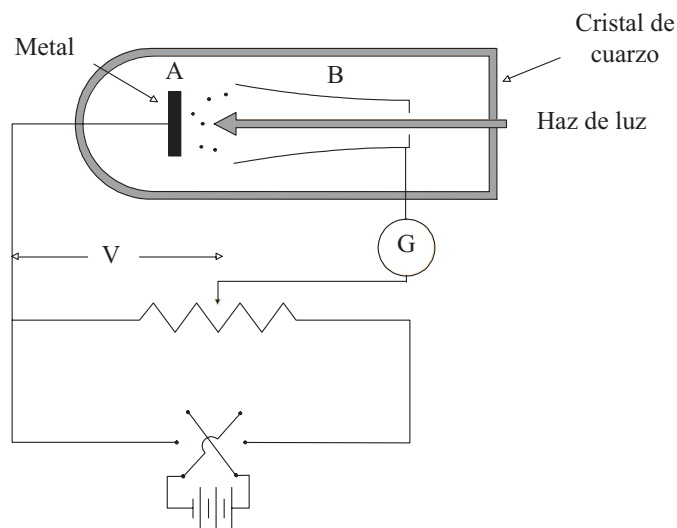
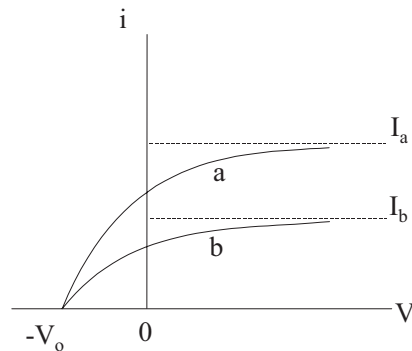


Efecto fotoeléctrico. Hipótesis de Einstein.

En 1905 se dio un paso adelante en el establecimiento de la cuantización de la energía, ya que Einstein consiguió explicar un nuevo fenómeno utilizando esta cuantización. 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. 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 *A* es iluminado emitiendo electrones que son recogidos por el colector *B*. Entre *A* y *B* existe 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.

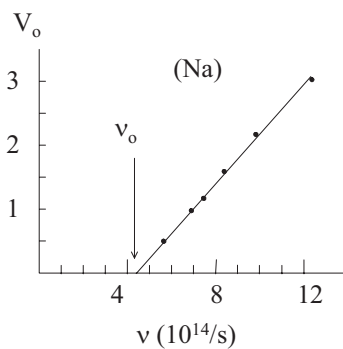


Si representamos la intensidad de corriente medida por el galvanómetro en función de la diferencia de potencial entre el metal y el colector, para una frecuencia fija de la luz incidente y dos intensidades distintas I_a e I_b , nos encontramos con curvas similares a las que se muestran en la figura.



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. Por otro lado, si invertimos la polaridad, la intensidad no cae a cero directamente, lo cual nos indica que los electrones son emitidos con una cierta energía cinética. Para un potencial negativo determinado V_0 , denominado el potencial de parada, la intensidad medida por el galvanómetro es nula. Este potencial de parada es una medida directa de la energía cinética máxima de los electrones emitidos, de modo que $T_{\max} = eV_0$. Experimentalmente, se observa que esta energía cinética máxima (o el potencial de parada) no depende de la intensidad de la radiación incidente como se aprecia en la figura anterior.

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 muestra la dependencia del potencial de parada con la frecuencia para el caso del sodio.



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. Por debajo de la frecuencia umbral no se emiten electrones y por lo tanto, no se observa el efecto fotoeléctrico.

Como dijimos anteriormente, existen una serie de hechos experimentales que no se pueden explicar clásicamente. Vamos a enumerar estos hechos:

1. En primer lugar, según el electromagnetismo la energía cinética máxima de los electrones debería aumentar con la intensidad de la luz, 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 de corte 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 haber un retraso entre la recepción de la luz y la emisión de electrones, de modo que un electrón adquiriera 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. De acuerdo con las hipótesis de Einstein 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 $h\nu$ (esta hipótesis es similar a la hipótesis de Planck, sin embargo Einstein se atrevió a dar el paso que no dió Planck y es el considerar que el la propia radiación electromagnética la que está cuantizada y no los osciladores que aparecían en la hipótesis de Planck). 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. 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 del metal, sino más bien un proceso discreto en el cual un electrón es emitido cuando absorbe un solo fotón completo. Vamos a ver como 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 del electrón emitido 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:

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

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 la figura anterior, 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, que es la que se muestra en la figura. Por debajo de la frecuencia umbral los fotones que componen la radiación electromagnética no tienen energía suficiente como para que al ser absorbidos por un electrón del metal éste pueda salir. 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.