

Física Básica III (FIS129)

Efecto Fotoeléctrico

Oscar Aravena Ortega

UTFSM

January 13, 2016

The FOLLOWING presentation has been approved for ALL AUDIENCES!

- Es muy probable que esta presentación este llena de errores, sea criterioso al momento de usarla!
- Si encuentra errores o ambigüedades favor escribir a oscar.aravena@usm.cl

Tabla de Contenidos

1 Motivación

2 Preliminares

- Extracción de electrones de un átomo: Versión ondulatoria
- Modelo de electrones en un metal: Toy model

3 El efecto fotoeléctrico

- Interpretación de sacar electrones de un metal con luz
- La explicación de Einstein
- ¿Cómo medir K ?
- Procedimiento experimental
- Resultados experimentales

- Recordemos que uno de los resultados más importantes emanados de la teoría especial de la relatividad es el siguiente:

$$E^2 - (Pc)^2 = (mc^2)^2$$

(1)

¹Recuerde: la luz visible es solo una parte del espectro electromagnético.

- Recordemos que uno de los resultados más importantes emanados de la teoría especial de la relatividad es el siguiente:

$$E^2 - (Pc)^2 = (mc^2)^2$$

(1)

- Lo anterior nos sugiere la existencia de partículas sin masa, *-¡pero con energía y momentum definidos!-*, y que además viajan a la velocidad de la luz.

¹Recuerde: la luz visible es solo una parte del espectro electromagnético. ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶

- Recordemos que uno de los resultados más importantes emanados de la teoría especial de la relatividad es el siguiente:

$$E^2 - (Pc)^2 = (mc^2)^2$$

(1)

- Lo anterior nos sugiere la existencia de partículas sin masa, *-¡pero con energía y momentum definidos!-,* y que además viajan a la velocidad de la luz.
- Un ejemplo de lo anterior son los fotones, "*corpúsculos de luz*¹"

¹Recuerde: la luz visible es solo una parte del espectro electromagnético.

- Recordemos que uno de los resultados más importantes emanados de la teoría especial de la relatividad es el siguiente:

$$E^2 - (Pc)^2 = (mc^2)^2 \quad (1)$$

- Lo anterior nos sugiere la existencia de partículas sin masa, *-¡pero con energía y momentum definidos!-,* y que además viajan a la velocidad de la luz.
- Un ejemplo de lo anterior son los fotones, "*corpúsculos de luz*¹"
- En la siguiente presentación revisaremos el efecto fotoeléctrico, que corresponde a la emisión de electrones desde la superficie de un material debido a la incidencia de ondas electromagnéticas.

¹Recuerde: la luz visible es solo una parte del espectro electromagnético. ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶

- Recordemos que uno de los resultados más importantes emanados de la teoría especial de la relatividad es el siguiente:

$$E^2 - (Pc)^2 = (mc^2)^2 \quad (1)$$

- Lo anterior nos sugiere la existencia de partículas sin masa, *-¡pero con energía y momentum definidos!-,* y que además viajan a la velocidad de la luz.
- Un ejemplo de lo anterior son los fotones, "*corpúsculos de luz*"¹
- En la siguiente presentación revisaremos el efecto fotoeléctrico, que corresponde a la emisión de electrones desde la superficie de un material debido a la incidencia de ondas electromagnéticas.
- ADVERTENCIA:** La siguiente presentación no corresponde a ningún apunte oficial y **DEBE ser complementado** con las actividades desarrolladas en clases.

¹Recuerde: la luz visible es solo una parte del espectro electromagnético. ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ▶ ≡ ▶

Tabla de Contenidos

1 Motivación

2 Preliminares

- Extracción de electrones de un átomo: Versión ondulatoria
- Modelo de electrones en un metal: Toy model

3 El efecto fotoeléctrico

- Interpretación de sacar electrones de un metal con luz
- La explicación de Einstein
- ¿Cómo medir K ?
- Procedimiento experimental
- Resultados experimentales

Preliminares

Recordemos que, a partir de las soluciones de las ecuaciones Maxwell tenemos lo siguiente:

- Los campos \vec{E} y \vec{B} satisfacen la ecuación de onda:

$$\nabla^2 E = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad ; \quad \nabla^2 B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad ; \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad ; \quad E = cB$$

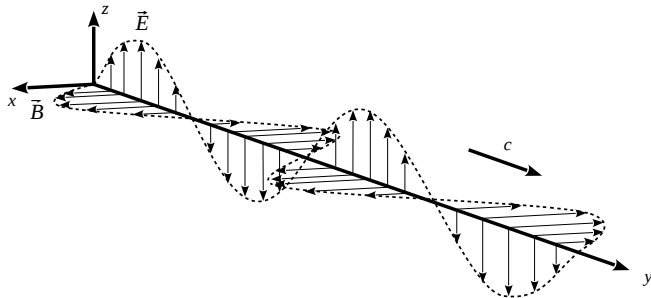
Preliminares

Recordemos que, a partir de las soluciones de las ecuaciones Maxwell tenemos lo siguiente:

- Los campos \vec{E} y \vec{B} satisfacen la ecuación de onda:

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad ; \quad \nabla^2 B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad ; \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad ; \quad E = cB$$

- La luz en sí **se comporta** como una onda *-onda electromagnética-* y además es una onda transversal:



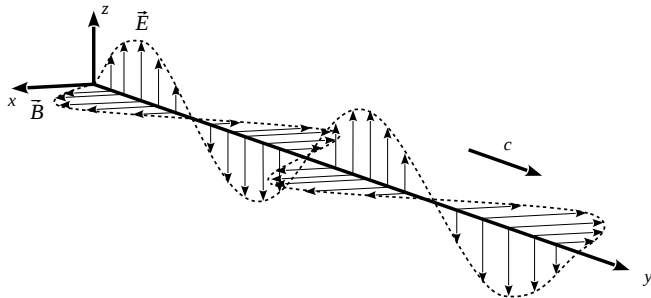
Preliminares

Recordemos que, a partir de las soluciones de las ecuaciones Maxwell tenemos lo siguiente:

- Los campos \vec{E} y \vec{B} satisfacen la ecuación de onda:

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad ; \quad \nabla^2 B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad ; \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad ; \quad E = cB$$

- La luz en sí **se comporta** como una onda *-onda electromagnética-* y además es una onda transversal:



- La intensidad de la luz es proporcional a la amplitud del campo eléctrico al cuadrado: $I \propto E^2$

Preliminares

Extracción de electrones de un átomo: Versión ondulatoria

- Desde el punto de vista ondulatorio, al aumentar la intensidad de la luz incidente sobre la superficie de un material, es posible extraer electrones

Preliminares

Extracción de electrones de un átomo: Versión ondulatoria

- Desde el punto de vista ondulatorio, al aumentar la intensidad de la luz incidente sobre la superficie de un material, es posible extraer electrones
- Lo que se observó: **¡NADA!, simplemente no ocurría**

Preliminares

Extracción de electrones de un átomo: Versión ondulatoria

- Desde el punto de vista ondulatorio, al aumentar la intensidad de la luz incidente sobre la superficie de un material, es posible extraer electrones
- Lo que se observó: **¡NADA!, simplemente no ocurría**

Un poco de historia:



- ▶ En 1887 Heinrich Hertz descubrió que los electrodos iluminados con luz cercana al UV creaban chispas eléctricas más fácilmente que las cercanas al IR

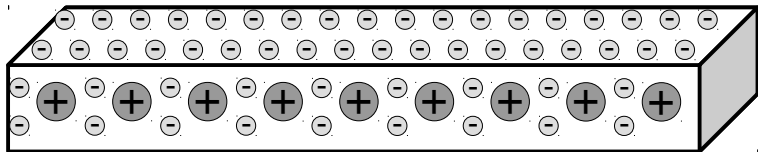


- ▶ En 1902 Philipp Lenard descubrió que la luz UV era capaz de arrancar electrones de un metal (en el vacío)
- ▶ La corriente producida era proporcional a la intensidad de la luz incidente
- ▶ La energía cinética máxima de los electrones $-K_{max}-$ poseía un valor fijo, independiente de la intensidad de la luz incidente y dependía solamente de la frecuencia y no de su intensidad

Preliminares

Modelo de electrones en un metal: Toy model

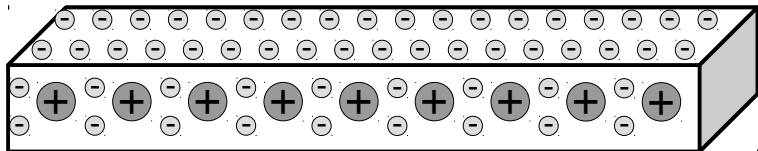
Consideremos un metal, en su más simple descripción:



Preliminares

Modelo de electrones en un metal: Toy model

Consideremos un metal, en su más simple descripción:



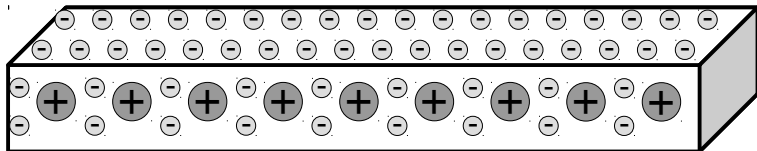
Algunas características de interés de los metales:

- Los electrones ($q < 0$) se encuentran prácticamente libres en su superficie, sin embargo se encuentran confinados a ella

Preliminares

Modelo de electrones en un metal: Toy model

Consideremos un metal, en su más simple descripción:



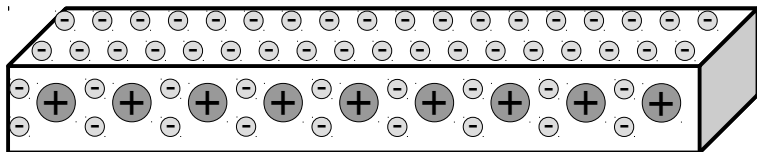
Algunas características de interés de los metales:

- Los electrones ($q < 0$) se encuentran prácticamente libres en su superficie, sin embargo se encuentran confinados a ella
- Bajo la superficie se encuentran tanto protones ($q > 0$) como electrones

Preliminares

Modelo de electrones en un metal: Toy model

Consideremos un metal, en su más simple descripción:



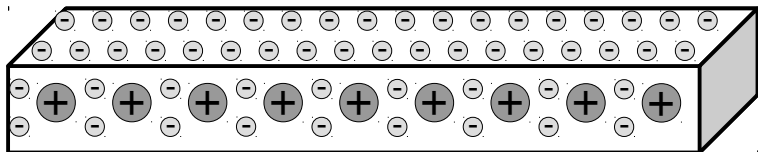
Algunas características de interés de los metales:

- Los electrones ($q < 0$) se encuentran prácticamente libres en su superficie, sin embargo se encuentran confinados a ella
- Bajo la superficie se encuentran tanto protones ($q > 0$) como electrones
- Desprender un electrón de la superficie es más fácil que sacar uno que está bajo de ella

Preliminares

Modelo de electrones en un metal: Toy model

Consideremos un metal, en su más simple descripción:



Algunas características de interés de los metales:

- Los electrones ($q < 0$) se encuentran prácticamente libres en su superficie, sin embargo se encuentran confinados a ella
- Bajo la superficie se encuentran tanto protones ($q > 0$) como electrones
- Desprender un electrón de la superficie es más fácil que sacar uno que está bajo de ella
- Al intentar sacar un electrón de la superficie, éste sentirá una fuerza atractiva debido a los núcleos que lo traerán de regreso

Tabla de Contenidos

1 Motivación

2 Preliminares

- Extracción de electrones de un átomo: Versión ondulatoria
- Modelo de electrones en un metal: Toy model

3 El efecto fotoeléctrico

- Interpretación de sacar electrones de un metal con luz
- La explicación de Einstein
- ¿Cómo medir K ?
- Procedimiento experimental
- Resultados experimentales

El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**

El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**
- La luz se comporta como partícula, dicha partícula recibe el nombre de fotón (*cuánto de energía*)

El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**
- La luz se comporta como partícula, dicha partícula recibe el nombre de fotón (*cuánto de energía*)
- El término *cuanto* abre la puerta de entrada a una nueva área del conocimiento, ¡la mecánica cuántica!

El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**
- La luz se comporta como partícula, dicha partícula recibe el nombre de fotón (*cuánto de energía*)
- El término *cuanto* abre la puerta de entrada a una nueva área del conocimiento, ¡la mecánica cuántica!

El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**
- La luz se comporta como partícula, dicha partícula recibe el nombre de fotón (*cuánto de energía*)
- El término *cuanto* abre la puerta de entrada a una nueva área del conocimiento, ¡la mecánica cuántica!

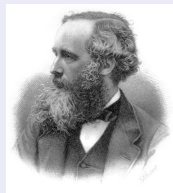
Recordemos:



El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**
- La luz se comporta como partícula, dicha partícula recibe el nombre de fotón (*cuánto de energía*)
- El término *cuanto* abre la puerta de entrada a una nueva área del conocimiento, ¡la mecánica cuántica!

Recordemos:



- ▶ Según Hans Christiaan Huygens la luz se comporta como onda

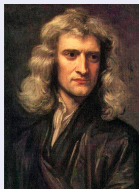
El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**
- La luz se comporta como partícula, dicha partícula recibe el nombre de fotón (*cuánto de energía*)
- El término *cuanto* abre la puerta de entrada a una nueva área del conocimiento, ¡la mecánica cuántica!

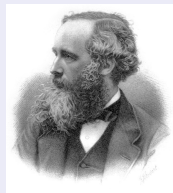
Recordemos:



- ▶ Según Hans Christiaan Huygens la luz se comporta como onda



- ▶ Según Isaac Newton la luz se comporta como partícula



El efecto fotoeléctrico

- Consiste en la extracción de electrones de un metal **¡USANDO LUZ!**
- La luz se comporta como partícula, dicha partícula recibe el nombre de fotón (*cuánto de energía*)
- El término *cuanto* abre la puerta de entrada a una nueva área del conocimiento, ¡la mecánica cuántica!

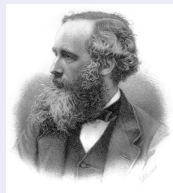
Recordemos:



- ▶ Según Hans Christiaan Huygens la luz se comporta como onda



- ▶ Según Isaac Newton la luz se comporta como partícula

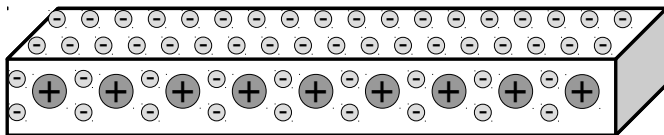


- ▶ Las soluciones a las ecuaciones de Maxwell muestran que la luz en sí es una onda

El efecto fotoeléctrico

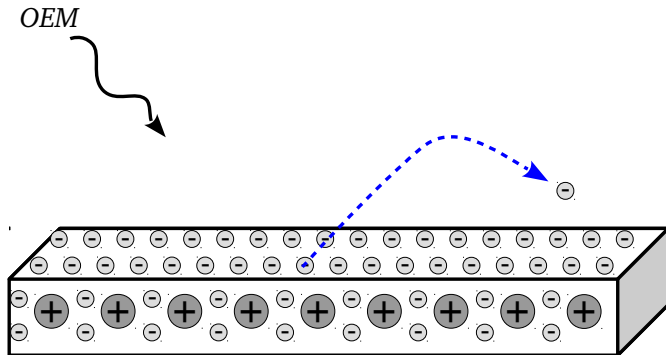
Interpretación de sacar electrones de un metal con luz

OEM



El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz

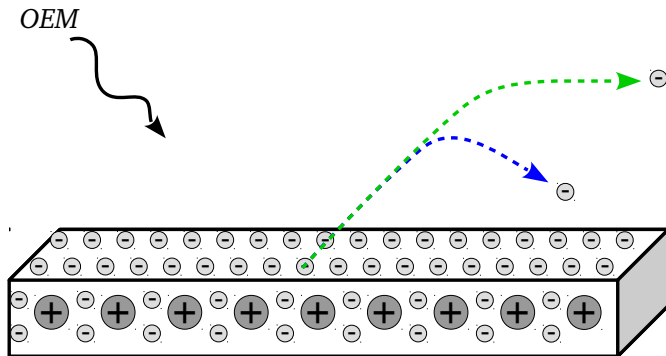


Se presentan 3 casos para el electrón de la superficie luego de absorber la radiación electromagnética:

- - - - El electrón no posee una energía suficiente para escapar del metal

El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz

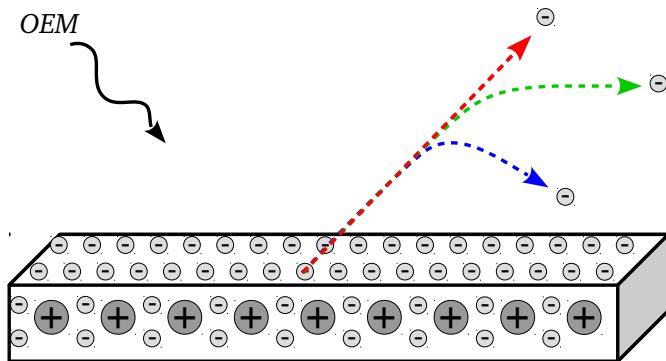


Se presentan 3 casos para el electrón de la superficie luego de absorber la radiación electromagnética:

- - - - El electrón no posee una energía suficiente para escapar del metal
- - - - El electrón posee una energía tal que está "a punto de escapar". En este caso podría escapar o regresar al metal. **El equilibrio es inestable.**

El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz

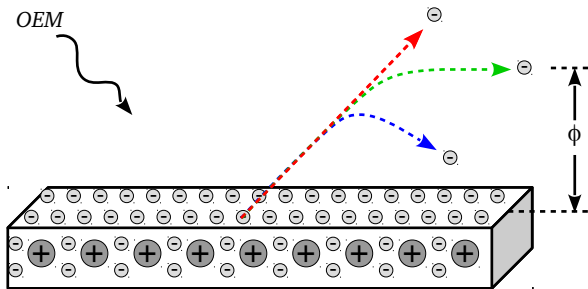


Se presentan 3 casos para el electrón de la superficie luego de absorber la radiación electromagnética:

- - - - El electrón no posee una energía suficiente para escapar del metal
- - - - El electrón posee una energía tal que está "a punto de escapar". En este caso podría escapar o regresar al metal. **El equilibrio es inestable.**
- - - - El electrón posee una energía suficiente para escapar del metal

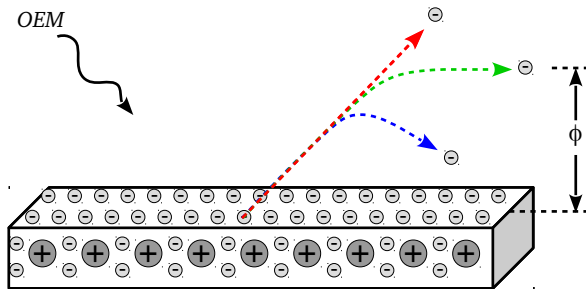
El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz



El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz

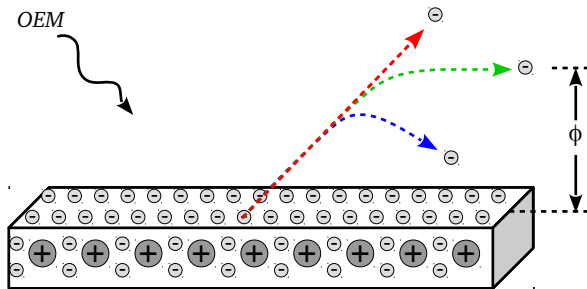


En general:

- Para lograr escapar los electrones del metal, éstos deben en primer lugar ser capaces de superar una barrera de energía potencial, llamada función trabajo

El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz

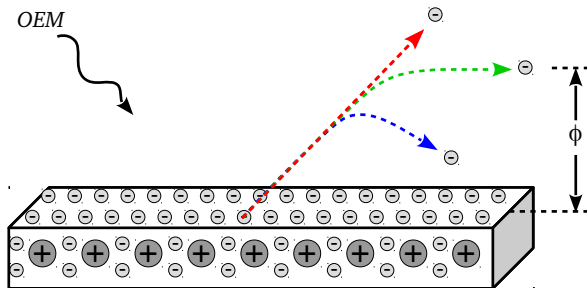


En general:

- Para lograr escapar los electrones del metal, éstos deben en primer lugar ser capaces de superar una barrera de energía potencial, llamada función trabajo
- La función trabajo $-\phi-$ es característica de cada material

El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz

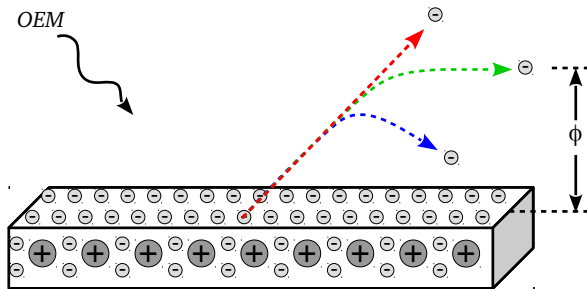


En general:

- Para lograr escapar los electrones del metal, éstos deben en primer lugar ser capaces de superar una barrera de energía potencial, llamada función trabajo
- La función trabajo $-\phi-$ es característica de cada material
- La unidad de medida de la función trabajo es el *electrón-Volt* [eV]

El efecto fotoeléctrico

Interpretación de sacar electrones de un metal con luz



En general:

- Para lograr escapar los electrones del metal, éstos deben en primer lugar ser capaces de superar una barrera de energía potencial, llamada función trabajo
- La función trabajo $-\phi$ es característica de cada material
- La unidad de medida de la función trabajo es el *electrón-Volt* [eV]
- **El efecto fotoeléctrico se produce a partir de cierta frecuencia característica llamada frecuencia umbral. ¡Es independiente de la intensidad de la luz incidente!**

El efecto fotoeléctrico

La explicación de Einstein

A partir de un análisis de conservación de la energía tenemos:

$$\text{Energía fotón incidente} = \text{Energía cinética del electrón} + \text{Energía potencial debido al material}$$

El efecto fotoeléctrico

La explicación de Einstein

A partir de un análisis de conservación de la energía tenemos:

Energía fotón incidente = Energía cinética del electrón + Energía potencial debido al material

Efecto fotoeléctrico:

$$h\nu = K + \phi$$

(2)

El efecto fotoeléctrico

La explicación de Einstein

A partir de un análisis de conservación de la energía tenemos:

Energía fotón incidente = Energía cinética del electrón + Energía potencial debido al material

Efecto fotoeléctrico:

$$h\nu = K + \phi$$

(2)

Donde:

- $h \rightarrow$ constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34} [J \cdot s] = 4.135 \times 10^{-15} [eV \cdot s]$)

El efecto fotoeléctrico

La explicación de Einstein

A partir de un análisis de conservación de la energía tenemos:

Energía fotón incidente = Energía cinética del electrón + Energía potencial debido al material

Efecto fotoeléctrico:

$$h\nu = K + \phi$$

(2)

Donde:

- $h \rightarrow$ constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34} [J \cdot s] = 4.135 \times 10^{-15} [eV \cdot s]$)
- $\nu \rightarrow$ frecuencia del fotón incidente

El efecto fotoeléctrico

La explicación de Einstein

A partir de un análisis de conservación de la energía tenemos:

Energía fotón incidente = Energía cinética del electrón + Energía potencial debido al material

Efecto fotoeléctrico:

$$h\nu = K + \phi$$

(2)

Donde:

- $h \rightarrow$ constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34} [J \cdot s] = 4.135 \times 10^{-15} [eV \cdot s]$)
- $\nu \rightarrow$ frecuencia del fotón incidente
- $K \rightarrow$ Energía cinética de los electrones emitidos

El efecto fotoeléctrico

La explicación de Einstein

A partir de un análisis de conservación de la energía tenemos:

Energía fotón incidente = Energía cinética del electrón + Energía potencial debido al material

Efecto fotoeléctrico:

$$h\nu = K + \phi$$

(2)

Donde:

- $h \rightarrow$ constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34} [J \cdot s] = 4.135 \times 10^{-15} [eV \cdot s]$)
- $\nu \rightarrow$ frecuencia del fotón incidente
- $K \rightarrow$ Energía cinética de los electrones emitidos
- $\phi \rightarrow$ Función trabajo, característica de cada material

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

- Recordemos que Lenard encontró que la energía cinética máxima de los electrones emitidos posee un valor fijo y no depende de la intensidad de la luz incidente. Luego, usando este hecho podemos buscar una forma de medir K_{max}

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

- Recordemos que Lenard encontró que la energía cinética máxima de los electrones emitidos posee un valor fijo y no depende de la intensidad de la luz incidente. Luego, usando este hecho podemos buscar una forma de medir K_{max}
- Una forma práctica es *frenando los electrones* que son emitidos del metal

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

- Recordemos que Lenard encontró que la energía cinética máxima de los electrones emitidos posee un valor fijo y no depende de la intensidad de la luz incidente. Luego, usando este hecho podemos buscar una forma de medir K_{max}
- Una forma práctica es *frenando los electrones* que son emitidos del metal
- **¿Cómo?**, la respuesta es usando un circuito eléctrico como el siguiente:

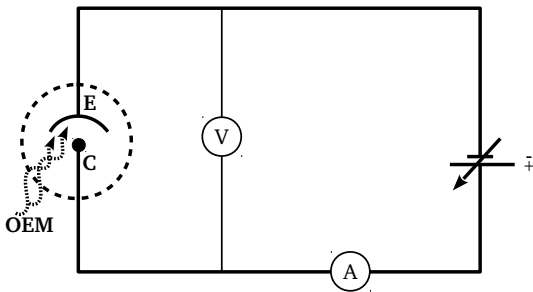
¿Cómo medir K ?

-

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

- Recordemos que Lenard encontró que la energía cinética máxima de los electrones emitidos posee un valor fijo y no depende de la intensidad de la luz incidente. Luego, usando este hecho podemos buscar una forma de medir K_{max}
- Una forma práctica es *frenando los electrones* que son emitidos del metal
- **¿Cómo?**, la respuesta es usando un circuito eléctrico como el siguiente:



A Partir del circuito presentado: ¿Cómo podemos medir K_{max} ?

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

Una buena forma es ajustar la diferencia de potencial de la fuente por medio del potenciómetro y llevarla a 0. Recordando uno de los teoremas más importantes de la física, el teorema del *Trabajo-Energía cinética*:

$$\sum_i W_i = \Delta K$$

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

Una buena forma es ajustar la diferencia de potencial de la fuente por medio del potenciómetro y llevarla a 0. Recordando uno de los teoremas más importantes de la física, el teorema del *Trabajo-Energía cinética*:

$$\sum_i W_i = \Delta K$$

Donde el lado izquierdo hace referencia a *la suma de todos los trabajos*, mientras que el lado derecho a *la variación de energía cinética*. Para el caso crítico tenemos:

$$-eV_0 = 0 - K_{max} \quad \Rightarrow \quad eV_0 = K_{max}$$

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

Una buena forma es ajustar la diferencia de potencial de la fuente por medio del potenciómetro y llevarla a 0. Recordando uno de los teoremas más importantes de la física, el teorema del *Trabajo-Energía cinética*:

$$\sum_i W_i = \Delta K$$

Donde el lado izquierdo hace referencia a *la suma de todos los trabajos*, mientras que el lado derecho a *la variación de energía cinética*. Para el caso crítico tenemos:

$$-eV_0 = 0 - K_{max} \quad \Rightarrow \quad eV_0 = K_{max}$$

OBSERVACIÓN: ¡El signo menos viene de la diferencia de potencial, no de la carga!. Así (2) se convierte en:

Efecto fotoeléctrico, versión experimental:

$$h\nu = eV_0 + \phi \quad (3)$$

El efecto fotoeléctrico

¿Cómo medir K ?

Una buena forma es ajustar la diferencia de potencial de la fuente por medio del potenciómetro y llevarla a 0. Recordando uno de los teoremas más importantes de la física, el teorema del *Trabajo-Energía cinética*:

$$\sum_i W_i = \Delta K$$

Donde el lado izquierdo hace referencia a *la suma de todos los trabajos*, mientras que el lado derecho a *la variación de energía cinética*. Para el caso crítico tenemos:

$$-eV_0 = 0 - K_{max} \quad \Rightarrow \quad eV_0 = K_{max}$$

OBSERVACIÓN: ¡El signo menos viene de la diferencia de potencial, no de la carga!. Así (2) se convierte en:

Efecto fotoeléctrico, versión experimental:

$$h\nu = eV_0 + \phi \quad (3)$$

Donde V_0 hace referencia a la diferencia de potencial a la cual la corriente del circuito va a 0, ésta diferencia de potencial recibe el nombre de *Voltaje de frenado*. La ecuación (3) es válida solamente cuando la corriente del circuito se hace 0, y no es universal como (2).

El efecto fotoeléctrico

Procedimiento experimental

En la práctica, las fotocorrientes² producidas son muy pequeñas, así, conectando una resistencia grande $\approx 100 [k\Omega]$ y en serie podemos medir indirectamente dicha fotocorriente³

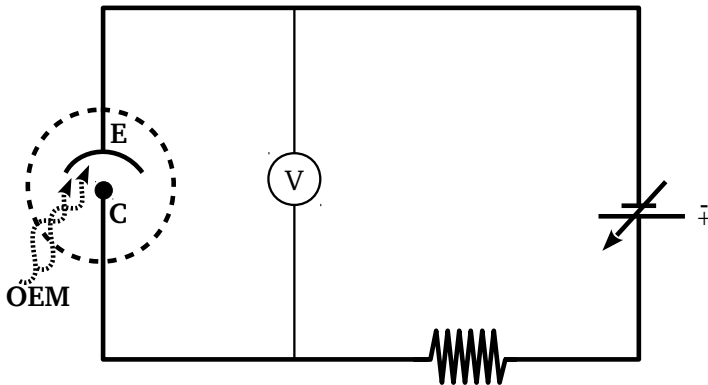
²A las corrientes producidas a partir de fotones les llamaremos fotocorrientes.

³Recuerde de la ley de Ohm que $V = iR$.

El efecto fotoeléctrico

Procedimiento experimental

En la práctica, las fotocorrientes² producidas son muy pequeñas, así, conectando una resistencia grande $\approx 100 [k\Omega]$ y en serie podemos medir indirectamente dicha fotocorriente³



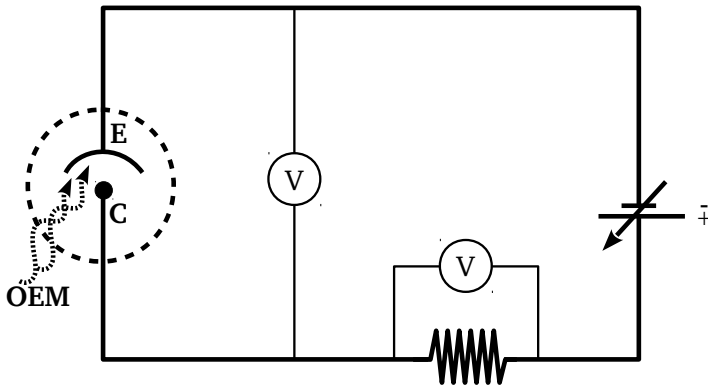
²A las corrientes producidas a partir de fotones les llamaremos fotocorrientes.

³Recuerde de la ley de Ohm que $V = iR$.

El efecto fotoeléctrico

Procedimiento experimental

En la práctica, las fotocorrientes² producidas son muy pequeñas, así, conectando una resistencia grande $\approx 100 [k\Omega]$ y en serie podemos medir indirectamente dicha fotocorriente³



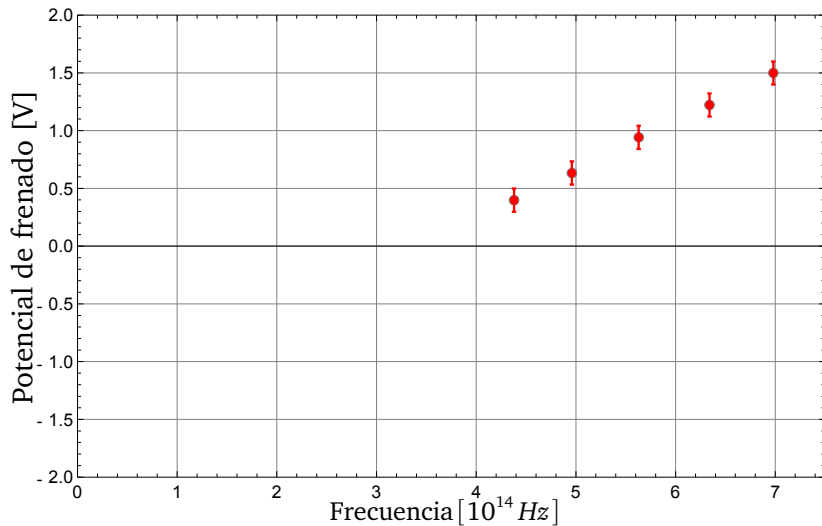
¿Por qué la resistencia se conecta en serie y no en paralelo?

²A las corrientes producidas a partir de fotones les llamaremos fotocorrientes.

³Recuerde de la ley de Ohm que $V = iR$.

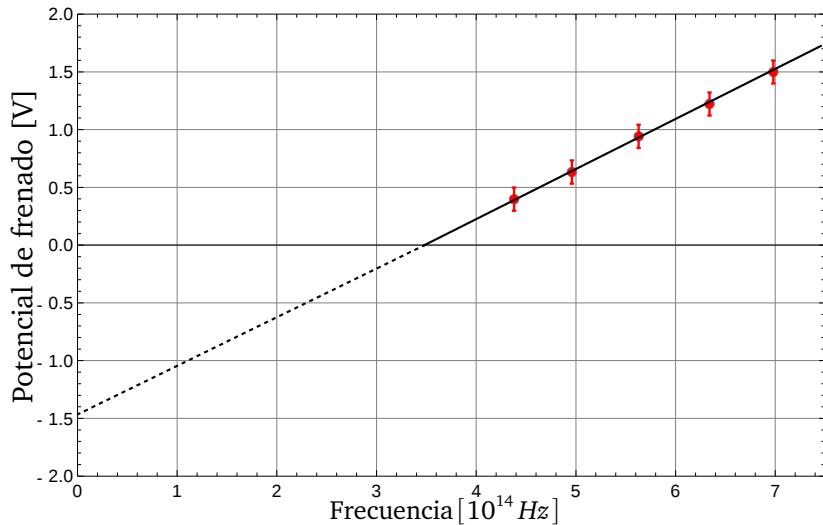
El efecto fotoeléctrico

Resultados experimentales



El efecto fotoeléctrico

Resultados experimentales



Física Básica III (FIS129)

Efecto Fotoeléctrico

Oscar Aravena Ortega

UTFSM

January 13, 2016