

Efecto fotoeléctrico

Jesus Diego Gomez Garnica, Marcos López Merino

Profesor: Alejandro Rosado Fuentes

25 de febrero de 2024

Resumen

Mediante el estudio del efecto fotoeléctrico se buscó estimar la constante de Planck h y la función de trabajo ϕ del antimonio de cesio (Cs_3Sb). Para ello, se caracterizó el espectro de emisión del mercurio identificando sus picos principales y se incidió la radiación correspondiente a cada una de estas longitudes de onda hacia un fototubo IP39, con la intención de determinar el potencial de frenado V_0 . Finalmente, a partir de la relación lineal entre el potencial de frenado V_0 y la frecuencia de la radiación incidente ν , dada por $V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\phi}{e}$, se intentó determinar los valores de h y ϕ . Sin embargo, los datos experimentales obtenidos para el potencial de frenado no permitieron obtener resultados precisos, lo que sugiere la presencia de errores significativos en la medición de las corrientes.

I. Introducción

El efecto fotoeléctrico ocurre cuando una superficie metálica es iluminada y se desprenden electrones, llamados fotoelectrones. Este fenómeno fue observado por primera vez por Heinrich Hertz en 1887 mientras realizaba experimentos sobre la radiación electromagnética.^[1] La fig. 1 muestra el arreglo experimental usado para estudiar el efecto fotoeléctrico. Un fototubo con dos electrodos conectados a una fuente de voltaje, donde la superficie en la que incide la luz es el photocátodo. Algunos de los fotoelectrones que se desprenden de la superficie metálica tiene suficiente energía para alcanzar el ánodo, generando una corriente eléctrica. ^[2] La máxima energía de los fotoelectrones puede medirse aplicando una diferencial de potencial ΔV entre el photocátodo y el ánodo que determina si los fotoelectrones alcanzan el ánodo o no. A medida que ΔV aumenta, incluso los electrones más energéticos no poseen la energía cinética suficiente para alcanzar el ánodo. El potencial con el que se reduce la corriente a cero se conoce como potencial retardador o de frenado V_0 y está relacionado con la energía cinética máxima de los fotoelectrones mediante la siguiente expresión^[1, 3],

$$K_{\max} = eV_0. \quad (1)$$

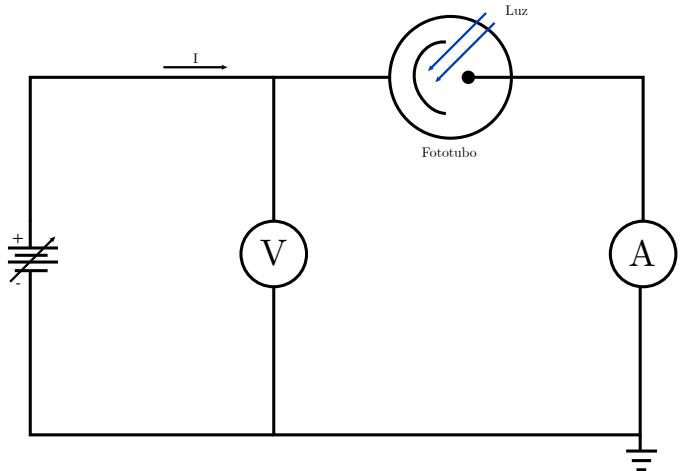


Figura 1. Circuito del arreglo experimental.^[4]

En 1905, Einstein propuso una explicación sobre la independencia del potencial de frenado de la intensidad de la luz, asumiendo que la cuantización usada por Planck era una característica universal de la luz. Es decir, la luz consiste de cuantos de luz, denominados fotones, cada uno con energía

$$E = h\nu, \quad (2)$$

donde h es una constante de proporcionalidad conocida como la constante de Planck, cuyo valor aceptado es de $6.626\,069\,6 \times 10^{-34}$ J s.

Cuando un fotón incide sobre la superficie del photocátodo, toda su energía es absorbida por un solo electrón. Si la energía necesaria para remover un electrón de la superficie metálica es ϕ , entonces la energía máxima de ese fotoelectrón es $h\nu - \phi$, esto como consecuencia de la conservación de la energía. Entonces, la ecuación del efecto fotoeléctrico es

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\phi}{e}, \quad (3)$$

donde la función de trabajo para el antimonio de cesio está en el rango de $\phi = 1.6 \text{ eV} - 1.8 \text{ eV}$ [5, 6].

II. Aplicación a la industria

El efecto fotoeléctrico es fundamental en la innovación de nuevas tecnologías, este posee aplicaciones en industrias clave. Por profundizar en una de ellas, los paneles solares [7] se convirtieron en una fuente alternativa de obtención de energía eléctrica, al estar compuestos por células fotovoltaicas, generalmente hechas de silicio, estas absorben fotones de la luz solar liberando un flujo de electrones que se canaliza a través de un circuito, produciendo energía utilizable. Gracias a este proceso, los paneles solares son una fuente limpia de electricidad, ampliamente utilizada en hogares, industrias y proyectos de energía a gran escala.

Sin embargo, no es la única utilidad, el efecto fotoeléctrico se puede encontrar en los sensores de luz en cámaras, sistemas de seguridad, lectores de código de barras o cosas mucho más especializadas, como foto multiplicadores para detectar radiación, instrumentos para estudiar espectros estelares o en medicina para las radiografías digitales, todas estas formas prácticas de utilizar este conocimiento, han hecho que su versatilidad además de su eficiencia lo conviertan en un pilar de la innovación industrial y científica.

III. Procedimiento experimental

Para la realización de la práctica se requiere de una fuente de luz de mercurio PASCO OS-9286A [8], un monocromador SPEX MINIMATE, un fototubo IP39, un multímetro Steren MUL-050 [9], una fuente de voltaje y un electrómetro

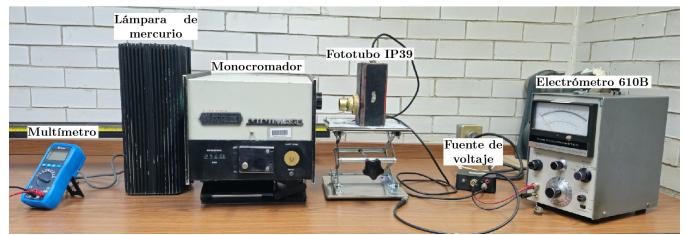


Figura 2. Montaje experimental para observar el efecto fotoeléctrico.

Keithley 610B [10] en un arreglo como se muestra en la fig. 2.

Como pasos preliminares se conectan por 30 min y 10 min el electrómetro y la fuente de mercurio, respectivamente. El primero para disminuir el desplazamiento de la aguja y el segundo para obtener el espectro de emisión del mercurio con la mayor intensidad.

III-A. Espectro de emisión del mercurio

Se realizó un barrido de las longitudes de onda, de 300 nm–800 nm con incrementos de 10 nm, manteniendo un voltaje constante de (4.00 ± 0.03) V. Para cada longitud de onda, se registró el valor de la corriente correspondiente. A partir de este espectro, se identifican las longitudes de onda con mayor intensidad, las cuales se utilizarán para determinar el potencial de frenado.

III-B. Voltaje de frenado

Para cada una de las longitudes de onda identificadas, (340 ± 5) nm, (440 ± 5) nm, (550 ± 5) nm y (580 ± 5) nm, se varió el voltaje en el rango de -5 V a 5 V , en pasos de 0.5 V , registrando las corrientes correspondientes. El valor del voltaje de frenado V_0 es el voltaje para el cual la corriente medida es cero.

Las datos de longitudes de onda y voltajes de frenado V_0 obtenidos serán utilizados para determinar la constante de Planck y la función de trabajo del metal.

IV. Resultados y análisis

IV-A. Espectro de emisión del mercurio

Una vez identificadas las longitudes de onda de las líneas espectrales más intensas obtenidas experimentalmente (fig. 3) se compararon con

las mostradas en el espectro de emisión que se incluye en el manual de la lámpara de mercurio, así como las registradas en [11], para determinar y elegir las longitudes de ondas adecuadas (fig. 4).

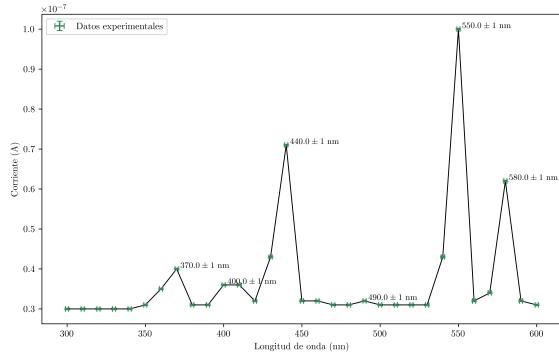


Figura 3. Espectro de emisión del mercurio obtenido experimentalmente con las incertidumbres correspondientes al monocromador y al electrómetro.

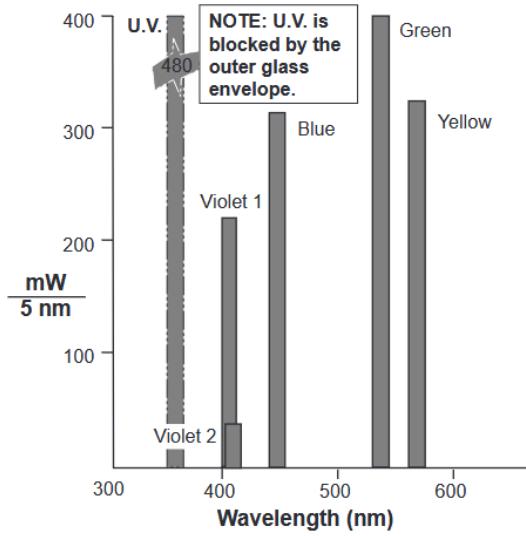


Figura 4. Espectro de emisión del mercurio mostrado en [8].

Posteriormente, se calcularon las frecuencias asociadas a partir de la relación entre la longitud de onda y la frecuencia, i.e.,

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (4)$$

con c la velocidad de la luz. Esto sera de gran ayuda para ajustar la gráfica a la recta esperada

IV-B. Voltaje de frenado

Para cada longitud de onda seleccionada, se midió la corriente en función del voltaje aplicado al fototubo dando por resultado la fig. 5.

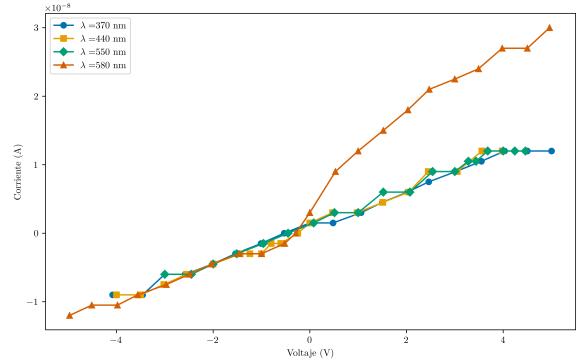


Figura 5. Corrientes obtenidas a partir de las longitudes de onda deseadas.

El comportamiento lineal de la corriente con el voltaje sugiere que la luz no incidía únicamente en el photocátodo. Esto puede deberse a una incorrecta alineación del monocromador con el fototubo o al ruido en las mediciones de las corrientes del electrómetro. El comportamiento para esta gráfica debería ser similar a una sigmoidal; sin embargo, se observa el comportamiento esperado por la ley de Ohm.

IV-C. Constante de Planck y función de trabajo

Una vez catalogados los potenciales de frenado, estos pasan por un proceso de ajuste por regresión de distancia ortogonal (ODR)[12] pues cada uno de los datos tiene un error asociado: al multímetro para el voltaje de frenado y a la propagación de incertidumbres para la frecuencia. Los resultados se muestran en la fig. 6.

A partir de este ajuste se puede estimar la constante de Planck y la función de trabajo del metal, como se segmenta de la ec. (3) sabemos que la pendiente de la recta corresponde a h/e y su ordenada al origen a ϕ/e , respectivamente. De esta manera, $h = (7.279 \pm 8.608) \times 10^{-35} \text{ J s}$ y $\phi = (1.178 \pm 5.539) \times 10^{-20} \text{ eV}$, los cuales fueron comparados con sus respectivos valores teóricos a través de la siguiente expresión,

$$\delta = \left| \frac{v_A - v_E}{v_E} \right| \cdot 100 \%, \quad (5)$$

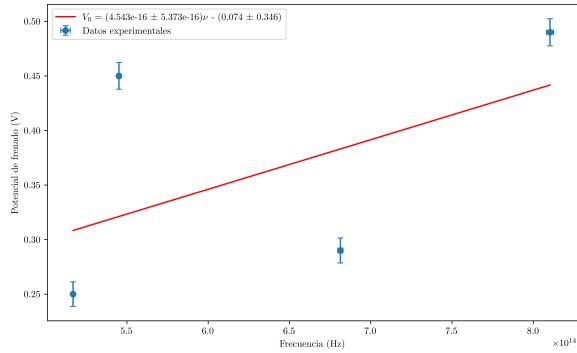


Figura 6. Gráfica de los datos obtenidos experimentalmente de V_0 vs ν , así como la gráfica que resulta del ajuste por ODR de estos.

donde v_A es valor experimental observado, v_E es el valor teórico y δ el error porcentual. El error porcentual obtenido para la constante de Planck fue de 89 % respecto al valor teórico. Esta diferencia sugiere la presencia de errores, como una incorrecta selección de las longitudes de onda o imprecisiones en la medición de las corrientes. Por otro lado, el valor experimental obtenido para la función de trabajo ϕ no se encuentra dentro del rango esperado 1.6 eV–1.8 eV según la literatura [5, 6], lo que refuerza los posibles errores mencionados más arriba.

V. Conclusiones

El efecto fotoeléctrico es una demostración clásica de la física cuántica que permite estimar la constante de Planck y la función de trabajo asociado a los conductores eléctricos.

Este experimento representa un reto en su instrumentación. La importancia de tener una certera precisión de las frecuencias y su una correcta alineación de la luz incidente sobre el fototubo IP39 es indispensable para obtener el voltaje de frenado, fundamental para medir la constante de Planck. Así como un mayor conocimiento sobre el funcionamiento preciso del electrómetro para cerciorarse que las medidas de corriente sean las adecuadas.

Las mediciones tomadas de parte del experimento representan un error considerable respecto al valor de la constante de Planck el cual se buscaba precisar, esto puede deberse a la inexactitud en la que la longitud de onda aislada de la

fuente de luz de mercurio no incidiera únicamente en el cátodo del fototubo, lo que provocó no poder medir con precisión el potencial de frenado para cada frecuencia y por ende aumentar error porcentual respecto al valor teórico buscado.

Referencias

- [1] K. S. Krane, *Modern Physics*. John Wiley & Sons, 18 de jun. de 2019, 592 págs., isbn: 978-1-119-49555-0.
- [2] P. A. Tipler y R. Llewellyn, *Modern Physics*. W. H. Freeman, 1 de ene. de 2012, 700 págs., Google-Books-ID: 221tzwEA-CAAJ, isbn: 978-1-4292-5078-8.
- [3] A. Beiser, *Concepts of Modern Physics*. McGraw-Hill, 2003, 564 págs., Google-Books-ID: VgApAQAAQAAJ, isbn: 978-0-07-115096-5.
- [4] C. del Laboratorio de Física Moderna, *Efecto fotoeléctrico*, Facultad de Ciencias, UNAM.
- [5] T. Sakata, «Studies on. the Cs3Sb Photo-Cathode,» *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 8, n.º 6, págs. 723-730, 15 de nov. de 1953, Publisher: The Physical Society of Japan, issn: 0031-9015. doi: 10.1143/JPSJ.8.723. visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://journals.jps.jp/doi/10.1143/JPSJ.8.723>.
- [6] H. J. Caulfield y R. A. Chapman, «Cesium—Antimony Films in Equilibrium with Cesium Vapor,» *Journal of Applied Physics*, vol. 37, n.º 13, págs. 4927-4935, 1 de dic. de 1966, issn: 0021-8979. doi: 10.1063/1.1708167. visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://doi.org/10.1063/1.1708167>.
- [7] M. D. Cabezas-Maslanczuk, J. I. Franco-Brazes y H. J. Fasoli-Tolosa, «Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica,» Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa, Departamento de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables, Argentina, vol. 19, n.º 6, págs. 723-730, 2018, Publisher: Scielo, issn: 0031-9015. doi: <https://doi.org/10.22201/fi.19.6.22201>.

- 25940732e.2018.19n2.018. visitado 22 de feb. de 2025. dirección: https://www.scielo.org/scielo.php?pid=S1405-77432018000200209&script=sci_arttext.
- [8] P. Scientific, Instruction Sheet for the PAS-CO Model OS-9286A: Mercury Vapor Light Source. visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://www.famaf.unc.edu.ar/~pury/famaf.gui/modern1/pasco/os9286a.pdf>.
- [9] Steren. «Steren MUL-050 Manual del usuario,» Steren MUL-050 Manual Del Usuario, visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://www.manualslib.es/manual/432141/Steren-Mul-050.html>.
- [10] K. Instruments. «Keithley 610B,» visitado 22 de feb. de 2025. dirección: https://w140.com/tekwiki/wiki/Keithley_610B.
- [11] AtomTrace. «Mercury Spectra,» Element Mercury |AtomTrace, visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://www.atomtrace.com/elements-database/element/80#AtomTrace>.
- [12] F. Mastrandrea, L. Diaz y D. Brutti, «Error en ambas variables: Ajuste por regresión de distancia ortogonal (ODR),» dirección: <https://materias.df.uba.ar/l4a2024c1/files/2024/05/Charla-Labo-4.pdf>.
- [13] D. W. Boys, M. E. Cox y W. Mykolajenko, «Photoelectric effect revisited (or an inexpensive device to determine h/e),» American Journal of Physics, vol. 46, n.º 2, págs. 133-135, 1 de feb. de 1978, issn: 0002-9505. doi: 10.1119/1.11371. visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://doi.org/10.1119/1.11371>.
- [14] J. Martinez-Perdigero, «On a Common Mistake in the Description of the Photoelectric Effect,» The Physics Teacher, vol. 57, n.º 8, págs. 536-537, 1 de nov. de 2019, issn: 0031-921X. doi: 10.1119/1.5131119. visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://doi.org/10.1119/1.5131119>.
- [15] Steren, Multímetro Digital. Manual de Instrucciones: MUL-282. dirección: <https://descargas.steren.com.mx/MUL-282-instr.pdf>.
- [16] M. Rodriguez Meza y J. Cervantes-Cota. «El efecto fotoeléctrico,» El efecto fotoeléctrico| Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, visitado 22 de feb. de 2025. dirección: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10413309>.