

EL MAGNETISMO DE LA LUZ

Alicia Oliver

Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad de México, 2025



FÍSICA



CIENCIA



MAGNETISMO



D.R. © UNAM, 2025. CC BY-NC-SA

Autor:

Alicia María Oliver y Gutiérrez

Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 04510, México.



El magnetismo de la luz

10 de diciembre de 2025.

D.R.©, 2025, UNAM. CC BY-NC-SA

Magnetismo de la luz © 2025 por Alicia María Oliver y Guitierrez, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México. Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-NoComercial-NoDerivadas 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Cita: Oliver y Gutiérrez, A. M. (2026). *El magnetismo de la luz*. Universidad Nacional Autónoma de México, Red Universitaria de Aprendizaje.

EL MAGNETISMO DE LA LUZ

En el siglo XIX los meticulosos experimentos realizados por Faraday para descubrir la ley de inducción electromagnética, y proponer las ideas de campo eléctrico y magnético como un ente físico esencial para describir la naturaleza de los fenómenos electromagnéticos, establecieron las bases experimentales de la teoría electromagnética, la cual fue posteriormente sintetizada por Maxwell en sus cuatro famosas ecuaciones. Para que las ecuaciones que describen los fenómenos electromagnéticos, hasta entonces conocidos, tuvieran una mejor simetría entre ellas, Maxwell tuvo que introducir un nuevo término en las ecuaciones. A este término Maxwell lo denominó la corriente de desplazamiento, y permitió predecir la existencia de ondas electromagnéticas, y calcular su velocidad, la cual es igual a la velocidad de la luz en el vacío. Posteriormente, Hertz logró crear ondas electromagnéticas en su laboratorio confirmando así la existencia de las ondas electromagnéticas predicha por las ecuaciones de Maxwell. Por otro lado, se confirmó plenamente que la luz es una onda electromagnética, compuesta de un campo eléctrico y magnético oscilantes, que se autogeneran mutuamente mientras se desplazan en el espacio a la velocidad de la luz. Esta fue considerada la evidencia definitiva de la naturaleza ondulatoria de la luz, en contraposición a las ideas corpusculares, cuyo principal defensor había sido Isaac Newton en el siglo XVII.

La luz transmite no solo energía si no también momento lineal. La transmisión de energía de la luz la podemos ver de manifiesto en el hecho de que la luz emitida por el sol puede calentar la superficie terrestre aun a millones de kilómetros de distancia. Es decir, la luz transporta energía desde el Sol hasta la Tierra, e inclusive a distancias mucho más grandes, lo cual permite ver y cuantificar la energía emitida por estrellas y galaxias distantes en el espacio. El momento lineal, por otro lado, es una cantidad física que está relacionada con la aplicación de una fuerza sobre objetos. De hecho, la muy conocida segunda ley de Newton que relaciona la fuerza aplicada con la masa y la aceleración de un objeto, $F = ma$, en realidad está escrita originalmente en los Principios Matemáticos de Filosofía Natural, escrito por Newton, en términos de cambios temporales del momento lineal de las partículas, $F = \Delta p / \Delta t$. El momento lineal se define como el producto de la masa por la velocidad de un objeto, $p = mv$. De manera que, asumiendo que la masa es constante, un cambio en el momento lineal de un objeto implica un cambio en su velocidad, es decir, el objeto se acelera. Y esto solo ocurre cuando una fuerza neta distinta de cero se aplica al objeto. La luz también puede aplicar una fuerza sobre los objetos de manera que puede acelerarlos en el espacio. Esto lo podemos notar en el hecho de que los paneles solares en los satélites puestos en órbita alrededor de la Tierra reciben un impulso extra por la luz que absorben proveniente del Sol. Este impulso, aunque pequeño, debe ser tenido en cuenta para corregir la órbita de los satélites cada cierto tiempo. En términos más precisos, decimos que la luz no solo transmite energía si no también momento lineal. Ese momento lineal se transfiere a la materia. De manera que la partícula u objeto que absorbe el momento lineal de la luz aumenta su momento lineal, y eso implica una aceleración o cambio en su estado de movimiento lineal. Estos dos fenómenos, transferencia de energía y momento lineal de luz pueden ser descritos dentro del marco de la teoría electromagnética con la ecuación de Poynting, que relaciona la energía con el producto vectorial de los campos eléctricos y magnéticos:

Un fenómeno menos conocido es que la luz también transfiere momento angular. El momento angular es también un concepto físico relacionado con el movimiento de las partículas, pero en este caso, al menos desde el punto de vista de la física clásica, con su movimiento rotacional. El momento angular se define en términos del momento lineal, p , que tiene una partícula que gira u órbita alrededor de un punto fijo, a una distancia r de la partícula en rotación. Mas precisamente, el momento angular es un producto vectorial entre el vector posición, $\mathbf{r}$, desde el punto de rotación hasta la partícula, y el momento lineal, $\mathbf{p}$, de la partícula. Una partícula que no gira alrededor de algún punto se dice que no tiene momento angular. Si la velocidad lineal alrededor del punto de giro es muy pequeña, el momento angular es pequeño, y viceversa. De manera que si la luz transfiere momento angular a la materia significa que es capaz de poner en movimiento rotacional, o de giro, a las partículas. El estudio de este fenómeno, sin embargo, ha recibido menos atención en la literatura científica.

La manera en la que la luz puede transferir momento angular a la materia está relacionada con su estado de polarización. Existen básicamente tres estados de polarización: lineal, circular y elíptico. El estado de polarización de la luz se define en términos de la dirección en la cual oscila el campo eléctrico de la onda electromagnética que conforma el haz de luz. El campo eléctrico es un vector, con magnitud y dirección. Por tanto, luz linealmente polarizada significa que el vector campo eléctrico de la luz, también denominado campo óptico, oscila siempre a lo largo de una línea que es transversal a la dirección de propagación de la luz. En este caso el campo eléctrico oscila desde un valor mínimo igual a cero hasta un valor máximo, que es igual a la amplitud de la onda. En el caso de polarización circular, el vector campo eléctrico gira alrededor del eje de propagación de la onda electromagnética a medida que esta avanza. Si miramos hacia la fuente de luz, de donde proviene la onda, y vemos que el vector campo eléctrico de la onda gira en sentido horario decimos que la polarización es circular derecha. Si, por el contrario, el vector campo eléctrico gira en sentido opuesto al de las manecillas del reloj decimos que la onda tiene polarización circular izquierda. En ambos casos la magnitud del vector campo eléctrico permanece constante mientras la onda avanza. En el caso de luz con polarización elíptica, la definición es similar a la luz con polarización circular, pero la magnitud del vector campo eléctrico varía a medida que gira mientras avanza la onda. La magnitud varía en este caso de tal forma que la punta del vector describe una elipse. Ver Figura 1. Una propiedad interesante es que si sumamos ondas con polarización circular derecha e izquierda el resultado es una onda con polarización lineal. Por lo que podemos pensar en la luz linealmente polarizada como conformada por cantidades iguales de luz con polarización circular derecha e izquierda.

En 1897, Sadovskii predijo por primera vez que la luz con polarización circular tiene un flujo de momento angular. Posteriormente, en 1936, Beth y Holbourn, de manera independiente, midieron el torque mecánico ejercido por luz circular en una placa retardadora de media onda [1].

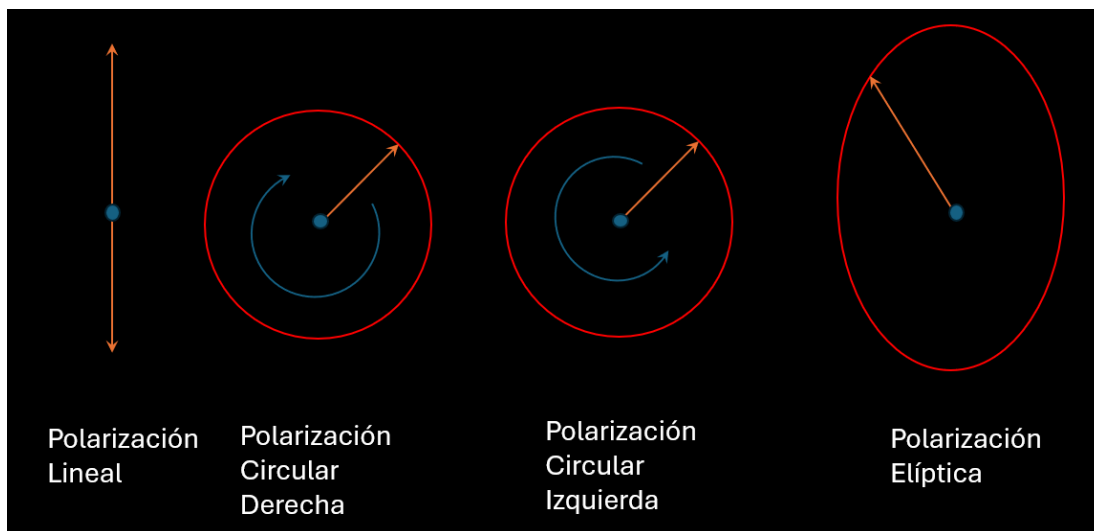


Figura1. Ilustración sobre los diferentes tipos de polarización de la luz. La flecha indica la oscilación del campo eléctrico de la luz. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, desde el punto de vista clásico, el magnetismo en la materia está relacionado con el movimiento de los electrones alrededor de los núcleos atómicos, es decir, con el momento angular de los átomos. A este momento angular se le denomina momento angular orbital. Sin embargo, de acuerdo con la física cuántica, el magnetismo en la materia se debe principalmente a un momento angular de espín, que es una cantidad fundamental de muchas partículas subatómicas, incluyendo al electrón. Este momento angular de espín a menudo se le relaciona con un movimiento de rotación del electrón sobre su propio eje, sin embargo, en realidad no tiene nada que ver con un “movimiento” de la partícula, y en realidad no es una cantidad que depende de un sistema de coordenadas para describir sus propiedades, como si ocurre con el momento angular orbital. En este sentido se dice que el momento angular de espín es una cantidad intrínseca a las partículas como el electrón, tal como su carga eléctrica.

Si el momento angular de muchos átomos en un trozo de materia está alineado en cierta dirección, esto da lugar a una magnetización de la materia, que se manifiesta por la aparición de un campo magnético macroscópico, que podemos percibir por la fuerza magnética que ejerce sobre otros objetos, especialmente aquellos hechos con materiales como el hierro. Por tanto, en este punto es fácil ver que, si podemos manipular de alguna manera el momento angular de cada átomo en un trozo de materia, podemos controlar sus propiedades magnéticas. Asimismo, surge la posibilidad de influir en la magnetización de la materia usando luz con polarización circular.

Muy recientemente, en el año 2005, Kimel [3] demostró que es posible controlar el momento angular de espín de los electrones con un haz láser con polarización circular. En este experimento un trozo de material magnetizado de ferrita pudo cambiar su estado de magnetización con pulso de luz circular, causando oscilaciones del espín de los electrones y por tanto oscilaciones en la magnetización de la sustancia. El efecto reportado por Kimel se atribuyó a la creación de un campo magnético estático creado por la irradiación con luz polarizada circularmente. A este efecto se le conoce también como Efecto Faraday Inverso

(IFE, por sus siglas en inglés). Ver Figura 2. Este efecto fue predicho en 1961 [4], aunque el termino IFE fue acuñado solo unos cuantos años después.

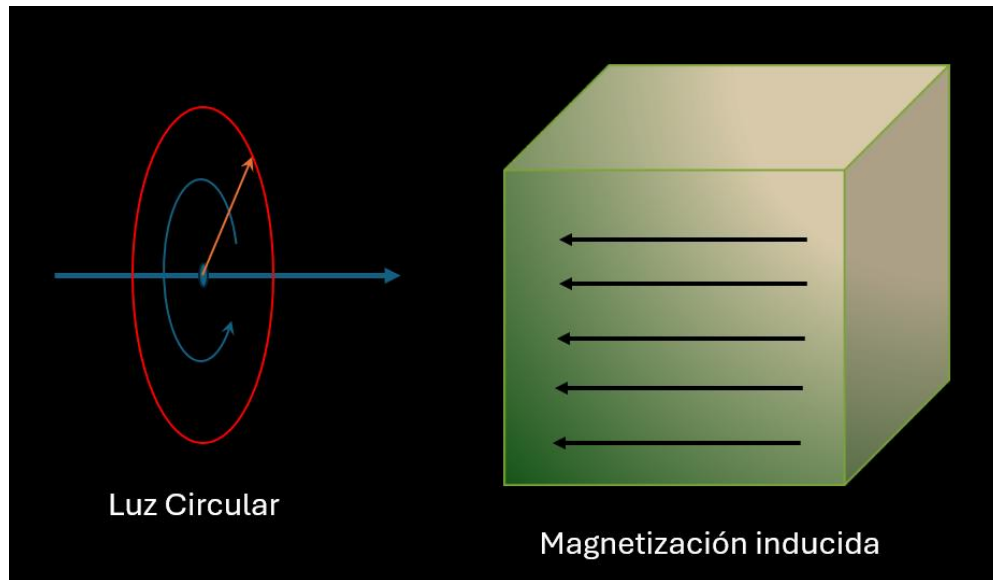


Figura 2. Ilustración sobre cómo un haz de luz con polarización circular derecha induce una magnetización en un trozo de material en la dirección opuesta a la de propagación de la luz. Fuente: Elaboración propia.

Desde los experimentos de Kimel, el uso de luz con polarización circular para controlar estados magnéticos se ha convertido en una herramienta importante para estudiar desde un nivel fundamental los procesos de interacción luz-materia y las dinámicas de magnetización, en un área de investigación conocida actualmente con magnetización ultrarrápida debido al uso de láseres pulsados. Para esto se requieren pulsos láser ultracortos con tamaños temporales del orden de picosegundos (10^{-12} s) o femtosegundos 10^{-15} s [5]. Este campo de estudio es también interesante por las potenciales aplicaciones tecnológicas en grabación magnética ultrarrápida de información con láseres pulsados, que conllevaría a un proceso de escritura más controlado y que eventualmente reemplazará las metodologías de grabación de información actuales, la cual hace uso de bobinas microscópicas y cabezales de escritura, lo cual constituye un método mucho más lento.

Referencias

- [1] Beth, R. A. (1936). Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light. *Physical Review*, 50, 115. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.50.115>
- [2] Holbourn, A. H. S. (1936). Angular momentum of circularly polarized light. *Nature*, 137, 31. <https://doi.org/10.1038/137031a0>
- [3] Kimel, A. V., Kirilyuk, A., Usachev, P. A., Pisarev, R. V., Balbashov, A. M., & Rasing, T. (2005). Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses. *Nature*, 435, 655–657. <https://doi.org/10.1038/nature03564>

[4] Pitaevskii, L. P. (1961). Electric forces in a transparent dispersive medium. *Soviet Physics JETP*, 12(5), 1008–1013.

[5] Bornacelli, J., Torres-Torres, C., Arenas-Alatorre, J., Martínez-Mondragón, M. M., Rodríguez-Fernández, L., & Oliver, A. (2020). Enhanced ultrafast optomagnetic effects in room-temperature ferromagnetic Pt nanoclusters embedded in silica by ion implantation. *Nanotechnology*, 31(35), 355705. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab93ec>