

## Урок №24 (24.12.2019) Основы атомной и ядерной физики.

### 1. Строение атома.

#### Опыты Резерфорда.

В самом начале XX века Резерфорд проводит серию опытов по зондированию атомов с помощью альфа-частиц. Альфа-частицы это ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Они возникают при  $\alpha$ -распаде радиоактивных элементов. Масса  $\alpha$ -частиц примерно в 8000 раз больше массы электрона, скорость вылета из радиоактивного вещества – около 1/15 скорости света.

*$\alpha$ -частицы получили своё название на заре исследования радиоактивности. Было установлено, что радиоактивные материалы испускают «лучи» трёх типов: два разных «луча» отклонялись в разные стороны электрическим полем, а третий вид «лучей» не отклонялся. Все три вида лучей засвечивали, тем не менее, фотопластинки. Соответственно исследователи назвали первые два вида лучей  $\alpha$  – и  $\beta$  – лучами, а третий тип, неотклоняющийся –  $\gamma$ . Теперь известно, что  $\alpha$ -лучи (а впоследствии  $\alpha$ -частицы) – это ядра гелия-4, состоящие из двух протонов и двух нейтронов;  $\beta$ -лучи (аналогично  $\beta$ -частицы) – это электроны;  $\gamma$ -лучи (или  $\gamma$ -кванты) – это фотоны высокой энергии с частотой больше  $10^{19}$  Гц.*

Резерфорд облучал  $\alpha$ -частицами тонкую фольгу исследуемого вещества. За фольгой располагался экран, покрытый сернистым цинком. При попадании  $\alpha$ -частица вызывает короткую вспышку света в покрытии, которая может быть зафиксирована.

Результаты экспериментов Резерфорда выглядели так: большинство  $\alpha$ -частиц пролетает через фольгу, не испытывая практически никакого отклонения (в опытах использовался *коллимированный*, т.е. очень узкий пучок параллельно летящих  $\alpha$ -частиц). Однако очень небольшая часть частиц, наоборот, испытывала очень большое рассеяние (т.е. отклонялась на очень большие углы, вплоть до  $180^\circ$ ).

Из этого следовало, что практически вся масса атома (не считая очень лёгких электронов) расположена очень компактно, практически в одной точке. Резерфорд назвал эту «точку» *ядром* атома. Анализ результатов рассеяния  $\alpha$ -частиц позволил оценить размер ядра:  $10^{-12} \div 10^{-13}$  см.

С другой стороны электрические размеры атома к этому моменту уже были известны и определены:  $10^{-8}$  см. Поэтому Резерфорд сделал вывод, что основную часть нейтрального в целом атома занимают электроны, а в центре расположено положительно заряженное тяжёлое ядро.

#### Строение атома.

Заряд ядра равен номеру элемента в таблице Менделеева – это число протонов в ядре. Масса атома, практически равная массе ядра, складывается из массы протонов и массы нейтронов. Положительно заряженные протоны ( $p^+$ ) и нейтральные нейтроны ( $n$ ) имеют практически равную массу, в 2000 раз большую, чем масса электрона ( $e^-$ ). Эти две частицы, составляющие ядро, называют *нуклонами*.

Количество протонов в ядре (и, соответственно, количество электронов в атоме) определяет химические свойства вещества. Количество нейтронов определяет вес и стабильность атомного ядра. Вещества с одинаковым зарядом ядра, но разным количеством нейтронов, называются *изотопами*.

Электрон связан с ядром электромагнитными силами. Нуклоны в ядре связаны ядерными силами, о которых речь пойдёт позже.

### **Модель Бора, расчёт атома водорода.**

Несмотря на то, что в действительности электрон согласно принципу неопределённости рассеян по атому, простейшие закономерности можно получить рассматривая планетарную модель атома, придуманную Бором. В таком атоме электрон «вращается» по орбите вокруг ядра. Т.к. электрон можно рассматривать как волну (по де Бройлю), то на стационарных орбитах должно укладываться целое число длин волн электрона, т.е.

$$n\lambda = 2\pi r,$$

где  $r$  – радиус круговой орбиты (совсем простая модель: электроны движутся даже не по эллипсу, а по простой окружности). Де Бройль показал, что длина волны частицы равна  $\lambda = h/p$ . Следовательно

$$pr = n \frac{h}{2\pi}, \text{ или}$$

$$pr = n\hbar.$$

*Обратим внимание, что это ни что иное, как принцип неопределённости Гейзенберга:  $\Delta p \cdot \Delta r \geq h$ !*

Итак, электроны могут находиться лишь на *дискретных* орбитах. Каждой орбите соответствует *главное квантовое число*  $n$ .

Используя второй закон Ньютона, в гауссовой системе единиц, где  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 1$ :

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2},$$

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{e^2}{2r}.$$

Выразим отсюда квадрат импульса и подставим в формулу разрешённых уровней:

$$p^2 = 2mE_k = \frac{me^2}{r},$$

$$p^2 r^2 = n^2 \hbar^2,$$

$$me^2 r = n^2 \hbar^2$$

Отсюда получаем выражение для радиуса  $n$ -ной орбиты атома водорода:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} n^2 = a n^2.$$

Величина  $a = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0,53 \cdot 10^{-8}$  см называется *боровским радиусом*; она характеризует размер атома водорода в основном состоянии.

Полная энергия электрона состоит из кинетической энергии орбитального движения и потенциальной энергии связи:

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

где за ноль потенциальной энергии мы принимаем состояние свободного электрона, поэтому связанный электрон имеет отрицательную энергию.

Подставляя в эту формулу полученное выражение для кинетической энергии электрона  $\frac{m_e v^2}{2} = \frac{e^2}{2r}$ , получаем выражение для энергии стационарных состояний:

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

где величина  $R = m_e e^4 / (2\hbar^2) = 13,6$  эВ называется *энергией ионизации* атома водорода.

### **Спектры излучения.**

При переходе электрона с одного *уровня* на другой испускается  $\gamma$ -квант с частотой  $h\nu = R \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ . Переходы с  $n_i$ -ной *орбитали* на  $n$ -ную определяют *спектральную серию*. Переходы на уровень с  $n = 2$  из состояний  $n_i = 3, 4, \dots$  образуют серию спектральных линий Бальмера, приходящуюся на видимую область спектра. Переходы на уровень с  $n = 1$  образуют серию Лаймана, лежащую в ультрафиолетовой области спектра.

*Электрон относится к фермионам, т.е. подчиняется статистике Ферми-Дирака. Согласно этой статистике, две частицы, обладающие абсолютно идентичным набором квантовых чисел (другими словами в одном и том же состоянии по степеням свободы), не могут находиться в одной точке пространства. Поэтому на одной орбите могут находиться не более двух электронов с разным спином: один со спином  $+1/2$ , другой со спином  $-1/2$ .*

### **Многоэлектронные атомы.**

Самое главное: многоэлектронный атом может быть описан лишь приближённо. Дело в том, что с точки зрения квантовой механики, электроны в таком атоме представляют единую структуру, и принципиально невозможно выделить из такой структуры один обособленный электрон.

Приближённо можно считать, что электроны располагаются по орбиталям, имеющим различную форму.

При этом можно упрощённо оценить размеры многоэлектронных атомов. Сильно упрощённо можно провести следующие рассуждения. Сила притяжения ядра с зарядом  $+Ze$  в  $Z$  раз больше, чем в атоме водорода. Следовательно, радиус орбиты первых электронов будет в  $Z$  раз меньше. При этом внутренние электроны экра-

нируют заряд ядра. Поэтому после прибавления  $n$  электронов поле получившегося иона выглядит как поле ядра с зарядом  $(Z - n)e$ .

В итоге внешние электроны всё менее и менее сильно связаны с ядром. К последнему электрону получается картинка, похожая на атом водорода: в центре что-то с зарядом  $+e$ , а вокруг электрон, по боровской орбите. Таким образом, размеры атомов мало отличаются друг от друга.

При этом спектры излучения внешних электронов похожи на спектр излучения атома водорода. И эти внешние электроны сравнительно легко отрываются от атома облучением. Поэтому они иногда называются *оптическими электронами*.