente a un estado estable. Para evitar esto y mantener la inversión de la población de un modo continuo, además de para conseguir un haz de luz direccional, el medio activo se encierra en una cavidad con dos espejos reflectantes en los extremos, uno total y otro parcial. De este modo, los fotones emitidos por los átomos en la dirección perpendicular a los espejos son reflejados una y otra vez, actuando de estimulantes de la radiación y manteniendo, con ayuda de la fuente externa, la inversión de la población. La luz estimulada y direccional se acumula hasta llegar a una intensidad apreciable, momento en que parte se escapa por el espejo semitransparente y forma el haz láser.

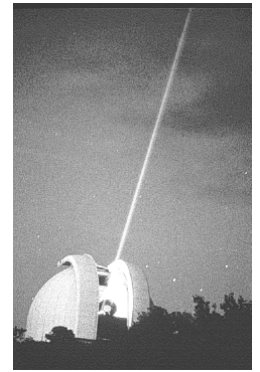
Además de los láser de cristal o de gas hoy disponemos de láser de vidrio, de colorantes químicos, líquidos y de semiconductor, modelos que producen haces de luz láser de frecuencia variable, pudiendo ir del infrarrojo al ultravioleta, sintonizando aquella que nos interese en cada caso.

Las múltiples aplicaciones del láser empiezan hacia 1980: lectores (de códigos de barras en los supermercados, de discos compactos), aplicaciones bélicas (dirección de proyectiles), industriales (dirección de túneles, soldadura y grabado de metales, taladro de materiales duros, corte de tejidos, etc.), médicas (microcirugía, destrucción de tumores), científicas (facilitan las experiencias de interferencia y difracción, activan reacciones químicas, función de "radar" en astronomía, fusión nuclear por confinamiento inercial, etc.), artísticas (holografía, impresoras láser, etc.). El láser ha dado lugar a una tecnología nueva llamada optoelectrónica, que incluye las telecomunicaciones por fibra óptica, así como los sistemas de almacenamiento de datos de ordenador en discos compactos. La utilización del láser en optoelectrónica se basa en el hecho de que la luz es preferible a las ondas de radio para transmitir información porque la cantidad de datos transmitidos aumenta con la frecuencia del agente empleado.

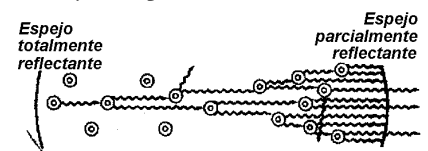
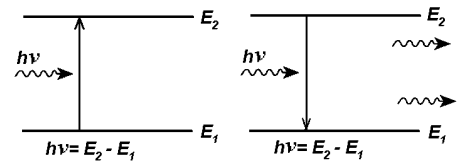
#### Del CD (Compac Disc), al DVD (Digital Video Disc) al BD (Blu-ray Disc): la búsqueda de mayor capacidad de almacenamiento en el mismo espacio y con total.

Los lectores/grabadores de discos compactos (CD's/DVD's/BD's) utilizan un sistema óptico con láser. Si se compara este reproductor con el tocadiscos, la función de la aguja la realiza un sensor luminoso que recoge el láser reflejado en el CD/DVD/BD. Pero la diferencia no se encuentra solamente en este principio físico, sino que también es completamente diferente la codificación de la información: en el disco tradicional, los surcos son un reflejo continuo del sonido grabado, es decir, es un sistema analógico, mientras que en el disco compacto, el sonido y/o la imagen se ha registrado por un sistema digital, esto es, se ha convertido en una sucesión de pulsos (encendido, apagado; 0 y 1) que en el disco compacto se traducen en una sucesión de agujeros (huecos) microscópicos (30 veces más delgados que un cabello humano).

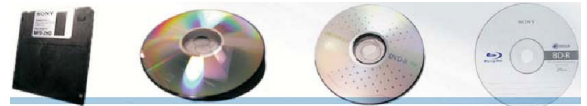
Cuando la luz láser incide sobre la superficie del disco compacto, que está metalizada (aluminio), se puede encontrar con una zona lisa (y allí se refleja) o bien con un hueco. En el hueco también se refleja pero la superposición de la luz incidente y la reflejada (interferencia) hace que la intensidad que recibe el fotodetector sea diferente en un hueco que en la superficie «normal». Esta sucesión de señales digitales después es transformada en sonido e imagen, alcanzándose una fidelidad extraordinaria.



Medición lunar por láser desde el Observatorio McDonald.



La capa protectora de material plástico (transparente) protege del polvo, agresiones mecánicas, huellas digitales,... a los discos compactos. Además, como no hay ningún contacto entre el disco compacto y el sistema de reproducción, se puede utilizar durante largo tiempo sin que se desgaste, manteniendo su calidad. Este aspecto se ha mejorado en los BD, donde la capa protectora posee un grosor seis veces mayor que en los CD's o DVD's.



La rápida evolución de los soportes de almacenamiento de información: Del disquete de 3,5 pulgadas al Blu-ray Disc (BD).

A diferencia de los discos de vinilo, en los que la velocidad angular era constante (por ejemplo, en los LP es 33,3 rpm), el lector/grabador de discos compactos debe mantener constante la velocidad lineal; por tanto, su velocidad angular varía en función de la zona que se reproduce/graba. Con el ya obsoleto CD, la zona central gira a unas 500 rpm mientras que en los bordes lo hace a unas 200 rpm.

En el paso del CD al DVD al BD se ha ido buscando fundamentalmente el disponer de mayor capacidad de almacenamiento de información en el mismo espacio: de los 650-700 Mb de información en el CD, pasamos a los 4,7-8,3 Gb del DVD, llegando a los 25-50 Gb en los actuales BD. Para ello hemos ido mejorando la tecnología que controla la luz láser roja (de 650 nm de longitud de onda) (en el paso del CD al DVD) y, ahora, con el paso al BD, hemos cambiado a un láser con luz azul (de aquí el nombre "blu", de "blue") (de 405 nm de longitud de onda) lo que le permite escribir más cantidad de información, y más rápido, en una misma superficie de disco, algo fundamental en la era de la alta definición (HD), para grabar TV y vídeo.

#### 4. EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO Y EL MICROSCOPIO DE BARRIDO DE EFECTO TÚNEL.

La primera aplicación del carácter ondulatorio de los electrones fue su utilización para ampliar objetos con mucho mayor detalle que con el microscopio óptico ordinario.

Cuanto más corta es la longitud de onda de la radiación usada en un microscopio, mayor es el aumento conseguido. Como la longitud de onda de los electrones es miles de veces menor que la de la luz visible, se pensó en utilizar un chorro de electrones, acelerados por un campo eléctrico intenso, como fuente luminosa en un microscopio. En 1933 se logró y en la actualidad el microscopio electrónico es una importante herramienta de investigación, particularmente útil en el estudio de macromoléculas, células, bacterias, virus y objetos de muy pequeño tamaño.

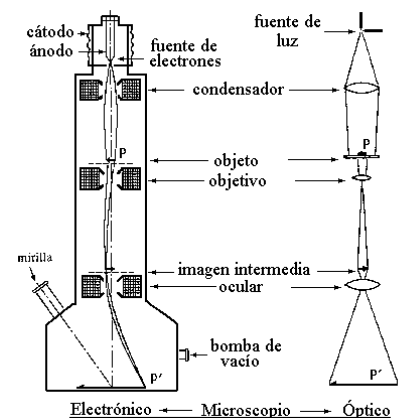
La figura muestra un esquema comparativo de las características esenciales de un microscopio electrónico y un microscopio óptico. El haz de electrones emitido por un filamento de wolframio se hace paralelo y se enfoca mediante electroimanes especialmente diseñados que actúan como lentes. La muestra que actúa como blanco debe ser muy delgada, de modo que el haz transmitido no se frene ni se disperse demasiado. La imagen final se proyecta sobre una pantalla fluorescente o sobre una placa fotográfica. Dentro del aparato existe un vacío muy elevado, de unos  $5 \cdot 10^{-5}$  mm de Hg.

Mientras que con un microscopio óptico ordinario pueden observarse estructuras de 200 nm, con el microscopio electrónico pueden fácilmente verse objetos de 1 nm.

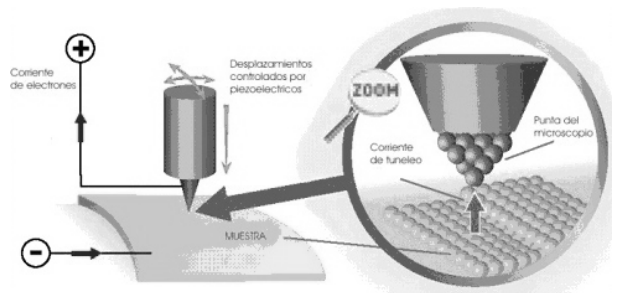
Por su parte, el microscopio de barrido por efecto túnel es una consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg y no tiene analogía fuera de la mecánica cuántica. El efecto túnel permite a las partículas cuánticas saltar barreras energéticas sin aportación de energía externa, debido a que la probabilidad de que la partícula cuántica se encuentre al otro lado de la barrera no es nula.

Con el microscopio de barrido de efecto túnel se generan imágenes reales de superficies con resolución atómica. Para ello se dispone de una aguja metálica muy fina, iluminada con un láser, que recorre la superficie de la muestra a observar. La punta y la superficie de la muestra deben ser conductoras de electricidad y aunque no están en contacto, por el efecto túnel existe una corriente entre ambas. La cantidad de corriente que circula depende de la distancia entre la punta de la aguja y la muestra. Si la punta se acerca, la corriente es mayor, y si se aleja, es menor. De esta forma, un equipo informático conectado a este sistema va fabricando una imagen en función de las diferencias de corriente. El resultado es la obtención de una foto de la superficie de la muestra y de cómo están dispuestos los átomos o las moléculas. Las diferencias de corriente dan idea de la rugosidad de la superficie y lo que se ve es como si hubiese tomado una fotografía aérea de una región montañosa.

La conjunción de la microelectrónica con el microscopio de barrido de efecto túnel ha abierto un nuevo campo, el de la nanociencia, que está permitiendo, entre otras muchas cosas, fabricar ordenadores más potentes con un tamaño muy reducido o detectar y curar enfermedades en el ámbito molecular.



Electrónico ← Microscopio → Óptico



Funcionamiento del microscopio de barrido de efecto túnel

### ¡APROVECHA LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS!

Aprovecha los recursos informáticos recogidos en soporte digital, en la Web del Departamento y en la Web personal de los autores. Te facilitarán el estudio y la comprensión de los conocimientos tratados en esta unidad.

#### SOLUCIONES A LAS ACTIVIDADES PLANTEADAS EN LA UNIDAD.

A.1.1. Para el gemelo viajero el tiempo transcurre más lentamente que para su hermano en tierra, por lo que a su regreso lo encontraría envejecido.

El gemelo en tierra (en movimiento respecto al fenómeno observado, el viaje de su hermano), mide un tiempo  $t = \frac{s}{v} = \frac{2 \cdot 1,52 \cdot 1,510^{11}}{7 \cdot 10^4} \approx 75,397$  días. El gemelo viajero (en reposo respecto al fenómeno, el viaje), debe medir un tiempo  $t_o$ , relacionado con  $t$  a través de la expresión relativista del tiempo:  $t_o = t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 75,397$  días; o sea, el mismo (los efectos relativistas no son significativos (el gemelo viajero es 0,18 s más joven).

A.1.2. Se resuelve aplicando la ecuación del efecto relativista sobre el tiempo:  $t = \frac{t_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 3,5 \cdot 10^{-8}$  s. Su vida se ha alargado 1,4 veces.

A.1.3. La masa del electrón en reposo,  $m_o = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg, la masa propia, es la que mide un observador en reposo respecto al electrón (en este caso el observador que lleva su misma velocidad). Un observador en movimiento respecto al electrón a velocidades próximas a las de la luz (en este caso el observador en reposo) medirá una masa relativista mayor:  $m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1,52 \cdot 10^{-30}$  kg.

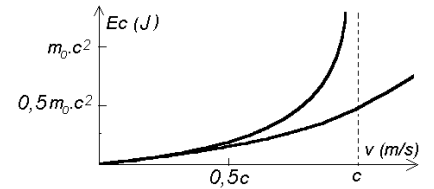
A.1.4. Aplicando el principio de equivalencia masa-energía,  $E = m \cdot c^2$ :  $E_o$  electrón =  $8,20 \cdot 10^{-14}$  J = 0,51 MeV;  $E_o$  protón =  $1,51 \cdot 10^{-10}$  J = 941,6 MeV.

A.1.5. Si su energía en reposo es  $E_o = 0,51$  MeV, su masa en reposo vale  $m_o = 0,51/c^2$  MeV/c<sup>2</sup>. Su masa relativista será:  $m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1,67 \cdot m_o = 0,85$

MeV/c<sup>2</sup>. Su cantidad de movimiento:  $p = m \cdot v = 0,68$  MeV/c; y su energía relativista:  $E = m \cdot c^2 = 0,85$  MeV.

A.1.6.  $E_c$  (expresión clásica) =  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ ;  $E_c$  (expresión relativista) =  $(m - m_o) \cdot c^2 = m \cdot c^2 - m_o \cdot c^2 = m_o \cdot c^2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$ . Asignando valores a la velocidad (0c, 0,1c; 0,2c; ...)

se obtiene la gráfica adjunta, donde se observa que para nuestro mundo, en el que las velocidades de los cuerpos están muy lejos de la velocidad de la luz, la expresión clásica coincide perfectamente con los valores dados por la expresión relativista. Sólo a partir de velocidades del orden del 10% de la velocidad de la luz empiezan a manifestarse diferencias; para velocidades del orden del 50% de la velocidad de la luz, la expresión relativista da valores un 24% superiores a los dados por la expresión clásica.



A.2.1. A partir de la definición de intensidad ( $I = P/S = P/\pi r^2$ ), potencia ( $P = E/t$ ) y de la ecuación de Planck ( $E_{fotón} = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$ ), se deduce:  $I = 12,732,4$  W/m<sup>2</sup>;  $E = P \cdot t = 10^{-2}$  J/s =  $N \cdot E_{fotón}$ ; donde  $N =$  número de fotones/s. Como:  $E_{fotón} = h \cdot c/\lambda = 3,16 \cdot 10^{-19}$  J;  $N = E/E_{fotón} = 3,17 \cdot 10^{16}$  fotones/s.

A.2.2. Ver apuntes.

A.2.3. Teniendo en cuenta cómo varía la frecuencia para las distintas radiaciones (de menor a mayor: infrarrojo, rojo, naranja, amarillo, verde, azul, violeta, ultravioleta), debemos tener claro que la luz roja no producirá efecto fotoeléctrico (ya no se produce con luz amarilla, de mayor frecuencia) pero sí lo producirá la luz ultravioleta (de mayor frecuencia que la azul).

A.2.4. Aplicando la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico: Para  $v$ :  $h \cdot \nu = h \cdot \nu_o + E_c$ ; para  $v' = 2v$ :  $2 \cdot h \cdot \nu = h \cdot \nu_o + E'_c$ ; de donde:  $2 \cdot h \cdot \nu_o + 2 \cdot E_c = h \cdot \nu_o + E'_c$ ; o sea:  $h \cdot \nu_o + 2 \cdot E_c = E'_c$ ; la energía cinética, al duplicar la frecuencia, se hace más del doble.

A.2.5. Dado que la función de trabajo vale:  $W = h \cdot \nu_o$ ;  $\nu_o = W/h = 6,03 \cdot 10^{14}$  Hz; luego:  $\lambda_o = c/\nu_o = 4,97 \cdot 10^{-7}$  m = 497 nm (luz visible verde). La luz de 550 nm, de menor frecuencia que la umbral, no emite electrones.

A.2.6. a) Dado que el trabajo de extracción se define como:  $W = h \cdot c/\lambda_o = 2,65 \cdot 10^{-19}$  J = 1,66 eV. b) Aplicando la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico:  $h \cdot c/\lambda = h \cdot c/\lambda_o + E_c$ ; llegamos a que:  $E_c = 3,71 \cdot 10^{-18}$  J = 23,21 eV.

A.2.7. a) Por el principio de conservación de la energía debe cumplirse:  $\Delta E_c = -\Delta E_p = -q \cdot \Delta V$ ; en nuestro caso:  $E_c = e \cdot V_o$ . Aplicando la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico:  $h \cdot \nu = h \cdot \nu_o + E_c$ ; o sea:  $h \cdot \nu = h \cdot \nu_o + e \cdot V_o$ ; de donde:  $\nu_o = \nu - e \cdot V_o/h = 7,17 \cdot 10^{14}$  Hz.

b) De la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico y como  $v = c/\lambda$ , se deduce:  $V_o = h \cdot (\nu - \nu_o)/e = 5,32$  V.

A.2.8. a) Dado que el trabajo de extracción vale:  $W = h \cdot \nu_o$ ;  $\nu_o = W/h = 5,57 \cdot 10^{14}$  Hz. La célula funciona con luz visible de frecuencia  $\nu \geq \nu_o$ , o sea, funciona con la luz violeta ( $\nu = 7,89 \cdot 10^{14}$  Hz) pero no con luz roja ( $\nu = 3,87 \cdot 10^{14}$  Hz).

b) Por el principio de conservación de la energía debe cumplirse:  $\Delta E_c = -\Delta E_p = -q \cdot \Delta V$ ; en nuestro caso:  $E_c = e \cdot V_o$ . Aplicando la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico:  $h \cdot \nu = h \cdot \nu_o + E_c$ ; o sea:  $h \cdot \nu = h \cdot \nu_o + e \cdot V_o$ ; de donde:  $V_o = h \cdot (\nu - \nu_o)/e = 0,3$  V.

c) De la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico llegamos a que:  $v = \sqrt{\frac{2h(\nu - \nu_o)}{m_e}} = 5,81 \cdot 10^5$  m/s.

A.2.9. a) A partir de la definición de potencia ( $P = E/t$ ) y de la ecuación de Planck ( $E_{fotón} = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$ ), se deduce:  $E = P \cdot t = 0,54$  J/s =  $N \cdot E_{fotón}$ ; donde  $N =$  número de fotones/s. Como:  $E_{fotón} = h \cdot c/\lambda = 3,32 \cdot 10^{-19}$  J;  $N = E/E_{fotón} = 1,63 \cdot 10^{18}$  fotones/s.

b) Dado que el trabajo de extracción vale:  $W = h \cdot \nu_o = h \cdot c/\lambda_o$ ; o sea  $\lambda_o = 6,22 \cdot 10^{-7}$  m = 622 nm.

c) Aplicando la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico:  $h \cdot \nu = h \cdot \nu_o + E_c$ ; llegamos a que:  $E_c = 1,15 \cdot 10^{-20}$  J = 0,07 eV.

d) Por el principio de conservación de la energía debe cumplirse:  $\Delta E_c = -\Delta E_p = -q \cdot \Delta V$ ; en nuestro caso:  $E_c = m \cdot v^2/2 = e \cdot V_o$ ; por tanto:  $v = 5,93 \cdot 10^6$  m/s.

e) La nueva energía del fotón incidente ( $1,66 \cdot 10^{-19}$  J) es menor al trabajo de extracción, por lo que no se daría el efecto fotoeléctrico.

A.2.10. Aplicando la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico:  $h \cdot c/\lambda = h \cdot c/\lambda_o + E_c$ ; llegamos a que:  $\lambda_o = 1,087 \cdot 10^{-6}$  m = 1.086,9 nm. Si la  $\lambda_o$  disminuye, aumentará la frecuencia umbral, con lo que la radiación ultravioleta emitiría electrones con menor energía cinética o podría llegar a no emitir electrones.

A.3. Algunas diferencias entre la física clásica y la física moderna son:

Física cuántica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carácter continuo de magnitudes como la energía y la cantidad de movimiento, frente al carácter discreto (discontinuo) en física moderna.</li> <li>- Emisión de radiación de las cargas aceleradas y ligadas (igual que las libres), frente a emisión de radiación de las cargas ligadas sólo en las transiciones entre niveles energéticos (a diferencia de las libres).</li> <li>- Partículas y campos clásicos frente a cuantos (fotones, electrones,...) con un comportamiento probabilístico.</li> <li>- Posibilidad, frente a imposibilidad, de determinar simultáneamente con absoluta precisión magnitudes conjugadas (posición-velocidad; energía-tiempo) de una partícula.</li> <li>- Trayectoria definida (órbitas) frente a trayectoria sin sentido físico (orbitales).</li> </ul>
-----------------	---

Física relativista	<ul style="list-style-type: none"><li>- Carácter absoluto del tiempo y del espacio, frente al carácter relativo, dependiente del observador.</li><li>- Masa constante de los cuerpos frente a masa relativista variable.</li><li>- Conservación independiente de la masa y de la energía, frente a la equivalencia masa-energía, que implica una conservación conjunta.</li></ul>
--------------------	---

**A. Final.** Trabajo personal.