

Efecto Zeeman normal

Jorge Alberto Chávez Sarmiento

8 de diciembre de 2008

Resumen

En este artículo pretendo describir brevemente y sin entrar en mucho detalle en los desarrollos, en que consiste en efecto Zeeman normal, dando una explicación del motivo por el cual se produce, analizándolo desde el punto de vista semiclásico y cuántico.

1. Introducción

En el año 1895 H. A. Lorentz en su teoría clásica de electrones predijo el desdoblamiento de los niveles de energía del átomo. Un año después de ocurrido esto P. Zeeman confirmó experimentalmente dicha predicción. Zeeman observó que —perpendicularmente a un campo magnético— en lugar de una línea espectral, se encontraba un triplete de líneas. Además, paralelamente a dicho campo encontró un doblete de líneas.

Resulta curioso que al efecto mencionado anteriormente se lo conozca como efecto Zeeman normal, ya que luego de el se descubrió uno similar en el cual los desdoblamientos de los niveles de energía eran algo más complicados y se le denominó efecto Zeeman anómalo; sin embargo Goudsmit y Uhlenbeck en el año 1925 enunciaron la hipótesis del spin electron donde el llamado efecto Zeeman normal es el que no sigue la regla, sólo que por esas cosas que trae el destino fue observado primero.

El efecto Zeeman normal también fue explicado posteriormente por Bhor de forma semiclásica al desarrollar su modelo del átomo de hidrógeno y luego también explicado con la mecánica cuántica.

2. Explicación del Efecto Zeeman normal

Que se observen varias líneas en una transición de un nivel atómico a otro implica que cada una de esas líneas corresponde a la emisión de una onda electromagnética formada por fotones con un determinado valor de energía; es decir lo que se busca probar es que, al someter al átomo a un campo magnético, sus niveles energéticos se desdoblan, permitiendo así que haya mas de una transición entre un nivel y otro. Éste es el motivo por el cual no solo se observará una sola línea en el espectro emitido.

A continuación presentaré dos formas en las cuales se puede explicar este efecto: primero basándome en la teoría semiclásica, y luego en la mecánica cuántica.

2.1. Teoría semiclásica

El momento magnético asociado al momento angular orbital de un electron está dado por:

$$\vec{\mu}_L = -\frac{e}{2m_e} \vec{L} . \quad (1)$$

Cuando se lo somete a un campo magnético que forma un ángulo α con la normal al plano en donde gira el electrón, este experimentará un torque $\tau = \mu_L \times B$, además si llamamos a $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ y se toma en cuenta que $L = \hbar\sqrt{\ell(\ell+1)}$, entonces la magnitud de ese torque es:

$$\tau = \mu_B \sqrt{\ell(\ell+1)} B \sin \alpha . \quad (2)$$

Luego, la energía empleada, E_B , para pasar de una posición angular $\alpha_0 = \pi_2$ (veremos más adelante que esto es para que $E_B = \Delta E_B$) a otra posición arbitraria α en presencia del campo magnético externo B_B (dirigido a lo largo del eje Z arbitrario) es entonces:

$$E = \int_{\pi/2}^{\alpha} d\alpha \mu_B \sqrt{\ell(\ell+1)} B \sin \alpha \implies \Delta E = \mu_B \sqrt{\ell(\ell+1)} B \cos \alpha \quad (3)$$

Pero se sabe que $\cos \alpha = \frac{L_z}{L} = \frac{m_\ell \hbar}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} \hbar$, entonces la ecuación anterior se puede reescribir como:

$$\Delta E_B = \mu_B B m_\ell \quad (4)$$

Esto significa que a la energía E_n de un estado n del electrón en el átomo de hidrógeno hay que añadirle una energía ΔE_B , lo cual produce un desdoblamiento de los niveles degenerados.

2.2. Mecánica cuántica

El efecto Zeeman normal aparece sólo en transiciones entre estados atómicos con spin total $S = 0$. El impulso angular total $J = L + S$ de un estado es, entonces, un impulso angular orbital puro, ($J = L$). Ahora si calculamos el Hamiltoniano, se tendría que:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \frac{eB_z}{2m_e} \hat{L}_z , \quad (5)$$

donde el primer término es el hamiltoniano en ausencia de campo magnético y el segundo es el que produce un campo magnético al colocáremos orientado en la dirección Z . Luego la ecuación de Schödinger viene dada por

$$\hat{H}_0 \Psi + \frac{eB_z}{2m_e} \hat{L}_z \Psi = E_B \Psi . \quad (6)$$

Los posibles valores de la energía son los valores propios del hamiltoniano. De hecho, las funciones propias \hat{H}_0 y \hat{L}_z por separado. Resolviendo la ecuación

se obtiene que la energía está dada por

$$E_B = \frac{-\mu e^4}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2} + \mu_B m_\ell B_z , \quad (7)$$

donde la constante $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ es el llamado magnetón de Bohr y tiene un valor de $9,274 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$, notar que es el mismo que aparece en la explicación semiclásica.

La ecuación anterior, muestra que un estado con determinados números cuánticos n y ℓ se separa en $2\ell + 1$ niveles de energía debido a la presencia de un campo magnético externo.

3. Comentarios finales

Observemos la siguiente figura 1.

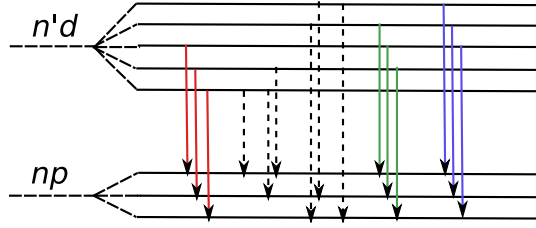


Figura 1: Desdoblamiento de los niveles np y $n'd$ de un sistema atómico, así como las transiciones entre ellos.

En la sección anterior se ha determinado que cada nivel se desdoblará en varios subniveles al someter al átomo a un campo magnético externo, y a eso se le conoce como efecto Zeeman normal. Pero de todas las transiciones, que se puedan realizar entre los subniveles de diferentes niveles energéticos, habrá algunas que involucran el mismo cambio de energía y, en consecuencia, la luz que emiten tiene la misma frecuencia y se observa como una sola línea. Además que algunas transiciones son transiciones prohibidas debido a las reglas de selección (esas transiciones se marcan con líneas punteadas), por ese motivo, solamente se observarán tres líneas en el espectro emitido.