

Урок №9 (11.03.2013)

Основные идеи квантовой механики (продолжение). Начала атомной физики.

1. Идеи квантовой механики (продолжение).

Полную лекцию пока не придумал, так что ниже только тезисы.

- Что такое измерение? Важно понимать эти два понятия: *измерение* и *состояние*. Предположим, что частица движется с точно определённым импульсом \vec{p} . Значит, у неё есть определённое на данный момент состояние с импульсом \vec{p} . Попытаемся теперь точно измерить положение частицы \vec{r} (как это можно сделать?). Мы это можем сделать, но при этом импульс частицы обязательно изменится! В итоге мы получим состояние с положением частицы \vec{r} .
- Гейзенберг показал, что принципиально невозможно измерить эти две величины точно: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$. Аналогично невозможно одновременно точно измерить другие сопряжённые величины: ток и напряжение, значение электрического и магнитного поля волны, энергии и времени. Всё в целом это называется *принципом неопределённости Гейзенберга*. Из принципа неопределённости в том числе следует возможность возникновения *виртуальных частиц*, время жизни которых столь мало, что $m_x c^2 \cdot \Delta t \leq \hbar/2$, или $\Delta t \leq \frac{\hbar/2}{m_x c^2}$. Из этой формулы следует, что чем массивнее частица, тем меньше времени она может существовать в виртуальном состоянии; безмассовая частица может, с другой стороны, существовать бесконечно долго.
- Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена: Согласно соотношению неопределённостей Гейзенберга, нет возможности одновременно точно измерить координату частицы и её импульс. Предполагая, что причиной неопределённости является то, что измерение одной величины вносит принципиально неустранимые возмущения в состояние и производит искажение значения другой величины, можно предложить гипотетический способ, которым соотношение неопределённостей можно обойти. Допустим, две одинаковые частицы A и B образовались в результате распада третьей частицы. В этом случае, по закону сохранения импульса, их суммарный импульс $p_A + p_B$ должен быть равен исходному импульсу третьей частицы, то есть, импульсы двух частиц должны быть связаны. Это даёт возможность измерить импульс одной частицы (A) и по закону сохранения импульса рассчитать импульс второй (B), не внося в её движение никаких возмущений. Теперь, измерив координату второй частицы, можно получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно. Но если это невозможно, то измерение координаты второй частицы мгновенно изменит импульс первой!
- Тожественность элементарных частиц. Этот принцип утверждает, что все элементарные частицы одного типа совершенно неотличимы. Поэтому, например, измерение импульса электрона и положения позитрона только что родившейся электрон-позитронной пары не даст абсолютного знания, т.к. мы, возможно, измерили какой-то другой электрон или позитрон.
- Волновая функция. Некая довольно сложная комплексная функция $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$, квадрат абсолютного значения которой даёт вероятность нахождения частицы в данной точке в данный момент времени. Таким образом, зная вол-

новую функцию частицы, можно посчитать вероятность нахождения частицы в определённом объёме пространства. Волновая функция может быть определена не только для одной частицы, но и для системы частиц и вообще для любой *квантовой системы*.

- Квантовые числа – переменные, характеризующие состояние частицы. Часть квантовых чисел определяет вид волновой функции и, тем самым, определяет области пространства, где может находиться частица. Это, например, главное радиальное (n), орбитальное (l) и магнитное (m) квантовые числа электрона в атоме (подробнее поговорим при разборе строения атома). Другие отражают сохраняющиеся величины, такие как спин и его проекция, цвет, заряд, лептонное и барионное числа и т.д.

2. Начала атомной физики

Строение атома

Химический элемент есть минимальная часть вещества, участвующая в химических реакциях. Химические элементы образуют молекулы, из которых и состоит всё вещество. Это – к химикам.

Каждый химический элемент состоит из *атомов* определённого типа (но может состоять и из нескольких изотопов!). Характерный размер атома – 1 Ангстрем (\AA) = 10^{-10} м. Основная масса атома (99.9%) сосредоточена в *ядре* – центральной области атома, заряженной положительно. Размер ядра в 100000 раз меньше размеров атома. Вокруг ядра рассеяны отрицательно заряженные *электроны*. Суммарный заряд атома равен нулю. Химический элемент определяется зарядом ядра. Химические свойства элемента определяются количеством валентных электронов или валентностью (к химикам!)

Атомная орбиталь

Электроны в атоме рассеяны по *орбиталям* – области пространства в атоме, в которых нахождение конкретного электрона наиболее вероятно. Понятие происходит, очевидно, от планетарной модели атома, придуманной Нагаоки (1904) и уточнённой Резерфордом (1911).

Атомная орбиталь определяется тремя квантовыми числами: главным (n), орбитальным (l) и магнитным (m), а состояние электрона на этой орбитали – ещё и четвёртым квантовым числом, спином (s).

Электронная оболочка

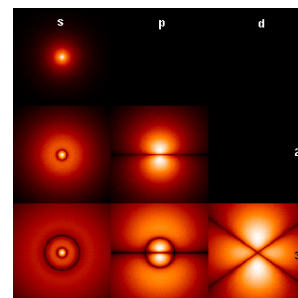
Совокупность атомных орбиталей с одинаковым значением главного квантового числа n составляет одну *электронную оболочку*.

Число электронов в каждой электронной оболочке не превышает определённого максимального значения $2n^2$. Электроны, располагающиеся на одной электронной оболочке, имеют близкие значения энергии. Чем больше номер n , тем больше энергия электронов.

Электронные оболочки обозначаются буквами K, L, M, N, O, P, Q или цифрами от 1 до 7.

Подуровни

Форма распределения амплитуды волновой функции в одной электронной оболочке (т.е. простыми словами – форма «облака») определяется орбитальным квантовым числом l ($l = 0, 1, 2, \dots, n-1$). Очень приближённо можно сказать, что полный момент количества движения электрона равен $j = l + s$.



Размещение электронов в электронной оболочке определяется орбитальным квантовым числом. Электроны, имеющие одно и то же значение главного и орбитального квантовых чисел, располагаются на одном и том же *подуровне*. Подуровни обозначаются буквами s, p, d, f, g, h, i или числами от 0 до 6.

Заселение электронов в атоме определяется следующей таблицей:

1	2	3	4	5	6	Итого
1 (K)	2					2
2 (L)	2	6				8
3 (M)	2	6	10			18
4 (N)	2	6	10	14		32
5 (O)	2	6	10	14	18	50

Энергия электрона внутри одной и той же электронной оболочки тем выше, чем больше у него значение орбитального квантового числа.

Магнитное квантовое число

Если пары какого-либо вещества поместить в очень сильное магнитное поле, то в спектре излучения (характеризующего разности энергий между различными уровнями) можно наблюдать расщепление линий (эффект Зеемана, 1896 год). При этом s-линии не расщепляются, p-линии расщепляются на 3, d-линии – на 5, f-линии – на 7 линий. Это происходит из-за того, что орбитальный магнитный момент разных электронов на одном и том же подуровне взаимодействует с внешним магнитным полем и энергия электронов на одном подуровне становится разной.

Количество уровней расщепления определяется третьим квантовым числом – магнитным. Это квантовое число m принимает целые значения от $-l$ до $+l$.

Уровни энергии атома водорода

Для описания спектров простых атомов, особенно атома водорода, неплохо подходит планетарная модель атома, в которой электрон движется по круговым орбитам. Согласно правилу квантования, длина такой орбиты должна быть кратна длине волны де Бройля для электрона. Длина волны де Бройля определяется так: $\lambda = h/p$, где h – постоянная Планка, а p – импульс электрона.

Тогда можно записать: $n\lambda = 2\pi r_n$, где r_n – радиус n -ной круговой орбиты. Подставляя длину волны де Бройля для электрона, получаем:

$$n \frac{h}{p} = 2\pi r_n, \quad mvr_n = \frac{nh}{2\pi}, \quad \text{или}$$

$$mvr_n = n\hbar.$$

Запишем второй закон Ньютона для электрона, движущегося по орбите радиуса r вокруг ядра (в гауссовой системе единиц):

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}, \quad \text{или} \quad mv^2 = \frac{e^2}{r}.$$

Также можем записать энергию электрона (сумма кинетической энергии и потенциальной энергии электрического взаимодействия электрона с ядром):

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{r},$$

или, учитывая предыдущую формулу

$$E = -\frac{mv^2}{2}.$$

Исключая v , получим радиусы разрешённых орбит и энергии E_n стационарных состояний:

$$v = \frac{n\hbar}{mr_n}, \quad mv^2 = m \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 r_n^2} = \frac{n^2 \hbar^2}{mr_n^2}.$$

Учитывая, что выше мы получили, что $mv^2 = \frac{e^2}{r}$, получаем для r_n и E_n :

$$r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} n^2 = a_0 n^2,$$

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -R \frac{1}{n^2},$$

где $R = \frac{me^4}{2\hbar^2} = 13.6 \text{ эВ}$ – энергия ионизации атома водорода, т.е. минимальная энергия, которую надо сообщить электрону в атоме водорода в основном энергетическом состоянии, чтобы удалить его на бесконечность.

Величина $a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} = 0.53 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ называется Боровским радиусом – это минимальный радиус электрона в атоме водорода.