

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

Centenario del experimento de Stern-Gerlach

Karina Galache · Thursday, March 24th, 2022

Categorías: Punto y Aparte, Ciencias Naturales y de la Salud

Fig. 1).- Concepción actual del experimento de Stern-Gerlach (ESG). Nótese que no hay trayectorias clásicas sino probables (líneas punteadas), y que los átomos en realidad entran en una superposición de estados de espín y de posición que se encuentran enredados, como en la ecuación que aparece dentro de la figura.

La investigación del Experimento de Stern-Gerlach (ESG) ha sido fundamental para el desarrollo de la mecánica cuántica y su enseñanza [1,2,3], pues es un elemento imprescindible para la formación de un físico. Un aspecto histórico de este descubrimiento es que ha sobrevivido por lo menos a dos teorías: la de Bohr-Sommerfeld y la semiclásica, usada para su explicación en los libros actuales de mecánica cuántica. En 2022 se celebran cien años de la realización del ESG, aún vigente, y continúa con un vertiginoso desarrollo tanto conceptual como en sus aplicaciones prácticas, con investigaciones que siguen generando reportes en revistas de prestigio internacional.

La historia de la física está llena tanto de momentos “estelares” como de episodios donde el conocimiento científico se va acumulando de forma gradual. Uno de ellos, estelar, fue la realización del ESG, ya que muestra de manera inequívoca la existencia del espín de las partículas sub-atómicas, el cual es una propiedad cuántica e intrínseca de las partículas que no tiene contraparte en el mundo clásico. Asimismo, el ESG se inscribe en la lista de experimentos cruciales de la física; que son aquellos que permiten distinguir y evaluar teorías opuestas. Por ejemplo, uno de los más famosos de la óptica es el interferómetro de Young, que permitió discernir entre dos teorías opuestas de la luz: una, propuesta por Isaac Newton, quien sugería que la luz estaba formada por partículas, y otra, por Hughes y Fresnel, quienes planteaban que la luz era una onda. El interferómetro de Young sirvió para discriminar e inclinar la evidencia en favor de la teoría ondulatoria de la luz. En el mundo de la mecánica cuántica el ESG tiene una connotación similar, ya que permitió, en su tiempo, discriminar entre la teoría clásica del átomo y la de Bohr-Sommerfeld.

En física hay dos grandes mundos: uno conocido como el “mundo clásico” y otro como el “mundo cuántico”. La física clásica, que corresponde al primero, ha sido muy exitosa en explicar diversos fenómenos naturales y es responsable de un sinnúmero de aplicaciones que dan confort a nuestra vida diaria. La física cuántica es otro “mundo” que describe un universo apasionante e impredecible que también ha generado multitud de aplicaciones benéficas para los seres humanos; por ejemplo, el entendimiento de los materiales semiconductores que llevó al desarrollo de los

transistores que son base de esta era digital.

La mecánica cuántica ha sido fuente continua de grandes controversias y descubrimientos. Uno de ellos fue el espín de las partículas. Históricamente, la existencia del espín se demostró por medio del ESG, una faceta que es relevante para la física; otra vertiente deriva de su uso como herramienta trascendental para el desarrollo y enseñanza de la mecánica cuántica.

El ESG se usa en la enseñanza para explicar diferentes procesos como la medición cuántica y la no conmutatividad de ciertos operadores, a diferencia de los números que sí conmutan; por ejemplo, $2 \times 3 = 3 \times 2$. Dentro de las curiosidades que lo rodean, cabe señalar que: i) no fue concebido dentro del formalismo de la mecánica cuántica actual, sino dentro de lo que se conoce como mecánica cuántica antigua (que abarca el periodo de 1900 a 1924); y ii) aunque parezca increíble, no se concibió para demostrar la existencia del espín, sino para demostrar experimentalmente que el momento angular orbital estaba cuantizado (que sólo puede adquirir valores discretos). El momento angular es una característica de los sistemas físicos, cuando ciertas partículas, como los electrones, orbitan alrededor de otra.

El experimento de Stern-Gerlach fue propuesto originalmente por Otto Stern en 1921. Su idea era demostrar que el momento orbital angular estaba cuantizado y se llevó a cabo hasta el año siguiente, en 1922, con la ayuda de Walter Gerlach quien, al obtener resultados confiables, envió una fotografía (ahora famosa y que aparece en muchos libros de texto) a Niels Bohr, físico danés quien había propuesto la cuantización del momento angular orbital (en realidad lo que se buscaba probar era una extensión de la teoría de Bohr conocida como teoría de Bohr-Sommerfeld). El experimento consistió en crear un haz de átomos de plata que atravesara un gradiente de campo magnético (que variara espacialmente conforme se desplazaban los átomos). La teoría clásica predecía que los átomos deberían llegar a una placa fotográfica formando una línea ¿ya que el momento orbital angular podría tener cualquier valor?, mientras que la teoría de Bohr-Sommerfeld conjeturaba que sólo llegarían a dos lugares ¿ya que el momento orbital angular únicamente tomaba valores discretos?. La fotografía que Gerlach le envió a Bohr era una confirmación de que los átomos llegaban a dos lugares, demostrando que el momento angular orbital estaba cuantizado. La teoría de Bohr-Sommerfeld era correcta.

Tres años después de la realización del experimento, en 1925, dos físicos, George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit, estudiantes de doctorado, propusieron la existencia del espín para explicar resultados de espectroscopia óptica (espectros de radiación) que no podían ser explicados por las teorías de ese momento. Tomó dos años a la comunidad de físicos comprender que lo que el ESG demostraba en realidad era la existencia del espín. A partir de 1927, el ESG se acomodó a la nueva teoría de la mecánica cuántica desarrollada a partir de 1925, y ha servido desde ese momento hasta nuestros días como una herramienta poderosa para explicar y entender diversos conceptos cuánticos y el desarrollo mismo de la mecánica cuántica.

Cabe mencionar que la explicación usual del experimento de Stern-Gerlach, que se encuentra en los libros de texto, emplea una teoría semiclásica, donde el espín está cuantizado pero la posición se considera clásica, implicando que los átomos siguen una trayectoria que se dibuja claramente como líneas continuas. Sin embargo, en mecánica cuántica no se puede hablar de trayectorias, ya que lo impiden diversos aspectos fundamentales, entre ellos el Principio de Incertidumbre de Heisenberg. Por otra parte, esta teoría semiclásica usa la segunda ley de Newton para analizar y predecir la trayectoria de los átomos y, paradójicamente, viola las leyes de Maxwell [3,4], leyes que gobiernan los fenómenos eléctricos y magnéticos. Por ello, desde los años noventa del siglo

pasado se han realizado diversas investigaciones para determinar las propiedades del ESG cuando se considera su aspecto cuántico completo, esto es, cuando su posición y su espín son considerados como variables cuánticas. Estos nuevos estudios revelan que el experimento posee propiedades de enredamiento cuántico no consideradas previamente [2,3,5,6]. Es decir, a partir de años recientes el ESG ha recibido nuevo estatus y explicación, prediciendo, además, nuevos fenómenos, por ejemplo, no localidad cuántica [2,6] (que se refiere a la posibilidad de afectar el estado de un sistema de forma instantánea aunque esté en lugar muy alejado), steering cuántico [2] (o manejo cuántico que se refiere a la posibilidad de manejar -manipular- el estado de un sistema de forma instantánea mediante mediciones realizadas en otro sistema cuántico); enredamiento híbrido [5] (que se refiere a un enredamiento entre variables discretas y continuas) e interferometría cuántica [7] (que se realiza usando ondas de materia).

Como se puede apreciar en la Fig. 1, en la concepción actual del experimento de Stern-Gerlach las trayectorias probables se muestran con líneas punteadas, indicando con esto que los átomos no tienen posición definida ni siguen una trayectoria clásica. La ecuación indica que el átomo se encuentra en un estado enredado entre la posición y el espín del átomo.

El enredamiento cuántico es un recurso físico que se usa para realizar tareas no clásicas como la computación cuántica, la criptografía cuántica, etcétera. Es una correlación (relación recíproca) entre estados cuánticos que no tiene contraparte clásica; usando esta correlación cuántica se puede “manejar”, por ejemplo, el estado de otro sistema en forma instantánea sin interactuar con él, aunque esté separado a una gran distancia [2], fenómeno mencionado en párrafos anteriores y conocido en idioma inglés como steering (todavía no hay traducción oficial al español). Cabe mencionar que el enredamiento cuántico que produce el ESG es híbrido, ya que se genera entre variables discretas y continuas [5].

Podemos concluir que el análisis del ESG abrirá las puertas a nuevos descubrimientos y aplicaciones, que den lugar a fenómenos no concebidos previamente por un experimento que este año celebra su primer centenario.

Bibliografía

- [1] Weinert, Friedel. 1995. “Wrong theory—Right experiment: The significance of the Stern-Gerlach experiments”, en *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Volume 26, Issue 1, Pages 75-86. [https://doi.org/10.1016/1355-2198\(95\)00002-B](https://doi.org/10.1016/1355-2198(95)00002-B)
- [2] Arévalo Aguilar, L.M. 2021. “Nonlocal single particle steering generated through single particle entanglement”, en *Scientific Reports*. vol 11, p.p. 6744. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85508-8>
- [3].- Benítez Rodríguez, E. y L. M. Arévalo Aguilar, A. E. Piceno Martínez. 2017. “A full quantum analysis of the Stern–Gerlach experiment using the evolution operator method: analyzing current issues in teaching quantum mechanics”, en *Eur. J. Phys.* vol 38, p.p. 025403. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa51ad>
- [4] Scully M O, Lamb W E Jr and Barut A. 1987. “On the theory of the Stern–Gerlach apparatus” en *Found. Phys.* Vol. 17, 575.
- [5].- Piceno Martínez, A.E. y L. M. Arévalo Aguilar. (2021). “Quantifying the hybrid entanglement of the Stern-Gerlach experiment using discrete reductions” en *Physics Letters A* vol. 394, p.p. 127200. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127200>

- [6].- Piceno Martínez, A. E.; Benítez Rodríguez, E.; J. A. Mendoza Fierro, M. M. Méndez Otero y L.M. Arévalo Aguilar, (2018). “Quantum Nonlocality and Quantum Correlations in the Stern–Gerlach Experiment”, en Entropy Vol. 20, 4. <https://dx.doi.org/10.3390/e20040299>
- [7] Margalit, Y., Dobkowski, O., Zhou, Z., Amit, O., Japha, Y., Moukouri, S., Rohrlich, D., Mazumdar, A., Bose, S., Henkel, C., Folman, R. 2021. (2021), “Realization of a complete Stern-Gerlach interferometer: Toward a test of quantum gravity”, Sci. Adv. 2021; 7 : eabg2879. DOI: [10.1126/sciadv.abg2879](https://doi.org/10.1126/sciadv.abg2879)

This entry was posted on Thursday, March 24th, 2022 at 3:43 pm and is filed under [Punto y Aparte](#), [Ciencias Naturales y de la Salud](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.