

Espín del electrón:

Momentos magnéticos dipolares orbitales:

Magnetón de Bohr:

Un electrón circulando alrededor del núcleo produce un efecto similar al de una espira que transporta una corriente i , la que genera un campo magnético B a una distancia grande de la misma.

$$v = \frac{2\pi r}{T} \longrightarrow T = \frac{2\pi r}{v} \quad \text{Donde } T \text{ es el periodo}$$

$$i = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$

Donde v es la velocidad del electrón y r es el radio de la órbita.

Debido a que la espira tiene un radio muy pequeño, el campo equivale al campo magnético generado por un dipolo magnético, localizado en el centro de la espira, y orientado perpendicularmente al plano que la contiene, si la espira tiene un área $A = \pi r^2$ y corriente i , el momento dipolar magnético orbital del electrón es:

$$\mu = iA = \frac{ev}{2\pi r} A = \frac{1}{2} evr$$

Debido a que el electrón tiene una carga negativa, la corriente es opuesta al movimiento del electrón, de forma que su momento angular orbital $L = mrv$ es antiparalelo a su momento angular dipolar μ .

De forma que: $\mu = \frac{e}{2m} L$, relación entre módulos. En forma vectorial $\boldsymbol{\mu} = -\frac{e}{2m} \mathbf{L}$ (1)

Se puede establecer una relación entre L_z , la componente en la dirección z del momento angular \mathbf{L} , con μ_z la componente a lo largo de z del momento dipolar magnético μ .

$$\mu_z = -\frac{e}{2m} L_z$$

$$\mu_z = -\frac{e\hbar}{2m} m_l$$

Donde se define el magnetón de Bohr μ_B como $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,27400899 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T}$

Los modelos de Bohr y Sommerferld proporcionaron una explicación precisa de numerosas evidencias experimentales del átomo de hidrogeno. Sin embargo, otras no pudieron explicarse como el caso del efecto Zeeman.

Las orbitas electrónicas de Bohr eran circulares y su cuantizacion venia caracterizada a través de la introducción de un único número cuántico entero al cual se le denomino número cuántico principal. Pocos años después, en 1916, Sommerferld extendió el modelo de Bohr incorporando en el mismo la posibilidad de orbitas elípticas.

La introducción de las orbitas elípticas implicaba la consideración de dos grados de libertad y, Sommerferld concluyo que se necesitaban dos números cuánticos enteros para describir las orbitas

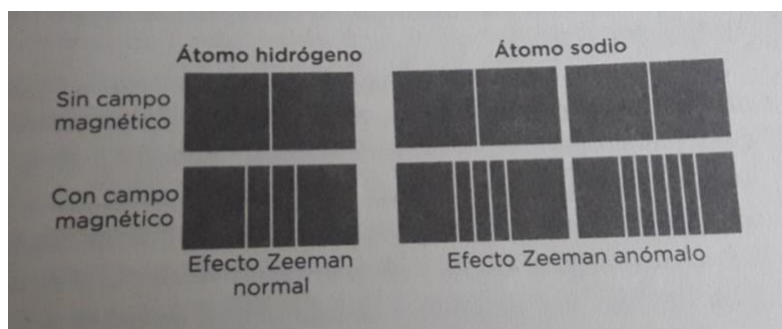
electrónicas. Sommerferld obtuvo las expresiones para las energías de los estados estacionarios en función de dos números cuánticos n y l , comprobando que dichos estados eran degenerativos, es decir, tenían exactamente la misma energía para determinados valores de los números cuánticos. Además comprobó que todas las orbitas correspondientes al mismo valor de n , independiente de que fuesen circulares o elípticas, tenían la misma energía. Expresado en términos degenerativos en el número cuántico l .

El efecto Zeeman consiste en el desdoblamiento de las líneas espectrales debido a la presencia de un campo magnético. Una línea espectral es una línea oscura o brillante en el espectro continuo, indicando la absorción o emisión de radiación correspondiente a valores discretos de la frecuencia o longitud de onda.

Heisenberg fue capaz de desarrollar un modelo que reproducía los datos experimentales. Para ello tuvo que introducir el concepto de números semi-enteros, algo totalmente inaceptable en aquellos años. Pauli también se vio obligado a introducir un número cuántico semi-entero, cuyo significado era desconocido para poder explicar el efecto Zeeman. Este fue el origen del principio de exclusión y de la introducción del espín.

Uno de los científicos que trabajaron en este problema fue el alemán Alfred Lande. Analizo cuidadosamente la separación entre las distintas líneas espectrales y propuso una expresión clásica, el número cuántico magnético, y un factor g , conocido como factor giromagnetico, o factor g de Lande.

$$\mu_z = -g_L \mu_B m_l; (g_L = 1)$$



El trabajo de Lande fue determinar el valor de g para las distintas líneas espectrales que aparecían en el efecto Zeeman, correspondientes a tripletes (efecto Zeeman normal) o cualquier otro número de líneas (efecto Zeeman anómalo). Lande concluyo que solo era posible reproducir las evidencias experimentales introduciendo valores semi-enteros para los números

cuánticos que caracterizaban las distintas orbitas electrónicas, es decir, las distintas líneas espectrales observadas.

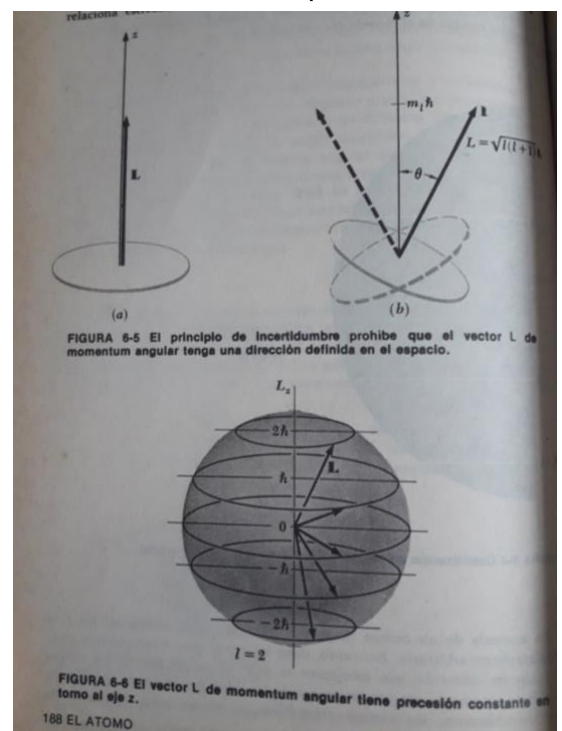
Efecto Zeeman normal:

En un campo magnético externo \mathbf{B} , un dipolo magnético tiene una cantidad de energía E que depende de la magnitud μ de su momento magnético y de la orientación de este momento con respecto al campo, que viene dada por:

$$E_B = -\mu \cdot B \cdot \cos\theta$$

Cuando μ se orienta en la misma dirección que B , entonces la energía tiene su valor mínimo. Esto es una consecuencia natural del hecho de que un dipolo tiende a alinearse con un campo magnético externo.

Utilizando la formula (1), la energía queda:



$$E_B = - \frac{e}{2m} L \cdot B \cdot \cos\theta$$

En la figura se observa que el ángulo θ entre L y la dirección z puede tener solamente el valor dado por la relación:

$$\cos\theta = \frac{m_l}{\sqrt{l \cdot (l + 1)}}$$

Mientras que los valores permitidos de L están dados por $\hbar\sqrt{l \cdot (l + 1)}$

Entonces al colocar un átomo en el campo magnético, se agrega al electrón en su órbita una energía:

$$E_B = - \frac{e\hbar}{2m} B \cdot m_l = -\mu_B m_l B$$

E_B puede tomar $2l + 1$ valores posibles, de acuerdo con los posibles valores que pueden tomar m_l . Estos valores corresponden a las $2l+1$ posibles orientaciones espaciales de L en el campo B .

Se observa que un espaciamiento regular constante dado que:

$$E_{B_l} = -\mu_B l B$$

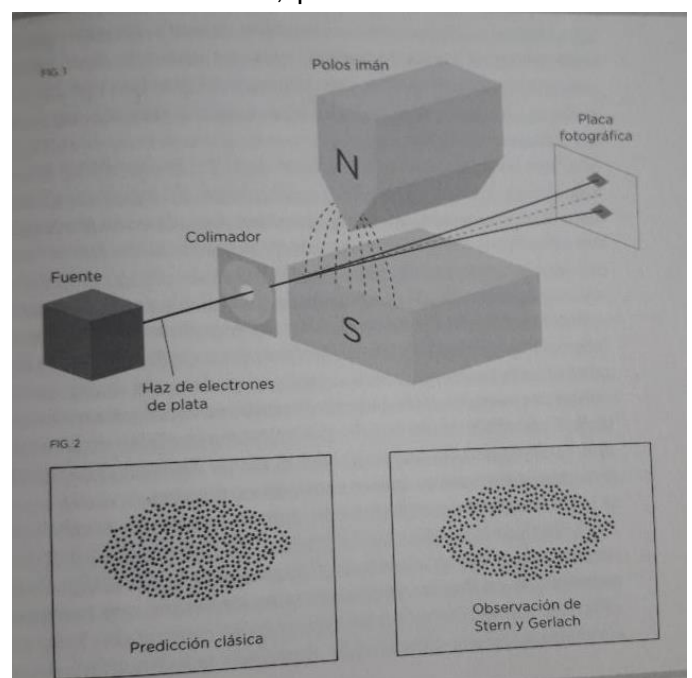
$$E_{B_{l+1}} = -\mu_B (l + 1) B$$

$$\Delta E_B = \mu_B B$$

En 1921 Walter Gerlach se encontraba preparando un experimento propuesto por Otto Stern para medir la cuantización direccional producida por un haz de átomos al atravesar un campo no homogéneo. Este fue el famoso experimento de Stern-Gerlach, cuya explicación solo fue posible con la introducción algunos años después de un nuevo concepto: el espín.

Experimento de Stern-Gerlach:

En 1922 Otto Stern era ayudante de Max Born en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Frankfurt, y Walter Gerlach, profesor ayudante en la misma universidad, pero en el Instituto de Física Experimental. El experimento consistió en hacer atravesar un haz de átomos neutros de plata a través de un campo magnético no homogéneo orientado en una dirección fija (fig. 1). Puesto que los átomos son neutros, la única fuerza que actúa sobre los mismos es proporcional al momento magnético orbital μ_z , donde, por conveniencia, se elige la dirección z como dirección del campo magnético. Así pues, cada átomo, al atravesar el campo magnético, sufre una deflexión proporcional a μ_z . Desde el punto de vista clásico, el átomo puede presentar cualquier orientación espacial y, consiguientemente, el haz deflexionado debería extenderse en una banda continua (panel izquierdo de la fig. 2). Por el contrario, la teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld (la existente en 1922) indicaba



que el haz debería desdoblarse en varias componentes discretas. Este número de componentes venia determinado por el número posible de valores asociados a la proyección del número cuántico orbital propuesto por Sommerferld, es decir, un número impar: $2l + 1$ posibles orientaciones, entre las cuales siempre debía aparecer el cero. Esto significaba que el experimento debería mostrar un número impar de líneas incluyendo el caso en que el haz incidente de electrones no sufriese ninguna deflexión. Stern y Gerlach encontraron que el haz de átomos de plata solo se desdoblaba en dos componentes discretas, una en la orientación positiva de el eje z y la otra en la dirección negativa (panel derecho en la fig. 2). Este resultado no era consistente con la teoría de Bohr-Sommerferld, y solo pudo explicarse tras la introducción de un nuevo grado de libertad: el espín. El experimento de Stern-Gerlach constituye uno de los experimentos en los que se ilustra de modo mas claro los principios básicos de la teoría cuántica.

El trabajo de Pauli fue esencial para entender dicho concepto; de hecho, el espín ya estaba implícito en la teoría que Pauli desarrollo para entender el efecto Zeeman y, en definitiva, para comprender la estructura de los átomos.

El descubrimiento del espín está ligado al trabajo de los jóvenes estudiantes de la universidad de Leiden, George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit. Durante el verano de 1925 estudiaron con detalle las investigaciones realizadas meses antes por Lande sobre el efecto Zeeman y especialmente, los dos trabajos de Pauli en los que había introducido el cuarto número cuántico y el principio de exclusión. Se les ocurrió ligar al cuarto número cuántico con un momento angular intrínseco del electrón cuyo valor era $1/2\hbar$, el cual podía tener dos orientaciones posibles en presencia de un campo magnético externo.

A pesar de la teoría de Pauli, este era muy consciente de los límites de la misma. El problema esencial residía en que la teoría no era consistente con la relatividad. Dirac construyo una ecuación general consistente con los principios fundamentales de las dos teorías del siglo XX: la teoría relativista y la mecánica cuántica. El espín surgió como consecuencia natural de la propia ecuación dinámica..