

8.4 EFECTO FOTOELÉCTRICO

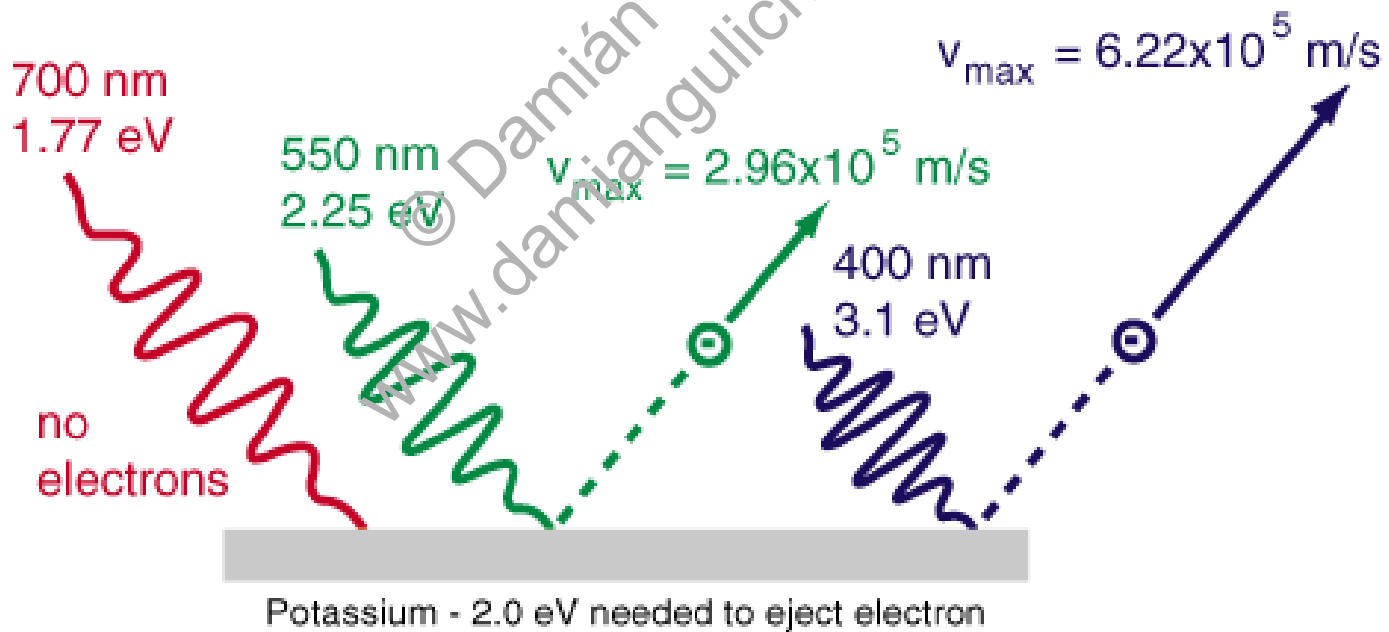
2018

© Damian Gulich
www.damiangulich.com.ar

8. 4.1 Definiciones

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Se llama **efecto fotoeléctrico** al proceso de emisión de electrones de la superficie de un metal cuando inciden sobre él, radiaciones electromagnéticas (visibles y ultravioletas).



Photoelectric effect

8. 4.2 Historia

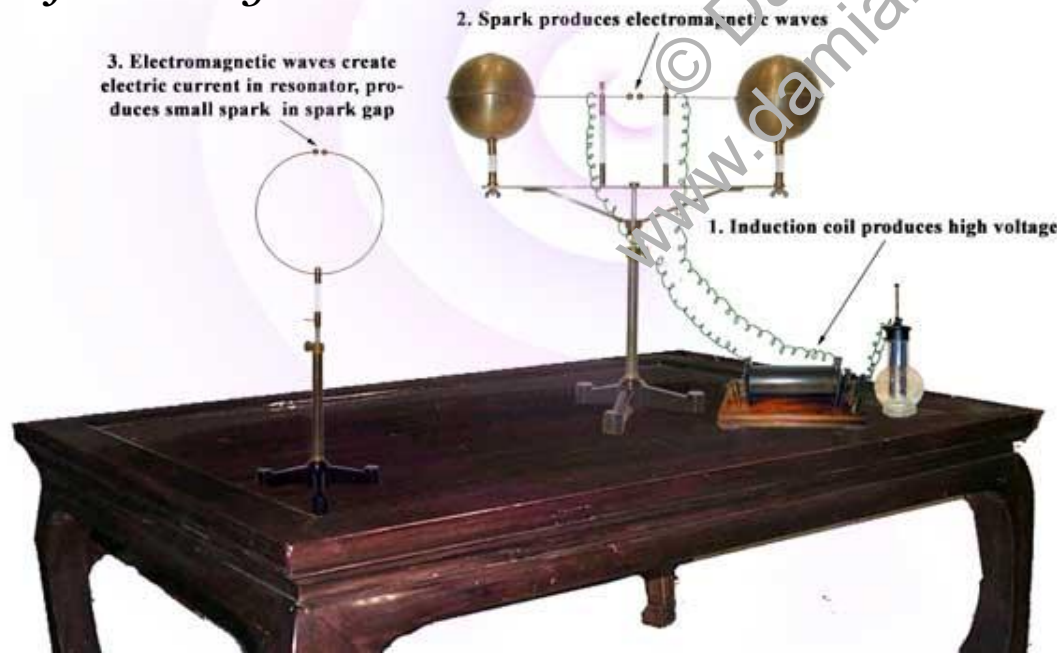
© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Históricamente

La teoría electromagnética de Maxwell (1874) predice la existencia de ondas electromagnéticas. Hertz (1887) demostró experimentalmente la teoría de Maxwell. Se estableció que la luz era una radiación electromagnética.

En sus experiencias Hertz encontró accidentalmente que si se iluminaba con luz ultravioleta un electrodo “saltaban” chispas hacia el otro mas fácilmente (menor diferencia de potencial entre elementos). Este efecto fue analizado por Hallwachs y Lenard.

H.Hertz (1887): La luz facilita la descarga de esferas cargadas



Heinrich Hertz

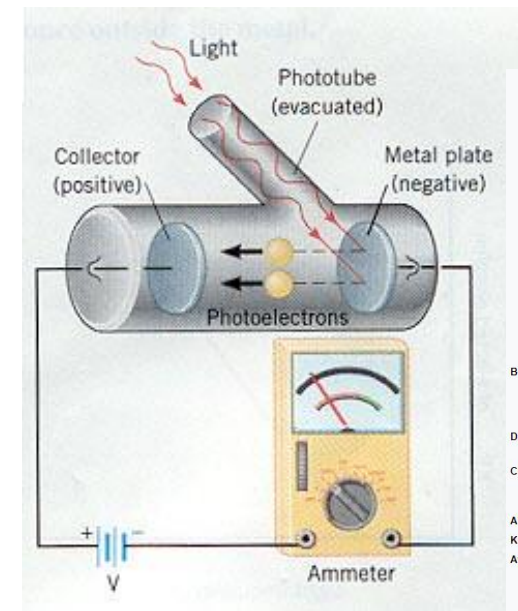
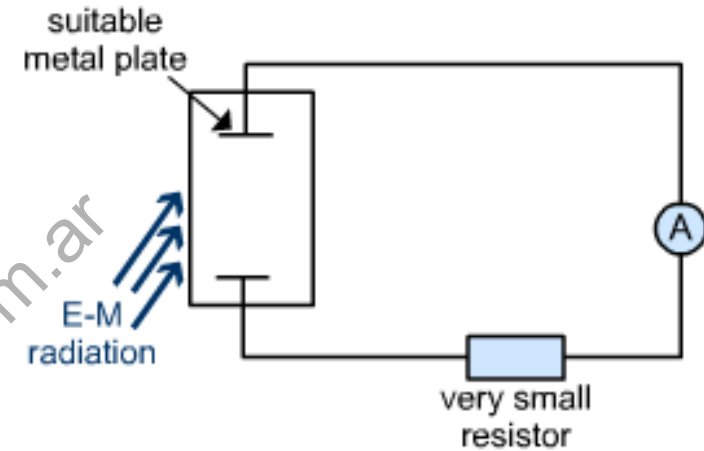


Born	Heinrich Rudolf Hertz 22 February 1857 Hamburg, German Confederation
Died	1 January 1894 (aged 36) Bonn, German Empire
Residence	Germany
Nationality	German
Alma mater	University of Munich University of Berlin
Known for	Electromagnetic radiation Photoelectric effect Hertz's principle of least curvature
Awards	Matteucci Medal (1888) Rumford Medal (1890)

Históricamente

Phillipp Lenard, estudió aun más el efecto, para eso construyó su propio dispositivo llamado "célula fotoeléctrica" (1899). Lenard determinó en 1902 que:

- las partículas emitidas tienen una carga negativa, de características equivalentes a los *electrones* de J. J. Thompson, por lo que se denominan **fotoelectrones**
- las energías cinéticas máximas E_C de los fotoelectrones emitidos dependen de la radiación (f)
- la frecuencia mínima f_0 por debajo de la cual no se produce el efecto fotoeléctrico depende del metal irradiado

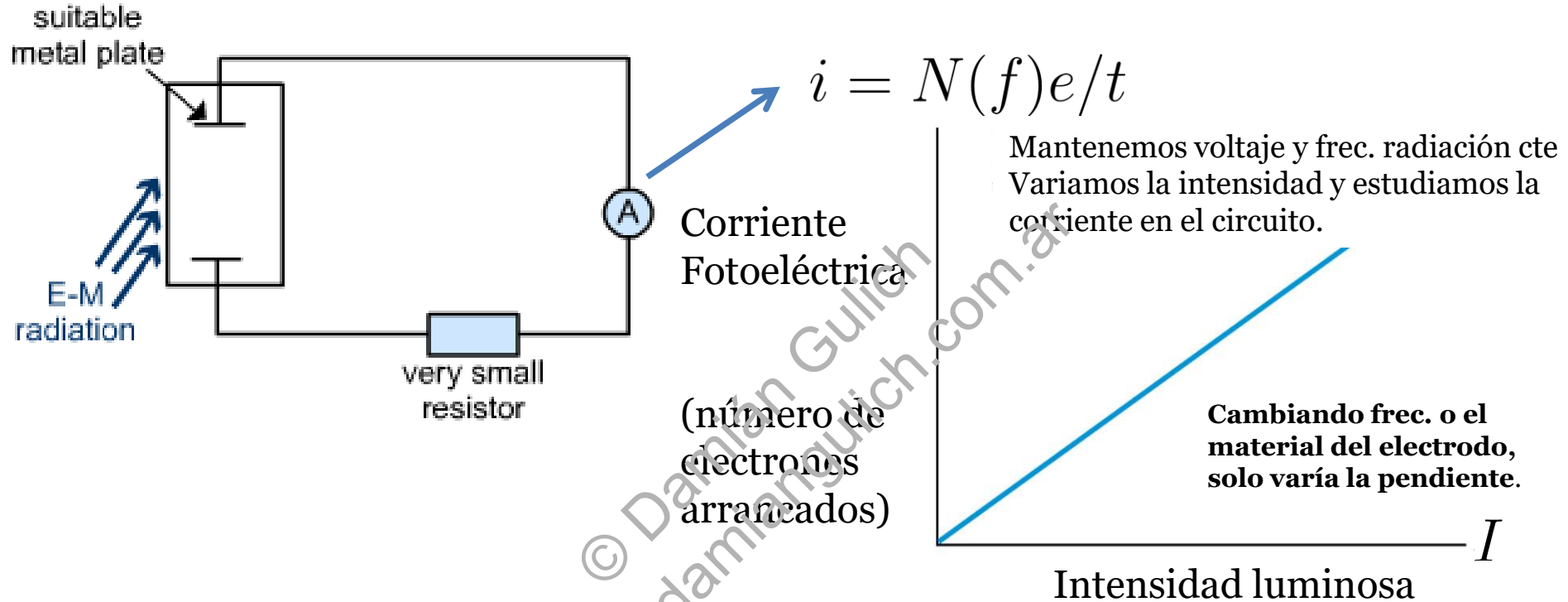


Philipp Lenard	
	
Philipp Lenard in 1900	
Born	Philipp Eduard Anton von Lenard 7 June 1862 Presburg, Kingdom of Hungary, Austrian Empire
Died	20 May 1947 (aged 84) Messehausen, Germany
Citizenship	Hungarian ⁽¹⁾ in Austria-Hungary (1862–1907), German (1907–1947)
Alma mater	University of Heidelberg
Known for	Cathode rays
Awards	Matteucci Medal (1898) Rumford Medal (1908) Nobel Prize for Physics (1905) Scientific career

8. 4.3 Características del efecto fotoeléctrico

© Damiano Guich
www.damianguich.com.ar

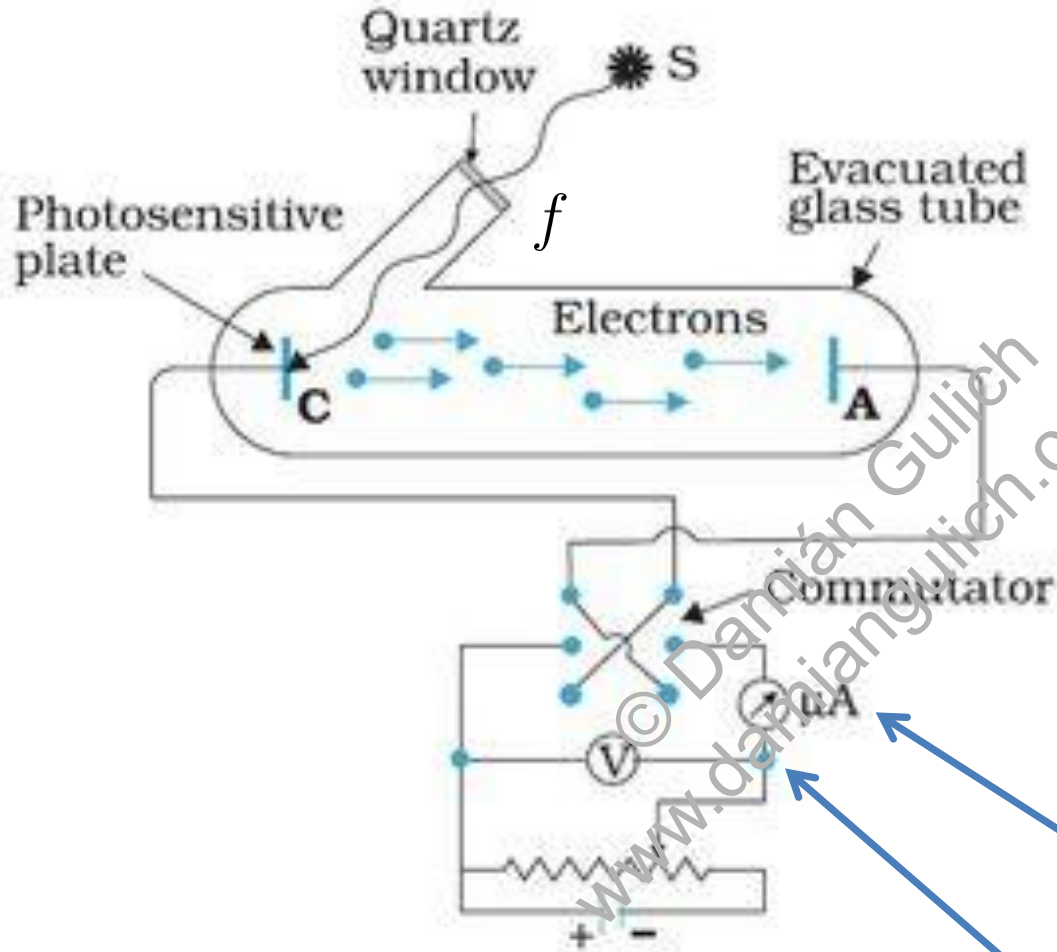
Resultados experimentales: corriente inducida



El número fotoelectrones producidos es proporcional a la intensidad de la luz. Esto configura un muy buen método para medir intensidades luminosas.

No se detecta tiempo de retraso entre la incidencia de la luz y el desprendimiento de los fotoelectrones.

Efecto fotoeléctrico - Dispositivo experimental por oposición

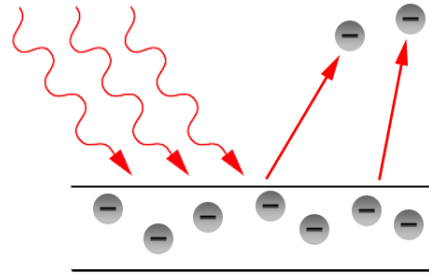


Un tubo al vacío contiene dos electrodos conectados a un circuito externo. Cuando la superficie C (cátodo) es iluminada con luz monocromática, emergen de ella fotoelectrones que alcanzan la superficie colectora A (ánodo).

Se puede determinar la energía cinética máxima de esos electrones invirtiendo la polaridad de batería hasta anular la corriente. La diferencia de potencial cuando la corriente es nula se llama **potencial de frenado** V_o .

La energía cinética máxima de los fotoelectrones es entonces $E_{C\text{ máx}} = e V_o$

Efecto fotoeléctrico - Características



Las características de la emisión fotoeléctrica son:

1. La emisión de electrones es instantánea al incidir la luz sobre el metal.
2. Al aumentar la intensidad luminosa se incrementa el número de electrones emitidos, pero **no** su velocidad.
3. La velocidad de los electrones emitidos para un dado metal sólo depende de la frecuencia f de la radiación incidente.
4. Para cada metal existe una frecuencia mínima o frecuencia umbral (o de corte) f_0 , **por debajo de la cual no se produce emisión fotoeléctrica**, por más intensa que sea la radiación.
5. En los metales hay electrones que se mueven más o menos libremente a través de la red cristalina, estos fotoelectrones se pueden liberar cuando se ilumina la superficie con radiación electromagnética.

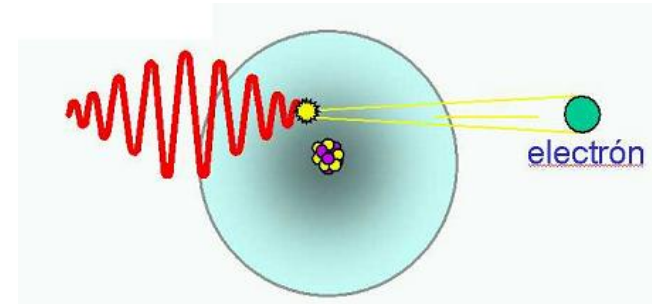
Efecto fotoeléctrico – Incompatibilidades con la Física Clásica

Modelo de interacción de la radiación electromagnética (ondas) con electrones libres:

El vector de campo eléctrico de la onda luminosa $\mathbf{E}$ ejerce una fuerza $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}$ sobre los electrones. La intensidad de la radiación es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico : $I \propto |\mathbf{E}_0|^2$

Predicciones clásicas

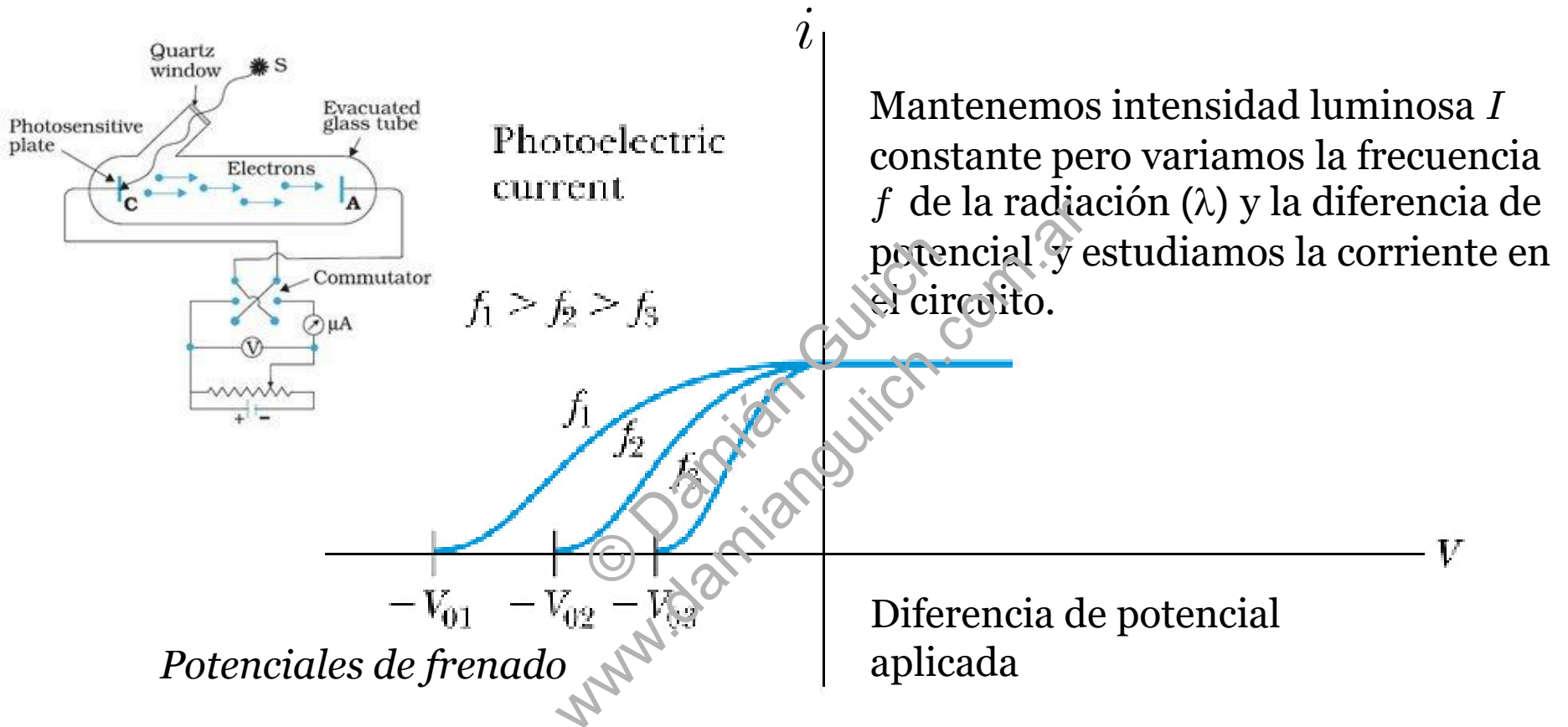
- Al aumentar la intensidad de la radiación luminosa la fuerza aumenta, luego la energía cinética máxima ($E_{C \text{ máx}}$) de los electrones emitidos debería aumentar ($E_{C \text{ máx}} \propto I$)
- Los fotoelectrones salen del metal al recibir energía mayor que su energía de enlace al material. Mientras la energía E sea suficientemente grande se deberían emitir electrones, *independientemente* de la frecuencia (longitud de onda) de la radiación incidente.
- Para intensidades muy bajas, se espera un tiempo de retardo entre exposición y emisión, mientras los electrones absorben energía suficiente para escapar del material



Realidad

- $E_{C \text{ máx}}$ **no** es función de I
- **No** hay efecto fotoeléctrico para frecuencias de radiación menores que f_0 .
- **No** hay retraso entre la incidencia de la luz y la emisión de fotoelectrones.

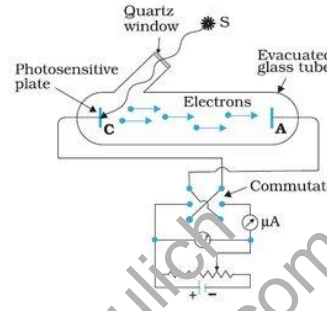
Resultados experimentales: corriente inducida



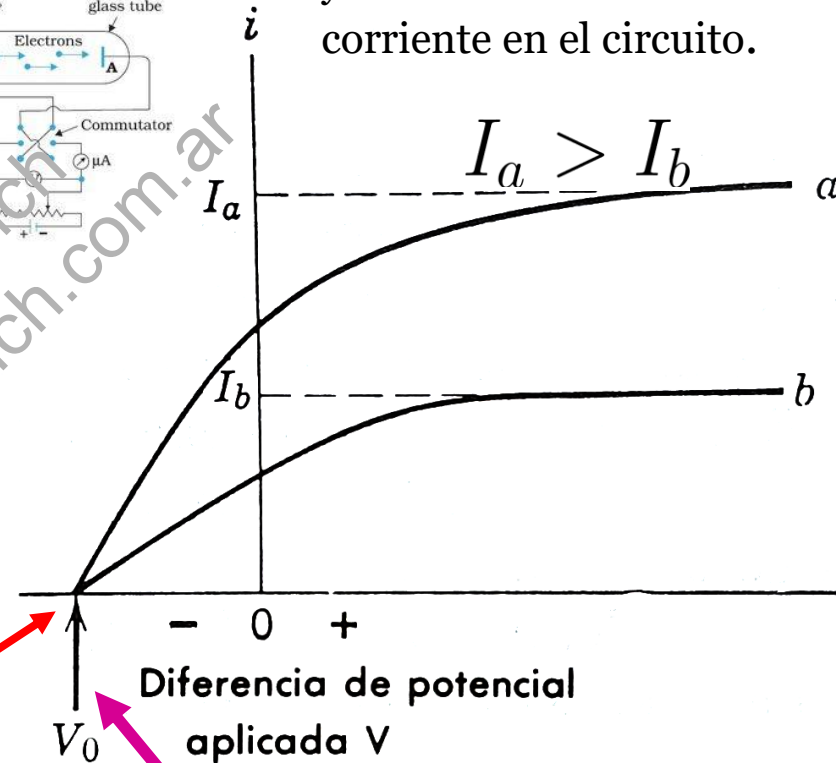
El potencial de frenado depende de la frecuencia (mayores frecuencias generan mayor energía cinética de los fotoelectrones).

Resultados experimentales: intensidad luminosa y corriente inducida

- Al disminuir la ΔV entre las placas disminuye el número de electrones que alcanzan el ánodo.
- La fotocorriente es proporcional a la intensidad de la radiación.
- Hay una corriente límite para grandes valores de ΔV (**corriente de saturación**).
- No hay corriente para ΔV inferiores al **potencial de frenado** V_0 .
- Hay una relación directa entre potencial de frenado y la energía cinética máxima de los fotoelectrones.



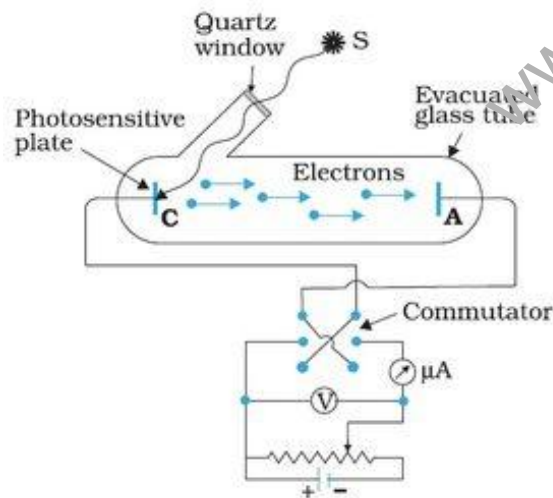
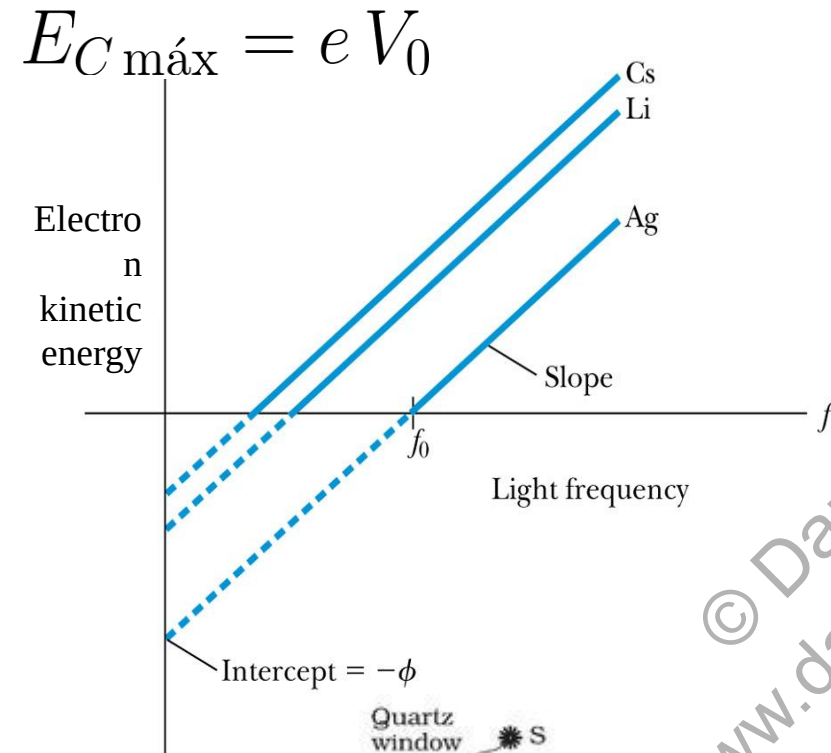
Mantenemos f e I constantes. Variamos V y estudiamos la corriente en el circuito.



El potencial de frenado corresponde a la máxima diferencia de potencial necesaria para que electrones pierdan toda su energía cinética.

Si radiación de determinada f (longitud de onda) incide sobre un emisor, el potencial de frenado no depende de la intensidad de la radiación

Resultados experimentales: energía cinética máxima de los fotoelectrones (Millikan, Nobel 1923)

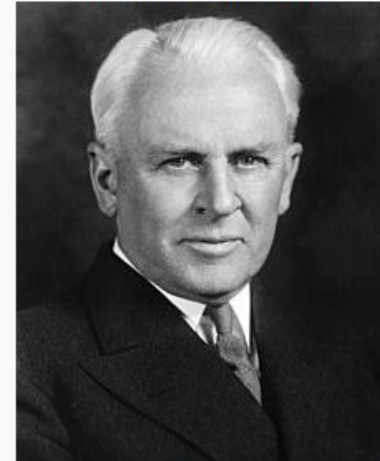


- La energía cinética de los fotoelectrones es independiente de la intensidad de la luz.

- La energía cinética de los fotoelectrones, para que emitan un determinado material, sólo depende **linealmente** de la frecuencia de la radiación incidente.

- Existe una **frecuencia umbral** f_0 de la luz por debajo del cual no se expulsan fotoelectrones (relacionadas con la función trabajo ϕ del material emisor).

Robert A. Millikan



1st President of California Institute of Technology

In office
1920–1946

Succeeded by Lee Alvin DuBridge

Personal details

Born	Robert Andrews Millikan March 22, 1868 Morrison, Illinois, U.S.
Died	December 19, 1953 (aged 85) San Marino, California, U.S.
Nationality	United States
Alma mater	Oberlin College Columbia University
Known for	Oil drop experiment measuring the charge of the electron Photoelectric effect Cosmic ray physics

Resumen de resultados experimentales

1. Si la frecuencia es menor a la frecuencia umbral f_0 (característica del material) no se emite ningún electrón, **independientemente** de la intensidad de la luz
2. Si se mantiene constante la frecuencia de la radiación incidente, la $E_{C\text{ máx}}$ de los electrones es **independiente** de la intensidad de la luz
3. La $E_{C\text{ máx}}$ de los electrones es proporcional a la frecuencia, con igual pendiente para todos los metales
4. Para frecuencia e intensidad de la radiación fijas el número de electrones emitidos es proporcional a la intensidad
5. Por muy baja que sea la intensidad de la radiación luminosa los electrones se emiten instantáneamente aunque sea muy débil la intensidad de la radiación luminosa

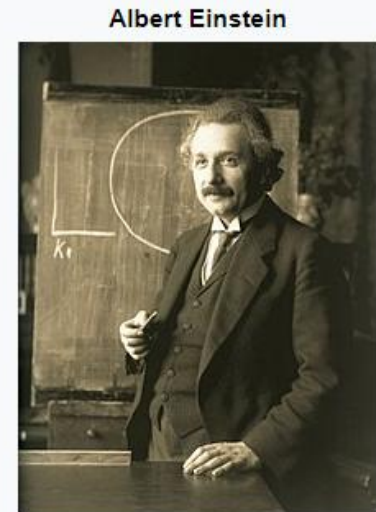
8. 4.4 Teoría cuántica de Einstein del efecto fotoeléctrico

© Damían Gulich
www.damiangulich.com.ar

1905 – El año de los milagros

Albert Einstein propuso una descripción matemática del efecto fotoeléctrico que parecía funcionar correctamente y en la que la emisión de electrones era producida por la absorción de cuantos de luz (concepto originalmente propuesto por Planck). En un artículo 1905 mostró como la idea de partículas discretas de luz podía explicar el mencionado experimento.

Por esta explicación Einstein recibió el Premio Nobel de Física en 1921.



Albert Einstein in 1921

Born	14 March 1879 Ulm, Kingdom of Württemberg, German Empire
Died	18 April 1955 (aged 76) Princeton, New Jersey, US
Residence	Germany, Italy, Switzerland, Austria (present-day Czech Republic), Belgium, United States
Education	Swiss Federal Polytechnic (1896–1900; B.A., 1900) University of Zurich (Ph.D., 1905)
Known for	General relativity Special relativity Photoelectric effect $E=mc^2$ (Mass–energy equivalence) $E=hf$ (Planck–Einstein relation) Theory of Brownian motion Einstein field equations Bose–Einstein statistics Bose–Einstein condensate Gravitational wave Cosmological constant Unified field theory EPR paradox Ensemble interpretation

1905 – *Annus Mirabilis* papers

Main articles: *Annus Mirabilis papers*, *Photoelectric effect*, *Special theory of relativity*, *Mass–energy equivalence*, and *Brownian motion*

The *Annus Mirabilis* papers are four articles pertaining to the *photoelectric effect* (which gave rise to *quantum theory*), *Brownian motion*, the *special theory of relativity*, and $E = mc^2$ that Einstein published in the *Annalen der Physik* scientific journal in 1905. These four works contributed substantially to the foundation of *modern physics* and changed views on *space*, *time*, and *matter*. The four papers are:

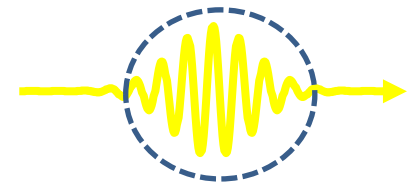
Title (translated)	Area of focus	Received	Published	Significance
<i>On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light</i>	Photoelectric effect	18 March	9 June	Resolved an unsolved puzzle by suggesting that energy is exchanged only in discrete amounts (<i>quanta</i>). ^[156] This idea was pivotal to the early development of quantum theory. ^[157]
<i>On the Motion of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid, as Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat</i>	Brownian motion	11 May	18 July	Explained empirical evidence for the atomic theory , supporting the application of statistical physics .
<i>On the Electrodynamics of Moving Bodies</i>	Special relativity	30 June	26 September	Reconciled Maxwell's equations for electricity and magnetism with the laws of mechanics by introducing changes to mechanics, resulting from analysis based on empirical evidence that the speed of light is independent of the motion of the observer. ^[158] Discredited the concept of a " <i>luminiferous ether</i> ". ^[159]
<i>Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?</i>	Matter–energy equivalence	27 September	21 November	Equivalence of matter and energy, $E = mc^2$ (and by implication, the ability of gravity to "bend" light), the existence of " <i>rest energy</i> ", and the basis of nuclear energy.

Teoría de Einstein: Cuantos de luz (fotones)

Albert Einstein propone una solución basada en una teoría corpuscular para la luz basada en las ideas de Plank para deducir la densidad espectral del cuerpo negro. La luz está compuesta de “cuantos” o paquetes, y sólo puede ser absorbida o emitida en estos paquetes y no de forma continua como propone la Física Clásica.

1. La energía radiante está discretizada en paquetes concentrados: **cuantos de luz (fotones)**. Cada fotón tiene la energía dada por la ecuación de Planck:

$$E = hf$$



donde f es la frecuencia de la luz y la $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ es la constante de Planck que lejos de ser un simple parámetro de ajuste, ha demostrado ser una de las constantes universales de la Física. A veces esto se escribe como

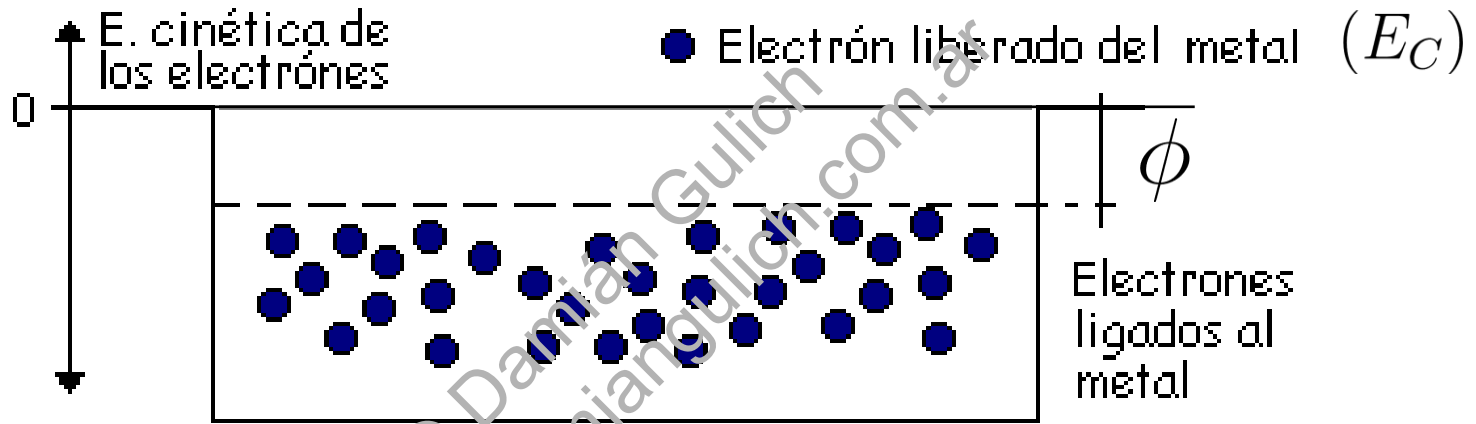
$$E = \hbar\omega \quad \text{donde:} \quad \hbar = h/(2\pi) \\ \omega = 2\pi f$$

2. En el proceso fotoeléctrico un fotón es **completamente** absorbido por un electrón del fotocátodo.

Esta transferencia de energía es un proceso de “todo o nada” a diferencia de las transferencias continuas de la teoría clásica, el electrón obtiene toda la energía del fotón o no obtiene nada

Un modelo sobre los electrones en el metal

Podemos considerar, desde el punto de vista energético, que los electrones de un metal dado se encuentran situados en un “pozo de potencial”:



Para arrancar un electrón de la superficie, éste debe absorber energía suficiente de la radiación incidente para superar la atracción de los iones positivos que lo mantienen ligado. La atracción produce una barrera de potencial que mantiene confinado al electrón en el interior.

Los electrones más débilmente ligados deben absorber **por lo menos una cantidad** de energía ϕ para ser liberados.

Teoría cuántica de Einstein del efecto fotoeléctrico

Cuando se emite un fotoelectrón desde la superficie del metal, la energía cinética máxima con la que salen del metal es

$$E_{C \text{ máx}} = hf - \phi \quad \text{Ecuación de Einstein}$$
$$= \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (\text{no relativista})$$

donde hf es la energía aportada por el fotón y ϕ es el trabajo necesario para arrancar a los electrones más débilmente ligados al metal en cuestión (**función trabajo**). Éste es el máximo valor posible porque algunos electrones pueden estar más fuertemente ligados o disipar algo de su energía en el proceso de salida. Esta ecuación es una forma de la conservación de la energía.

La función trabajo entonces interpreta la frecuencia de corte por debajo de la que no se produce el efecto fotoeléctrico sencillamente:

$$\phi = h f_0$$

La Ecuación de Einstein entonces puede escribirse como

$$E_{C \text{ máx}} = hf - hf_0$$

Análisis del efecto fotoeléctrico según Einstein

Consideremos cómo la Ecuación de Einstein permite interpretar los hechos experimentales.

1. Si aumentamos la intensidad de la luz incidente, no hacemos más que aumentar la cantidad de interacciones fotón – electrón ($f > f_0$)

$$N = IAt / (hf)$$

Número de fotones incidentes sobre un área A en un tiempo t dado

2. Dado que $E = eV$, de la Ecuación de Einstein puede recuperarse el potencial de frenado como función de la frecuencia

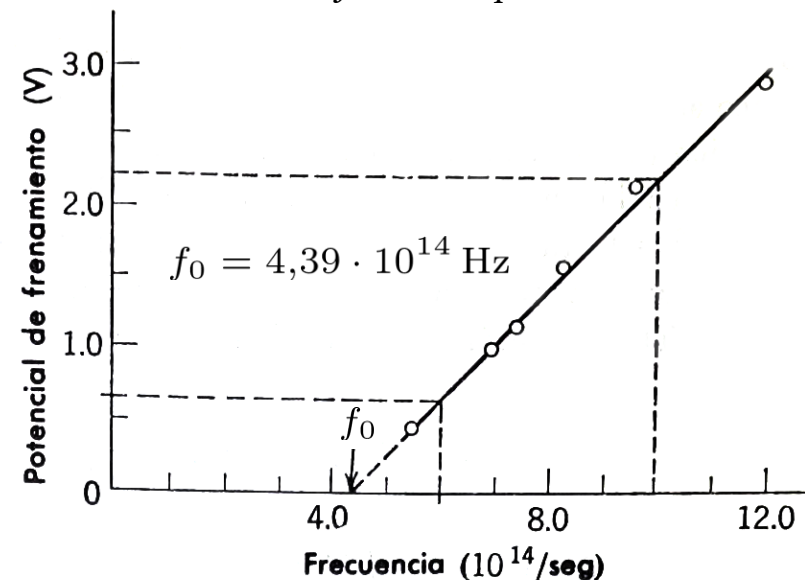
$$V_0 = \frac{h}{e}f - \frac{\phi}{e}$$

Esta relación predice que V_0 es función lineal de la frecuencia y con pendiente h/e . Después de que Millikan midió la carga del electrón en 1909, determinó el valor de la constante de Planck por estas mediciones.

$$1 \text{ eV} \equiv 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \equiv 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$$

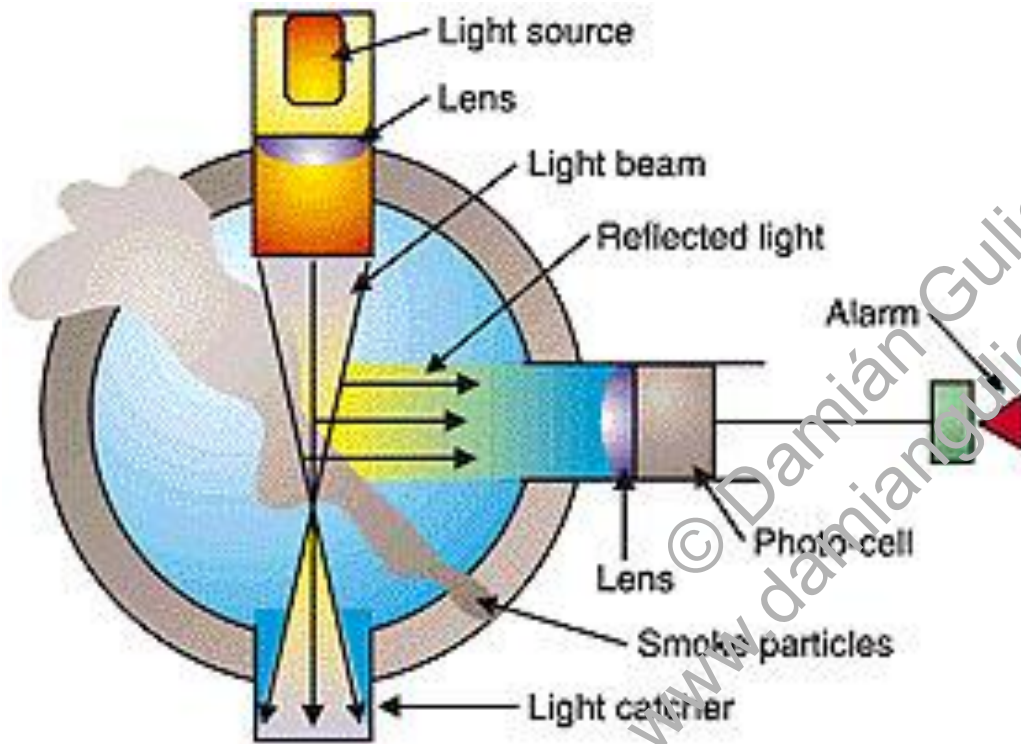
Gráfica de las medidas realizadas por Millikan para el potencial de frenado en función de la frecuencia para el caso del sodio.



8. 4.5 Algunas aplicaciones del efecto fotoeléctrico

© Damían Gulich
www.damiangulich.com.ar

Detectores de humo

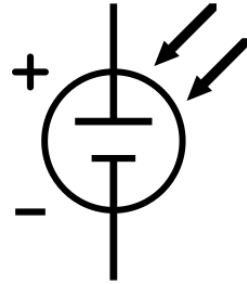


Es un dispositivo basado en el efecto fotoeléctrico.

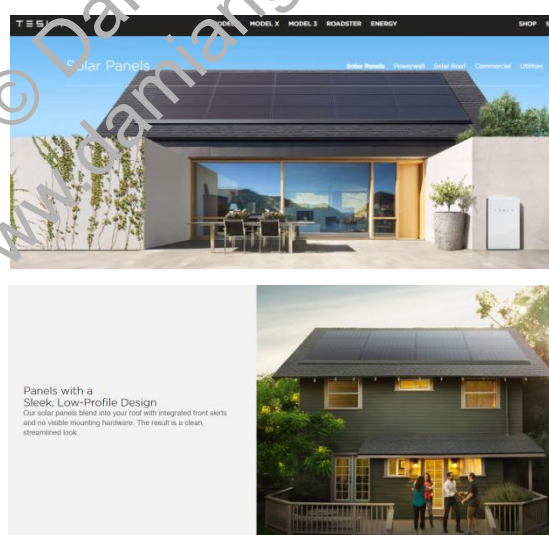
Un diodo emisor de luz (LED) emite un haz. Bajo condiciones libres de humo, el rayo de luz atraviesa en una línea recta sin interrupciones, no golpeando la fotocélula. La fotocélula, genera una corriente cuando se expone a la luz. Cuando hay humo, la luz es dispersada por las partículas de humo, y algo de la luz se dirige a la fotocélula y se dispara la alarma.

Celdas fotovoltaicas (paneles solares)

En un semiconductor expuesto a la luz, un fotón de energía arranca un electrón, creando a la vez un «hueco» en el átomo excitado. Normalmente, el electrón encuentra rápidamente otro hueco para volver a llenarlo, y la energía proporcionada por el fotón, por tanto, se disipa en forma de calor. El principio de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los «huecos» a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él: así, se producirá una diferencia de potencial y por lo tanto tensión entre las dos partes del material, como ocurre en una pila.



El récord de eficiencia, sin concentración solar, está actualmente establecido en el 45 %.



Parque fotovoltaico de 19 MW en Alemania.

Modelos hogareños de la empresa Tesla.

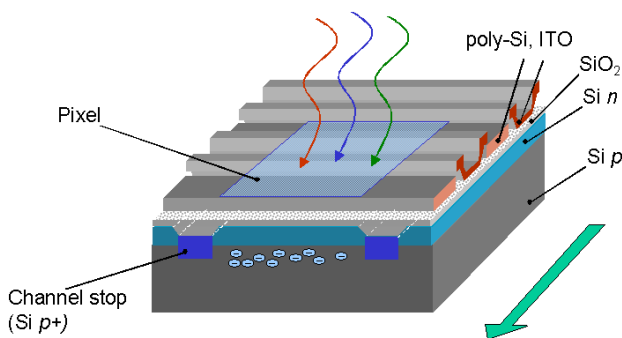
Argentina.

Cámaras digitales

Un dispositivo de carga acoplada (en inglés *charge-coupled device*, conocido también como CCD) es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados.

El término CCD es conocido popularmente como la designación de uno de los elementos principales de las cámaras fotográficas y de video digitales. En estas, el CCD es el sensor con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen. Desde allí la imagen es procesada por la cámara y registrada en la tarjeta de memoria.

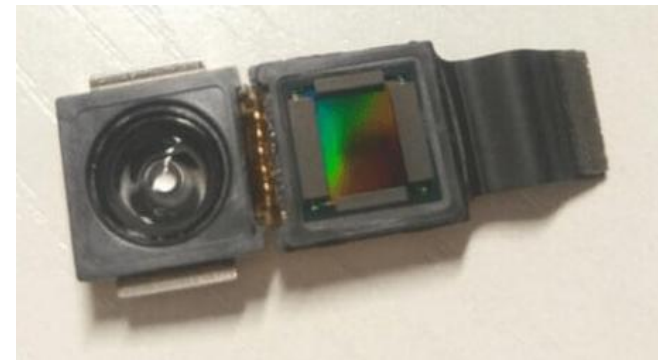
Los detectores CCD, al igual que las células fotovoltaicas, se basan en el efecto fotoeléctrico, la conversión espontánea de luz recibida en corriente eléctrica que ocurre en algunos materiales. El número de electrones producido es proporcional a la cantidad de luz recibida. Al final de la exposición los electrones producidos son transferidos de cada detector individual (fotosite). De este modo, el CCD se lee línea a línea, aunque existen numerosos diseños diferentes de detectores.



Versión simplificada en 3D de un sensor CCD.



Filtro de Bayer utilizado en numerosas cámaras digitales.



Cámara desmantelada de un iPhone 8.