

# Laboratorio de física contemporánea I

## Conceptos básicos

Jorge Iván Reyes Hernández

29 de septiembre de 2021

A finales del siglo XIX la física había acumulado diversos problemas que no podía explicar o cuyas explicaciones resultaban contradictorias dentro del marco de la física clásica [5]. De particular importancia para el presente trabajo resulta el problema de la determinación de la naturaleza de la luz. La teoría electromagnética de Maxwell comprobó que la luz se comporta como una onda; sin embargo a finales del siglo XIX y principios del siglo XX se encontraron indicios de la existencia de una estructura discreta de la radiación luminosa [9]. El primero de esos indicios fue descubierto por H. Hertz (1887) [3], mismo que se describe a continuación.

### Efecto fotoeléctrico

En términos simples, el *efecto fotoeléctrico* (también conocido como *fotofecto*) consiste en la liberación de electrones del enlace atómico [3]. El aparato con el que Hertz descubrió este fenómeno se muestra en la figura 1.

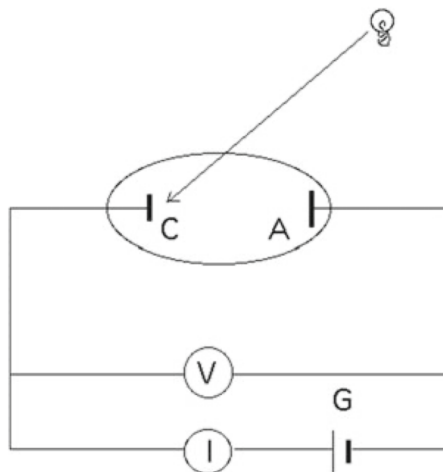


Figura 1: Aparato de Hertz para el efecto fotoeléctrico. Figura tomada de [3] pp. 68

En la figura, C y A son electrodos al vacío. Sobre C se irradia luz monocromática de frecuencia variable, mientras que A se pone a un potencial negativo (respecto a C) vía un generador G, el cual es medido con el voltímetro V. Hertz midió la corriente eléctrica a través del amperímetro I y observó que si la frecuencia de la luz es superior a cierto umbral  $\nu_1$  (determinado por  $V$ ), se produce un flujo de corriente  $i$  del electrodo A al C. La dirección de la corriente y la posibilidad de detenerla aumentando la diferencia de potencial muestra que el flujo eléctrico está formado por

electrones extraídos de los átomos del electrodo C debido a la radiación luminosa [3]. Como resume [9], los *hechos experimentales del efecto fotoeléctrico* son los siguientes:

- El fotoefecto sólo aparece a partir de una determinada frecuencia umbral  $\nu_1$ . Esta frecuencia depende del material de la superficie metálica (sobre la que se irradia luz).
- La energía cinética de los fotoelectrones que escapan está determinada por la frecuencia de la luz irradiada, siendo independiente de la intensidad de la luz. Además la relación entre la energía cinética del electrón y la frecuencia de la luz es lineal.
- Para frecuencias mayores a la umbral ( $\nu > \nu_1$ ) el número de fotoelectrones emitidos es proporcional a la intensidad de la luz incidente.
- El efecto fotoeléctrico se produce sin retardo de tiempo ( $< 10^{-9}s$ ).

A. Einstein (1905) propuso su famosa *hipótesis cuántica de la luz* con base en la hipótesis de Planck, es decir, propuso que durante su interacción con la materia, la radiación de frecuencia  $\nu$  se comporta como si fuera un conjunto de cuantos de luz (fotones) cada uno con energía  $E = h\nu$  con  $h$  el cuanto de acción de Planck. Bajo este supuesto, cada electrón que se libera del metal absorbe exactamente uno de esos cuantos de luz, el cual aumenta su energía en  $h\nu$ . En 1921 A. Einstein recibió el premio Nobel en física por su explicación del efecto fotoeléctico [10].

## Constante de Stefan-Boltzmann

Considere el sistema físico cuya energía interna está dada por la ecuación de estado calórico:

$$U = V\epsilon(T)$$

y cuya ecuación de estado térmico es

$$p = \frac{1}{3}\epsilon(T)$$

A un sistema descrito por estas ecuaciones se le conoce como *radiador de cuerpo negro* o *gas de fotones* [8].

G. Kirchhoff (1859) ofreció la primera teoría sistemática de la radiación térmica, es decir, intentaba describir el hecho de que todos los sólidos -independientemente de su temperatura- emiten radiación: a altas temperaturas emiten luz visible; a bajas temperaturas emiten energía en forma de radiación de calor [9]. Kirchhoff consideró el ya mencionado *cuerpo negro* que grosso modo puede entenderse como un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él.

El problema del cuerpo negro también figura entre las cuestiones que la física clásica no podía resolver a inicios del siglo XX. Usando la segunda ley de la termodinámica Kirchhoff probó que la radiación del cuerpo negro era isotrópica, homogénea y además que la densidad de energía espectral  $w_\nu$  no dependía, a temperatura constante, del material con que se modelara el cuerpo negro. Entonces concluyó que debía existir una función universal tal que

$$w_\nu = f(\nu, T)$$

Años después W. Wien (1896) usando la termodinámica y el electromagnetismo concluyó que la función universal de Kirchhoff era de la forma

$$f(\nu, T) = \nu^3 g\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

ecuación conocida como *ley de Wien*. De esta ecuación se sigue que

$$w = \int_0^\infty \nu^3 g\left(\frac{\nu}{T}\right) d\nu = T^4 \int_0^\infty x^3 g(x) dx$$

es decir,

$$w(T) = \sigma T^4 \quad (1)$$

La ecuación 1 es conocida como la *ley de Stefan-Boltzmann*, mientras que la constante  $\sigma$  es conocida como la *constante de Stefan-Boltzmann* o *constante de Stefan*.

El desenlace del fracaso de la física clásica por el problema de cuerpo negro se resolvió, luego de pasar por la fórmula de Wien, la fórmula de Rayleigh-Jeans y una catástrofe ultravioleta, con la hipótesis de Planck; historia fuera del alcance de este trabajo. Consulte [5] o [9] para más detalles.

## ¿Cómo medir experimentalmente la constante de Stefan-Boltzmann?

El valor de la constante de Stefan-Boltzmann en el SI es  $5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  [ste], donde  $W$  son watts,  $m$  metro y  $K$  kelvin. También puede definirse en términos de otras constantes fundamentales

$$\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2}$$

con  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $\hbar$  la constante reducida de Planck y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Una forma de medir experimentalmente el valor de esta constante es usando un tubo de vacío Diodo EZ-81 como se explica en [iit] del Instituto de Tecnología de la India, Roorkee.

## Efecto Faraday

Como se menciona en [6], el efecto Faraday constituye una prueba de la existencia de una conexión entre radiación (luz) y electromagnetismo. El descubrimiento de Faraday consiste en que un campo magnético aplicado a un medio dieléctrico es capaz de hacer girar la polarización de una onda que lo atraviesa. Hay dos tipos de efecto Faraday: efecto Faraday eléctrico y efecto Faraday magnético, en virtud de que un campo magnético externo puede modificar a los tensores dieléctrico y magnético, respectivamente.

Siguiendo la discusión de [4], Faraday (1845) estudió por primera vez la acción de un campo magnético sobre las propiedades ópticas de un material transparente con el experimento que se resume en la figura 2.

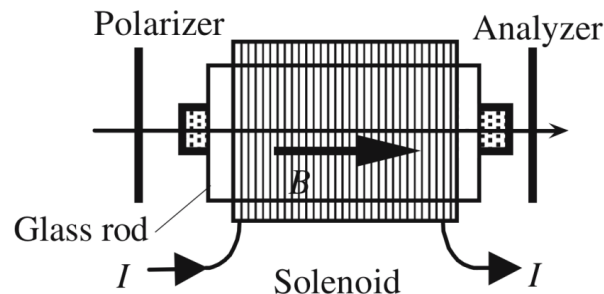


Figura 2: Experimento de Faraday: Se coloca un material transparente a lo largo del eje de un solenoide alimentado con una corriente eléctrica  $I$ . Un haz de luz polarizado rectilíneo se propaga paralelamente al campo magnético. Durante la propagación, la polarización sigue siendo rectilínea, pero gira en un ángulo que es proporcional a la longitud del medio atravesado y al campo magnético. El signo de la rotación cambia con la dirección del campo. La vibración óptica gira en la misma dirección que la corriente en la bobina, sea cual sea la dirección de propagación del haz a lo largo del eje. Figura y texto tomados de [4] pp. 220

En resumen, Faraday descubrió que la aplicación de un campo magnético hace que un material sea birrefringente [4].

## Leyes de Maxwell

Las ecuaciones básicas del electromagnetismo son las *ecuaciones de Maxwell*:

$$\operatorname{div} \mathbb{B} = 0 \quad (2)$$

$$\operatorname{curl} \mathbb{E} + \dot{\mathbb{B}} = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbb{D} = \rho \quad (4)$$

$$\operatorname{curl} \mathbb{H} - \dot{\mathbb{D}} = \mathbf{j} \quad (5)$$

con  $\mathbb{B} = \mu_0(\mathbb{H} + \mathbb{M})$  y  $\mathbb{D} = \epsilon_0\mathbb{E} + \mathbb{P}$ . Las ecuaciones 2 y 3 son conocidas como ecuaciones homogéneas, y las 4 y 5 como ecuaciones inhomogéneas [7].

A grandes rasgos la ecuación 4 nos dice dónde nacen y mueren (fuentes y sumideros) las líneas de campo eléctrico: si  $\operatorname{div} \mathbb{E} > 0$  es una fuente, si  $\operatorname{div} \mathbb{E} < 0$  es un sumidero y si  $\operatorname{div} \mathbb{E} = 0$  simplemente no hay nada. En otras palabras el Teorema físico de Gauss afirma que el flujo del campo eléctrico a través de una superficie de volumen dado es, salvo un factor no esencial, igual a la carga contenida en ese volumen. La ecuación 2 nos dice que no existen monopolos magnéticos libres. Las ecuaciones 3 y 5 describen el acoplamiento de los campos eléctricos y magnéticos cuando tienen dependencia temporal.

## Referencias

- [ste] 2018    codata    value:    Stefan–boltzmann    constant.    <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma>. Accessed: 2021-09-29.
- [iit] Experiments    for    b.    tech.    1st    year    physics    laboratory. <https://www.iitr.ac.in/departments/PH/uploads/Teaching> Accessed: 2021-09-29.
- [3] Becchi, C. M. and D’Elia, M. (2008). *Introduction to the basic concepts of modern physics: special relativity, quantum, and statistical physics*. Undergraduate Lecture Notes in Physics. Springer International Publishing, third edition.
- [4] Chartier, G. (2005). *Introduction to optics*. Advanced texts in physics. Springer, New York.
- [5] de la Peña, L. (2014). *Introducción a la mecánica cuántica*. Fondo de Cultura Económica, third edition.
- [6] Giusfredi, G. (2019). *Physical Optics: Concepts, Optical Elements, and Techniques*. UNITEXT for Physics. Springer International Publishing.
- [7] Nolting, W. (2016). *Theoretical Physics 3*. Springer International Publishing.
- [8] Nolting, W. (2017a). *Theoretical Physics 5*. Springer International Publishing.
- [9] Nolting, W. (2017b). *Theoretical Physics 6*. Springer International Publishing.
- [10] Sontz, S. B. (2020). *An Introductory Path to Quantum Theory: Using Mathematics to Understand the Ideas of Physics*. Springer International Publishing.