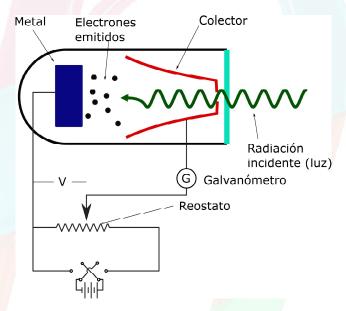
Efecto fotoeléctrico. Hipótesis de Einstein.

En 1905 se dio un paso adelante en el establecimiento de la teoría cuántica, ya que Einstein consiguió explicar un nuevo fenómeno utilizando la cuantización de la energía introducida por Planck. Cuando iluminamos una superficie metálica, bajo ciertas condiciones que veremos posteriormente, ésta emite electrones y este fenómeno se conoce como el efecto fotoeléctrico. En principio, el efecto fotoeléctrico se puede explicar desde el punto de vista clásico, ya que lo único que ocurre es que al iluminar el metal estamos dándole energía y si los electrones absorben esta energía podrán salir del metal y, por tanto, el metal emite electrones.

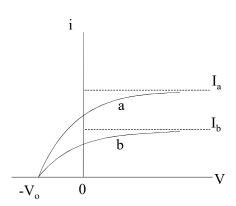
Este fenómeno se conocía a finales del siglo XIX y tiene una gran cantidad de aplicaciones: desde medidores de intensidad de luz, hasta transductores de la banda sonora de una película o células solares. Sin embargo, hay una serie de hechos experimentales que, como veremos, no se pueden explicar desde el punto de vista clásico. En la figura se muestra un dispositivo típico para estudiar el efecto fotoeléctrico. El metal es iluminado emitiendo electrones que son recogidos por el colector. Entre el metal y el colector podemos establecer una diferencia de potencial que se puede variar arbitrariamente. Por último, el galvanómetro G, que mide la corriente eléctrica, nos permite medir el número de electrones recogidos por el colector por unidad de tiempo.



En la página http://www.hbarra.es hay un applet que permite observar la fenomenología del efecto fotoeléctrico y que se muestra en la siguiente figura.



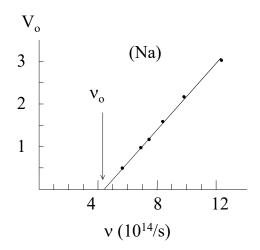
La primera propiedad que podemos ver del efecto fotoeléctrico es la dependencia de la intensidad de corriente con la diferencia de potencial entre el metal y el colector, para una frecuencia fija de la luz incidente. En la siguiente figura se muestra dicha dependencia para dos intensidades distintas de la radiación incidente $I_a > I_b$. Recordamos que la intensidad I de una onda, como la radiación incidente, es la energía por unidad de tiempo y frente de ondas que transporta la onda, de modo que la radiación de intensidad I_a transporta mayor energía que la radiación de intensidad I_b . En la siguiente figura podemos ver dicha dependencia.



En primer lugar, para diferencias de potencial suficientemente grandes la intensidad medida por el galvanómetro alcanza una saturación. Esta saturación corresponde a que todos los electrones emitidos por el metal son recogidos por el colector. Podemos ver que la saturación en la intensidad del galvanómetro es mayor para el caso I_a , lo cual es lógico ya que como la radiación tiene mayor intensidad arrancará más electrones del metal. Por otro lado, cuando se invierte la polaridad y se consideran valores negativos de la polarización, la intensidad disminuye ya que el colector empieza a repeler los electrones emitidos por

el metal. Sin embargo, la intensidad que mide el galvanómetro no es nula cuando el potencial de polarización es nulo, lo cual nos indica que los electrones son emitidos con una cierta energía cinética de modo que algunos irán en la dirección del colector y serán recogidos por éste. Para un determinado potencial negativo $-V_0$, la intensidad medida por el galvanómetro es nula. El valor de V_0 se denomina potencial de parada. Este potencial de parada es una medida directa de la energía cinética máxima de los electrones emitidos, de modo que $T_{\rm max} = eV_0$. Cuando la polarización del colector vale $-V_0$ quiere decir que ningún electrón tiene energía suficiente como para alcanzar el colector ya que ningún electrón tiene una energía por encima de $T_{\rm max}$. Lo que sorprende es que, tal como se muestra en la figura, ésta energía cinética máxima (o el potencial de parada) no depende de la intensidad de la radiación incidente, como se aprecia en la figura anterior. Esto no tiene sentido desde el punto de vista clásico ya que la energía cinética máxima de los electrones emitidos debería ser mayor para I_a que para I_b .

De lo que sí depende el potencial de parada es de la frecuencia de la radiación y de la naturaleza del metal. En la siguiente figura se muestran los datos medidos por Millikan para el caso de un metal de sodio.



La dependencia de V_0 con ν es claramente lineal. Por tanto, el potencial de parada se puede expresar de la siguiente forma:

$$V_0 = a\nu + b$$

Experimentalmente se encontró que la constante a es universal y no depende de la naturaleza del metal. Sin embargo, la constante b sí que depende del metal de que se trate. Existe una determinada frecuencia para la cual el potencial de parada y, por tanto, la energía cinética máxima de los electrones emitidos, es nulo. Esta frecuencia se denomina frecuencia umbral y se indica como ν_0 en la figura. Por debajo de la frecuencia umbral no se emiten electrones y, por lo tanto, no se observa el efecto fotoeléctrico. Este fenómeno tampoco se puede explicar clásicamente ya que aunque ν sea menor que ν_0 si la intensidad de la radiación incidente es suficientemente grande llegará gran cantidad de energía al metal y se deberían emitir electrones.

Vamos a enumerar todos los hechos experimentales que no se pueden explicar clásicamente:

- 1. En primer lugar, según el electromagnetismo la energía cinética máxima de los electrones emitidos debería aumentar con la intensidad de la luz incidente, de modo que a mayor intensidad de la luz, será mayor la energía que incide por unidad de área y tiempo en el metal y, por tanto, debería ser mayor la energía cinética máxima de los electrones emitidos, pero hemos visto que esto no es así. La energía cinética máxima de los electrones emitidos depende de la frecuencia y no de la intensidad de la radiación incidente.
- 2. En segundo lugar, para cualquier frecuencia de la radiación incidente se deberían emitir electrones, con tal de que la intensidad de la radiación incidente sea lo suficientemente grande. Sin embargo, según hemos visto, por debajo de la frecuencia umbral no se emiten electrones, sea cual sea la intensidad de la radiación incidente.
- 3. Por último, si la intensidad de la luz es suficientemente débil, como esta se distribuye uniformemente en el haz, debería existir un retraso entre la recepción de la luz y la emisión de electrones, de modo que un electrón adquiera suficiente energía como para salir del metal. Sin embargo, experimentalmente se observa que la emisión de electrones es instantánea. Aunque la intensidad de la radiación incidente sea muy pequeña, en el momento de llegada de la radiación se empiezan a emitir electrones.

En 1905 Einstein fue capaz de explicar todos estos inconvenientes de la teoría clásica, a partir de la cuantización de la energía de la radiación electromagnética. Einstein da un paso adelante sobre la hipótesis de Planck. De acuerdo con la hipótesis de Planck, la energía de la radiación electromagnética está cuantizada, de modo que la energía de una onda electromagnética de frecuencia ν sólo puede tomar valores que sean múltiplos enteros de $h\nu$. Planck achaca esa cuantización a la cuantización de la energía de las partículas que producen la onda electromagnética. Sin embargo, Einstein se atrevió a dar el paso que no dio Planck y es el considerar que es la propia energía de la radiación electromagnética la que está cuantizada. Además, la energía no sólo está cuantizada, sino que se encuentra concentrada en paquetes de energía o cuantos de energía que se denominaron fotones. La energía de un fotón es $h\nu$ y un fotón se comporta como una partícula indivisible. De acuerdo con la hipótesis de Einstein una onda electromagnética tiene una energía múltiplo entero de $h\nu$ porque contiene un número entero de fotones, cada uno de energía $h\nu$.

Einstein consideró que el efecto fotoeléctrico no es un proceso continuo en el cual se va absorbiendo energía de forma continua por parte de los electrones del metal hasta que adquieren suficiente energía como para salir, sino más bien un proceso discreto en el cual un electrón es emitido cuando absorbe la energía de un solo fotón completo. Vamos a ver cómo se pueden justificar los hechos experimentales que acabamos de enumerar en base a la existencia de estos fotones. De acuerdo con la conservación de la energía, la energía cinética de un electrón emitido que ha absorbido la energía de un fotón de valor $h\nu$ será:

$$T = h\nu - w$$

donde w es la energía de ligadura del electrón dentro del metal. No todos los electrones estarán igualmente ligados. Vamos a denominar w_0 a la mínima energía de ligadura de

un electrón dentro del metal. La energía cinética máxima de un electrón emitido será por tanto:

$$T_{\text{max}} = h\nu - w_0$$

La energía w_0 se denomina el trabajo de extracción del metal (o función trabajo del metal) y es una característica del metal. Esta ecuación nos permite explicar el primer punto, de modo que la energía cinética máxima de los electrones emitidos sólo depende de la frecuencia de la radiación incidente y de la naturaleza del metal pero no de la intensidad de la radiación incidente. Además, esta ecuación nos permite calcular el potencial de parada:

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{w_0}{e}$$

Esta ecuación nos permite obtener valores para las constantes a y b, de modo que a=h/e, donde el valor de h coincidió con el valor de la constante de Planck y que de hecho es una constante universal. Por otro lado, la constante b vale $b=w_0/e$, que depende de la naturaleza del metal.

Vamos a ver a continuación cómo se explica el segundo punto. Igualando la energía cinética máxima a cero podemos obtener la frecuencia umbral, ν_0 :

$$\nu_0 = \frac{w_0}{h}$$

Por debajo de la frecuencia umbral los fotones que componen la radiación electromagnética no tienen energía suficiente como para arrancar electrones. Si un electrón absorbiese un solo fotón de frecuencia menor que ν_0 , no tendría suficiente energía para salir del metal, ya que $h\nu$ sería menor que w_0 . De acuerdo con las hipótesis de Einstein, en este caso, los fotones pasarán de largo y no se absorberán, de modo que no se emiten electrones, explicando así el segundo punto. Un electrón no puede acumular la energía de varios fotones para salir del metal.

El tercer punto también se explica fácilmente a partir de la existencia de los fotones. Si la luz incidente tiene una intensidad muy débil, como la energía de la radiación no está uniformemente distribuida sino concentrada en los fotones, desde el momento de llegada de los fotones al metal, aunque sean muy pocos, los fotones serán absorbidos y se emitirán electrones sin ningún retraso.

En este apartado hemos visto como Einstein explicó el efecto fotoeléctrico suponiendo que la energía de la radiación electromagnética está cuantizada. De acuerdo con las hipótesis de Einstein, la energía de la radiación electromagnética no sólo está cuantizada, sino que se encuentra concentrada en los fotones, que se comportan como partículas indivisibles.