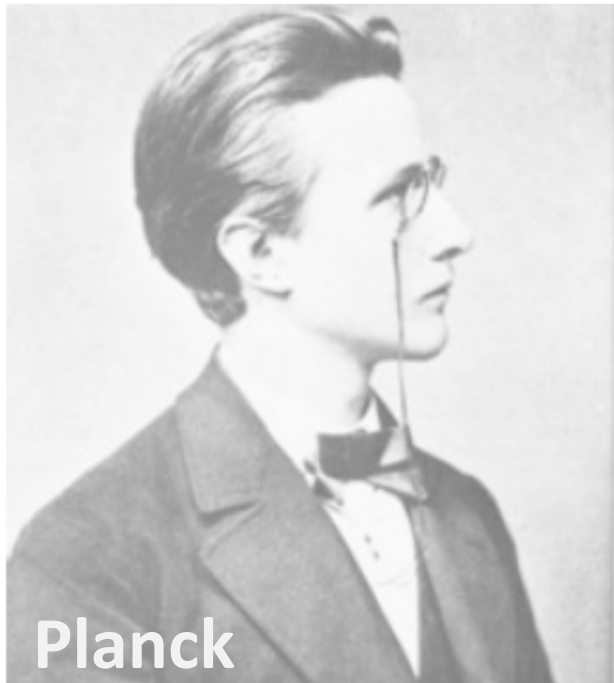


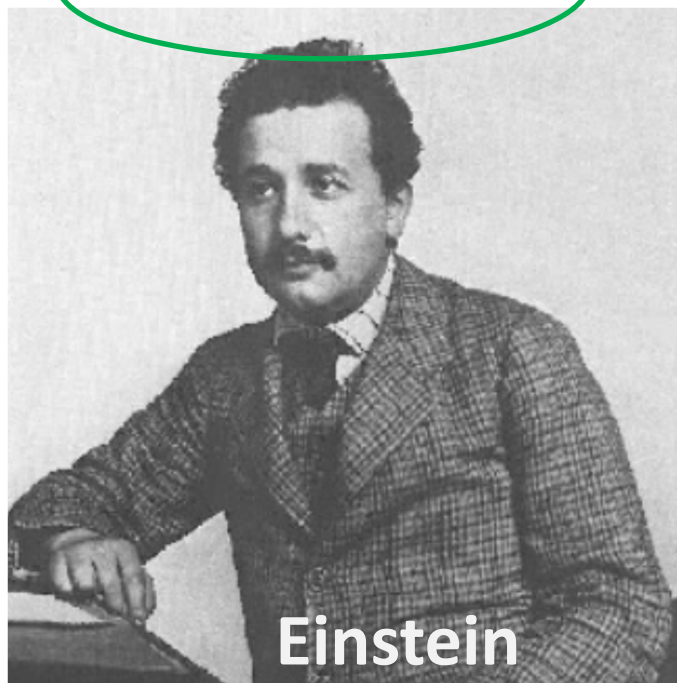
Problemas que conducen a la formación de la MC

La mecánica Cuántica se origina al estudiar distintos problemas relacionados a la **interacción de la luz con la materia**.

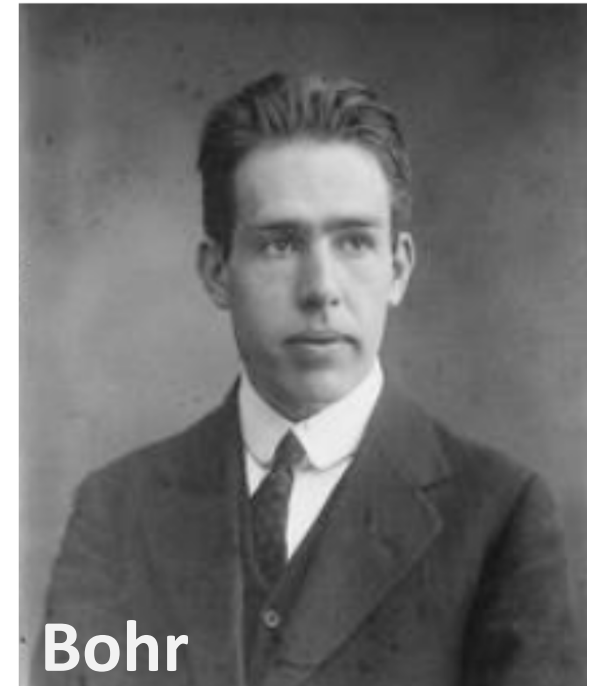
Radiación de Cuerpo Negro



Efecto fotoeléctrico

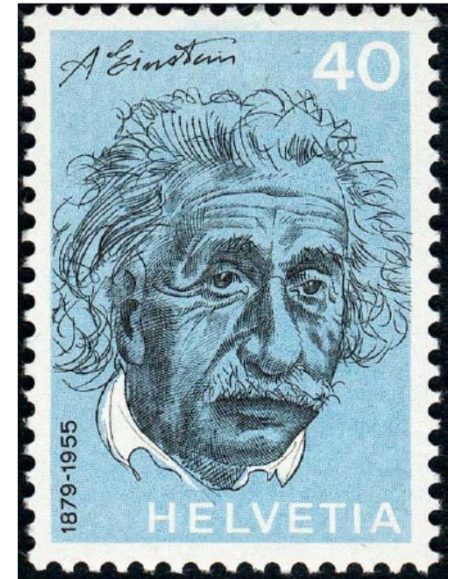


Espectro del Hidrógeno



Efecto fotoeléctrico

-Vimos que Planck introduce los cuantos de energía en su cálculo de osciladores.

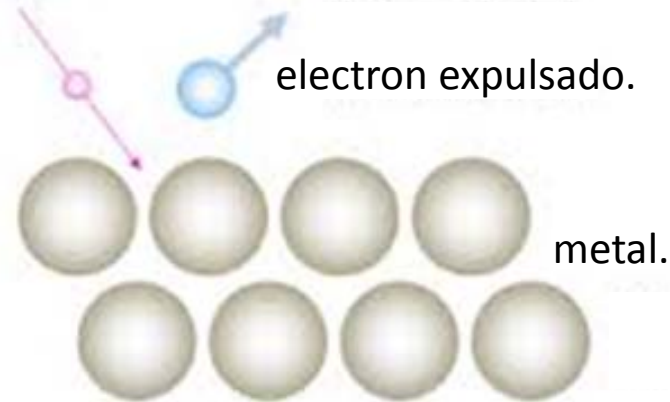


- Inicialmente Planck no toma demasiado en serio su cálculo y piensa que de alguna forma es un artificio matemático sin demasiada relevancia física.
- Además, hay que tener en cuenta que Planck pensaba que la cuantización de la energía estaba relacionada al intercambio de energía de los osciladores (no a la radiación en si).
- Va a ser Einstein en su explicación del efecto fotoeléctrico el que termina de mostrar la relevancia de los cuantos de energía. Einstein va a mostrar que esto es un propiedad intrínseca de la luz (la luz esta cuantizada, formada por partículas llamadas fotones).



- -Phillipp Lenard (1862-1947) hace incidir rayos catódicos (electrones) sobre foils de metales.
- -Luego comienza a hacer incidir luz sobre metales, y descubre que la luz expulsa electrones del metal.

luz incidente.

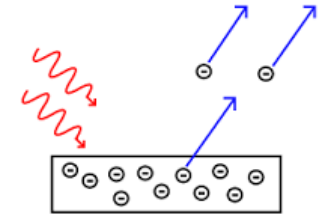


metal.

Efecto Fotoeléctrico

- El efecto fotoeléctrico fue clave para la comprensión de la naturaleza de la Luz. La explicación de Einstein no solo va a modificar la visión ondulatoria de la luz, sino que va a cambiar a la física en su conjunto.

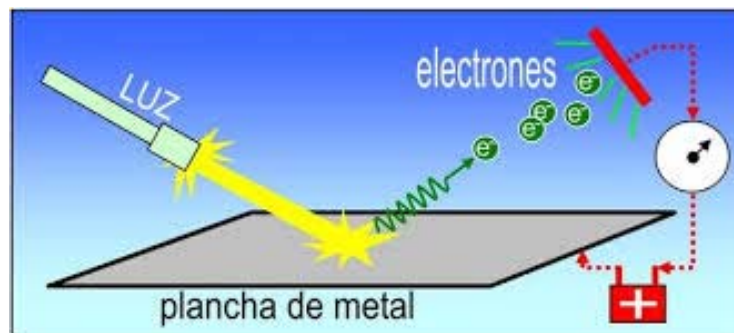
- El efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones cuando la luz choca contra una superficie.



- Para escapar de una superficie, el electrón debe absorber energía suficiente de la radiación incidente para superar la atracción de los iones positivos del material de la superficie.

- Esta atracción produce una barrera de energía potencial, que confina a los electrones al interior del material. Esta barrera se denomina **función trabajo**.

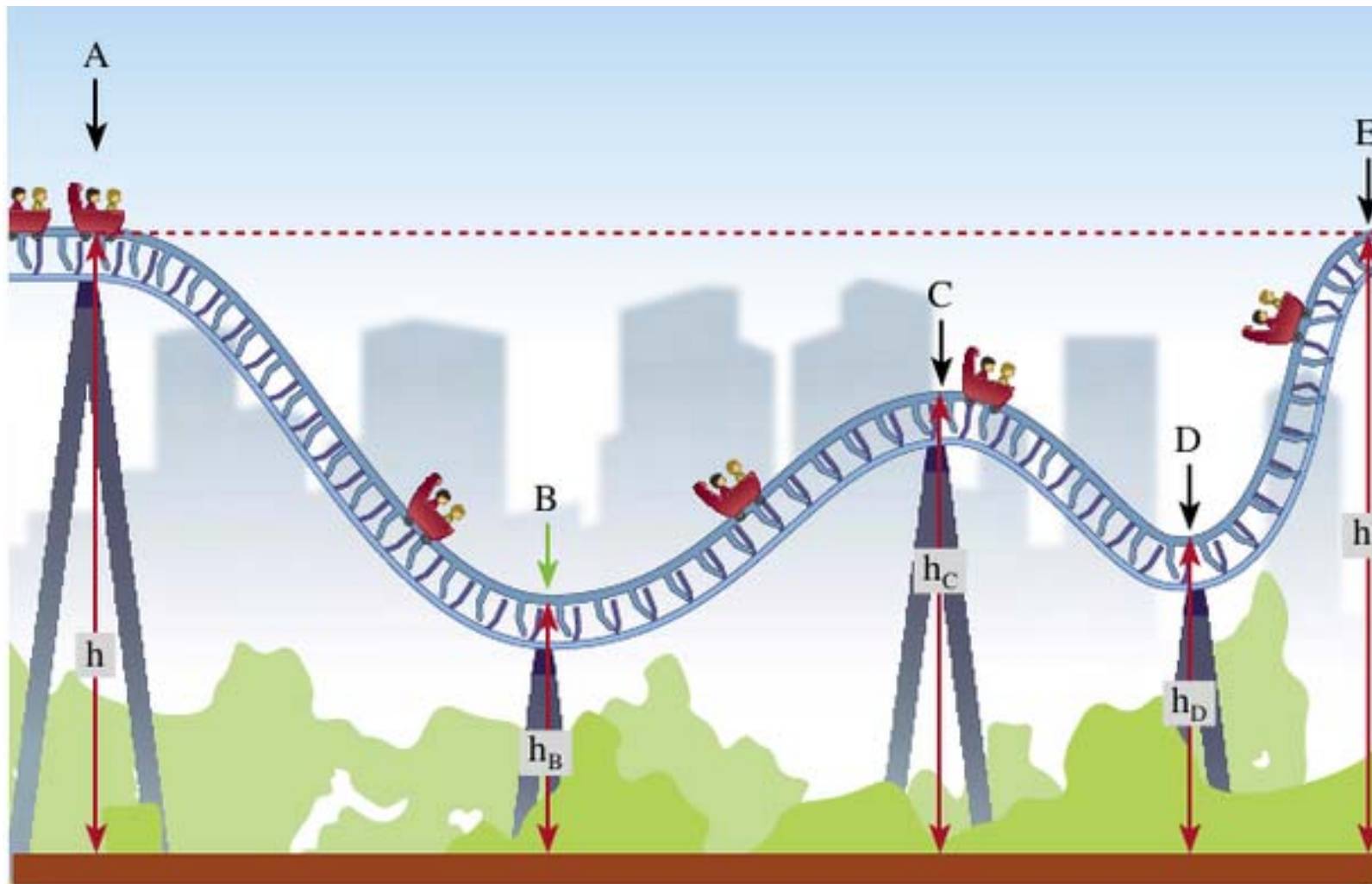
Dispositivo para estudiar el efecto fotoeléctrico



algunos visores nocturnos usan el efecto fotoeléctrico

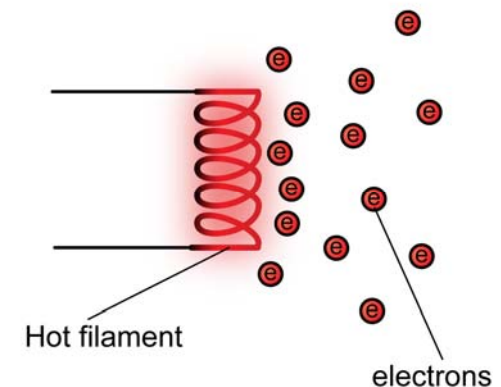
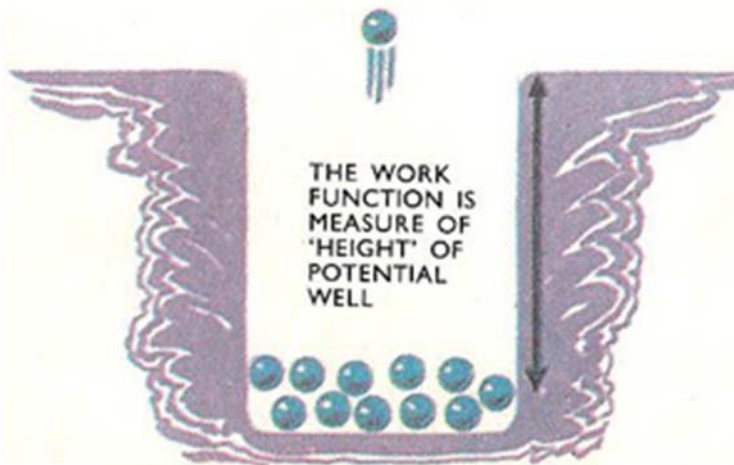
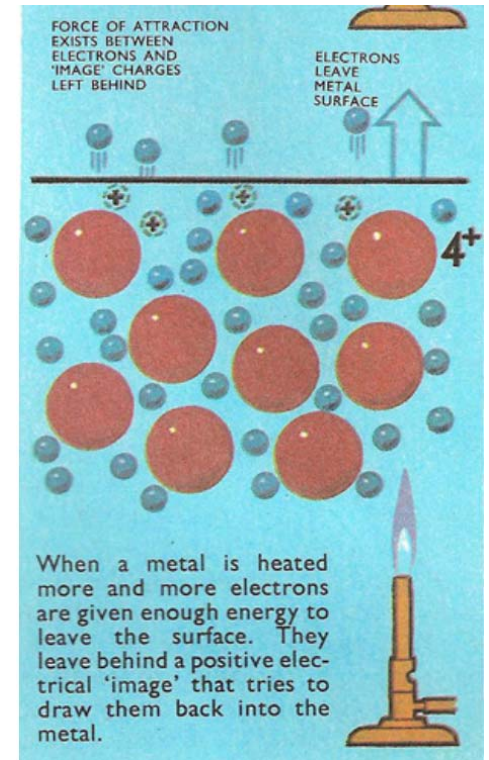


Recordemos el concepto de energía...



La función trabajo

- La función trabajo es la energía necesaria para expulsar un electro de un metal.
- Cuando hervimos agua las moléculas de agua dejan la superficie del líquido, para pasar a la fase gaseosa.
- Similarmente cuando calentamos un metal, algunos electrones pueden escapar del metal (termo-ionicidad). Esto se puede usar para generar un haz de electrones.
- Similarmente cuando calentamos un metal, algunos electrones pueden escapar del metal (termo-ionicidad). Esto se puede usar para generar un haz de electrones.
- Tanto las moléculas de agua como los electrones necesitan energía para poder dejar la superficie (que se puede ver como un potencial que confina a los electrones).



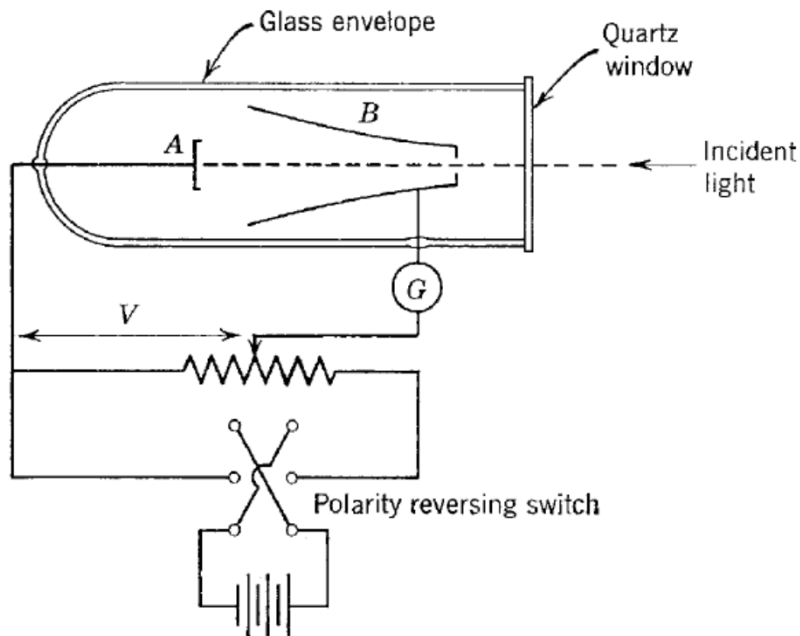
Características de Efecto Fotoeléctrico

- Aunque originariamente este efecto fue observado por Hertz (en 1887), Lenard fue el que lo estudió sistemáticamente (~1900).

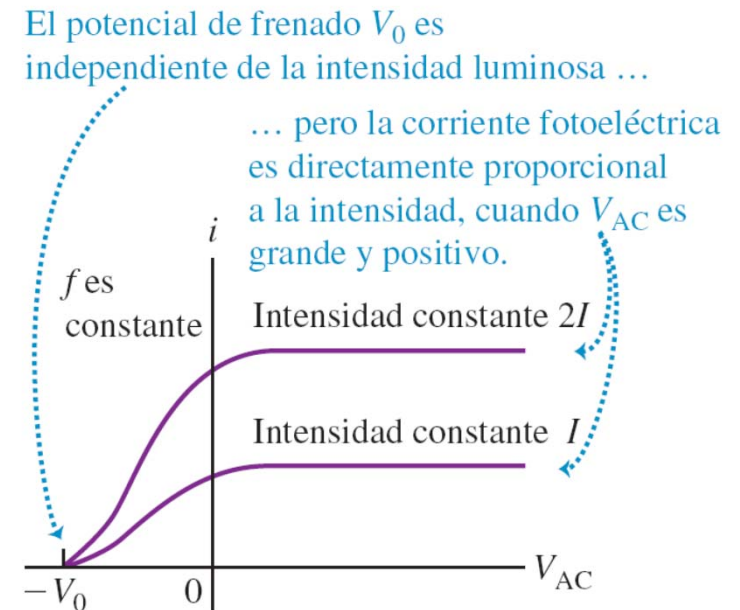
- La luz incide sobre el metal libera electrones. Gracias a una diferencia de potencial estos electrones forman una corriente que se puede medir con un galvanómetro.

- Entonces uno puede estudiar como es la corriente de electrones como función de la luz que incide (frecuencia e intensidad), metal, y potencial aplicado.

Dispositivo experimental



Típica curva experimental



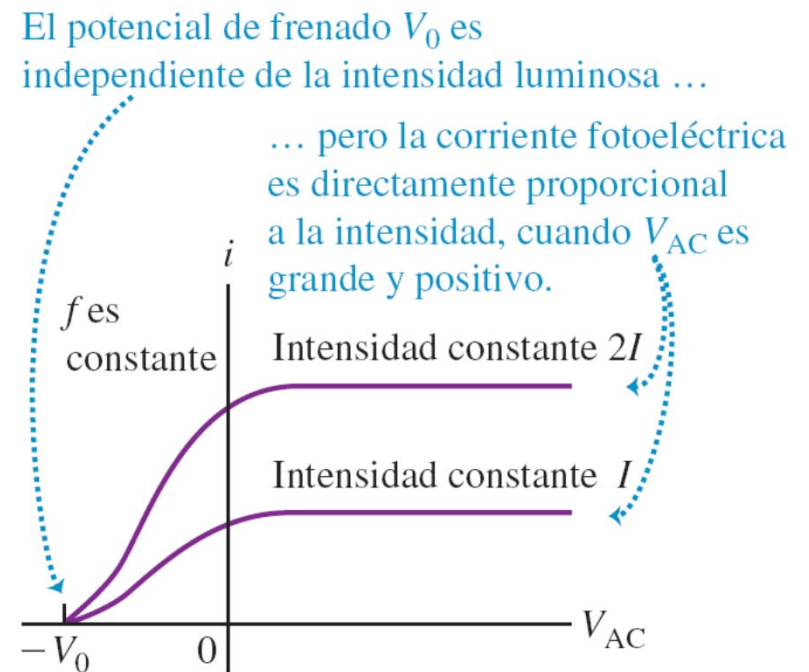
Algunas conclusiones del efecto fotoeléctrico

-1) Existe un **potencial de frenado** (hay que frenar a los electrones para que no lleguen al anodo).

- Este potencial revela que los electrones son disparados por la luz con cierta energía cinética :

$$W_{\text{tot}} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{\text{máx}}$$

$$K_{\text{máx}} = \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2 = eV_0$$



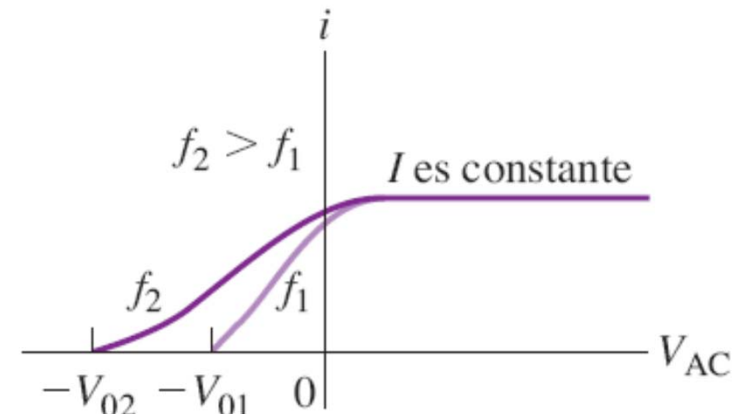
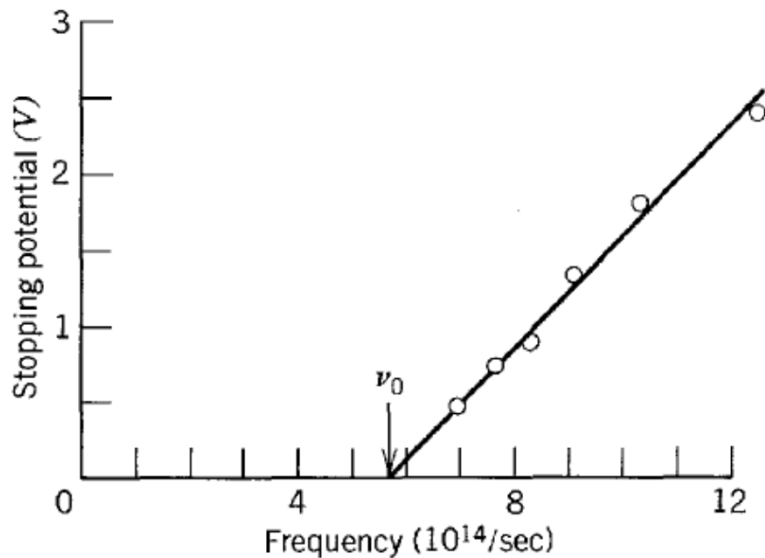
- La corriente fotoeléctrica depende de la intensidad de la luz (pero el potencial de frenado no depende de la intensidad de la luz!)

Algunas conclusiones del efecto fotoeléctrico

-2) El **potencial de frenado** sólo **depende** de la **frecuencia** de la luz, no de la intensidad!.

- Además existe una **frecuencia cutoff**, para la cual **la luz no arranca más electrones** del metal. Esta frecuencia depende del material (para los metales está en el ultravioleta).

- Esta frecuencia es independiente de la intensidad!



El potencial de frenado V_0 (y, en consecuencia, la energía cinética máxima de los fotoelectrones) aumenta en forma lineal con la frecuencia: ya que $f_2 > f_1, V_{02} > V_{01}$.

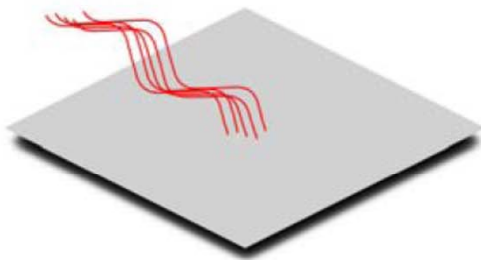
Problemas con la descripción clásica del efecto fotoeléctrico

- En la visión clásica, el campo eléctrico de la luz pone a oscilar los electrones del metal hasta que los logra arrancar del metal.

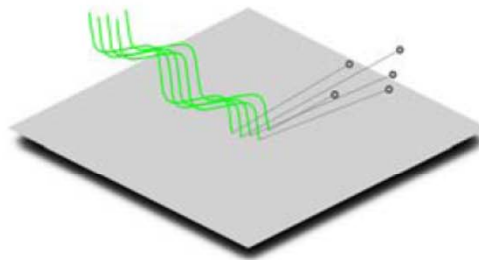
- Sin embargo la fuerza sobre un electrón es $F=-q.E$, con lo que al incrementar la intensidad de la luz se debería incrementar la fuerza sobre los electrones, arrancarlos más fácil, con lo que se incrementaría la corriente fotoeléctrica. Esto no es lo que se observa! La corriente solo depende de la frecuencia.

- Además, porque existe una frecuencia umbral, a partir de la cuál no se arrancan más electrones de la superficie del metal?

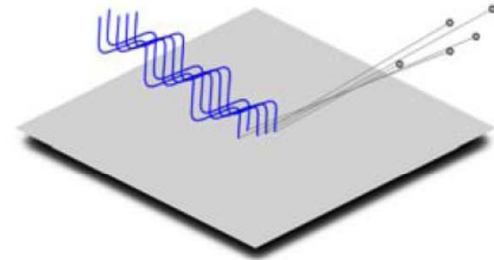
Results of a Typical Photoelectric Experiment



Red light does not eject photoelectrons (even if it is very bright).



Green light does eject photoelectrons (even if it is very dim).



Blue light ejects photoelectrons with more energy than green light (even if it is very dim).

Einstein in 1905



In 1905, Albert Einstein was 26 and was employed as 'technical expert third class' at the Swiss patent office in Bern. In that year, he published three papers, which are among the greatest classics of all physics. Any one of them would have ensured that his name remained a permanent fixture in scientific history. These papers are:

1. 'On the theory of Brownian motion'
2. 'On the electrodynamics of moving bodies'
3. 'On a heuristic viewpoint concerning the production and transformation of light'.

All three appeared in Volume 17 of the *Annalen der Physik* of 1905.

Y luego Einstein (1905)...

- Einstein propuso, siguiendo el trabajo reciente de Planck sobre la cuantización de la energía en el espectro del cuerpo negro, que la luz también está cuantizada.
- De esta forma, la luz está formada de pequeñas partículas llamadas **fotones**. El carácter ondulatorio de la luz sólo surge de considerar rayos con muchos fotones (concepción estadística del fenómeno ondulatorio).
- Siguiendo la cuantización de la energía de Planck, la energía de un fotón debería ser:

$$E = h\nu$$

- Además Einstein asumió que en el efecto fotoeléctrico el fotón es completamente absorbido por la superficie. Entonces la energía cinética de los electrones emitidos es:

Relación lineal entre el potencial de frenado y la frecuencia

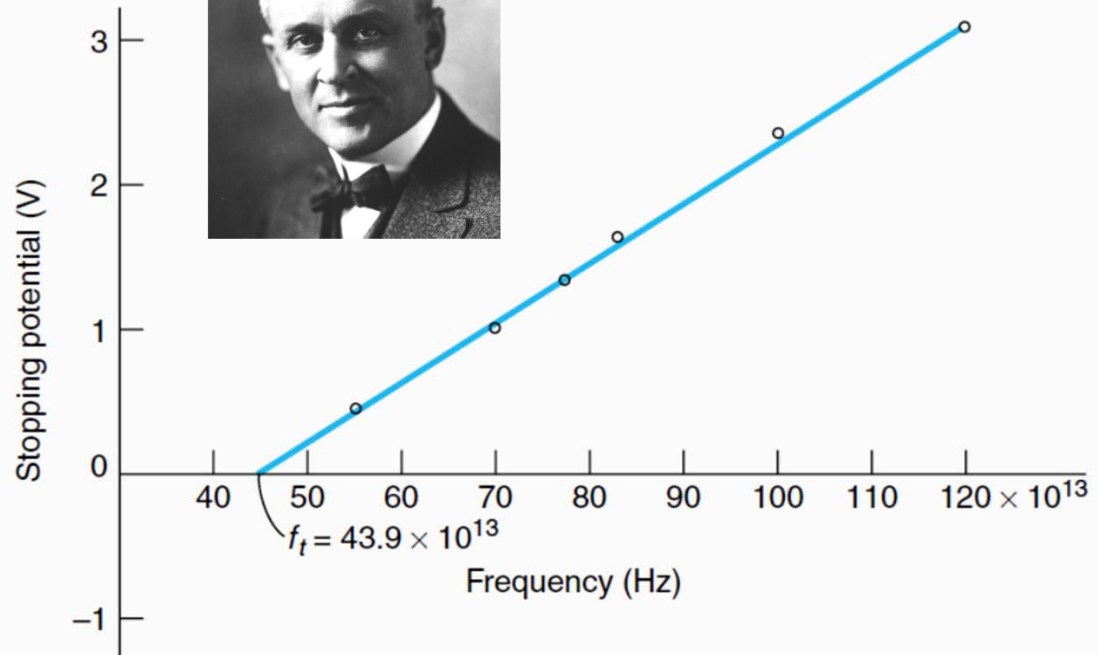
$$K = h\nu - w \quad \longrightarrow \quad K_{\max} = h\nu - w_0 \quad \longrightarrow$$

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

- Esto explica lo observado en el efecto fotoeléctrico, al doblar la intensidad dobla el número de fotones y la corriente fotoeléctrica (número de electrones arrancados), pero no cambia la energía. Además existe una frecuencia crítica a la cual el efecto desaparece.

Figure 3-10 Millikan's data for stopping potential versus frequency for the photoelectric effect. The data fall on a straight line with slope h/e , as predicted by Einstein a decade before the experiment. The intercept on the stopping potential axis is $-\phi/e$. [R. A. Millikan, *Physical Review*, 7, 362 (1915).]

When Millikan's Nobel Prize came to pass (1923), his Nobel address contained passages that showed his continuing struggle with the meaning of his own achievement: ***"This work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof...of the Einstein equation and the first direct photo-electric determination of Planck's h ."*** (Nobel prize for both precision measurements of elemental charge and h)



Millikan himself on a more informal occasion: ***"I spent ten years of my life testing that 1905 equation of Einstein's and contrary to all my expectations, I was compelled in 1915 to assert its unambiguous verification in spite of its unreasonableness since it seemed to violate everything we knew about the interference of light."***

Evidencia (final?) de que la luz son partículas: Scattering de Compton

Cuando se incide con luz (rayos X) sobre electrones, se observa que hay un corrimiento en la frecuencia de la luz dispersada. Además este corrimiento es proporcional al ángulo de dispersión. Esto no era esperado clásicamente. El resultado clásico, conocido como scattering Thompson, nos dice que un electrón en un campo electromagnético vibra a la misma frecuencia del campo y emitirá entonces radiación con la misma frecuencia.

