

100 años del experimento Stern-Gerlach

Jorge Santoro



Jorge Santoro

Profesor de Investigación del CSIC
jubilado

C-e: jorgesantorosaid@gmail.com

Recibido: 18/02/2022

Aceptado: 28/04/2022

Resumen: Se cumplen 100 años del experimento Stern-Gerlach que demostró concluyentemente la existencia de la cuantización espacial, un fenómeno clave en diversos aspectos de la Química y de la Física, tales como las espectroscopías de RMN y RSE, el máser o los relojes atómicos. En este artículo de carácter histórico se describe la motivación del experimento y las dificultades que tuvieron que superar sus autores.

Palabras clave: Experimento Stern-Gerlach, cuantización espacial, historia de la ciencia.

Abstract: It is the 100th anniversary of the Stern Gerlach experiment that demonstrated conclusively the existence of spatial quantization, a key phenomenon in various aspects of Chemistry and Physics, such as NMR and EPR spectroscopies, the maser or the atomic clocks. This historical article describes the motivation for the experiment and the difficulties its authors had to overcome.

Keywords: Stern-Gerlach experiment, space quantization, history of science.

Introducción

La noche del 7 al 8 de febrero de 1922 se llevó a cabo con éxito, tras casi un año de intentos, el experimento conocido como el "experimento Stern-Gerlach". El experimento es, sin duda, uno de los más citados en obras que tratan con temas relacionados con la Mecánica Cuántica, tanto desde un punto de vista teórico como histórico, así como en tratados de Química Física o de Espectroscopía. Ello se debe a varias características. Por un lado, el experimento sirvió para confirmar aspectos importantes de la teoría cuántica: por primera vez se observaba la cuantización de modo directo. Por otro, sin embargo, puso de manifiesto las limitaciones de la mecánica cuántica inicial, la vieja mecánica cuántica que mezclaba la cuantización de determinadas propiedades con una dinámica de tipo clásico. Finalmente, se trataba de un experimento que se puede calificar como extremadamente elegante por su sencillez conceptual.

Durante la Segunda Guerra Mundial se destruyó el dispositivo experimental original del experimento, así como la documentación de laboratorio asociada con él. La reconstrucción de cómo se llevó a cabo está basada en entrevistas a los autores y en los recuerdos de algunos colaboradores de Otto Stern o de Walther Gerlach de la época o posteriores (Schütz, Estermann, Herschbach, ...). Aparecen en estos relatos multitud de anécdotas que, como ocurre en torno a otros desarrollos científicos trascendentes (la bañera de Arquímedes, la manzana de Newton, el sueño de Kekulé, la contaminación de una placa Petri de Fleming, la compañera sexual de Schrödinger en Arosa, etc.), no siempre está claro si son ciertas o forman parte del mito.

El origen

El origen del experimento hay que situarlo en la génesis de la teoría atómica. Mientras que para los químicos la existencia de átomos resultaba indiscutible, especialmente tras el famoso congreso de Karlsruhe de 1860, hasta comienzos del siglo xx los físicos prácticamente no habían prestado atención al tema y parte de ellos cuestionaba su "realidad". La situación cambió drásticamente como consecuencia de varios hechos, entre los que destacan el descubrimiento del electrón y el de la radiactividad. Se comenzó entonces a proponer modelos atómicos (Thomson, Nagaoka, Rutherford) de entre los cuales el modelo cuántico de Bohr resultó triunfante. El modelo inicial de Bohr, que involucraba órbitas electrónicas circulares, fue extendido por Sommerfeld, primero admitiendo órbitas elípticas (dos grados de libertad) y posteriormente cuantizando la inclinación del plano de la órbita (tres grados de libertad: forma, tamaño, dirección)^[1]. La cuantización espacial era capaz de explicar el efecto Zeeman normal^[2,3], pero no el anómalo. No superaba, por tanto, a la teoría clásica de Zeeman y Lorentz. Además, planteaba problemas que hicieron que fuera considerada por muchos físicos como un artificio matemático^[4]. Uno de estos problemas era que, en el caso de un gas de átomos hidrogenoides, en presencia de un campo magnético debía producirse una birrefringencia óptica, algo que no se observaba experimentalmente. Este hecho se planteó en un seminario en la Universidad de Fráncfort. A la mañana siguiente Otto Stern, que había asistido al seminario, se despertó temprano, pero hacía demasiado frío para levantarse de la cama, así que se quedó allí pensando acerca del asunto y tuvo la idea de un experimento para confirmar o descartar la cuantización espacial^[5]. Para llevar a cabo el experimento reclutó a su colega Walther Gerlach, que era un experimentador más experto que él.

Los autores

¿Quiénes eran Otto Stern y Walther Gerlach en 1922?

Otto Stern nació en 1888 en la entonces ciudad alemana de Sohrau (actualmente Żory, Polonia). Estudió Química Física, en las universidades de Friburgo, Múnich y Breslavia, doctorándose en 1912 en esta última con una aplicación de la teoría cinética al estudio de la presión osmótica. A continuación realizó su postdoctorado con Albert Einstein, primero en la Universidad Alemana de Praga y luego en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH), con quien estudió la energía del punto cero. Tras conseguir la "Habilitation" consiguió un puesto de profesor asociado en Zúrich y posteriormente en el Instituto de Física Teórica de Fráncfort. Durante la Primera Guerra Mundial sirvió en una unidad meteorológica en el frente ruso. Casi al final de la guerra Nernst consiguió el traslado de Stern a su laboratorio en Berlín. Allí conoció a Max Volmer con quien colaboró en el estudio de la desactivación intermolecular de procesos fotofísicos, obteniendo la denominada relación de Stern-Volmer. De vuelta a Fráncfort se interesó por los haces moleculares con los que estudió la distribución de velocidad de los átomos que emergen de un horno. Sus datos experimentales no se ajustaban bien a la distribución de Maxwell-Boltzmann. En una segunda publicación mostró, tras una indicación de Einstein, que la velocidad de los átomos que emergen del horno no debe mostrar dicha distribución, puesto que los de mayor velocidad tienen una mayor probabilidad de escapar; el flujo difiere de la densidad. Su siguiente trabajo sería el experimento en el que deseaba probar o descartar la cuantización espacial.

Walther Gerlach nació en Biebrich (Alemania) en 1889. Estudió Física en la universidad de Tubinga en la que se doctoró en 1912 con una tesis sobre la ley de radiación de Stefan-Boltzmann, dirigida por Friedrich Paschen. Tras el doctorado continuó trabajando con Paschen y, entre otros temas, se interesó por los haces moleculares que intentó utilizar, sin éxito, en estudios espectroscópicos. Durante la Primera Guerra Mundial sirvió en una unidad de desarrollo de la telegrafía sin hilos y en la Comisión de Pruebas de Artillería. Tras la guerra trabajó en el laboratorio de Física de una industria de pinturas. En 1920 obtuvo el puesto de profesor asociado en el Instituto de Física Experimental de la Universidad de Fráncfort. Allí entabló muy buenas relaciones con los integrantes del Instituto de Física Teórica, que, a pesar del nombre, también realizaban trabajo experimental. Fruto inicial de esas relaciones fueron varias publicaciones con Max Born, el director del Instituto de Física Teórica. Una de ellas fue el estudio de redes cristalinas utilizando el método Debye-Scherrer, lo que tiene cierto interés por el efecto que tuvo en el desarrollo del dispositivo experimental con el que se llevó a cabo el experimento Stern-Gerlach. Otro de los problemas que se planteó abordar Gerlach fue el de comprobar si los átomos de bismuto mostraban el mismo diamagnetismo que se observaba en cristales. Concibió para ello un experimento con haces moleculares en el que los átomos de bismuto sería deflectados por un campo fuertemente inhomogéneo. Se cuenta^[6] que Born era de la opinión de que el experimento no tendría éxito puesto que la deflexión sería muy pequeña, a

lo que Gerlach contestó "kein Versuch ist so dumm, dass man ihn nicht versuchen sollte" (ningún experimento es tan estúpido que uno no debería intentarlo). Para preparar el experimento empezó a estudiar cómo producir un campo magnético con un fuerte gradiente de campo. Antes de que realizara el experimento con el bismuto Otto Stern le preguntó: ¿Sabes lo que es la cuantización direccional? A continuación, le explicó su idea para confirmarla o refutarla mediante un experimento.

Hay un tercer responsable del experimento que permanece parcialmente olvidado. Se trata del maestro mecánico del Instituto de Física de la Universidad de Fráncfort Adolf Schmidt. Schmidt se encargó de la construcción y mantenimiento de gran parte del equipo con el que se llevó a cabo el experimento.

La descripción teórica del experimento

En julio de 1921 aparecía en Zeitschrift für Physik un artículo^[7] que indujo a Stern a publicar inmediatamente su propuesta experimental. El artículo lo firmaban Hartmut Kallman y Fritz Reiche, que trabajaban en Berlín en el Instituto de Química Física dirigido por Fritz Haber, y llevaba por título "Über den Durchgang bewegter Moleküle durch inhomogene Kraftfelder" (Sobre el paso de moléculas en movimiento a través de campos de fuerza no homogéneos). En él se decía "se está probando en nuestro instituto el siguiente método nuevo para la detección de dipolos: se pasa un haz molecular a través de un campo eléctrico no homogéneo; entonces, si las moléculas poseen dipolos, un número notable de las moléculas deben desviarse de su camino". Dado que Born estaba interesado en moléculas dipolares Kallman y Reiche enviaron, antes de su publicación, una copia del trabajo a Fráncfort. Born se lo enseñó a Stern, que al leerlo temió que dieran un paso más y se ocuparan de la cuantización espacial. Para mantener la prioridad en su idea escribió inmediatamente un artículo^[8] en el que desarrollaba la motivación y la base teórica del experimento que había concebido.

El artículo de Stern, recibido en Zeitschrift für Physik solo un mes después del de Kallman y Reiche, llevaba por título "Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld" (Una vía para la comprobación experimental de la cuantización direccional en el campo magnético). Comenzaba indicando que de acuerdo con la teoría cuántica si se coloca un gas de átomos con impulso angular total \hbar en un campo magnético solo son posibles dos orientaciones, puesto que la componente del impulso angular en la dirección del campo magnético solo puede tomar los valores $\pm\hbar$. Indicaba a continuación dos objeciones a esta posibilidad. Por un lado, de cumplirse esto, debería dar lugar a una birrefringencia óptica, algo que hasta la fecha no se había observado. Por otro, resultaba difícil explicar cómo los átomos, cuyos momentos angulares en ausencia de campo apuntan en todas las direcciones posibles, se orientan al entrar en el campo magnético. De hecho, lo esperado era un movimiento de precesión, la precesión de Larmor, en la que el ángulo entre el momento magnético del átomo y el campo magnético externo se mantiene constante. Afirmaba después: "Ob nun die quantentheoretische oder die klassische Auffassung zutrifft, läßt sich durch ein prinzipiell

ganz einfaches Experiment entscheiden. Man braucht dazu nur die Ablenkung zu untersuchen, die ein Strahl von Atomen in einem geeigneten inhomogenen Magnetfeld erfährt." (Si la concepción teórica cuántica o la clásica es la correcta puede decidirse mediante un experimento en principio muy simple. Tan solo se necesita examinar la desviación que experimenta un haz de átomos en un campo magnético no homogéneo adecuado.). Indicaba además en una nota que Gerlach y él llevaban ya algún tiempo ocupados en la ejecución del experimento.

Presentaba a continuación las bases teóricas del experimento. En presencia de un gradiente de campo magnético se ejerce sobre el átomo una fuerza igual a la variación de la energía potencial cambiada de signo

$$V = -\mu \times B$$

$$F = (\mu_x \text{ dB/dx}, \mu_y \text{ dB/dy}, \mu_z \text{ dB/dz})$$

Se considera como eje z el definido por el campo magnético constante. Debido a la precesión de Larmor los valores medios de μ_x y μ_y a considerar son nulos, dado que el tiempo correspondiente a una rotación alrededor del eje z (en la que los valores de μ_x y μ_y pasan de ser positivos a negativos y viceversa) es mucho menor que el tiempo en el que el efecto del gradiente de campo varía la trayectoria en las direcciones x o y de modo apreciable. Por tanto, tan solo hay que considerar la fuerza en la dirección z.

$$F_z = \mu_z \text{ dB/dz}$$

La aceleración será

$$a_z = F/m = \mu_z/m \text{ dB/dz}$$

Si la fuerza actúa durante el tiempo t en el que el átomo atraviesa una distancia l, perpendicular al campo magnético, a una velocidad v la desviación será

$$s_z = 1/2 a_z t^2 = 1/2 a_z l^2/v^2 = \mu_z/2m \text{ dB/dz } l^2/v^2$$

De acuerdo con la teoría cinética de los gases se cumple $mv^2 = 3k_B T$, luego

$$s_z = \mu_z/6k_B \text{ dB/dz } l^2/T$$

En el caso cuántico y para átomos con número cuántico azimutal igual a uno solo existen dos valores posibles de μ_z , $\pm e/2m$ (Stern sigue en esto a Bohr, que descartaba la posibilidad $\mu_z = 0$), por lo que el haz se dividiría en dos alejados en $2s_z$, cada uno con la mitad de átomos del original. Al depositarse los átomos en una placa dejarían dos trazas separadas y una intensidad nula en la posición que se alcanza en ausencia del campo magnético inhomogéneo, es decir sin desviación del haz. En el caso clásico el número de átomos con momentos magnéticos cuya orientación forma un ángulo θ con el campo magnético, $\mu_z = e\hbar/2m \cos(\theta)$, es proporcional a $\sin(\theta)$, por lo que el depósito del haz sería un continuo

entre los dos valores correspondientes al caso cuántico y con una intensidad máxima en la posición de desviación nula.

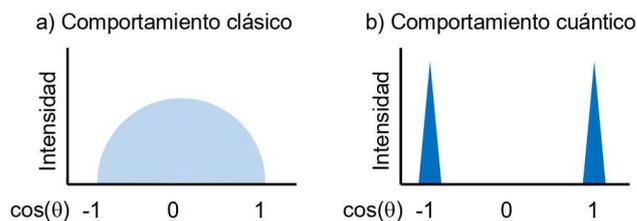


Figura 1. Resultado esperado del experimento Stern-Gerlach de acuerdo con: a) la Física clásica; b) la Mecánica cuántica.

Con objeto de evaluar la viabilidad del experimento el artículo terminaba con un cálculo de la desviación esperada para el momento magnético máximo $\mu_z = e\hbar/2m$. Utilizando valores "razonables" experimentalmente ($\text{dB/dz} = 100 \text{ T/m}$, $l = 0,033 \text{ m}$ y $T = 1000 \text{ K}$) el resultado era de $s_z = 0,0112 \text{ mm}$ (posiblemente hay una errata en la publicación, pues el valor correcto es $0,0122 \text{ mm}$). Resulta sorprendente que con un valor esperado de la desviación tan minúsculo Stern y Gerlach decidieran realizar el experimento. De hecho, Gerlach cuenta^[9] que, unos días después de la propuesta inicial, Stern le dijo que había hecho el cálculo y que la desviación era demasiado pequeña. A continuación, indicó que el experimento podría funcionar si se hicieran ciertas cosas. En especial preguntó a Gerlach si conseguiría una inhomogeneidad de campo de 10^4 Gauss/cm (100 T/m). La contestación de Gerlach fue que la conseguiría con seguridad, incluso mayor. Ante esto Stern comentó que tenían que conseguir un haz de una décima o incluso una centésima de milímetro de diámetro y todo funcionaría.

La publicación de Stern^[8] despertó un gran interés, no solo entre los científicos ocupados en temas de mecánica cuántica sino entre los físicos en general. Este interés se trasladó a empresas privadas relacionadas con la investigación científica, que colaborarían con Stern y Gerlach proporcionándoles medios para la realización del experimento.

La instrumentación

Así como desde el punto de vista teórico el experimento era sencillo, desde el punto de vista experimental presentaba enormes dificultades. Básicamente el equipo experimental consistía en: un horno en cuyo interior se situaba un hilo de platino sobre el que se había fundido el metal a examinar, la plata, y que se calentaba eléctricamente; un par de rendijas para seleccionar la parte del haz atómico de dirección adecuada; un campo magnético no homogéneo; una placa sobre la que se depositaban los átomos del haz. Además, todo el dispositivo se encontraba en vacío con objeto de evitar colisiones, lo que hacía necesario refrigerar las paredes exteriores del horno y el imán. Gran parte de las dificultades que presentaba la construcción del equipo aparecen reflejadas en el artículo^[10] que publicaron Gerlach y Stern un par de años después del éxito del experimento, en el que describieron la instrumentación con las distintas modificaciones que fueron introduciendo.

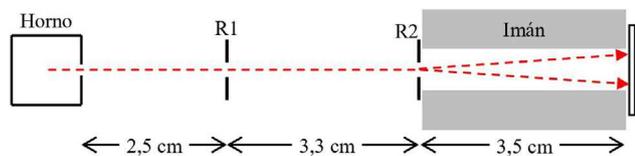


Figura 2. Esquema del dispositivo experimental usado por Stern y Gerlach.

El primer horno que utilizaron era metálico, de hierro, con una apertura circular de 1 mm de diámetro. En ocasiones, tras calentarse durante horas se evaporaba el aislante que separaba el hilo de platino de las paredes del horno, lo que producía cortocircuitos. Para evitar este inconveniente tuvieron que sustituirlo por un horno cerámico. Este horno resultó más resistente, si bien el calentamiento no resultaba tan uniforme como con el de hierro. Inicialmente las rendijas eran orificios circulares de 1/20 mm de diámetro hechos en placas de platino. Tiempo después uno de estos diafragmas se sustituyó por una rendija rectangular de 0,8 mm de altura y 0,03 a 0,04 mm de anchura. Para conseguir el gradiente de campo magnético construyeron piezas polares, una en forma de cuña y la otra con una hendidura, que unieron a las piezas polares de un electroimán en el que la longitud l que debía atravesar el haz era de 3,5 cm. Todo el dispositivo debía estar en vacío. Como el calentamiento debido al horno impedía conseguir un buen vacío, decidieron utilizar dos cámaras, uno para el horno y otro para el resto del instrumento. El vacío se obtenía mediante sendas bombas de difusión de mercurio. Además, cada cámara estaba conectada a un recipiente que se enfriaba con nieve carbónica o aire líquido. Las bombas de vacío fueron las que dieron mayores problemas. Tal como cuenta Wilhelm Schütz^[11], doctorando de Gerlach en aquellos años, las bombas de difusión de mercurio eran poco eficientes y poco fiables. Estaban hechas de vidrio, y no era raro que se rompieran por el golpeo del mercurio en ebullición o debido a la condensación de agua. Con la rotura no solo se desperdiciaban horas y horas de bombeo, sino que era necesario sustituir la bomba. Finalmente decidieron construirlas y repararlas ellos mismos^[9]. La conexión entre las dos cámaras de vacío y la estabilidad mecánica de todo el sistema tampoco resultó sencilla y tuvieron que probar tres disposiciones para encontrar una configuración estable que además les permitiera alinear todo el sistema con cierta facilidad. Obviamente el último elemento, la placa de condensación, no planteó problemas, pero sí la observación de la pequeña cantidad de átomos de plata que se depositaba. Respecto a esto Dudley Herschbach cuenta^[5,12] que Stern le comentó: "After venting to release the vacuum, Gerlach removed the detector flange. But he could see no trace of the silver atom beam and handed the flange to me. With Gerlach looking over my shoulder as I peered closely at the plate, we were surprised to see gradually emerge the trace of the beam. . . . Finally we realized what [had happened]. I was then the equivalent of an assistant professor. My salary was too low to afford good cigars, so I smoked bad cigars. These had a lot of sulfur in them, so my breath on the plate turned the silver into silver sulfide, which is jet black, so easily visible. It was like developing a photographic film". Tras esto desarrollaron un procedimiento de revelado que les permitía observar con

claridad el depósito de plata. Aunque la anécdota tiene todos los elementos para considerarla apócrifa, Bretislav Friedrich y Dudley Herschbach consiguieron reproducir el revelado con humo de un puro en 2002, con motivo de la celebración de los 80 años del experimento^[12].

Además de las dificultades técnicas se enfrentaban a problemas económicos derivados de la situación de Alemania tras la Primera Guerra Mundial. Afortunadamente recibieron ayuda de diversas fuentes, lo que es un signo del interés que había despertado el experimento. En las publicaciones agradecieron a la empresa Hartmann und Braun el préstamo del electroimán, que más tarde compraron con una ayuda de una fundación del Kaiser Wilhelm-Institut für Physik; a la empresa Messer u. Co., Luftverflüssigungsanlagen por el donativo de aire líquido; a la Asociación de Amigos y Patrocinadores de la Universidad de Fráncfort por los medios que habían puesto a su disposición. Una de las contribuciones económicas resulta curiosa; la cuentan Friedrich y Herschbach en^[12]. Born mencionó la mala situación económica del Instituto a un colega que iba a viajar a Nueva York. Unas semanas después recibió de éste una postal invitándole a que escribiera a Henry Goldman. Friedrich y Herschbach reproducen a continuación parte de lo que indica Born en su autobiografía: "At first I took it for another joke, but on reflection I decided that an attempt should be made ... [A] nice letter was composed and dispatched, and soon a most charming reply arrived and a cheque for some hundreds of dollars ... After Goldman's cheque had saved our experiments, the work [on the Stern-Gerlach experiment] went on successfully." Henry Goldman era miembro de la familia fundadora del banco de inversión Goldman Sachs, familia que tenía sus raíces en Fráncfort.

La realización experimental

En los primeros días de noviembre de 1921 —Gerlach indica el 4 de noviembre en una entrevista^[9] y la noche del 5 al 6 de noviembre en un artículo^[13]— utilizando todavía un horno de acero y rendijas circulares de 0,05 mm de diámetro, consiguieron un éxito parcial, que enviaron inmediatamente a publicar^[14]. Habían realizado cinco experimentos sin campo magnético, con éxito en cuatro casos, y cuatro experimentos con campo magnético, con resultados en tres de ellos. La duración de cada experimento era de 8 horas, tras lo cual el depósito de plata estaba en el límite de detección. En los experimentos sin campo magnético la traza del depósito era circular con un diámetro de 0,1 mm. En los experimentos con campo magnético la traza aparecía ensanchada en una dimensión, la correspondiente al gradiente de campo, con un tamaño de 0,25-0,3 mm. Este ensanchamiento correspondía a un momento magnético de uno o dos magnetones de Bohr. Este fue el único resultado que se atrevieron a indicar en la publicación, aunque la ausencia de estructura discernible en el depósito con campo magnético parecía favorecer la ausencia de cuantización espacial, tal como contaría Gerlach años después^[9]. Gerlach cuenta también que durante una visita a Fráncfort Sommerfeld indicó que habría que considerar también la posible división del haz en tres subhaces, correspon-

dientes a los números cuánticos magnéticos $m = +1, 0$ y -1 , subhaces que eran suficientemente difusos como para observar un continuo. La posibilidad $m = 0$ había sido excluida por Bohr y Stern no la había tenido en consideración. Sommerfeld, por su parte, dudaba entre ambas posibilidades, inclinándose en ocasiones por una alternativa y en otras por la contraria. La explicación del resultado requería realizar experimentos adicionales con mejor resolución espacial.

Stern había conseguido una plaza de profesor de Física Teórica en Rostock, a orillas del mar Báltico, a la que se incorporó en el primer semestre del curso 1921/1922. Gerlach continuó solo a cargo del experimento. Durante las vacaciones de Navidad él y Stern realizaron varios cambios en el dispositivo experimental. Sustituyeron el horno de acero por uno cerámico, de chamota. Incrementaron la distancia entre la salida del horno y la primera rendija circular, que se había obturado con plata fundida en alguno de los experimentos anteriores. Sin embargo, aunque esto suponía también trabajar con un haz más fino, los experimentos no parecían dar mejores resultados. A principios de febrero de 1922 Stern y Gerlach se reunieron en Gotinga, a mitad de camino entre Rostock y Fráncfort, para decidir el futuro del experimento. De acuerdo con Immanuel Estermann^[6], que trabajaba con Stern en Rostock y lo haría después en Hamburgo, la conclusión de sus discusiones fue que el experimento no funcionaría. Una huelga de trenes obligó a Gerlach a permanecer día y medio en Gotinga, tiempo durante el que revisó todos los detalles instrumentales y decidió hacer un último intento. En éste la segunda rendija circular había sido sustituida por una rendija rectangular de 0,8 mm de altura y 0,03 mm de anchura que estaba orientada perpendicularmente al campo magnético y que proporcionaba mayor intensidad. Esta sustitución la realizó Gerlach al recordar^[9] que había usado este tipo de rendija en el estudio de redes cristalinas utilizando el método Debye-Scherrer que se ha comentado antes.

La noche del 7 al 8 de febrero el experimento dio lugar a dos trazas separadas, con un hueco entre ellas de 0,11 mm. La separación entre los centros de ambas trazas era de 0,2 mm. La mejor descripción de este éxito la realizaría años después Wilhelm Schütz^[11]: "I arrived one morning in February 1922 at the institute; it was a gorgeous morning; cold air and snow! W. Gerlach was in the middle of developing the silver deposit left by an atom beam which ran for 8 hours through the inhomogeneous magnetic field. Full of expectation, we watched the development process and have experienced the success of many months of hard work: the first splitting of a silver beam by an inhomogeneous magnetic field. After Meister Schmidt and, if I remember correctly, also E. Madelung, saw the splitting, the image was recorded micro-graphically in the mineralogical Institute. Then I got the job to send a Telegram to Herr Professor Stern in Rostock, which read "Bohr is right after all!" ("Bohr hat doch recht!")". Gerlach preparó varias postales con las fotografías de la traza en ausencia y en presencia de campo magnético que envió a diversos colegas. La más famosa es la que envió a Bohr en la que decía: "Hochverehrter Herr Bohr, anbei die Fortsetzung unserer Arbeit (siehe Zeitschrift f Physik VIII. Seite 110. 1921): Zu experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung. Wir gratulieren zur Bestätigung Ihrer

Theorie." (Estimado señor Bohr, adjunta la continuación de nuestro trabajo (ver Zeitschrift f Physik VIII. página 110. 1921): La evidencia experimental de la cuantización direccional. Le felicitamos por la confirmación de su teoría.). La postal aparece fechada el 8 de febrero de 1922, lo que permite deducir la fecha en la que tuvo éxito el experimento. Años después los autores de un artículo de carácter histórico sobre Stern^[15] han aprovechado la descripción de Schütz de las condiciones atmosféricas y su comparación con los registros del servicio meteorológico para confirmar la fecha.

Tras el éxito Gerlach y Stern escribieron inmediatamente un artículo^[16] en el que incluyeron los resultados de dos experimentos adicionales, que confirmaban el resultado del primero. En el artículo comenzaban explicando las mejoras que habían hecho en el dispositivo experimental respecto al utilizado en su publicación anterior. Presentaban a continuación la fotografía de su primer resultado y dibujos de la forma del depósito de plata en los tres experimentos realizados. Resumían a continuación las características de las imágenes y las conclusiones que se derivaban de ellas. Las más interesantes son:

- El haz atómico se divide en dos haces discretos en el campo magnético. No se detectan átomos no desviados.
- La anchura de los haces desviados es mayor que la anchura de la imagen no desviada. Esta última es simplemente la imagen de la rendija R2 proyectada sobre la placa colectora. El haz desviado se ensancha debido a la distribución de velocidad de los átomos de plata.
- Este hecho refuerza la evidencia de que los átomos no deflectados no están presentes en una cantidad notable. Porque la detección de átomos no deflectados que colapsan en un área pequeña es mucho más sensible que la de los átomos deflectados que se separan en un área mayor. Por tanto, la orientación del eje magnético perpendicular a la dirección del campo parece no existir.
- En estos resultados vemos la evidencia experimental directa de la cuantización direccional en el campo magnético.

Finalmente, anunciaban una publicación en Annalen der Physik con una descripción detallada de los experimentos y de los resultados tan pronto como una medición más precisa de la inhomogeneidad del campo magnético les permitiera cuantificar el valor del magnetón. A pesar de ello un mes después enviaron a la misma revista, Zeitschrift für Physik, un artículo con la medida del momento magnético de átomo de plata^[17]. Stern aprovechó las vacaciones de Pascua para trasladarse a Fráncfort y participar en los experimentos. Los dos artículos^[16,17] aparecieron publicados en el mismo número de la revista en páginas sucesivas mientras que la escritura del artículo anunciado en Annalen der Physik se demoraría dos años^[10].

Para la determinación del valor del momento magnético necesitaban conocer con precisión la distancia entre el haz y las piezas polares en ausencia de campo. Para ello redujeron el haz haciendo más estrechas las rendijas y unieron a una

de las piezas polares filamentos de cuarzo que creaban sombras en el depósito y servían de referencia para la medida. Esto les permitió determinar la distancia con una precisión de la centésima de milímetro. También necesitaban determinar el gradiente del campo magnético en las posiciones por las que pasan los átomos deflectados durante su trayectoria. La determinación punto a punto la llevaron a cabo determinando la fuerza repulsiva experimentada por un diminuto espécimen diamagnético de bismuto mediante pesadas. Efectuaron un experimento con el haz a 0,21 mm de distancia de la pieza polar en cuña. El análisis lo realizaron utilizando datos de dicho experimento y del mejor de los tres reportados en la publicación anterior, para el que estimaron una distancia de 0,32 mm. Utilizaron además unas modificaciones de la fórmula que había dado Stern en^[8]. Las modificaciones eran necesarias por dos motivos. En primer lugar, el gradiente de campo magnético no es constante, sino que depende de la distancia a la cuña, que varía a medida que el haz se curva. En segundo lugar, la velocidad cuadrática media de los átomos del haz es mayor que la correspondiente a la distribución de Boltzmann, que era la utilizada en la fórmula primitiva. Resulta extraño este error en la obtención de la fórmula inicial, puesto que había sido Stern el que, tanto experimental como teóricamente, había mostrado esta diferencia. Con estas correcciones y utilizando el valor del magnetón de Bohr para el momento magnético se reproducían bien los valores de deflexión experimentales (0,146 mm calculados frente a 0,150 observados para el experimento nuevo y 0,111 mm calculados frente a 0,103 mm observados para el anterior). Por tanto, el átomo de plata poseía un momento magnético de un magnetón de Bohr, con una incertidumbre que estimaban en un 10%.

Consecuencias

Como contestación a las postales que había enviado Gerlach recibieron varias contestaciones de las que las más entusiastas fueron la de Wolfgang Pauli^[9] -"Lieber Gerlach, Meinen herzlichsten Glückwunsch zum gelungenen Experiment. Jetzt wird hoffentlich auch der ungläubige Stern von der Richtungs-Quantelung überzeugt sein". (Estimado Gerlach: Mis más sinceras felicitaciones por el exitoso experimento. Esperemos que ahora incluso el incrédulo Stern estará convencido de la cuantización direccional)- y la de Paschen -"Ihr Versuch beweist zum ersten Mal die Realität von Bohrschen-Zuständen." (Su experimento prueba por primera vez la realidad de los estados de Bohr)-. Otros, como Bohr o Franck, preguntaban cuestiones diversas sobre el experimento. Una vez bien conocidos los resultados a partir de las publicaciones, la cuantización espacial fue aceptada como un hecho físico real. Además, el éxito del experimento se consideró una de las pruebas más convincentes de la validez de la teoría cuántica. Sin embargo, no todo eran buenas noticias para la mecánica cuántica de aquellos años. El principal problema era el de explicar cómo se producía la reorientación del momento magnético nada más entrar en el seno del campo magnético. De un modo prácticamente instantáneo. En efecto, considerando una velocidad de los átomos de plata de unos 600 m/s y aun suponiendo

que la reorientación total se produjera tras atravesar un 10% de la trayectoria a lo largo del imán, 0,3 cm, el tiempo sería de tan solo 50 ms. Este problema, que ya había apuntado Stern en su publicación teórica^[8], fue analizado por Einstein y Ehrenfest^[18]. En su razonamiento consideraban que un cambio de orientación del momento magnético suponía la liberación o la absorción de energía, que no podía tener lugar sin una influencia externa. Intentando encontrar explicaciones semiclásicas calcularon el orden de magnitud esperado atribuyendo el efecto a la radiación asociada a la precesión de Larmor o a la radiación térmica del entorno del instrumento. En el primer caso el tiempo de la reorientación sería del orden de 10^{11} segundos y de 10^9 en el segundo caso. Exploraban después dos posibles mecanismos: que la cuantización se produjera en el horno, en el que existiría un campo magnético residual, inducida por colisiones; que los tránsitos de un estado no cuántico a uno cuántico mediante procesos de absorción y emisión de radiación fueran mucho más rápidos que entre dos estados cuánticos. En ambos casos aparecían problemas que les obligaban a descartarlos.

El otro problema que planteaba la cuantización espacial era el ya citado de la birrefringencia óptica. Dado el éxito final alcanzado en la demostración de la cuantización direccional, Stern y Gerlach se propusieron observarla. Durante el verano de 1922 Gerlach se trasladó a Rostock e intentaron observarla con vapores de sodio^[6,9,19] sin conseguirlo. Gerlach indica^[9] que de regreso a Fráncfort hizo algunos intentos adicionales igualmente infructuosos.

Un experimento con estrella

Un análisis moderno, a la luz de la mecánica cuántica actual, desvela que gran parte de las hipótesis que usaron Stern y Gerlach eran incorrectas. Tan solo una serie de hechos afortunados llevaron a que el experimento produjera el resultado esperado. Para la planificación del experimento y para su interpretación se habían basado en la mecánica cuántica antigua. De acuerdo con ésta el electrón se mueve alrededor del núcleo en una órbita elíptica definida por dos números cuánticos. El eje mayor de la elipse es proporcional al número cuántico radial o principal, n , y el eje menor al número cuántico azimutal, l . Este último puede variar de 1 a n . El valor 0 estaba excluido puesto que la trayectoria sería una línea recta que atraviesa el núcleo. La orientación de la órbita respecto a una dirección del espacio también aparece cuantizada. Queda definida por el número cuántico m , con valores $m = l, l-1, \dots, -l$, de modo que el ángulo que forma el impulso angular con la dirección de medida cumple $\cos(\theta) = m/l$. En el caso de la plata el electrón de valencia tendría el número cuántico $l = 1$, lo que supone que el impulso angular puede ser paralelo ($m = \pm 1$) o perpendicular ($m = 0$) al campo magnético. Bohr excluía el caso $m = 0$, puesto el electrón se movería en una órbita paralela al campo magnético que define la dirección privilegiada, lo que resultaría inestable. Por tanto, cabía esperar dos orientaciones del momento magnético (a favor y en contra del campo) de magnitud un magnetón de Bohr, que fue el resultado observado.

La descripción del electrón de acuerdo con la mecánica cuántica actual es muy diferente. Ya no se considera que el electrón se mueve en órbitas determinadas alrededor del núcleo, sino que está definido por una función de onda. Su estado viene determinado por el número cuántico principal, n , y por el azimutal, $l = 0, \dots, n-1$, que ahora sí puede tomar el valor cero y por un nuevo número cuántico, el de espín, s . El número cuántico de espín para el electrón es $1/2$, y el impulso angular asociado es $[s(s+1)]^{1/2}\hbar$. Cuando hay dos impulsos angulares, a y b , éstos se combinan para dar el definido por el número cuántico j , que puede tomar los valores $a+b, \dots, |a-b|$. La magnitud de este impulso angular es $[j(j+1)]^{1/2}\hbar$. Finalmente el número cuántico magnético, m , asociado con la orientación del momento magnético puede tomar los valores $m = j, j-1, \dots, -j$. A diferencia con la teoría antigua la componente del impulso angular en la dirección de medida, $m\hbar$, nunca coincide con el módulo del momento angular. En el caso de la plata el electrón de valencia es $5s^1$, con lo que $n = 5$ y $l = 0$. De no considerar el espín, que en 1922 era desconocido, el momento magnético del átomo, proporcional al angular, sería nulo y no se debería observar ninguna deflexión en el experimento. El único causante de la deflexión observada en el experimento es el espín electrónico.

Stern y Gerlach eligieron la plata suponiendo que $l = 1$. De los tres valores posibles de m eliminaron el caso $m = 0$ siguiendo la propuesta de Bohr. Supusieron que el impulso angular total era \hbar . Consideraron que el impulso angular estaba orientado por completo a favor ($m = 1$) o en contra ($m = -1$) del campo magnético. La componente del momento magnético en la dirección del campo debía ser de un magnetón de Bohr, tal y como encontraron. La realidad es que en el caso de la plata el único impulso angular a considerar es el del espín, de magnitud $3^{1/2}/2 \hbar$. Sus posibles componentes en la dirección del campo son $m\hbar = \pm\hbar/2$. El momento magnético en la dirección del campo en este caso debería ser de medio magnetón de Bohr. Sin embargo, tal como demostraría Paul Dirac, en el caso del espín electrónico la constante de proporcionalidad entre el momento magnético y el impulso angular incluye un factor adicional, el denominado factor g de valor 2. Como consecuencia la componente del momento magnético en la dirección del campo es precisamente de un magnetón de Bohr. La realidad se alineaba a favor de Stern para que el resultado del experimento fuera el previsto.

Conclusiones

El experimento Stern-Gerlach se había diseñado para dilucidar "si la concepción teórica cuántica o la clásica es la correcta". El experimento demostraba fuera de toda duda la existencia de una cuantización direccional. Eliminaba, por tanto, el comportamiento clásico. Sin embargo, como hemos visto, la descripción cuántica estaba basada en una serie de hipótesis equivocadas que, de un modo totalmente afortunado, derivaban en una predicción correcta del resultado esperado. Mientras que el experimento proporcionaba evidencias concluyentes contra la teoría clásica, la supuesta

validación de la vieja teoría cuántica era incorrecta, puesto que gran parte de sus hipótesis lo eran. Esta constatación no quita ningún mérito al experimento, tanto en lo que concierne a su concepción ingeniosa como a la audacia y a la perseverancia de Stern y Gerlach hasta conseguir un resultado concluyente: la demostración de la existencia de una cuantización espacial.

Bibliografía

- [1] A. Sommerfeld, *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, *Ann. Phys.* **1916**, 356, 1-94.
- [2] A. Sommerfeld, *Zur Theorie des Zeeman-Effekts der Wasserstofflinien, mit einem Anhang über den Stark*, *Phys. Z.* **1916**, 17, 491-507.
- [3] P. Debye, *Quantenhypothese und Zeeman-Effekt*, *Phys. Z.* **1916**, 17, 507-512.
- [4] J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1, Part 2*, Springer Verlag, New York, 1982, pag. 435.
- [5] D. Herschbach, *Molecular Dynamics of Elementary Chemical Reactions*, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1987**, 26, 1221-1243.
- [6] I. Estermann, *History of the molecular beam research: Personal reminiscences of the important evolutionary period 1919-1933*, *Am. J. Phys.* **1975**, 43, 661-671.
- [7] H. Kallman, F. Reiche, *Über den Durchgang bewegter Moleküle durch inhomogene Kraftfelder*, *Z. Phys.* **1921**, 6, 352-375.
- [8] O. Stern, *Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld*, *Z. Phys.* **1921**, 7, 249-253.
- [9] Entrevista a Walther Gerlach por Thomas S. Kuhn en febrero de 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, <http://repository.aip.org/islandora/object/nbla:266549>.
- [10] W. Gerlach, O. Stern, *Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld*, *Ann. Phys.* **1924**, 379, 673-699.
- [11] W. Schütz, *Personliche Erinnerungen an die Entdeckung des Stern-Gerlach-Effektes*, *Phys. Bl.* **1969**, 25, 343-345.
- [12] B. Friedrich, D. Herschbach, *Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics*, *Phys. Today* **2003**, 56, 53-59.
- [13] W. Gerlach, *Zur Entdeckung des Stern-Gerlach-Effektes*, *Phys. Bl.* **1969**, 25, 472.
- [14] W. Gerlach, O. Stern, *Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms*, *Z. Phys.* **1922**, 8, 110-111.
- [15] J.P. Toennies, H. Schmidt-Böcking, B. Friedrich, J.C.A. Lower, *Otto Stern (1888-1969): The founding father of experimental atomic physics*, *Ann. Phys.* **2011**, 523, 1045-1070.
- [16] W. Gerlach, O. Stern, *Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld*, *Z. Phys.* **1922**, 9, 349-352.
- [17] W. Gerlach, O. Stern, *Das magnetische Moment des Silberatoms*, *Z. Phys.* **1922**, 9, 353-355.
- [18] A. Einstein, P. Ehrenfest, *Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach*, *Z. Phys.* **1922**, 11, 31-34.
- [19] Entrevista a Immanuel Estermann por John L. Heilbron el 13 de diciembre de 1962, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4593.