

nº 17 EXPERIMENTO DE STERN-GERLACH: ANALOGIAS CON LA
POLARIZACION DE LA LUZ

Objetivo

Ilustrar los resultados de los experimentos de Stern-Gerlach con experimentos análogos realizados con filtros polarizadores.

Teoría

En el experimento de Stern-Gerlach un haz colimado de átomos de plata se desvía al pasar por un campo magnético no uniforme (figura 1)

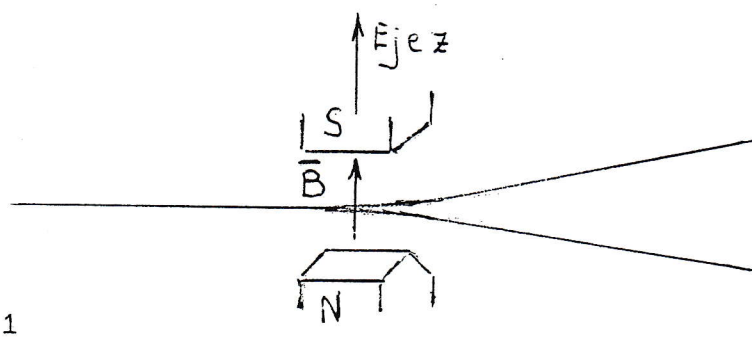


Figura 1

La fuerza que da lugar a la desviación en la dirección del eje z es

$$F_z = \frac{\partial}{\partial z} (\mu \cdot B) = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z} \quad (1)$$

donde μ es el momento magnético de los átomos. En el caso de la plata, μ es proporcional al momento angular de espín del electrón de valencia. Si $\mu_z > 0$ el átomo experimenta una fuerza hacia abajo, mientras que si $\mu_z < 0$ la fuerza es hacia arriba. Según la teoría clásica del electrón cabría esperar que todos los valores de μ_z entre $|\mu|$ y $-|\mu|$ fueran posibles y, en consecuencia, que los átomos se desviarán de forma continua entre dos valores extremos. En cambio, se encuentra que el haz se divide en dos partes con direcciones bien definidas lo que significa que solo son posibles dos valores de μ_z . Esta cuantización espacial es, según la teoría cuántica,

consecuencia de que el electrón sólo tiene dos valores posibles de la componente z del momento angular de espín: S_z^+ y S_z^- (debe de quedar claro que la dirección z , llámese z , x , y , ..., es la dirección del campo magnético).

Para estudiar este comportamiento cuántico se consideran otros experimentos en los que los átomos de plata pasan, sucesivamente, por varios campos magnéticos cuyas orientaciones forman entre sí un ángulo θ . Estos experimentos cuya realización requiere el empleo de materiales muy caros y sofisticados, se pueden ilustrar mediante experimentos análogos realizados con un haz de luz y filtros polarizadores. En este caso, el campo eléctrico de la onda luminosa es un vector que se puede descomponer como suma de dos estados de polarización, mutuamente perpendiculares. Un filtro polarizador selecciona una de las componentes y bloquea la otra. En esta práctica, haciendo pasar el haz de luz, sucesivamente, a través de varios filtros que simulan los dispositivos de Stern-Gerlach se obtienen resultados similares.

Material utilizado en la práctica

Lámpara de sodio con su correspondiente fuente de alimentación, banco de óptica con 9 soportes, lentes de focales 5 y 10cm, diafragmas, polarizadores (3, 2 en de ellos en montura orientable), pantalla, célula de silicio, amplificador, polímetro y cables de conexión (4).

Realización de la práctica

1) Conectar la lámpara de Na A TRAVES DE SU FUENTE DE ALIMENTACION y con la lente de distancia focal $f_1=5\text{cm}$ concentrar la luz emitida sobre uno de los diafragmas. Situar la lente de modo que el aumento sea la unidad (lente a una distancia $2f$ de la lámpara). Después, emplear la lente de focal $f_2=10\text{cm}$ para obtener un haz colimado (de rayos paralelos), situándola a una distancia f del diafragma (ver primera parte de la figura 2). Comprobar que el paralelismo del haz depende del tamaño del diafragma (foco idealmente puntual) siendo necesario obtener un compromiso entre paralelismo e intensidad del haz.

2) Montar el sistema detector compuesto por la célula de silicio, el amplificador en modo "low drift" y factor de amplificación 10^2 y el multímetro en escala DC 20V. Conectar la salida de la célula a la entrada del amplificador y la salida del amplificador al multímetro. Situar la célula a unos 30cm del diafragma y ajustar el tamaño del mismo para que la señal en estas condiciones sea del orden de 12 V.

3) La luz de la lámpara de sodio no está polarizada. Intercalar uno de los filtros polarizadores en el haz de rayos paralelos y variar su orientación comprobando que el sistema detector no es sensible al estado de polarización.

Para conseguir que lo sea, en adelante, incluiremos uno de los filtros polarizadores de orientación variable en el detector. Este polarizador que llamaremos analizador lo colocaremos junto a la célula de silicio.

4) Polarizar el haz de rayos paralelos situando junto a la lente de $f=10\text{cm}$ un filtro polarizador P_1 con su eje orientado en dirección vertical (usar el filtro con marquito). Girar el analizador tomando lecturas a intervalos de 10° entre -90° y $+90^\circ$.

Se obtiene que la respuesta presenta un máximo cuando la dirección del eje del analizador es también vertical ($\theta=0$) y es mínima para $\theta=\pm 90^\circ$. Representar los resultados y comprobar que en este caso la probabilidad de que los fotones alcancen el detector es $\cos^2\theta$. Como los polarizadores distan bastante del comportamiento ideal restar la luz de fondo representando, en vez de $V(\theta)/V_{\max}$, la función experimental $(V(\theta)-V_{\min})/(V_{\max}-V_{\min})$ y, con ayuda del ordenador, compararla con la teórica $\cos^2\theta$.

5) Repetir el análisis y la representación intercalando un segundo filtro polarizador P_2 a continuación del primero (figura 2). Considerar dos casos:

a) El eje de P_2 es paralelo al de P_1 ($\theta=0$).

b) El eje de P_2 está girado 45° respecto al de P_1 ($\theta=45^\circ$).

Se obtiene, que los resultados están determinados ahora por la orientación del segundo polarizador y que, en el caso b), existe una probabilidad significativa (50%) de que pasen los fotones que habían sido bloqueados por el primer polarizador. En estos experimentos como consecuencia de usar otro filtro polarizador más (no ideal) la absorción aumenta y las diferencias entre V_{\max} y V_{\min} disminuyen.

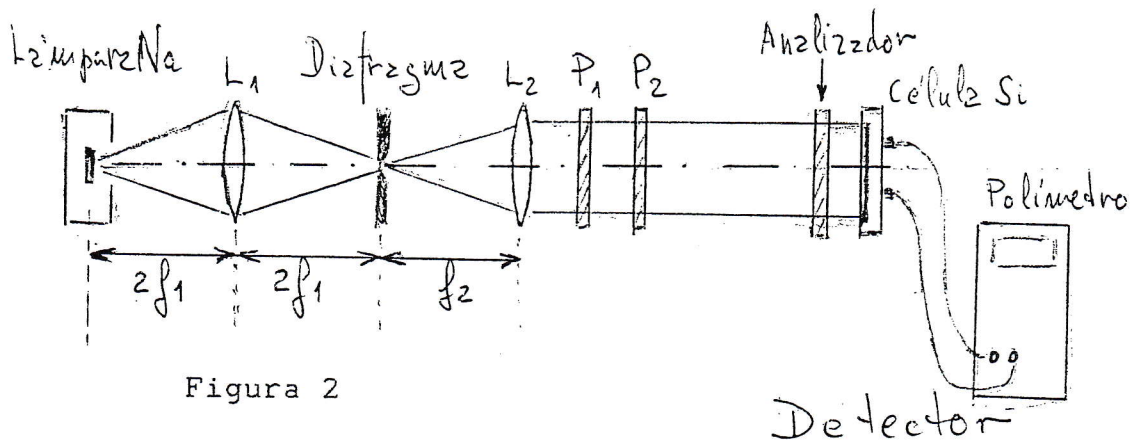


Figura 2

Interpretación cuántica

Para hacer predicciones sobre el resultado de una medida, se debe conocer el estado del sistema (la polarización del fotón en este caso) inmediatamente antes de la medida.

Los fotones que salen de la lámpara no están polarizados. Al encontrarse con el polarizador, en la dirección p ,

sólo tienen dos posibilidades: o el fotón atraviesa el polarizador o es absorbido por éste. Después de atravesar el polarizador, la luz está completamente polarizada en la dirección p. El polarizador produce pues un haz de fotones todos en el estado de polarización e_p . Se ha preparado así un estado de polarización e_p . Este estado se puede descomponer en una combinación lineal de otros estados (figura 3)

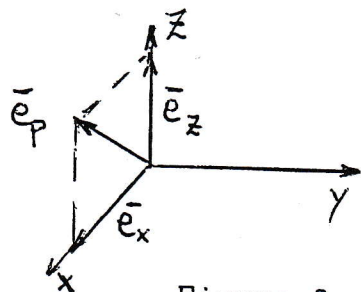


Figura 3

$$\vec{e}_p = \vec{e}_z \cos \theta + \vec{e}_x \sin \theta \quad (2)$$

Primer experimento (apartado 4): Al colocar en el haz polarizado en la dirección z un analizador en la dirección p (aparato que mide el estado de polarización del fotón en la dirección p), sólo hay dos resultados posibles: el fotón atraviesa el analizador o es absorbido por éste. Si se envía un número N muy grande de fotones, sóloamente se puede predecir la probabilidad de obtener los distintos resultados. Esta probabilidad es proporcional al cuadrado del valor absoluto del coeficiente de estado correspondiente. De (2) se tiene que cada fotón tiene una probabilidad $\cos^2 \theta$ de atravesar el analizador y una probabilidad $\sin^2 \theta$ de ser absorbido por él. (Al girar el analizador desde $\theta = -90$ a $\theta = +90$, se comprueba esta dependencia de $\cos^2 \theta$ respecto a la dirección z).

Segundo experimento (apartado 5a): Al colocar detrás del primer polarizador P_1 orientado en la dirección z, un segundo polarizador P_2 con su eje en la misma dirección, todos los fotones que atraviesan P_1 atraviesan también P_2 . Después de atravesar P_2 el estado de los fotones sigue siendo e_z por lo que se sabe con certeza (probabilidad 1) que el fotón atraviesa el segundo polarizador (al girar el analizador se comprueba la dependencia $\cos^2 \theta$ con respecto a la dirección z de P_2).

Tercer experimento (apartado 5b): Al orientar el segundo polarizador P_2 en otra dirección p (en este caso, un ángulo de 45° respecto a la dirección z) el estado de los fotones tras atravesar P_2 es e_p y no e_z (al girar el analizador se comprueba la dependencia $\cos^2 \theta$ con respecto a la dirección p de P_2).

Alicante, noviembre de 1998