

# DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CONSTANTE DE PLANCK Y FUNCIÓN TRABAJO PARA UNA ALEACIÓN PLATINO-RODIO

Caamaño Bresba Facundo Manuel, Pironio Bernardo, Mastantuono Tomás

*facu.caam.bresba@gmail.com, bpironio@gmail.com, tomastantuono.uba@gmail.com*

Laboratorio 5, 2<sup>do</sup> Cuatrimestre 2025  
Departamento de Física, FCEyN, UBA

## Resumen

En el presente informe se busca estimar experimentalmente, a partir del efecto fotoeléctrico, la constante de Planck y la función trabajo característica de una aleación de platino-rodio. Para la constante de Planck, se realiza un barrido de voltaje para ciertas longitudes de onda de las cuales se obtiene un voltaje de frenado  $V_0$ ; con estos voltajes, se realiza un ajuste lineal de la ecuación característica del efecto, obteniendo un valor de  $h = (3,33 \pm 0,25)10^{-24}$  Js. Para estimar la función trabajo, se realiza un barrido de frecuencias con un potencial fijo. En los resultados no se logró observar una frecuencia de corte, por lo que se tomó un rango acotado y se obtuvo una función trabajo con un valor de  $\phi = (13,92 \pm 1,07)10^{-20}$  J. Además, se observaron dos picos de intensidad en la corriente, correspondientes a dos frecuencias de máximo efecto.

## 1. Introducción

La luz es capaz de descargar cátodos de ciertos materiales, produciendo rayos catódicos. El primero de estos fenómenos fue observado por H. Hertz en 1887. Su experimento consistió en un electroscoPIO de lámina de oro al que se hace incidir una luz altamente energética, y la primera explicación teórica del fenómeno fue dada en 1905 por A. Einstein, vinculando la energía cinética de los electrones liberados por el material del cátodo con la frecuencia de la luz incidente, teniendo como constante de proporcionalidad a la constante de Planck y considerando el trabajo necesario para extraer electrones del material. En 1916, R.A. Millikan logró estimar con alta precisión el valor de la constante de Planck, utilizando un sistema de tubos cuyo interior (en vacío) poseía las distintas muestras de materiales fotosensibles a ser incididos con luz.

El objetivo del presente informe es revisar este fenómeno utilizando materiales modernos y el marco teórico desarrollado por Einstein en 1905 para estimar la constante de Planck y la función trabajo característica de una aleación Platino-Rodio, basándose en los experimentos llevados a

cabo por Hertz y Millikan.

## 2. Modelado teórico

Al incidir la luz sobre una capa del material del cátodo, parte de la energía se convierte en energía cinética de los electrones. A su vez, un electrón que obtuvo energía cinética dentro del cátodo habrá perdido parte de esa energía al alcanzar la superficie del material. Se asume que cada electrón debe realizar un trabajo  $\phi$ , característico del material, para escapar del mismo. Para un cierto ángulo, los electrones excitados abandonarán el material con velocidad normal máxima. Su energía cinética será entonces  $h\nu - \phi$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia de la luz incidente. Si además el material se carga con el potencial máximo  $V_0$  (el *potencial de frenado*) que evite la pérdida de electrones del mismo, se tendrá

$$eV_0 = h\nu - \phi, \quad (1)$$

donde  $e$  es la carga del electrón. Esta ecuación puede utilizarse para obtener  $h$  como la pendiente de la recta formada por  $V_0(\nu)$ , y en principio para determinar  $\phi$ . En la práctica, sin embargo, la determinación de  $\phi$  se dificulta al considerar que  $V_0$

es en realidad suma del potencial entre el cátodo y el ánodo y un potencial de contacto. El desconocimiento de este factor agregado impide la obtención de  $\phi$ , pero no altera la pendiente de la recta, por lo que aún puede obtenerse  $h$  [1].

Existe una frecuencia,  $\nu_{min}$ , tal que la energía del fotón es justo la necesaria para arrancar un electrón del material, la energía cinética con la que el mismo saldrá será nula, por lo que se tiene la relación

$$h\nu_{min} = \phi \quad (2)$$

de la cual puede determinarse  $\phi$ , siendo que se conoce el valor de  $\nu_{min}$  [2]. Para experimentos análogos al realizado por Millikan, se sabe que la función trabajo  $\phi$  corresponde al ánodo en lugar de al cátodo, por lo que al medir se estaría obteniendo el trabajo necesario para transferir electrones al exterior del primer material, en lugar del segundo[3].

### 3. Desarrollo experimental

Para el montaje se utilizó un fototubo LEYBOLD conteniendo tanto al ánodo como al cátodo. El fototubo se encuentra recubierto de una carcaza[4], que cumple el rol de impedir la incidencia de luz externa al experimento sobre el material fotosensible, y presenta un orificio frente al cual se montó un diodo emisor (LED). El cátodo está conformado por potasio, con una cubierta de platino oxidado, y el ánodo por una aleación de platino y rodio [5]. La carcaza también cuenta con una salida y una entrada, mediante la cual puede introducirse una diferencia de potencial entre ánodo y cátodo.

El diodo LED produce luz blanca, por lo que se lo hizo pasar por un monocromador Kurios con el objetivo de poder elegir una longitud de onda específica. El led se alimenta mediante un generador de ondas Tektronix AFG3021B, que al mismo tiempo funciona como referencia del amplificador Lock-In SR830, que fue el utilizado para medir la corriente de salida (sobre el ánodo). El generador fue configurado para alimentar al diodo con una señal sinusoidal de 1KHz de frecuencia con amplitud mínima de 1,2V y máxima de 5V (ver Fig. 1).

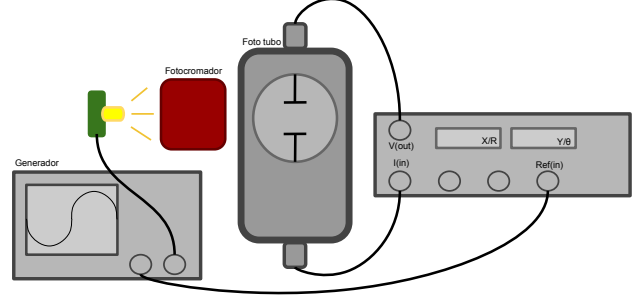


Figura 1: Esquema experimental. El generador de funciones alimenta el diodo LED y brinda la referencia al amplificador Lock-In, que genera una diferencia de potencial  $V_0$  en el fototubo y registra la corriente  $I$  sobre el ánodo. La luz blanca del diodo se hace pasar por un monocromador capaz de filtrarla, resultando en un haz monocromático. El dibujo del ánodo y cátodo es meramente esquemático, realmente estos tienen forma de anillo y disco respectivamente.

## 4. Resultados y discusiones

A fin de estimar los valores de  $h$  y  $\phi$ , se llevaron a cabo dos esquemas de medición: en el primero, se obtiene el valor de  $V_0$  correspondiente a distintos valores de  $\nu$ , a partir de un barrido de valores de corriente sobre el ánodo en función del voltaje aplicado en el fototubo, y se obtiene  $h$  a partir de un ajuste lineal, siguiendo la ecuación 1. En el segundo, se obtiene  $\nu_{min}$ , a partir de un barrido de valores de la corriente sobre el ánodo en función de la frecuencia de la luz incidente, y se despeja  $\phi$  de la ecuación 2.

### 4.1. Obtención de $h$

El principio en que se basa el esquema de medición para la obtención de  $h$  es que, si  $V_0$  es la diferencia de potencial máxima para la cual no se pueden extraer electrones del material, entonces puede hallarse como aquel punto donde comience a registrarse corriente sobre el ánodo. Para esto se tomaron distintas longitudes de onda, y para cada una se realizó un barrido de voltaje aplicado al fototubo ( $V$ ) desde  $-1,5V$  hasta  $1V$ , dividido en 200 pasos. El monocromador permite obtener luz monocromática a partir del diodo con un rango de  $420nm$  a  $730nm$  de longitud de onda, por lo que se utilizaron 12 longitudes de onda equiespaciadas desde  $420nm$  a  $720nm$  y se agregó una medición a  $730nm$ , para abarcar todo el espectro disponible, tomando como error  $0,5 nm$  por ser la mitad de la mínima resolución posible. Se midió la corriente

correspondiente a cada valor (ver Fig. 2). Se utilizó ese rango a partir de la observación de que en un rango entre  $-0,6\text{V}$  y  $0\text{V}$  comenzaba a detectarse corriente en el ánodo. Como configuración del Lock-In para estas mediciones se utilizó un tiempo de integración de  $30\text{ms}$ , con una sensibilidad de  $5\text{nA}$  hasta los  $620\text{nm}$ , y  $300\text{ms}$  de tiempo de integración y  $500\mu\text{A}$  de sensibilidad.

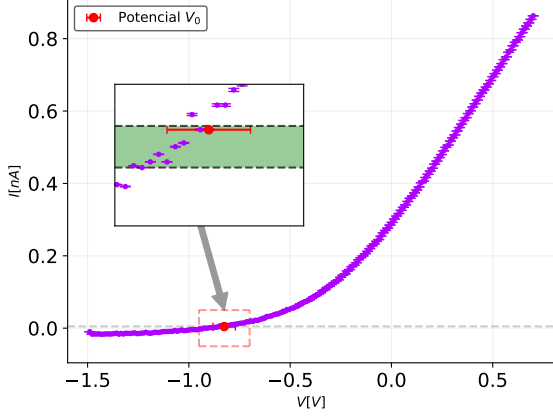


Figura 2: Barrido de voltajes para  $\lambda = 420\text{nm}$ . En la figura se muestra la medición de corriente  $I$  en nA en función del voltaje  $V$  en V aplicado en el fototubo. Además, se encuentra recuadrada en rojo la región en la cual aplicamos el criterio de selección para  $V_0$ .

Como se muestra en la Figura, para seleccionar el potencial máximo  $V_0$  se utilizó como criterio colocar una cota mínima y máxima para la intensidad de corriente  $I$ , y entre todos los valores de tensiones que cumplieran esta condición se tomó el de mayor valor, y como error cinco veces el promedio de las distancias laterales. Este criterio fue tomado debido a que en las mediciones no se muestra ningún cambio abrupto en la corriente a partir de algún  $V_0$ , sino más bien un cambio suave y continuo, esto puede deberse a factores externos del sistema estudiado como los cables utilizados o el desgaste del material o instrumentos (ver las otras mediciones en Apéndice 6.1).

Con los  $V_0$  obtenidos para cada longitud de onda, se realizó un ajuste lineal según 1 (ver Fig. 3) a los datos obtenidos de  $eV_0$ , en función de la frecuencia  $\nu$  correspondiente a cada longitud de onda del diodo LED. Del ajuste obtuvimos como estimación para la constante de Planck  $h = (3,33 \pm 0,25)10^{-24} \text{ Js}$ , con un valor de  $p_{value} = 0,48$  que indica la probabilidad de haber obtenido un  $\chi^2 = 12$  o mayor.

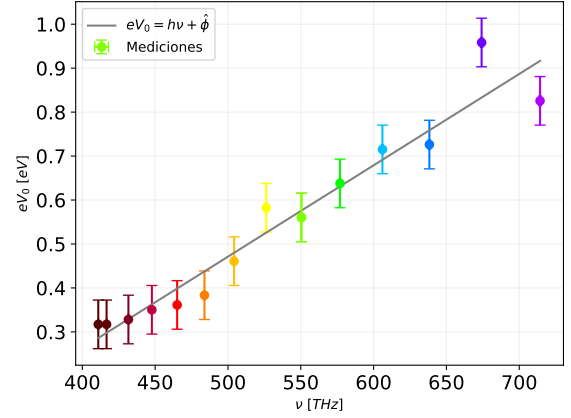


Figura 3: Ajuste por función lineal a la energía en función de la frecuencia. Se muestra la energía expresada como  $eV_0[\text{eV}]$  en función de la frecuencia  $\nu[\text{THz}]$  ajustados según 1.

## 4.2. Obtención de $\phi$

Para medir  $\phi$ , se realizó un barrido en la frecuencia de la luz incidente a un potencial fijo, desde  $\frac{c}{730\text{nm}}$  a  $\frac{c}{420\text{nm}}$ , con un paso de  $1\text{nm}$  en el barrido sobre la longitud de onda, y se midió la corriente correspondiente a cada valor (ver Fig. 4). El potencial  $V$  fijo, según el modelo, es arbitrario siempre y cuando se cumpla que  $V \geq V_0$ , para que pueda producirse el efecto. Se utilizó entonces un potencial de  $1\text{V}$ . Se configuró el Lock-In con un tiempo de integración de  $300\text{ms}$  y una sensibilidad de  $10\text{nA}$ .

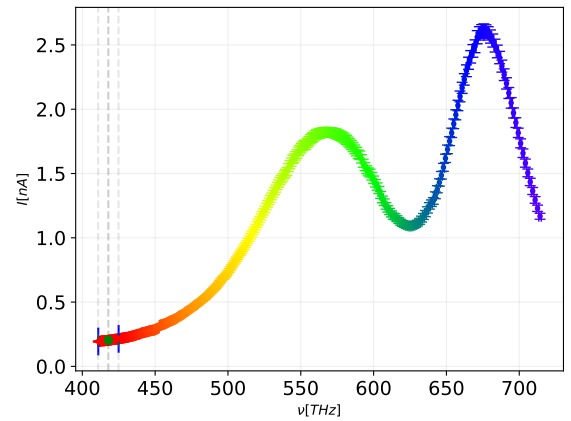


Figura 4: Barrido de frecuencia  $\nu$  del diodo LED para voltaje fijo. Se muestra la corriente  $I$  en nA en función de la frecuencia  $\nu$  en THz emitida por el diodo LED. La línea azul marca el criterio utilizado para estimar la frecuencia  $\nu_{min}$ , junto con sus barras de error. Además se observan dos regiones donde la corriente toma valores máximos para ciertas frecuencias.

Como se muestra en la Figura, para la frecuencias mas bajas se encontró un rango de valores de corriente  $I$  candidatos a  $\nu_{min}$ , se decidió tomar un valor promedio entre este rango de frecuencias y como error la mayor distancia entre dos puntos. De esta forma se logró hacer una estimación utilizando 2, donde se obtuvo la estimación para el potencial trabajo  $\phi = (13,92 \pm 1,07)10^{-20}$  J (ver propagación de errores en Apéndice 6.2).

## 5. Conclusiones

Finalizadas las mediciones de barrido de voltaje para cada longitud de onda, se observó que ninguna de las mediciones mostraba la forma predicha por el modelo (voltaje nulo seguido de una función lineal), sino que la dependencia funcional de la corriente mostraba una curva más suave. Se estima que estas desviaciones del modelo surgen de factores del material e instrumentos, al estar posiblemente desgastados por el uso, o por los cables utilizados.

Utilizando 1 y los valores estimados de  $V_0$  se

realizó un ajuste lineal, cuya pendiente es proporcional a la constante de Planck, por lo que se la estimó con un valor de  $h = (3,33 \pm 0,25)10^{-24}$  Js. Utilizando el test de hipótesis chi cuadrado, obtuvimos un  $\chi^2_\nu = 12$  y un  $p_{value} = 0,48$ . Con el  $p_{value}$  obtenido se decidió no descartar la hipótesis ya que la probabilidad de obtener el  $\chi^2$  calculado o uno mayor es aproximadamente del 50 %.

En las mediciones sobre voltaje aplicado al fototubo fijo, y variando la frecuencia de la luz emitida por el diodo LED, logramos obtener la distribución para la corriente en función de la frecuencia de la luz, en la cual se observaron dos máximos locales para dos frecuencias específicas. Además, con el rango al cual podía llegar el monocromador no se logró observar ninguna frecuencia de corte con la cual la corriente medida sea realmente nula. Como consecuencia de esto, decidimos tomar un rango de frecuencias acotado entre 400nm y 425nm, de forma tal que de este rango obtuvimos un valor medio y de error la distancia promedio entre el  $\nu_{min}$  y las cotas en las frecuencias. Utilizando 2 estimamos que  $\phi = (13,92 \pm 1,07)10^{-20}$  J.

## 6. Apéndice

### 6.1. Barrido de voltaje para cada longitud de onda

Para cada longitud de onda perteneciente al diodo LED se realizó un barrido de voltaje sobre el fototubo y se midió la corriente utilizando el Lock-In (ver Fig 5). Para cada una de estas mediciones se estimó el potencial  $V_0$  utilizando como criterio a cumplir que este potencial debía encontrarse dentro de cierta cota de corriente mínima y máxima.

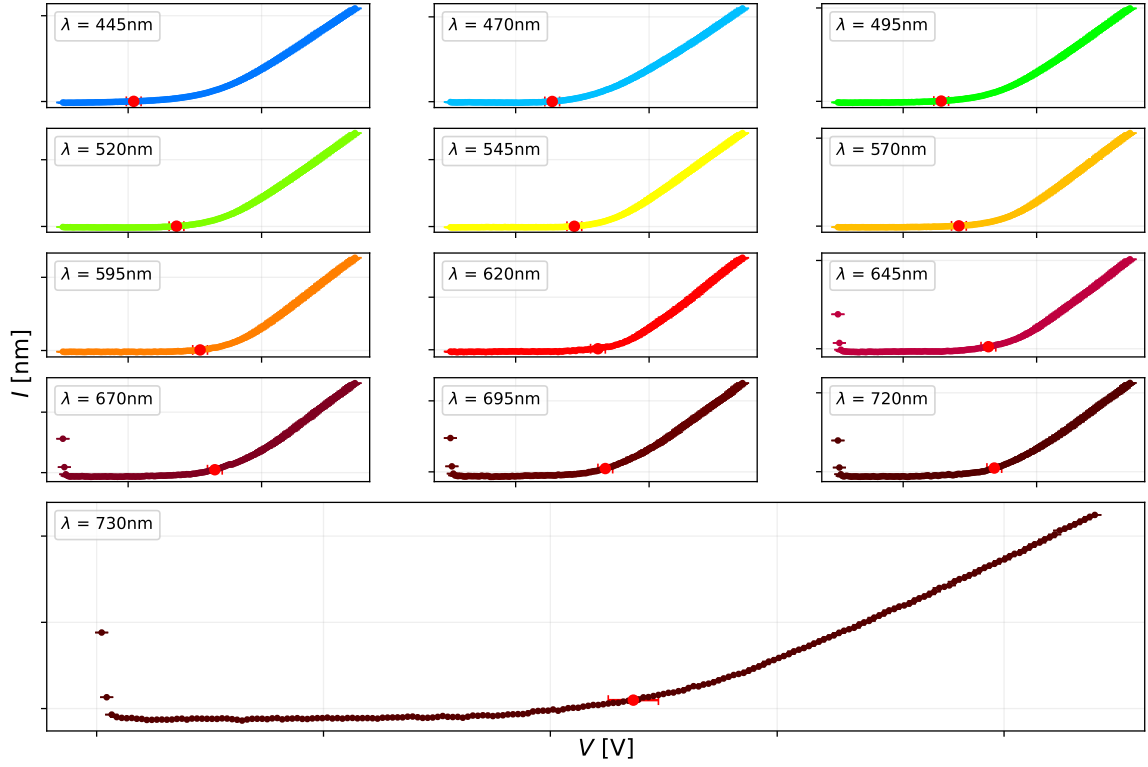


Figura 5: Barrido de voltajes para diferentes longitudes de onda. En la figura se muestran las mediciones de corriente  $I$  en nA en función del voltaje  $V$  en V aplicado en el fototubo. Cada gráfico posee una medición de longitud de onda y marcado con puntos rojos los respectivos  $V_0$ .

## 6.2. Propagación de errores de $\phi$

Utilizando la ecuación 2, podemos realizar un desarrollo en Taylor de la varianza al rededor los valores medios obtenidos, obteniendo de esta forma

$$Var(\phi) \approx \left( \frac{\partial \phi}{\partial h} \right)^2 Var(h) + \left( \frac{\partial \phi}{\partial \nu_{min}} \right)^2 Var(\nu_{min}) \quad (3)$$

## Referencias

- [1] J. J. Livingood G. P. Harnwell. *Experimental Atomic Physics*. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1933.
- [2] A. Einstein. «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. (alemán)[(On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light)]». En: *Annalen der Physik* 132.17 (1905), págs. 132-148.
- [3] D. S. Tannhauser J. Rudnik. «Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect». En: *American Journal of Physics* 796.44 (1976).
- [4] *Basic Device for Photo Cell- Instruction Sheet 558 791*. URL: <https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/5/558/558791e.pdf>.
- [5] *Photo cell for determining Planck's constant-Instruction Sheet 558 77*. URL: <https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/5/558/55877e.pdf>.