

---

---

## ЛЕКЦИЯ 8

---

# КЛАССИФИКАЦИЯ ФОТОНОВ. ПРАВИЛА ОТБОРА. АТОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Мы выяснили, какие законы сохранения есть в квантовой физике и не было в классической.

### 1. Инверсия

$$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}.$$

При такой замене импульс

$$\vec{p} = m\vec{v} \rightarrow -\vec{p}$$

меняется на противоположный, т. к.

$$v = \frac{dr}{dt}.$$

Момент импульса сохраняется:

$$M = mvr \rightarrow +M.$$

Т. е. есть величины, который меняют свой знак, а есть те, которые не меняют.

Величина  $F$  сохраняется, если она коммутирует с гамильтонианом, т. е. скобки Пуассона равны нулю ( $[H, F] = 0$ ).

Четность состояния, которая определяется как  $\pi = (-1)^l$  — сохраняется.

На самом деле закон сохранения четности выполняется только в нерелятивистских случаях.

2. В квантовой физике есть тождественные частицы, которых не может быть в классической физике. Мы не можем пометить частицы. Тождественность частиц приводит к наличию симметричных и антисимметричных функций. В силу того, что  $\psi^2$  определяет вероятность, то минус ее не меняет.



*Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).*

Частицы, у которых спин полуцелый, а  $\psi$ -функция антисимметрична, называются фермионы. Частицы, у которых спин целый, а  $\psi$ -функция симметрична — бозоны. Для фермионов существует принцип запрета Паули, который гласит, что в одном и том же квантовом состоянии в одном и том же месте не может находиться более одной частицы. Принцип Паули приводит к так называемому обменно-взаимодействию.

Если орбитальное движение не зависит от спинового, то

$$\Psi(1, 2) = \Psi(r_1, r_2, s_1, s_2) = \psi(r)S(s),$$

т. е. произведение пространственной части на спиновую. Это если спин-орбитальное взаимодействие слабое.

Пусть есть молекула водорода  $H_2$ . Это два протона на достаточно большом расстоянии.

У электронов симметричное состояние,  $\psi$ -функции одинаковые. Но суммарная функция должна быть антисимметрична, значит спиновая часть должна быть антисимметрична, т. е. спины направлены в разные стороны (см. рис. 8.1).

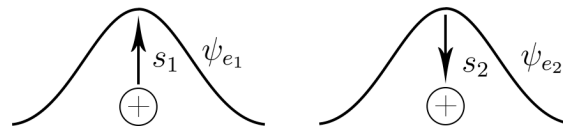


Рис. 8.1

Теперь, если приблизить атомы, то волновые функции будут перекрываться и появится область, в которой может быть и первый электрон, и второй (см. рис. 8.2). Это приводит к тому, что между атомами водорода как бы появляется отрицательный заряд, который притягивает атомы. Это называется **обменным взаимодействием**.

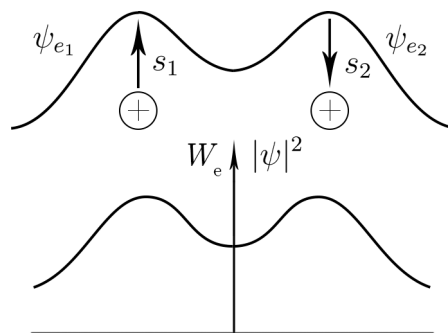


Рис. 8.2

Если же взять частицы с противоположными пространственными функциями, то тогда спиновая часть будет симметрична и вероятность нахождения электрона посередине равна нулю (см. рис. 8.3). Протоны расталкиваются.

Потенциал взаимодействия в этих двух случаях будет следующим:

$W = k \pm A$  — энергия равна кулоновской плюс энергии взаимодействия, которая может как повышать, так и понижать кулоновскую (см. рис. 8.4).



*Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)*

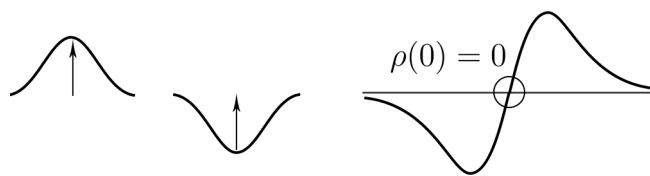


Рис. 8.3

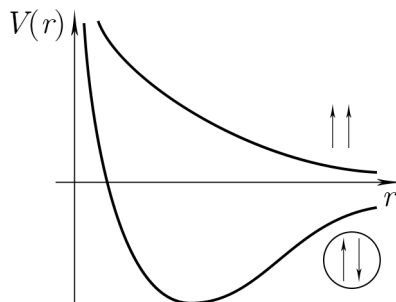


Рис. 8.4

Именно обменное взаимодействие ответственно за проявление магнетизма, о котором мы будем говорить потом.

Мы научились строить систему энергетических уровней в атоме. При переходе электрона на более низкий уровень, испускается квант света. Но нужно понять, когда электроны могут переходить, а когда нет.

Когда фотон вылетает или, наоборот, поглощается, то нужно еще учесть сохранение углового момента системы. **Спин** — это собственный угловой момент системы в его системе координат. А поскольку, фотон летит со скоростью света, то нельзя говорить о спине фотона. Можно говорить только об угловом моменте фотона, связанном с центром масс системы.

Излучение может возникнуть в двух случаях:

1. Из-за движения зарядов (перестройка электронной системы). В этом случае фотон называется *E*-фотон (электрический фотон). Например обычное колебание зарядов (диполь).
2. Из-за изменения внутренних токов. В этом случае фотон называется *M*-фотоном (магнитным фотоном). Это если, например, меняется орбита электрона.

Но нужно еще характеризовать полный угловой момент фотона.

Для того, чтобы узнать, возможен ли переход электрона нужно:

1. закон сохранения энергии

$$\hbar\omega = \Delta E_{12},$$

2. закон сохранения углового момента  $J$ , т. е. какой момент унес с собой фотон,
3. закон сохранения четности. Но для того, чтобы выяснить справедливость закона, нужно знать четность начального состояния, четность конечного, а также  $\Delta E$ ,  $\Delta J$  и тип испускаемого фотона.



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

## 1. Отражение

Если имеется колеблющийся диполь, то четность должна быть отрицательной ( $\pi = -1$ ). Если же магнитного типа, то при отражении ничего не меняется — четность должна быть положительной (см. рис. 8.5).

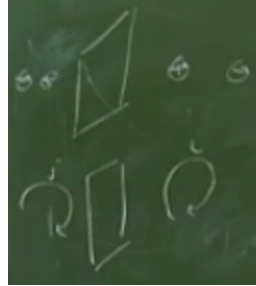


Рис. 8.5

Тогда для электрических фотонов

$$\pi_E = (-1)^J, \quad E1^-, \quad E2^+, \quad E3^-,$$

для магнитных

$$\pi_E = (-1)^{J+1}, \quad M1^+, \quad M2^-, \quad M3^+.$$

Угловой момент характеризует диаграмму направленности излучения (симметрию излучения). При  $J = 1$  — дипольное, при  $J = 2$  — квадрупольное, и т. д (см. рис. 8.6).

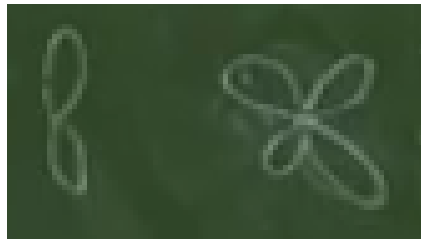


Рис. 8.6

Почему говорят, что спин фотона равен единице?

Размер атома:  $R \sim 10^{-8}$  см.

$$\lambda \sim 5000 \text{ \AA} = 5 * 10^{-5} \text{ см}, \quad \frac{\lambda}{[h]} \gg 1,$$

т. е. длина волны гораздо больше излучающей системы. Для того, чтобы найти вероятность такого излучения, нужно разложить по мультиполю.

Пусть имеются два перехода с энергиями  $E_1$  и  $E_2$  (см. рис. 8.7). Как различаются вероятности этих переходов?

Утверждается, что вероятности переходов связаны с временами испускания:

$$\frac{\text{Вероятность } E_1}{\text{Вероятность } E_2} = \frac{\tau(E_2)}{\tau(E_1)} = \left( \frac{\lambda}{2\pi R} \right)^2.$$



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

Вероятность дипольного излучения на шесть порядков больше, чем квадрупольного. А для дипольного угловой момент — единица. Поэтому фотону как бы приписывают спин единицу.

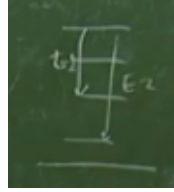


Рис. 8.7

Пусть есть осциллятор:

$$r = ae^{i\omega t}, \quad \text{где } d = er \text{ — дипольный момент.}$$

Электрическое поле

$$E_{\text{дип}} \propto d = er.$$

Вероятность дипольного излучения

$$W_{\text{дип}} \propto (\ddot{d})^2 \propto \ddot{r} \propto \frac{e^2 \omega^4 a^2}{c^3},$$

т. к. излучение может быть связано только с ускорением.

Вероятность излучения

$$W_{\text{изл}} = \frac{1}{\tau} = \frac{W}{\hbar\omega} = \frac{e^2 \omega^3 a^2}{\hbar c^3} = \omega \left( \frac{e^2}{\hbar c} \right) \left( \frac{a\omega}{c} \right)^2 = \omega * \alpha \left( \frac{a * 2\pi}{\lambda} \right)^2, \quad \text{где } \alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}.$$

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

Вероятность дипольного излучения

$$W_{\text{изл}}^{\text{дип}} \propto \omega^3 (E_\gamma^3)$$

— закон  $E^3$  дипольного излучения.

Поскольку

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{-6}$$

то говорят, что переход с изменением  $j$  на два запрещен. Это не так. Он сильно подавлен более вероятным переходом, но в принципе может происходить.

Например, такой переход наблюдают в кобальте (см. рис. 8.8).

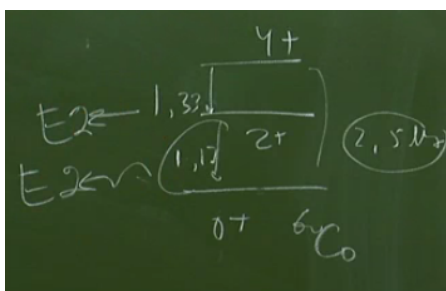


Рис. 8.8

Можно также сказать:

$$\frac{E_3}{E_2} \frac{M_1}{E_1} = \left( \frac{2\pi R}{\lambda} \right)$$

Т. е. вероятность магнитных порядков на 6 порядков меньше, чем электрических. Отсюда появляются правила отбора. Они показывают, какие возможно переходы из всех энергетических состояний.

$$\Delta J = \pm 1, 0,$$

кроме 0 – 0 переходов. Например, если вектор  $J$  поворачивается, то  $\Delta J = 0$ .

Теперь квантовые числа:  $\Delta m_s = 0$ . Если спин меняется, то это значит, что переход магнитный, а он крайне маловероятен. Если есть собственный угловой момент, то в силу отрицательного заряда электрона, спиновый магнитный момент направлен в другую сторону. Спины выстраиваются не по полю, а против поля (см. рис. 8.9).

Поскольку  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ , то возможны два состояния.

$$\mu = \frac{1}{c} JS.$$

Если есть электрон, вращающийся по орбите, то в центре витка поле не равно нулю. А если мы перейдем в систему координат электрона, то получится, что уже заряд ядра создает магнитное поле, которое взаимодействует с электроном (см. рис. 8.10). Это называется спин-орбитальное взаимодействие.

Но если нет орбитального момента, то нет и взаимодействия.

Пусть  $n = 2$ ,  $l = 0$ , тогда состояние  $2S_{\frac{1}{2}}$ . А если  $l=1$ , то возникнет расщепление на  $2P_{\frac{3}{2}}$  и  $2P_{\frac{1}{2}}$ . Отсюда и появляется дублет натрия. Может еще быть спин-спиновое взаимодействие, но оно ужасно маленькое.



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

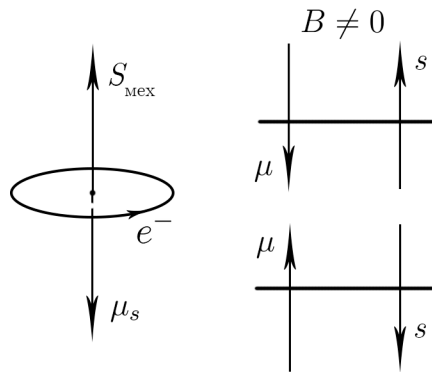


Рис. 8.9

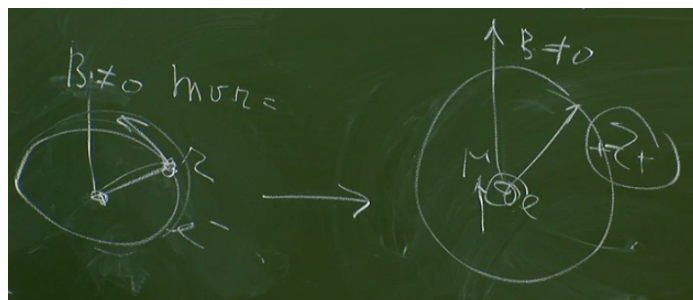


Рис. 8.10

Может быть взаимодействие спина электрона с магнитным моментом ядра. Его энергия

$$W_{\text{ея}} = \frac{\mu_{\text{э}}\mu_{\text{я}}}{r^3}.$$

Но, поскольку ядерный магнитный момент в 2000 раз меньше электронного, то эта энергия мала, а расщепление называется **сверхтонким**.

А взаимодействие спин-орбита называется тонким расщеплением. Мы будем рассматривать тонкое расщепление.

Все эти расщепления мы увидим и без внешнего поля. А теперь поместим атом в магнитное поле:

$$U = U_{SL} + U_{SH} + U_{LH}$$

— суммарное взаимодействие складывается из: спин-орбитального, спин с полем и орбита с полем. Магнитный момент атома

$$\mu = -g_{\Lambda}\mu_{\text{Б}}\vec{J}$$

Нужно определить, какое поле будет (сильное или слабое), по сравнению с внутренним полем (образованное спин-орбитой).

## 2. Слабое поле

$$E = E_0 - \vec{\mu}\vec{B} = E_0 + g_{\Lambda}\mu_{\text{Б}}\vec{J}\vec{B} = E_0 + g_{\Lambda}\mu_{\text{Б}}m_jB,$$

где  $E_0$  — энергия, которая была без магнитного поля.

! Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

Получается, что мы снимаем вырождение по  $m_j$  потому что энергия будет зависеть от того, под каким направлением ориентирован  $j$ .

Рассмотрим, как это происходит в атоме натрия. Чтобы возбудить электрон, нужно перевести его в состояние  $3P$ . Там есть два состояния, которые определяются тонкой структурой. Мы говорили, что энергия зависит только от главного квантового числа, а тут имеем совершенно другую картину. Но для  $P$ -оболочки экранирование электронов меньше, чем для  $s$ -электронов, поэтому уровни разные по энергии. Если внешнее поле равно нулю, то увидим дублет натрия (см. рис. 8.11).

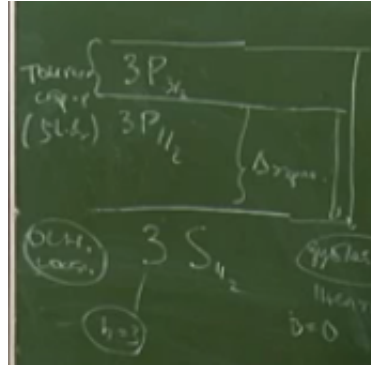


Рис. 8.11

Теперь приложим слабое внешнее поле.

Уровень  $3P_{3/2}$  расщепится на  $(2J + 1) = 4$  уровня.

Уровень  $3P_{1/2}$  расщепится на  $(2J + 1) = 2$  уровня.

Уровень  $3S_{1/2}$  расщепится на  $(2J + 1) = 2$  уровня (см. рис. 8.12).

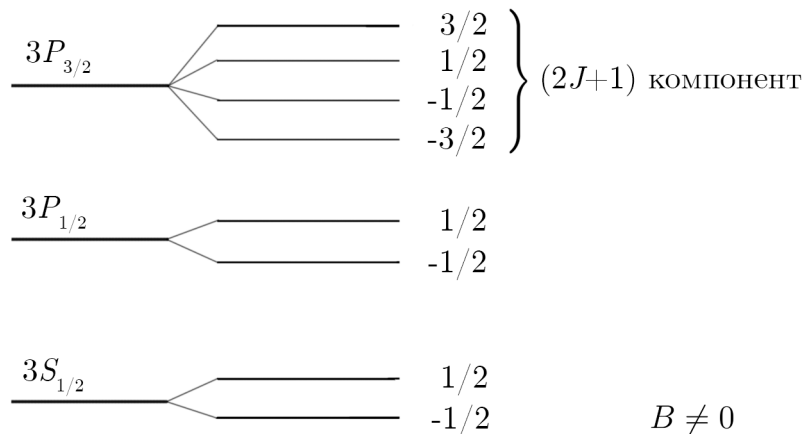


Рис. 8.12

Теперь разберемся с тем, что мы увидим, когда нагреем пары. Воспользуемся правилами отбора. Возможные переходы приведены на графике. Система уровней сложная. Это называют сложным **эффектом Зеемана**. Проявляется 10 линий. Запрещены только два перехода (см. рис. 8.13).



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

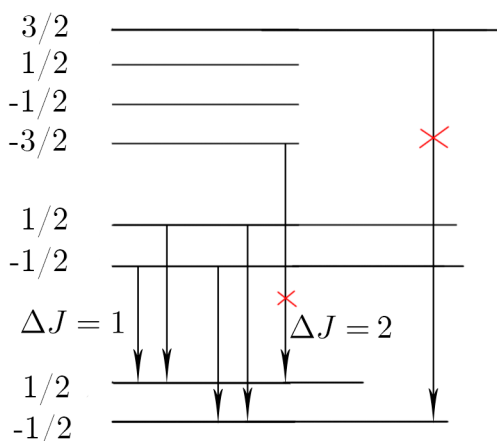


Рис. 8.13

### 3. Сильное поле

В поле расщепление больше, чем спин-орбитальное. Тогда считаем, что есть просто  $S$ -уровень и  $P$ -уровень.  $m_L + 2m_S$  — независимо складываются моменты.  $P$ -уровень расщепляется на 5 подуровней, а  $S$ -уровень — на два (см. рис. 8.14). Но в этом случае будет только три линии, т. к.  $\Delta m_s = 0$ .

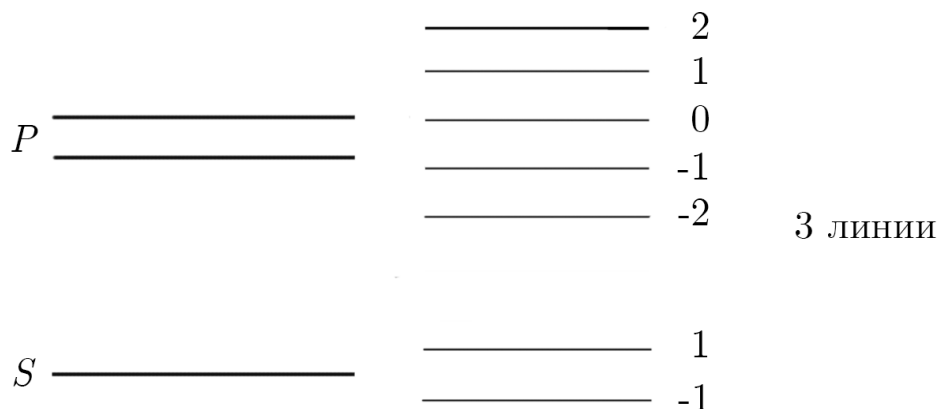


Рис. 8.14

Если есть излучение, энергия которого совпадает с распределением уровней электронов во внешнем магнитном поле, то появляется резонансное поглощение или ЭПР — **электронно-парамагнитный резонанс**. А если это происходит не во внешнем поле, а просто с внутренним, то это ЯМР — **ядерный магнитный резонанс**.

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)