

## Determinación de la constante de Planck

Selección de la longitud de onda con filtros de interferencia sobre el banco óptico

### Objetivos del experimento

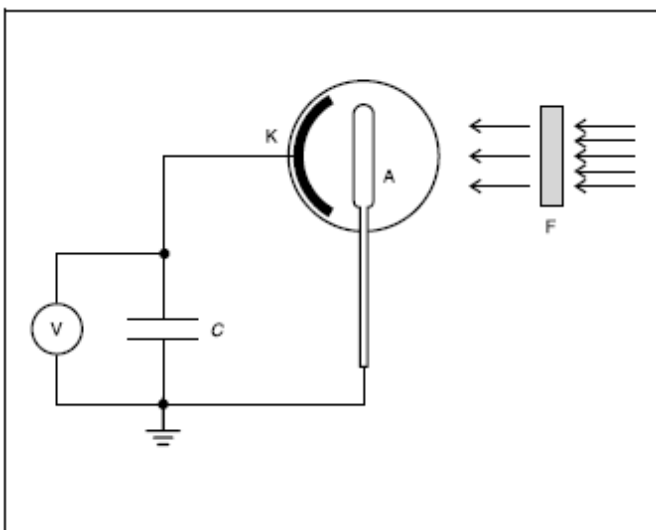
- Comprobación del efecto fotoeléctrico.
- Medición de la energía cinética de los electrones en función de la frecuencia de la luz.
- Determinación de la constante de Planck  $h$ .
- Demostración de la independencia de la energía cinética de los electrones respecto de la intensidad de la luz.

### Fundamentos

Si se irradia luz de longitud de onda suficientemente corta pueden extraerse electrones de la superficie de determinados metales (efecto fotoeléctrico). Su energía dependerá solamente de la frecuencia  $\nu$  de la luz incidente pero no de su intensidad; ésta sólo determina la cantidad de electrones extraídos. Este fenómeno contradice la física clásica y fue interpretado por primera vez en 1905 por *Albert Einstein*. Él supuso que la luz consiste en un haz de partículas, los llamados fotones, cuya energía  $E$  es proporcional a la frecuencia:

$$E = h \cdot \nu \quad (I)$$

Fig. 1 Montaje esquemático de un experimento para medir la constante de Planck  $h$  mediante el efecto fotoeléctrico. La luz monocromática (generada por un filtro de longitud de onda F) incide sobre el cátodo K de una celda fotoeléctrica. Los electrones arrancados llegan al ánodo A y cargan el capacitor C hasta una tensión límite  $U_0$ .



El factor de proporcionalidad  $h$  recibe el nombre de constante de Planck y es una importante constante de la naturaleza. Según esta interpretación corpuscular de la luz, cada fotoelectrón es arrancado por un fotón y abandona el átomo con la energía cinética

$$E_{\text{cin}} = h \cdot \nu - W_C \quad (II),$$

donde  $W_C$  representa el trabajo necesario para que el electrón salga del metal. Este valor es distinto para cada metal.

Para determinar la constante de Planck  $h$  se hace incidir luz monocromática (o sea, de una determinada longitud de onda) sobre una celda fotoeléctrica, y se mide la energía cinética  $E_{\text{cin}}$  de los electrones salientes.

La figura 1 muestra el montaje esquemático de este experimento. La luz pasa a través de un ánodo con forma de anillo (aquí un alambre de platino) e incide sobre una capa de potasio. El potasio es un buen material para hacer cátodos debido al reducido trabajo necesario para extraer electrones: los electrones de valencia se encuentran muy débilmente ligados en los metales alcalinos.

Algunos de los fotoelectrones llegan al ánodo y forman allí la denominada fotocorriente  $I$ . Si se hace retardar el movimiento de los electrones mediante una tensión negativa que se incrementa continuamente, la fotocorriente decrecerá también de manera continua. La tensión a la cual la fotocorriente se anula es denominada tensión límite  $U_0$ . Llegado este punto, tampoco los electrones más débilmente ligados (o sea, aquellos con la menor energía  $W_C$  y, por ende, los de mayor energía cinética) podrán contrarrestar la tensión del ánodo. En este experimento, la tensión del ánodo es producida por un capacitor que cargan los electrones incidentes hasta una tensión límite  $U_0$  (comparar con figura 1). Teniendo el valor de la tensión límite  $U_0$  puede calcularse la energía de estos electrones débilmente ligados:

$$e \cdot U_0 = h \cdot \nu - W_C \quad (III)$$

$e$ : carga elemental

$W$  ya no es aquí la energía  $W_C$  del cátodo, ya que en el balance de energía debe tenerse en cuenta también el potencial de contacto entre cátodo y ánodo.

**Equipo**

1 celda fotoeléctrica para determinar $h$	558 77
1 montura para celda fotoeléctrica .....	558 791
1 lámpara de mercurio de alta presión	451 15
1 portalámparas E27 con ficha múltiple	451 19
1 bobina de reactancia universal 230 V, 50 Hz	451 30
1 lente $f = + 100$ mm .....	460 03
1 diafragma de iris .....	460 26
1 rueda de filtros con diafragma de iris	558 792
1 filtro de interferencia 578 nm .....	468 401
1 filtro de interferencia 546 nm .....	468 402
1 filtro de interferencia 436 nm .....	468 403
1 filtro de interferencia 405 nm .....	468 404
1 electrómetro amplificador .....	532 14
1 fuente de alimentación 230 V/12V~/20 W	562 791
1 capacitor STE 100 nF, 630 V .....	578 22
1 pulsador STE (interruptor), de un punto	579 10
1 voltímetro de CC .....	531 100
1 banco óptico, perfil normal 1m .....	460 32
o bien	
1 carril adicional 0,5 m .....	460 34
2 jinetillos ópticos, H = 90 mm/B = 50 mm	460 352
3 jinetillos ópticos, H = 120 mm/B = 50 mm	460 357
2 enchufes de bornes .....	590 011
1 casquillo BNC .....	501 10
1 adaptador BNC/4 mm, 1 polo .....	501 09
1 ficha de acople .....	340 89
1 enchufe múltiple cuadrado .....	502 04
cables	

Las mediciones se realizan para diversas longitudes de onda  $\lambda$ , o bien frecuencias

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{IV})$$

$c$ : velocidad de la luz en el vacío

de la luz irradiada. Si se incrementa la frecuencia de la luz incidente en una cantidad  $\Delta v$ , se elevará la energía de los electrones en  $h \cdot \Delta v$ . La tensión límite debe ser incrementada en  $\Delta U_0$  para volver a compensar el crecimiento de la fotocorriente.

**Consejo para la seguridad**

La lámpara de mercurio de alta presión emite luz ultravioleta, por lo que puede ocasionar daños en los ojos.

- Cuidar los ojos del haz directo de la lámpara de mercurio de alta presión y del reflejado.
- Prestar siempre atención a las instrucciones de uso de la lámpara de mercurio de alta presión.

Si se representa la tensión límite  $U_0(v)$  en función de  $v$ , se obtiene, según (III), una recta de pendiente:

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta v} = \frac{h}{e} \quad (\text{V})$$

Conociendo la carga elemental  $e$  se obtiene de ahí la constante de Planck  $h$ .

Para la selección de la longitud de onda se utilizan en el experimento filtros de interferencia de banda angosta, cada uno de los cuales selecciona con precisión una línea respectivamente de la luz espectral de la lámpara de mercurio de alta presión. La indicación de longitud de onda que viene en cada filtro corresponde a la longitud de onda de la línea de mercurio transmitida.

**Montaje****Montaje óptico:**

*Indicación: La lámpara de mercurio de alta presión alcanza su intensidad máxima recién luego de 10 minutos de calentamiento.*

*Poner en funcionamiento esta lámpara directamente al comenzar el montaje para poder empezar con las mediciones inmediatamente después de haberlo finalizado.*

La figura 2 muestra el montaje del experimento; la posición del borde izquierdo del jinetillo óptico está dada aquí en cm.

- Conectar la bobina de reactancia universal a la red mediante el enchufe múltiple cuadrado.
- Montar la lámpara de mercurio de alta presión mediante el jinetillo óptico (H = 90 mm) según la indicación de posición, conectar al enchufe múltiple y encender.
- Asegurar la celda fotoeléctrica con un jinetillo óptico (H = 90 mm) según la indicación de posición, quitar su cubierta sellada y ubicarla de forma que su superficie negra con recubrimiento mire a la lámpara de mercurio.
- Montar en el banco óptico el diafragma de iris con un jinetillo óptico (H = 120 mm) según indicación de la posición.
- Montar la lente con un jinetillo óptico (H = 120 mm) según indicación de la posición; ajustar la altura de forma que el punto medio de la lente quede a la misma altura que el punto medio del diafragma de iris.

Ahora, la luz de la lámpara de mercurio debe verse nítidamente sobre la parte ennegrecida (la zona sensible) de la celda fotoeléctrica. Procurar aquí que la luz no incida ni sobre el anillo de metal ni sobre la parte de la zona ennegrecida a la cual están unidos los contactos. También debe evitarse iluminar los márgenes.

Para ello, proceder de la manera siguiente y repetir tantas veces como sea necesario hasta lograr la optimización:

- Modificar la altura del diafragma de iris y de la lente de forma que la mancha de luz caiga sobre la zona ennegrecida de la celda fotoeléctrica, manteniendo siempre el punto medio de la lente a la misma altura que el del diafragma; variar eventualmente también la altura de la celda fotoeléctrica y su inclinación (mediante el tornillo debajo del zócalo).
- Ajustar el tamaño de la mancha luminosa con ayuda del diafragma de iris hasta lograr que la mayor parte de la zona ennegrecida de la celda fotoeléctrica sea iluminada, exceptuando los márgenes, el anillo metálico y los contactos en la capa ennegrecida.
- Modificar eventualmente la nitidez de la mancha luminosa desplazando la lente sobre el banco óptico.

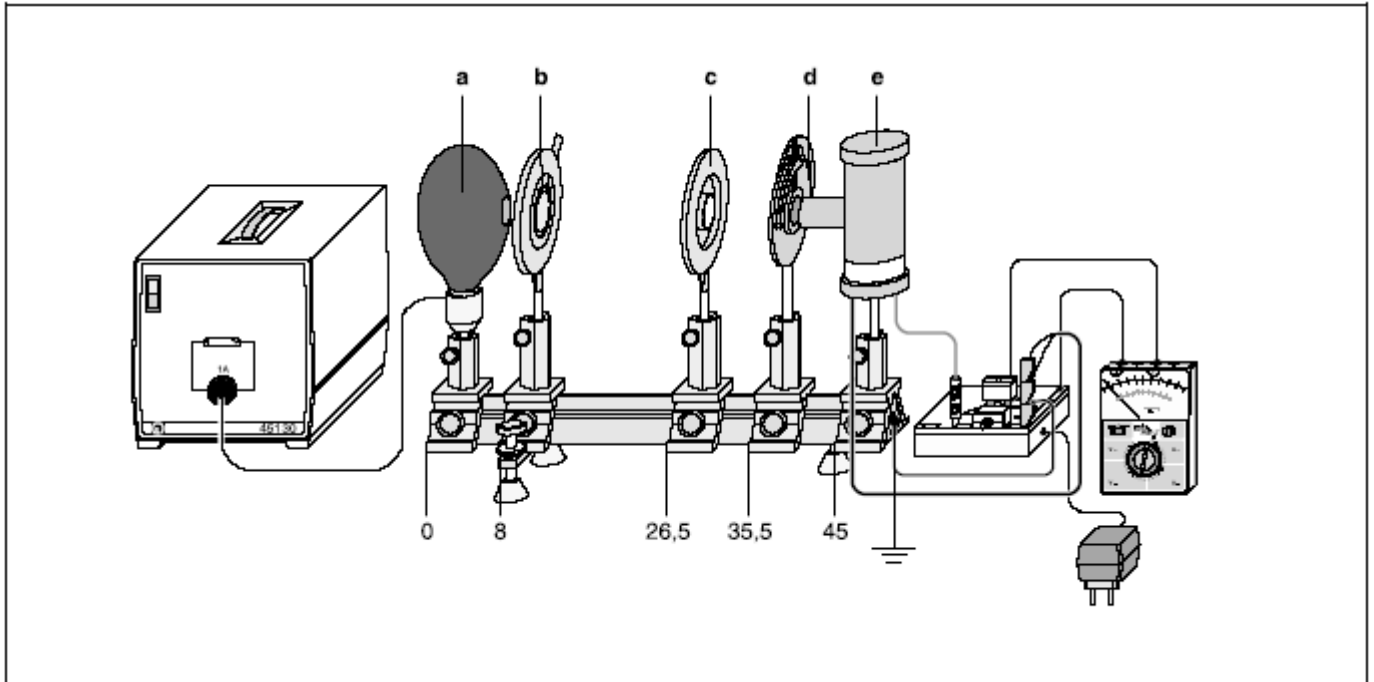
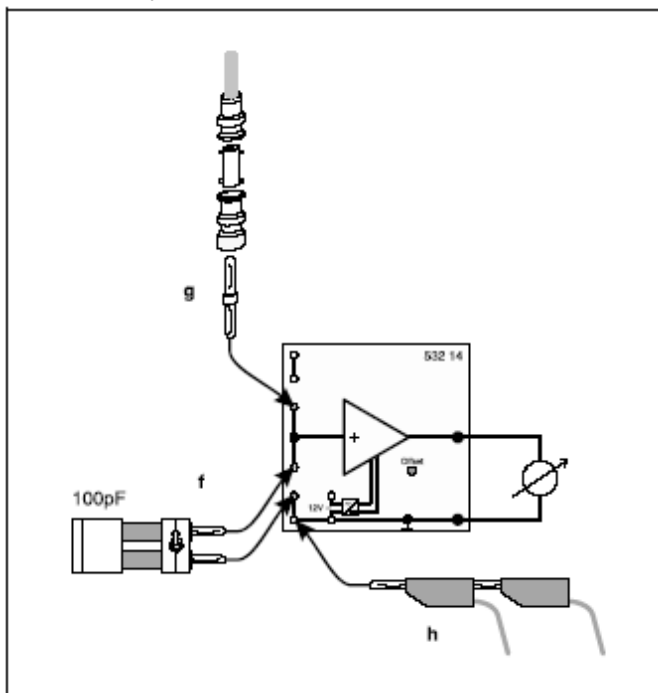


Fig. 2 Montaje del experimento en el banco óptico con indicación de la posición en cm para el costado izquierdo del jinetillo óptico.  
**a** lámpara de mercurio de alta presión  
**b** diafragma de iris  
**c** lente,  $f = 100$  mm  
**d** rueda de filtros con filtros de interferencia  
**e** celda fotoeléctrica

*Indicación: Una vez realizados estos ajustes, no modificarlos.*

- Colocar la cubierta sellada en la celda fotoeléctrica.
- Ubicar la rueda de filtros con el diafragma de iris mediante el jinetillo óptico ( $H = 120$  mm) exactamente delante de la celda fotoeléctrica en el banco óptico. Unir el diafragma de la rueda de filtros con la cubierta sellada de la celda fotoeléctrica para evitar que entre luz dispersa en dicha celda.

Fig. 3 Conexión del electrómetro amplificador para medir la tensión límite  $U_0$ .



### Montaje eléctrico:

Los electrones que aparecen en el anillo de metal de la celda fotoeléctrica cargan un capacitor y crean así la tensión límite  $U_0$ , necesaria para determinar la energía cinética. Medir la tensión del capacitor con un electrómetro amplificador.

La conexión para el electrómetro amplificador se realiza según la figura 3:

- Conectar los enchufes de bornes (**f**) y acoplarle el capacitor de 100 pF y el pulsador.
- Colocar la ficha de acople (**g**), conectar el adaptador BNC/4 mm y el casquillo BNC y unir con el cable gris apantallado de la celda fotoeléctrica.
- Conectar sendos cables negros (**h**) de la celda fotoeléctrica a la conexión de masa del electrómetro amplificador.
- Conectar el multímetro a la salida del electrómetro amplificador.

Además:

- Conectar la fuente de alimentación (12 V) para alimentar el electrómetro amplificador y conectar a la red mediante el enchufe múltiple.
- Interconectar el banco óptico (eventualmente también el mango de la montura para la celda fotoeléctrica), la conexión de masa del electrómetro amplificador y la conexión externa a tierra del enchufe múltiple.

**Realización**

*Indicaciones:*

*Una capa del anillo del ánodo con potasio de la capa fotosensible del cátodo puede causar una corriente de electrones que interfiera:*

*Calentar el anillo del ánodo según las instrucciones de uso de la celda fotoeléctrica.*

*La impurezas de la celda fotoeléctrica pueden provocar corrientes de fuga entre el ánodo y el cátodo, que pueden influir en la medición de la tensión límite  $U_0$ .*

*Limpiar la celda fotoeléctrica con alcohol.*

*La tensión en el capacitor también puede recibir efectos del exterior:*

*Durante la medición realizar los mínimos movimientos posibles.*

*No es necesario oscurecer el ambiente; esto no influye en los resultados de la medición.*

- Conectar el multímetro y seleccionar la escala de 1 V CC.
- Girar el filtro de interferencia para luz amarilla ( $\lambda_{Hg} = 578$  nm) e interponerlo en el paso del haz.
- Descargar el capacitor; para ello, mantener presionado el pulsador hasta que el multímetro marque 0 V.
- Liberar el pulsador y comenzar la medición; esperar entre 30 segundos y un minuto hasta que el capacitor se haya cargado hasta la tensión límite  $U_0$ . Anotar el valor de  $U_0$ .
- Girar el filtro de interferencia para luz verde ( $\lambda_{Hg} = 546$  nm), interponerlo en el paso del haz y repetir la medición.
- Subir la escala hasta 3 V y repetir las mediciones para los filtros de interferencia azul ( $\lambda_{Hg} = 436$  nm) y violeta ( $\lambda_{Hg} = 405$  nm).
- Con el diafragma de iris de la rueda de filtros variar la intensidad de la luz que incide en la celda fotoeléctrica y determinar en cada caso la tensión límite  $U_0$ .

*Indicación: Si el diafragma de iris se cierra demasiado, se modifica la iluminación regular de la mancha lumínica sobre el cátodo. Además, las corrientes de fuga cumplen un papel cada vez más importante.*

**Ejemplo de medición**

Tabla 1: Tensión límite  $U_0$  en función de la longitud de onda  $\lambda$  y de la frecuencia  $\nu$ .

color	$\frac{\lambda}{nm}$	$\frac{\nu}{THz}$	$\frac{U_0}{V}$
amarillo	578	519	0,59
verde	546	549	0,70
azul	436	688	1,23
violeta	405	741	1,40

**Análisis**

En la figura 4 se representa la tensión límite  $U_0$  en función de la frecuencia  $\nu$ . Los puntos de medición trazados describen, con buena aproximación, una recta.

La linealización de los tres primeros valores de medición conduce al valor de pendiente

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = 0,38 \cdot 10^{-14} \text{ Vs}$$

Según (V), y sabiendo que  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  A.s, la constante de Planck valdrá

$$h = 6,1 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Valor extraído de tablas:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

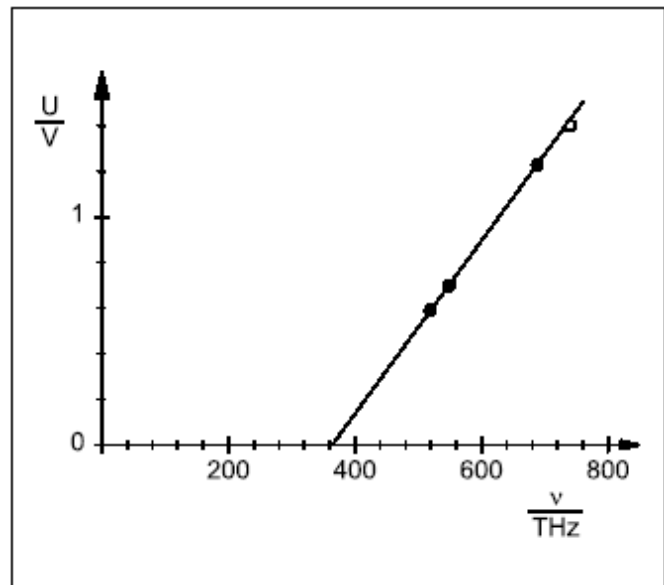


Fig. 4 Tensión límite  $U_0$  como función de la frecuencia  $\nu$

**Resultado**

En el efecto fotoeléctrico, la energía cinética  $E_{cin}$  de los electrones salientes depende de la frecuencia de la luz incidente, no de su intensidad.

Midiendo la tensión límite  $U_0$  (por encima de la cual los electrones ya no pueden abandonar el material) en función de la frecuencia  $\nu$  puede calcularse la constante de Planck  $h$ .