

El experimento de Stern-Gerlach: la primera medida del espín cuántico

Introducción

Desde hace más de un siglo sabemos que los átomos pueden comportarse como pequeños imanes, generando un campo magnético. Según la física clásica, este magnetismo ocurre porque los electrones giran alrededor del núcleo. Pero, ¿cómo “giran” exactamente estos electrones? ¿Qué tipo de “giros” hacen que un átomo se comporte como un imán? Estas preguntas, aparentemente sencillas, llevaron al desarrollo de uno de los experimentos más importantes y sorprendentes en la historia de la física moderna: el experimento de Stern-Gerlach.

Antes de continuar, conviene aclarar algunos conceptos básicos necesarios para comprender este experimento:

- El momento angular \vec{L} es un vector que describe el movimiento de rotación de un objeto alrededor de un punto. El módulo de este vector está relacionado con la rapidez con la que gira el objeto: cuanto mayor sea el módulo de \vec{L} , más rápidamente gira el objeto. La dirección del vector indica el eje de rotación. En el caso atómico, clásicamente cada electrón tendría asociado un momento angular, y el momento angular total del átomo sería la suma vectorial de los momentos angulares de todos sus electrones.
- El momento magnético $\vec{\mu}$ es un vector que indica la intensidad y dirección del campo magnético generado por un objeto que gira. Este es proporcional al momento angular: cuanto más rápidamente giren los electrones alrededor del núcleo, mayor será el momento magnético generado (más intenso será el átomo como imán).
- Según la física clásica, un imán con momento magnético $\vec{\mu}$, situado en presencia de un campo magnético externo \vec{B} , tiene una energía potencial dada por $W = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$. Si el campo magnético es uniforme (igual en todo el espacio), esta energía potencial provoca que el momento magnético realice una precesión alrededor de la dirección del campo magnético, pero no produce desplazamiento neto del imán. En cambio, en un campo magnético no uniforme (varía en el espacio), el imán experimenta una fuerza que provoca un desplazamiento neto hacia las regiones donde el campo magnético es más intenso.

Un poco de historia

En las primeras décadas del siglo XX, surgieron los primeros modelos cuánticos primitivos del átomo. Estos modelos intentaban describir cómo “giran” los electrones en el átomo más allá de la física clásica, con el fin de explicar algunos fenómenos experimentales que no podían ser comprendidos mediante la teoría clásica. El más famoso fue el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld. Según este modelo, los electrones no podían orbitar el núcleo en cualquier órbita, sino solo en ciertas órbitas específicas con momentos angulares \vec{L} muy concretos y discretos. Esta idea, conocida como “cuantización espacial”, implicaba que los electrones no podían tener cualquier valor arbitrario de momento angular, sino únicamente ciertos valores definidos y cuantizados.

Sin embargo, el modelo de Bohr-Sommerfeld generaba dudas entre los físicos de la época, ya que sus postulados parecían algo extraños y arbitrarios. Otto Stern y Walther Gerlach diseñaron y realizaron en 1922 un experimento crucial para aclarar estas ideas. Su objetivo era verificar directamente si el momento angular atómico estaba realmente cuantizado o si, en su lugar, podía tomar cualquier valor continuo como predecía la física clásica. Este experimento acabaría cambiando profundamente nuestra comprensión de la física atómica.

Explicación

El set-up del experimento diseñado por Stern y Gerlach se puede ver esquematizado en el póster.

Primero, utilizaron un horno que calentaba átomos de plata. Al calentarse, estos átomos salían del horno formando un haz fino (dirección y en el sistema de referencia), dirigido por una serie de colimadores (pequeñas rendijas que definían claramente la dirección del haz). Este haz de átomos pasaba luego por una región en la que se había colocado un potente imán que producía un campo magnético no homogéneo que desviaba los átomos debido a su momento angular. Finalmente, los átomos impactaban en una pantalla donde se condensaban, formando un patrón visible que permitía medir cuánto se habían desviado los átomos de su trayectoria inicial.

La razón por la que eligieron átomos de plata es que estos son eléctricamente neutros, lo que era esencial para evitar desviaciones adicionales por acción de otras fuerzas electromagnéticas. De esta manera, las desviaciones del haz serían causadas únicamente por el momento angular de los átomos de plata. Por otro lado, un átomo de plata posee un solo electrón de valencia en su capa más externa, mientras que las capas internas están completas. Según la teoría de Bohr-Sommerfeld, las órbitas electrónicas de estas capas internas se organizan de forma simétrica, de manera que la suma vectorial de sus momentos angulares se anula. Así, el electrón de valencia sería, según la interpretación inicial, el único responsable del momento angular y, por tanto, del momento magnético $\vec{\mu}$ del átomo. Como veremos después, Stern y Gerlach asumían erróneamente que el momento angular de este electrón era orbital, es decir, debido a su giro alrededor del núcleo.

En el experimento, el campo magnético \vec{B} generado por el imán varía a lo largo de la dirección vertical, que llamamos dirección z. La fuerza que sienten los átomos depende del grado de alineamiento de su momento magnético con el campo, específicamente de la componente de dicho momento magnético en la dirección z (μ_z). Cuanto más alineado esté el momento magnético del átomo con la dirección del campo magnético, mayor será la fuerza experimentada y, por lo tanto, mayor será la desviación del átomo en la pantalla. Así, midiendo esta desviación (dónde caen los átomos), se puede determinar directamente la componente z del momento magnético atómico.

Si la teoría clásica fuera correcta, los momentos magnéticos podrían estar orientados en cualquier dirección de manera aleatoria. Por tanto, la componente z del momento magnético podría tomar cualquier valor comprendido entre $+\mu$ (máxima alineación hacia arriba) y $-\mu$ (máxima alineación hacia abajo). Esto provocaría una distribución continua de átomos desviados, mostrando un patrón difuso sin líneas claras en la pantalla.

Por el contrario, si el modelo cuántico primitivo de Bohr-Sommerfeld fuera correcto, los momentos angulares orbitales del electrón estarían cuantizados en valores discretos. Esto produciría que los átomos se desviasen únicamente en ciertas direcciones concretas, generando líneas discretas claramente separadas en la pantalla.

Demostración experimental

Lo que Stern y Gerlach observaron en la pantalla fueron únicamente dos líneas discretas claramente separadas. Este resultado descartó inmediatamente la teoría clásica, pues no se veía una distribución continua como la esperada.

En un primer momento, los resultados parecían respaldar el modelo de Bohr-Sommerfeld. Sin embargo, surgió una contradicción importante: cálculos posteriores, como los realizados por Ronald Fraser, demostraron que el electrón de valencia del átomo de plata no posee momento angular orbital —es decir, no “gira” alrededor del núcleo en el sentido clásico. Por lo tanto, los átomos no deberían desviarse en presencia de un campo magnético inhomogéneo, y en la pantalla sólo debería observarse una única línea definida. Entonces, ¿cómo es posible que Stern y Gerlach detectaran claramente un momento magnético en los átomos?

La explicación teórica correcta llegó años más tarde (1925) con la introducción del concepto de espín electrónico, propuesta por los físicos Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck, junto con aportaciones paralelas del físico Ralph Kronig. Estos científicos sugirieron que el electrón posee un momento angular intrínseco (algo equivalente a un "giro" sobre sí mismo), completamente independiente de cualquier movimiento orbital alrededor del núcleo, y que solo puede poseer dos valores. Este momento angular intrínseco genera un momento magnético propio, explicando así los resultados observados por Stern y Gerlach (dos líneas en la pantalla).

Sin embargo, el electrón no puede girar realmente sobre sí mismo (como lo haría una pequeña esfera), porque es una partícula puntual sin estructura interna. Por tanto, el espín debe entenderse como una propiedad exclusivamente cuántica, un grado de libertad interno del electrón que no tiene ningún análogo en la física clásica.