

3.12. Спин электрона.

3.12.1. Экспериментальные факты существования спина.

Такая относительно простая теория атома водорода, которая представлена в предыдущем параграфе, при описании других атомов, с большим количеством электронов, натолкнулась на некоторые трудности, обнаруженные на эксперименте. Было понятно, что взаимодействие между электронами должно изменить энергии отдельных электронов. Однако если наружный электрон находится достаточно далеко от остальных электронов в атоме, т. е. он находится практически в кулоновском поле ядра, экранированном внутренними электронами, то его поведение должно быть аналогично поведению электрона в атоме водорода. Это можно проверить измерениями спектров излучения, которые определяются переходами электронов между уровнями.

Например, атомы щелочных металлов должны быть похожи на атом водорода, т.к. их наружный валентный электрон расположен на значительном удалении от остальных и, по идее, должен двигаться в поле достаточно близко приближенному к чисто кулоновскому полю. Однако оказалось, что спектр атомов щелочных металлов имеет более сложную структуру, чем это следует из задачи о состояниях в кулоновском поле. Линии спектра имеют вид дублетов, т.е. линии аналогичные линиям в атоме водорода расщеплены и имеют тонкую структуру. Это означает, что возбужденные уровни наружного электрона расщеплены по энергии (см рис. 12.1).

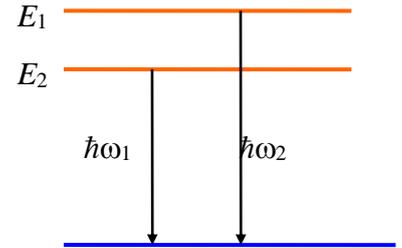


Рис. 12.1.

Спектры других атомов, оказывается, часто также имеют мультиплетную структуру, то есть вместо синглетов (1 линия в спектре излучения), наблюдаются дублеты (2 линии), триплеты (3 линии), квартеты и так далее. Очевидно, что эта структура линий испускания обусловлена расщеплением энергетических уровней, которое называется *тонкой структурой* уровней.

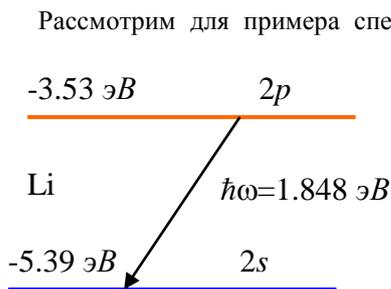


Рис. 12.2.

Рассмотрим для примера спектры атомов щелочных металлов. Так для атома лития Li ($Z=1$), в основном состоянии которого находится один наружный электрон на уровне $2s$, имеется излучательный переход из возбужденного состояния $2p$ в состояние $2s$. Энергия излученного кванта равна $\hbar\omega = 1.848 \text{ эВ}$, что соответствует длине волны света $\lambda = 6707.85 \text{ \AA}$. Оказалось, что уровень $2p$ двойной и эта линия перехода в спектре расщеплена, причем расщепление очень мало и составляет $2 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}$ (на рис. 12.2 это малое расщепление не показано).

Существенно большее расщепление получается для аналогичных линий в спектре натрия с $Z=11$ (см рис. 12.3).

Возбужденный $3p$ уровень расщепляется, и поэтому могут излучаться два фотона с энергиями $\hbar\omega = 2.1049 \text{ эВ}$ и $\hbar\omega = 2.1027 \text{ эВ}$ (или длинами волн $\lambda = 5889.9 \text{ \AA}$ и $\lambda = 5895.9 \text{ \AA}$, соответственно). Разность длин волн $\Delta\lambda = 6 \text{ \AA}$.

Для атома цезия ($Z=55$) расщепление уже составляет величину $\Delta\lambda = 422.34 \text{ \AA}$.

Откуда возникает эта двойственность линий в спектре излучения? Расщепление энергетических уровней может быть связано только с тем фактом, что имеется какое-то дополнительное взаимодействие, не учтенное в простой теории атомов.

К вопросу об этом взаимодействии мы еще вернемся в дальнейшем в §3.14.

Другой экспериментальный факт, который не укладывается в простую теорию атома: *аномальный эффект Зеемана*. При помещении атома в магнитное поле наблюдается расщепление уровней с ненулевым орбитальным моментом импульса. Это не удивительно, поскольку орбитальное движение сопровождается

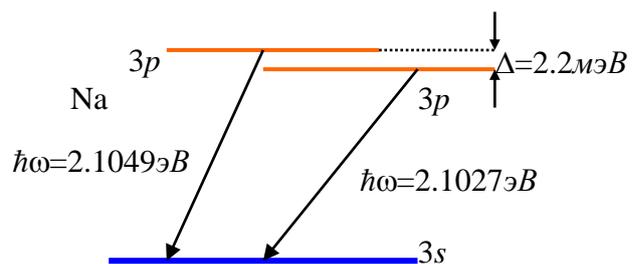


Рис. 12.3.

магнитным моментом, который и взаимодействует с внешним магнитным полем. Энергия взаимодействия определяется $W = -\vec{M}\vec{B}$ (см Электромагнетизм, §3.8).

Ранее в курсе Электромагнетизма (§3.11, п.3.11.3) рассматривался эксперимент Штерна – Герлаха (1921 г.), в котором пучок атомов проходил через неоднородное магнитное поле. Напомним, что классическая физика утверждает, что угол между векторами момента импульса и магнитного поля может быть любым. Однако в опыте Штерна - Герлаха было обнаружено явление пространственного квантования магнитного момента атома при помещении атома в неоднородное магнитное поле. В квантовой теории угол между магнитным моментом и направлением магнитного поля не произвольный, т.е. угол и проекция магнитного момента на направление поля квантуется.

Однако для атома серебра, у которого снаружи находится один неспаренный электрон, а орбитальный момент импульса атома равен нулю ($l = 0$), магнитный момент также должен быть равным нулю. Тем не менее, эксперимент для атомов серебра показал, что все равно наблюдается расщепление на 2 подуровня. Это означает, что атомы обладают *дополнительным магнитным моментом*, не связанным с орбитальным движением.

Кроме того, спектр излучения атомов, помещенных в магнитное поле, показывает, что расщепление уровней происходило таким образом, что уровни энергии имеют нецелые значения квантовых чисел момента импульса.

Примечание 1. Питер Зеeman, 1865–1943, нидерландский физик, Нобелевская премия 1902г. Отто Штерн, 1888–1969, немецкий физик, Нобелевская премия 1943г. Вальтер Герлах, 1889–1979, немецкий физик. Публикации: O.Stern (1921, Z.fur Physik, “Способ экспериментальной проверки пространственного квантования в магнитном поле”) и W.Gerlach, O.Stern (1922, “Экспериментальное доказательство наличия магнитных моментов у атомов серебра”).

Все эти факты говорили о том, что существуют еще дополнительные свойства электронных состояний, которые характеризуют момент импульса электрона.

3.11.2. Описание спина электрона.

С. Гаудсмит и Дж. Уленбек в 1925 г. выдвинули гипотезу, что электрон обладает *собственным механическим моментом импульса* L_s , не связанным с движением электрона в пространстве (Сэмюэл Абрахам Гаудсмит, 1902–1979, американский физик-теоретик; Джордж Юджин Уленбек, 1900, американский физик-теоретик).

Собственный механический момент импульса электрона L_s – *спин*.

Первоначально предполагалось, что спин – это момент импульса, связанный просто с вращением электрона вокруг собственной оси. Тогда электрон должен был бы обладать магнитным моментом, равным:

$$\mathbf{M} = -\frac{e}{2mc} L_s \quad (3.12.1)$$

Напомним, что отрицательный знак из-за отрицательного заряда электрона, поэтому механический и магнитный моменты электрона направлены в разные стороны. Однако из эксперимента следует, что собственный магнитный момент электрона в два раза больше и равен:

$$\mathbf{M} = -\frac{e}{mc} L_s \quad (3.12.2)$$

Это означает, что спин электрона не связан с вращением заряженного шара, а есть его *внутреннее свойство*, присущее ему также как его заряд и масса.

Примечание 2. Спином обладает большинство элементарных частиц: протон, нейтрон, фотон, нейтрино и другие. Напомним, что частицы с целочисленным спином – бозоны, они подчиняются статистике Бозе - Эйнштейна. Частицы с полуцелым спином – фермионы, и они подчиняются статистике Ферми-Дирака.

По законам квантовой механики вводится оператор спина, находятся соответствующие собственные волновые функции и собственные значения, а также квантовые числа, определяющие спиновое состояние частиц. Для электрона спиновое квантовое число $s = 1/2$ (максимальное значение проекции). По аналогии с обычным моментом импульса *собственное значение собственного момента импульса – спина* – равно:

$$L_S = \hbar\sqrt{s(s+1)} = \hbar\sqrt{1/2 \cdot 3/2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\hbar \quad (3.12.3)$$

Проекция на заданное направление определяется аналогично:

$$L_{S_z} = m_S \hbar \quad (3.12.4)$$

где $m_S = \pm s = \pm 1/2$.

Собственный магнитный момент электрона

$$\mathbf{M} = -\frac{e}{mc} L_S = -\frac{e\hbar}{mc} \sqrt{s(s+1)} = -2\mu_B \sqrt{s(s+1)} = -\mu_B \sqrt{3}. \quad (3.12.5)$$

Здесь введен *магнетон Бора*, который равен:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} = 0.927 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{Т}} \quad (3.12.6)$$

Проекция магнитного момента на ось z по модулю равна магнетону Бора:

$$M_z = -\frac{e}{mc} L_{S_z} = -\frac{e}{mc} m_S \hbar = -\frac{e\hbar}{mc} \cdot \left(\pm \frac{1}{2}\right) = \mp \mu_B \quad (3.12.7)$$

Именно наличием спина и соответствующего ему магнитного момента объясняются и дублетная структура спектральных линий в атомах щелочных металлов, и аномальный эффект Зеемана, а также многие другие явления в атомной физике.

Спин – это новая характеристика элементарных частиц, которая не связана с обычными пространственными координатами. В квантовой теории поэтому вводят так называемое спиновое пространство – новую “координату” или переменную – спин. Для электрона это пространство состоит из двух возможных значений переменной: $\pm 1/2$. Оператор спина действует в этом пространстве на эту дополнительную переменную, а собственная функция оператора спина для электрона представляет собой двухкомпонентную функцию – спинор, – компоненты которой отличаются разными “спиновыми координатами”.

Оператор спина \hat{S} , как и остальные операторы момента, имеет компоненты \hat{S}_x , \hat{S}_y и \hat{S}_z , причем выполняются следующие коммутационные соотношения: $[\hat{S}_x, \hat{S}_y] = i\hbar\hat{S}_z$ с соответствующей циклической перестановкой.