

22 Атомная физика и квантовая механика.

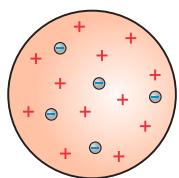
22.1 Явления, свидетельствующие о сложном строении атома.

Понятие «атом» зародилось еще в Древней Греции, более двадцати веков назад. Древнегреческий философ Демокрит Абдерский (ок. 460 до н. э. - ок. 370 до н. э.) был одним из основателей *атомистики* - теории, согласно которой все материальные тела состоят из атомов. Например, другой древнегреческий философ Платон считал, что мир состоит из четырех «стихий» - огня, земли, воздуха и воды, а атомы этих «стихий» имеют форму четырех правильных многогранников: тетраэдр олицетворял огонь, икосаэдр - как самый обтекаемый - воду, гексаэдр - самая устойчивая из фигур - землю, а октаэдр - воздух.

Окончательно идея строения вещества из атомов утвердилась в физике только в середине XIX века, благодаря успехам химии и теории газов. К началу XX века физики знали примерный размер атомов $\sim 10^{-10}$ м и массу $\sim 10^{-27}$ кг.

О сложном строении самого атома свидетельствовали следующие явления:

- Закон электролиза, открытый М. Фарадеем, говорил о том, что существуют мельчайшие носители электрического заряда;
- Открытие катодных лучей, которые как оказалось являлись потоком электронов и появлялись при бомбардировке катода ионами разряженного газа, свидетельствовало о том, что в состав атомов входят электроны;
- Открытие рентгеновского излучения, возникающего при торможении электронов у анода, говорило о сложных процессах происходящих внутри атома;
- Открытие электрона Дж. Томсоном, измерения заряда электрона Милликенем в сочетании с теорией электропроводности металлов говорило о том, что электроны входят в состав атомов;
- Радиоактивность, открытая Беккерелем, позволила выявить наличие положительных и отрицательных зарядов внутри атома;
- Линейчатые спектры испускания газов, свидетельствовали о сложном расположении электронов внутри атома.



В 1904 году, вскоре после открытия электрона, английский физик Джозеф Джон Томсон предложил модель атома в виде положительно заряженной по объему сферы, радиуса порядка $\sim 10^{-10}$ м с «вкрапленными» внутрь электронами.

Модель Томсона пыталась объяснить два факта: электроны имеют отрицательный заряд и при этом атом электрически нейтрален. Поэтому, суммарный заряд электронов должен быть равен заряду сферы. Чтобы атом мог излучать электромагнитные волны, электроны должны двигаться с ускорением, поэтому в модели предполагалось, что электроны могут свободно двигаться внутри сферы. Масса атома считалась равномерно распределенной по объему сферы.

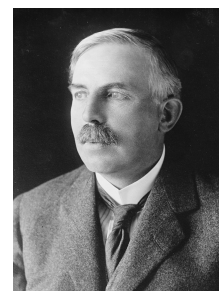
Модель Томсона вошла в историю, как модель пудинга, т.к. сфера с электронами по внешнему виду напоминала настоящий пудинг, где электроны были изюминками, а тесто это положительно заряженное по объему вещество сферы атома.



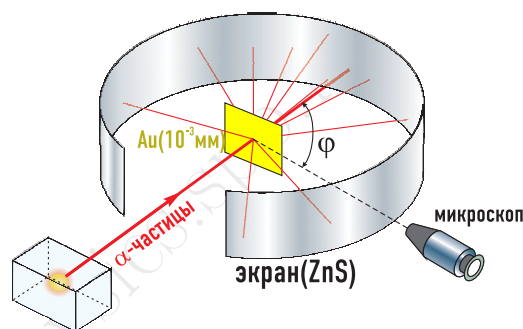
22.2 Модель строение атома по Резерфорду.

В 1906-1911 годах Эрнест Резерфорд поставил эксперимент, целью которого была проверка модели строения атома Томсона. Для того, чтобы выяснить, что находится внутри атома, он использовал альфа-частицы в качестве «ядер» которыми он «обстреливал» тончайшую пленку из золота толщиной 0,001 мм.

К 1906 году было известно, что альфа-частицы имеют массу значительно большую, чем масса электрона, что заряд альфа-частицы положительный и что радий, испытывая естественный радиоактивный распад испускает альфа-частицы с большой скоростью. Для того, чтобы получить узконаправленный пучок альфа-частиц, был использован свинцовый контейнер, внутри которого был помещен радий и для дополнительной фокусировки были использованы свинцовые щели. В итоге была получена «пушка», которая «стреляла» узко направленным пучком альфа-частиц.



Эрнест Резерфорд
(1871-1937)



Далее на пути потока альфа-частиц помещалась тончайшая пленка из золота (см. схему опыта). Для того, чтобы зарегистрировать в каком направлении будет двигаться альфа-частицы после взаимодействия с пленкой, установка была окружена экраном на который был нанесен ZnS (сульфид цинка). При столкновении альфа-частицы с ZnS возникала микровспышка света, которую можно было наблюдать в микроскоп. До Резерфорда подобный опыт ставили, но он первым предложил распространить экран на область, в которую частицы могли бы отскочить назад.

Опыт показал к удивлению Резерфорда, что есть частицы, которые отскакивают назад.

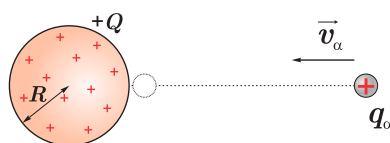
Студенты и аспиранты Резерфорда вели наблюдения в течении нескольких лет, подсчитывая количество частиц в зависимости от угла рассеяния. Получились следующие результаты:

ЗАВИСИМОСТЬ РАССЕЯНИЯ α -ЧАСТИЦ ОТ УГЛА (ДЛЯ ЗОЛОТА)

УГОЛ ОТКЛОНЕНИЯ В ГРАДУСАХ	150	135	120	105	75	60	45	30	15
ЧИСЛО СЦИНТИЛ- ЛЯЦИЙ	33	43	52	70	211	477	1435	7800	132000

Результаты говорили о том, что модель Томсона неверна. Т.к. если наблюдались частицы с углами рассеяния больше 90 градусов, то это означало, что внутри атома есть что-то массивное и положительно заряженное, что могло подействовать на быстро движущуюся положительно заряженную альфа-частицу так, чтобы изменить направление ее движения на почти противоположенное.

Если взять модель Томсона, в которой весь объем атома занимает положительный заряд. И будем считать, что альфа-частица летит в направлении центра атома с характерной скоростью для альфа-частиц $v_\alpha = 2 \cdot 10^7$ м/с .



Тогда, воспользуемся законом сохранения энергии для системы: атом и альфа-частица:

$$\frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2} = \frac{kq_\alpha Q}{R} \Rightarrow Q = \frac{m_\alpha v_\alpha^2 R}{2kq_\alpha} = 0,5 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$$

Заряд получается очень большой, гигантский. Для объяснения отскока альфа-частицы в обратном направлении, Резерфорд предположил, что размер области, в которой находится положительный заряд, должен составлять не 10^{-10} м, а 10^{-15} м. Это очень хорошо соответствовало соотношению между количеством частиц пролетевших условно прямо, т.е. не попавших в ядро и частиц, которые рассеялись на углы более 90 градусов.

Так появилась новая модель атома, которая была названа планетарной.



- Атом имеет размер 10^{-10} и его основной объем занимает пустота. Т.к. большинство альфа-частиц пролетало прямо.
- В центре атома находится массивное положительно заряженное ядро. Основная масса атома сосредоточена в ядре.
- Размер ядра в 10^5 раз меньше размеров атома.
- Вокруг ядра вращаются электроны, подобно планетам вокруг Солнца. Отсюда и возникло название модели - планетарная.
- Количество электронов равно заряду ядра, т.к. атом является электрически нейтральным.

У планетарной модели было множество недостатков один из которых можно сразу заметить. Электроны, двигаясь по круговым орбитам, движутся с ускорением. А следовательно, согласно классической электродинамике Максвелла, ускоренно движущиеся заряды должны излучать электромагнитные волны. Т.е. электроны на орбиталях должны все время излучать электромагнитные волны и тратить на это энергию. В результате чего, электроны должны падать на ядро атома, а этого не происходит.

22.3 Квантовые постулаты Бора.

Для устранения недостатков модели Резерфорда в 1913 году датский физик Нильс Бор в работе «О строении атомов и молекул» предложил дополнить модель двумя постулатами. В результате появилась квантово-классическая модель строения атома по Бору.

I постулат Бора (О стационарных состояниях).



В атоме существуют некоторые стационарные состояния. Каждому стационарному состоянию соответствует определенная энергия. В этих состояниях атом не излучает.



Нильс Бор
(1887-1962)

Стоит отметить, что первый постулат Бора противоречит законам классической физики. В классической физике, электрон может вращаться вокруг ядра на любом расстоянии и этому будет соответствовать отрицательная энергия электрического взаимодействия разноименных зарядов. (см. раздел «[Электростатика](#)»). Т.е. энергия может принимать произвольные отрицательные значения. Бор же предположил, что в атоме должен существовать некоторый набор разрешенных энергий в соответствующих стационарных состояниях.

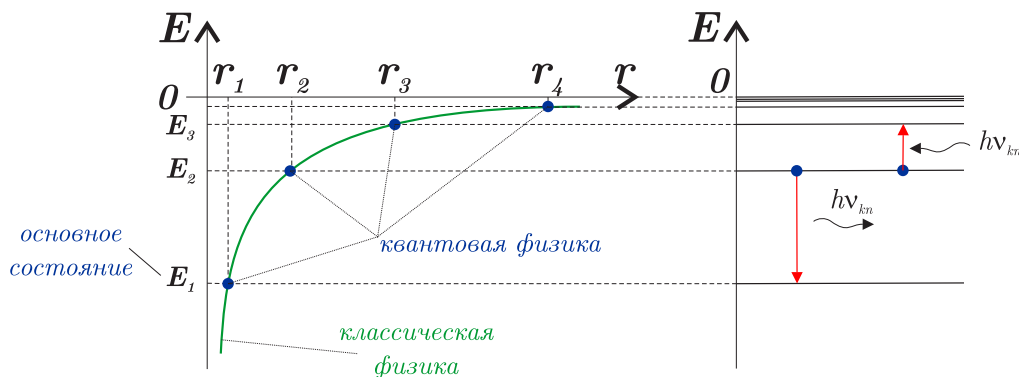
II постулат Бора (Правило частот).



Атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе может испускаться или поглощаться квант энергии, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:

$$E_k - E_n = h\nu_{kn} \quad (1)$$

В правиле частот E_k, E_n это энергии атомов в состоянии с номером k и n соответственно. Если $E_k < E_n$ то при переходе из состояния k в состояние n происходит излучение кванта энергии, а если $E_k > E_n$ то ее — поглощение.



Def. Состояние атома, которому соответствует наименьшая энергия, называется основным, а состояния, которым соответствуют большие значения энергии — возбужденными.

В основном энергетическом состоянии атом может находиться неограниченно долго, а в остальных стационарных состояниях $\sim 10^{-8}$ с. Это так называемое время жизни атома в возбужденном состоянии.

В результате, первый постулат Бора позволил объяснить дискретность значений энергии атома, а первый и второй постулаты — линейчатую структуру атомных спектров, которые наблюдались в экспериментах.

Бор предложил также количественное правило квантования для нахождения радиусов стационарных (разрешенных) круговых орбит электронов:

Правило квантования Бора:

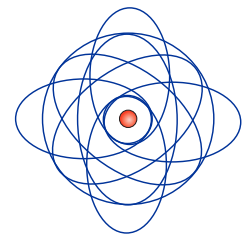
St. →

В стационарных состояниях момент импульса электрона должен быть кратен приведенной постоянной Планка.

$$m_e v_n r_n = n \hbar = n \frac{h}{2\pi} \quad (2)$$

Бор для простоты полагал, что орбитали, по которым движутся электроны представляют собой окружности, хотя в общем случае орбитали могут иметь форму эллипса, причем ядро располагается в одном из его фокусов. На рисунке справа показаны орбитали в атоме по теории Бора.

Правило квантования также противоречит законам классической физики. Но это правило в сочетании с законом сохранения энергии и законами классической физики: II законом Ньютона и законом Кулона позволило полностью рассчитать атом водорода и определить радиусы его разрешенных орбиталей, значения разрешенных энергетических уровней и спектр излучения (поглощения) атома.

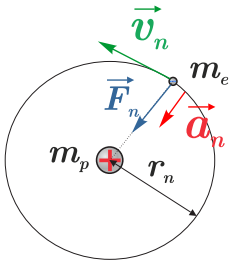


Электронные орбитали в атоме по теории Бора

22.4 Атом водорода по Бору. Спектр излучения водорода.

22.4.1 Радиусы разрешенных орбиталей.

Рассмотрим атом водорода и воспользуемся постулатами Бора и правилом квантования. В водороде будем считать, что электрон вращается вокруг положительно заряженного ядра по круговой орбитали.



Запишем второй закон Ньютона, воспользовавшись законом Кулона и правилом квантования:

$$\begin{cases} ke^2 = \frac{m_e v_n^2}{r_n} \\ \varepsilon r_n^2 = \frac{m_e v_n^2}{r_n} \\ m_e v_n r_n = n\hbar = n \frac{h}{2\pi} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_e v_n^2 r_n = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \\ m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} \end{cases}$$

- здесь было учтено, что заряд ядра и заряд электрона одинаковые по величине $q_p = |q_e| = e$ и диэлектрическая проницаемость равна единице $\varepsilon = 1$.

Разделим теперь в последней системе верхнее уравнение на нижнее, выразим скорость и, подставив ее во второе уравнение системы, найдем выражение для радиуса орбитали:

$$v_n = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 n \hbar} \Rightarrow r_n = \frac{n \hbar}{2\pi m_e v_n} = \frac{n \hbar 2\varepsilon_0 n \hbar}{2\pi m_e e^2} = n^2 \frac{\varepsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e e^2} \sim n^2$$

$$\boxed{r_n = n^2 \frac{\varepsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e e^2}} \Rightarrow \boxed{r_1 : r_2 : r_3 = 1^2 : 2^2 : 3^2}$$

Отсюда получается, что радиусы разрешенных орбиталей относятся как квадраты номеров орбиталей. Например, радиус второй орбитали будет в четыре раза больше чем первой: $r_2 = 4r_1$.

Найдем радиус первой орбитали в атоме водорода, т.е. возьмем $n = 1$:

$$r_1 = \frac{\varepsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e e^2} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м} \cdot 6,6^2 \cdot 10^{-68} \text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{кг} \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38} \text{Кл}^2} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{м}$$

$$[r_1] = \frac{\text{Ф} \cdot \text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{Кл}^2} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{Кл}^2} = \frac{\text{Дж}^{\cancel{2}} \cdot \text{с}^2}{\text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \cancel{\text{с}^2}}{\cancel{\text{с}^2} \cdot \text{кг}} = \text{м}$$

Таким образом диаметр водорода в основном состоянии будет равен

$$d_1 = 2 \cdot r_1 = 10,6 \cdot 10^{-11} \text{ м} \sim 10^{-10} \text{ м}$$

Диаметр водорода 10^{-10} м совпадает с опытными данными и используется во многих разделах физики, как характерный размер атомов.



22.4.2 Энергия атома водорода.

Найдем теперь выражение для энергии в зависимости от номера орбитали. Полная энергия атома складывается из кинетической энергии движения электрона по орбитали и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром атома.

$$E_n = \frac{m_e v_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$$

Из второго закона Ньютона выразим значение скорости и подставим в выражение для энергии:

$$\frac{m_e v_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \Rightarrow v_n^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n m_e}$$

$$E_n = \frac{m_e e^2}{2 \cdot 4\pi\epsilon_0 r_n m_e} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \sim -\frac{1}{r_n} \sim -\frac{1}{n^2} \Rightarrow \boxed{E_n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}} \quad (3)$$

Интересно заметить, что в процессе вывода мы доказали, что кинетическая энергия электрона по величине в два раза меньше потенциальной энергии. NB!

$$K_e = -\frac{P_e}{2}$$

Полная энергия атома отрицательная, что обуславливает его стабильность. При этом полная энергия равна половине потенциальной энергии. NB!

$$\begin{cases} r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \\ E_n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \end{cases} \Rightarrow E_n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{\pi m_e e^2}{\epsilon_0 h^2} = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \Rightarrow$$

$$\boxed{E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}} \quad (4)$$

Из полученной формулы получается следующее соотношение для энергии атома водорода в различных состояниях:

$$\boxed{E_1 : E_2 : E_3 = \frac{1}{1^2} : \frac{1}{2^2} : \frac{1}{3^2}} \quad (5)$$

Отсюда видно, что энергия атома в состоянии с $n = 3$ в девять раз меньше в абсолютном значении (без учета знака), чем энергия атома в основном состоянии:

$$\frac{E_1}{E_3} = \frac{1}{1^2} \cdot \frac{3^2}{1} = 9 \Rightarrow E_3 = \frac{1}{9} E_1$$

Найдем энергию атома водорода в основном состоянии, когда электрон находится на первой орбитали:

$$\begin{aligned} n = 1 \Rightarrow E_1 &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1} = -\frac{1,6^2 \cdot 10^{-38} \text{ Кл}^2}{8 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}} \\ &= -2,168 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,53 \text{ эВ} \end{aligned}$$

22.4.3 Формулы Бальмера и Ридберга.

Ко второй половине XIX века было известно 4 линии в видимой части спектра водорода:

Обозначение	H_α	H_β	H_γ	H_δ
n	3	4	5	6
Длина волны, нм	656,3	486,1	434,1	410,2

В 1885 году швейцарский математик Иоганн Бальмер смог подобрать формулу, которая объединяла в себе все 4 частоты в видимой части спектра.

$$\lambda_n = b \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (6)$$

где $n = 3, 4, 5, 6$, $b = 364, 56$ нм.

В 1888 году шведский ученый Йоханесс Ридберг предложил более общую формулу описывающую спектр излучения водородоподобных атомов во всех диапазонах длин волн:

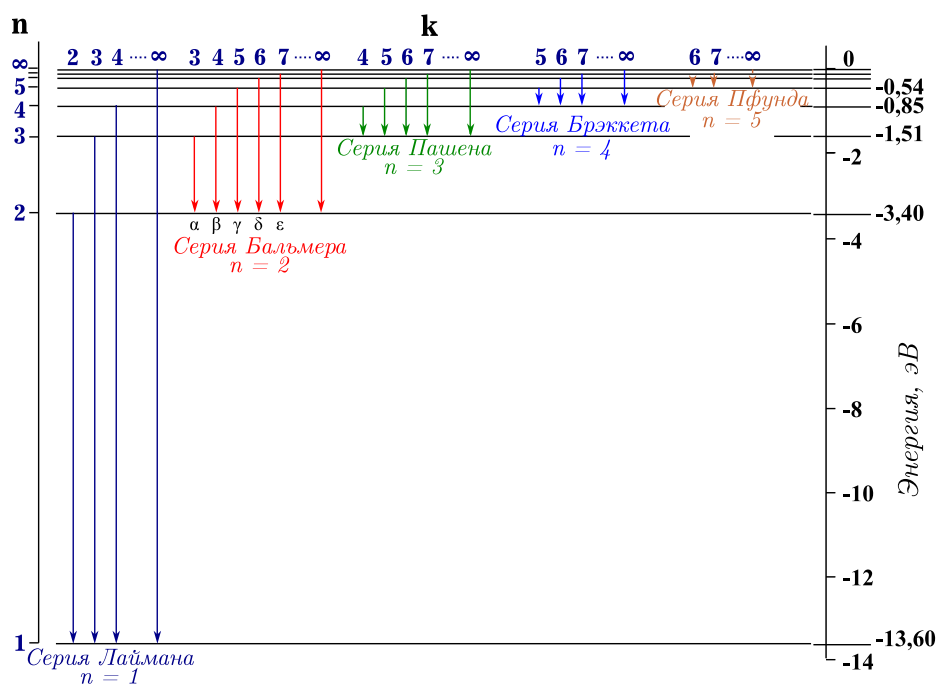
$$\frac{1}{\lambda_{kn}} = Z^2 R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (7)$$

где Z - порядковый номер атома в таблице Менделеева (заряд ядра атома), R - постоянная Ридберга.

Для водорода $Z = 1$, тогда постоянная Ридберга будет равна:

$$R = 10\,967\,758 \text{ м}^{-1}$$

Формула Ридберга для водорода давала не только четыре линии в видимой части спектра водорода, но и линии в ультрафиолетовой и инфракрасной области.



k	Переход	Название серии	Диапазон	Год открытия
1	$\infty \rightarrow 1$	Серия Лаймана	Ультрафиолетовая часть спектра	1906
2	$\infty \rightarrow 2$	Серия Бальмера	Видимая часть спектра	1814 (Фраунгофер)
3	$\infty \rightarrow 3$	Серия Пашена	Инфракрасная часть спектра	1908
4	$\infty \rightarrow 4$	Серия Брэккета	Инфракрасная часть спектра	1922
5	$\infty \rightarrow 5$	Серия Пфунда	Инфракрасная часть спектра	1924
6	$\infty \rightarrow 6$	Серия Хэмпфри	Инфракрасная часть спектра	1953

Зная выражение для энергии (4) и второй постулат Бора (1) можно вычислить, какие частоты может излучать атом водорода исходя из теории:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \Rightarrow \boxed{\nu_{kn} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)} \Rightarrow$$

$$\nu_{kn} = R' \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

Полученное выражение, находится в полном соответствии с формулой Ридберга (7):

$$\frac{1}{\lambda_{kn}} = \frac{\nu_{kn}}{c} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \Rightarrow R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = \frac{R'}{c}$$

При этом и R и R' принято называть постоянной Ридберга. Рассчитаем их значение из теории:

$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6^4 \cdot 10^{-76}}{8 \cdot 8,85^2 \cdot 10^{-24} \cdot 6,62^3 \cdot 10^{-102} \cdot 3 \cdot 10^8} = 10\,973\,731 \text{ м}^{-1}$$

$$[R] = \frac{\text{кг} \cdot \text{Кл}^4}{(\text{Ф/м})^2 \cdot \text{Дж}^3 \cdot \text{с}^3 \cdot \text{м/с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{Кл}^3 \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2}{\text{Ф}^2 \cdot \text{Дж}^3 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{Кл}^2 \cdot \text{В}^2 \cdot \text{В}^2 \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{В} \cdot \text{с}^2} =$$

$$= \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{Дж} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{с}^2} = \frac{1}{\text{м}}$$

$$R' = Rc = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Полученное значение оказалось очень близко к экспериментальному, отличия были связаны с тем, что модель Бора даже для водорода не является абсолютно точной и не учитывает целый ряд квантовых эффектов.

22.5 Объяснение законов люминесценции.

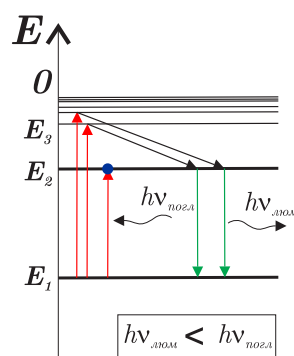
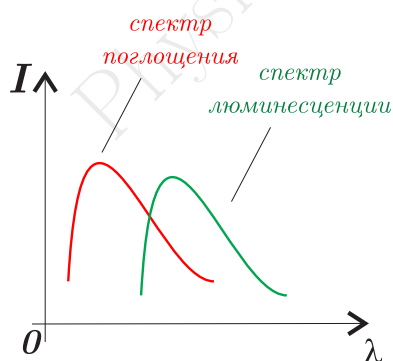
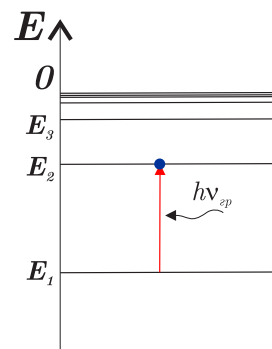
Из квантовых постулатов Бора следует, что набор возможных дискретных частот соответствующих переходу атома между стационарными состояниями однозначно определяет линейчатый спектр атома. Спектры поглощения и испускания вещества являются источником информации о качественном составе (из каких молекул или атомов состоит вещество), количественном соотношении различных компонентов вещества, их состоянии и структурной организации.

Таким образом отсюда получается **первый закон люминесценции**: «Каждое вещество светится характерным для него светом.»

Поскольку атомы некоторое время могут пребывать в возбужденном состоянии и потом переходить в основное с излучением фотона, отсюда следует **второй закон люминесценции**: «Существует послесвечение.»

Для объяснения **третьего закона люминесценции**, о существовании минимальной частоты света вызывающего фотолюминесценцию, можно посмотреть на энергетические уровни атома. Для того, что перевести атом из основного состояния в возбужденное, требуется некоторая энергия, которая определяется разностью уровней энергии атома в основном состоянии E_1 и в первом возбужденном состоянии E_2 .

Также дискретная структура энергетических уровней атома позволяет объяснить четвертый закон люминесценции **правило Стокса**: «Свет люминесценции характеризуется большей длиной волны (меньшей частотой), чем свет возбуждающий люминесценцию.»



Причина сдвига спектров люминесценции относительно спектра поглощения заключается в том, что электронный переход при поглощении кванта энергии происходит с нижнего основного состояния на любые колебательные уровни возбужденных состояний атома. Вследствие внутренней конверсии, испускание электромагнитных квантов происходит при переходе атома с самых нижних подуровней возбужденных состояний на любые подуровни нижележащих электронных состояний.

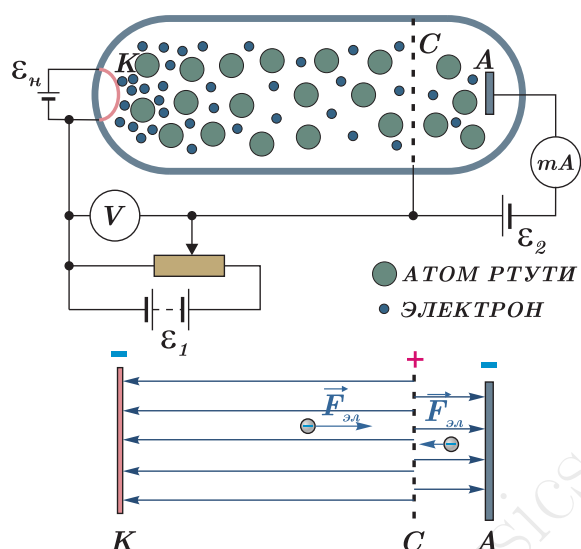
В результате образуются полосы испускания (люминесценции) — первая, вторая и т.д., которые не совпадают по частоте с полосами поглощения, а смещены относительно них в сторону меньших частот (больших длин волн).

Итог: квантовые постулаты Бора и модель Бора позволили объяснить законы люминесценции открытые в XIX веке.

22.6 Экспериментальное доказательство существования стационарных орбиталей.

В 1914 году немецкие физики Джеймсон Франк и Людвиг Герц (племянник знаменитого Генриха Герца) поставили эксперимент, который смог подтвердить существование стационарных состояний.

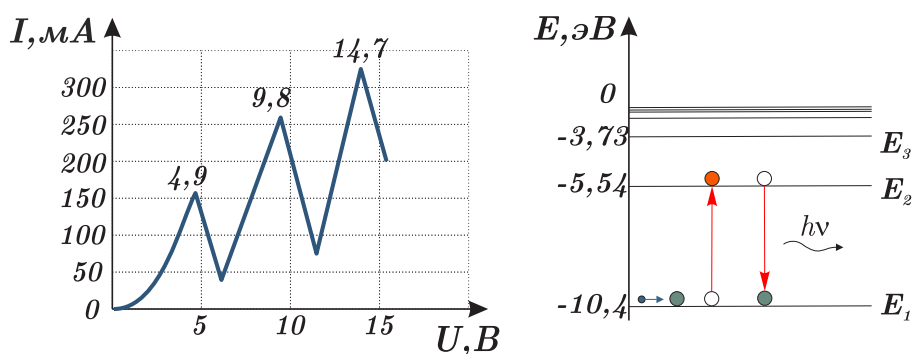
Основным элементом экспериментальной установки был стеклянный баллон с тремя электродами: катодом (К), анодом (А) и сеткой (С). Внутри баллона находились разреженные пары ртути, давление внутри баллона было около 1 мм.рт.ст.



Через катод пропусклся ток, при помощи источника ε_H . Катод нагревался и вследствие термоэлектронной эмиссии начинал испускать электроны.

Электрон попадая в электрическое поле катод-сетка ускоряется, а если долетел до сетки, то в электрическом поле сетка-анод тормозился. Разность потенциалов катод-сетка и сетка-анод, подбирали так, чтобы электрон точно мог долететь до анода. То, что электрон долетел до анода, регистрировали при помощи миллиамперметра, а разность потенциалов катод-сетка — при помощи вольтметра. Эту разность потенциалов можно было увеличивать, при помощи потенциометра, передвигая ползунок слева направо. В процессе изменения разности потенциалов катод-сетка, данные наносились на график вольт-амперной характеристики.

Пока разность потенциалов катод-сетка было меньше 4,9 В, электроны если и сталкивались с атомами ртути, то испытывали абсолютно упругое столкновение и поскольку масса электрона во много раз меньше массы атома ртути, кинетическая энергия электрона при столкновениях практически не изменялась. С ростом ускоряющей разности потенциалов катод-сетка электроны приобретали всё большую кинетическую энергию, соответственно на анод они прилетали быстрее и ток который регистрировал миллиамперметр, увеличивался.



При напряжении 4,9 В, энергия электронов стала достаточной, чтобы перевести атом ртути в возбужденное состояние. Электрон испытывал неупругое столкновение с атомом ртути и

терял почти всю свою кинетическую энергию. И соответственно не мог преодолеть тормозящую разность потенциалов сетка-анод. Ток начинал уменьшаться.

Далее все повторялось, если после одного столкновения электрон находился в ускоряющей разности потенциалов, он снова увеличивал свою скорость и преодолев тормозящую разность потенциалов достигал анода, ток начинал расти. При напряжении 9,8 В электроны успевали уже дважды неупруго столкнуться с атомами ртути и т.д.

Стоит отметить, что возбужденные атомы ртути через $\sim 10^{-8}$ с переходят в основное состояние с излучением соответствующего фотона с частотой $\nu = \frac{E}{h}$ или $\lambda = \frac{hc}{E}$. Франк и Герц наблюдали в опыте свечение строго определенной длины волны 254 нм, причем оно возникало с тем же периодом, что и график вольт-амперной характеристики.

Постоянство периодов и длины волны излучаемого света, говорило о том, что атом ртути способен поглотить только определенную порцию энергии, соответствующую переходу атома между основным и первым возбужденным состояниями. Это стало решающим доказательством справедливости постулатов Бора.

В то время как Франк и Герц публиковали результаты своих экспериментов в 1914 году, они ещё не знали, что в 1913 году Нильс Бор предложил свою модель атома. Франк и Герц предположили, что напряжение 4,9 В, характерное для их экспериментов, было вызвано ионизацией атомов ртути в результате столкновений с испускаемыми катодом электронами. В 1915 году Бор опубликовал статью, в которой отмечалось, что измерения Франка и Герца больше согласуются с предположением о квантовых уровнях в рамках его модели атома



Опыт Франка и Герца относят к фундаментальным физическим экспериментам. За это открытие, в 1925 году они были награждены Нобелевской премией.

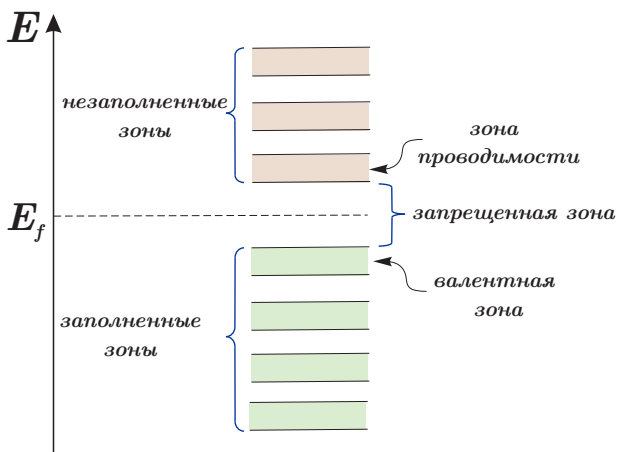


22.7 Зонная теория проводимости.

У изолированных атомов электроны расположены на разных орбиталях с разными расстояниями до ядра. Этому соответствуют разные энергии атома. Когда атомы оказываются в твердом теле, в нем они расположены в строгом геометрическом порядке - кристаллической решетке. При этом орбитали, по которым движутся электроны, деформируются, и происходит изменение в энергетических уровнях атома. В основном изменения связаны со взаимодействием электронов с ядрами и электронами соседних атомов.

Def. При кристаллизации вещества, т.е. при переходе атомов в упорядоченную структуру, каждый энергетический электронный уровень атома расщепляется на ряд близких подуровней, объединенных в энергетическую полосу или зону.

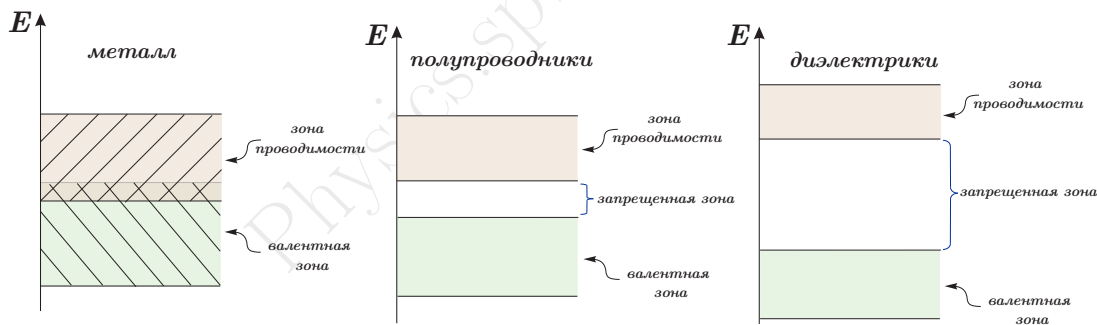
Электроны находящиеся в одной зоне обладают очень близкими энергиями. В зоне, которая расположена ближе всего к ядру, электроны находятся в связанном состоянии, они не могут оторваться от ядра и стать свободными, или перейти к соседнему атому, т.к. у него в нижней зоне так же все занято.



Наивысшая из разрешённых энергетических зон в полупроводниках и диэлектриках, в которой при температуре 0 К все энергетические состояния заняты электронами, называется валентной зоной, следующая за ней — зоной проводимости. В металлах зоной проводимости называется наивысшая разрешённая зона, в которой находятся электроны при температуре 0 К.

Все вещества, с точки зрения проводимости делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. В них энергетические зоны расположены по-разному.

В металлах — зона проводимости и валентная зона перекрываются, образуя одну зону, называемую зоной проводимости, таким образом, электрон может свободно перемещаться между атомами, получив любую малую энергию, например в результате теплового движения. А если к твердому телу приложить разность потенциалов, электроны приобретут энергию за счет действия электрического поля и смогут свободно двигаться по проводнику из точки с меньшим потенциалом в точку с большим потенциалом, образуя электрический ток. Поэтому к проводникам относят все металлы.



В диэлектриках — валентная зона и зона проводимости не перекрываются, и расстояние между ними составляет более 3,5 эВ. Чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется значительная энергия, поэтому при нормальных условиях диэлектрики ток практически не проводят.

В полупроводниках — зоны не перекрываются, и расстояние между ними составляет не более 3,5 эВ. Чтобы электрон мог попасть из валентной зоны в зону проводимости, необходима энергия меньшая, чем для диэлектрика, поэтому чистые полупроводники слабо пропускают ток.

Поскольку одним из основных механизмов передачи электрону энергии является тепловой, то проводимость полупроводников очень сильно зависит от температуры. Также проводимость можно увеличить, создав разрешённый энергетический уровень в запрещённой зоне путём добавления различных примесных атомов для изменения физических и химических свойств основного материала.

Зонная теория является основой современной теории твёрдых тел. Она позволила понять природу и объяснить важнейшие свойства проводников, полупроводников и диэлектриков. Величина запрещённой зоны между зонами валентности и проводимости является ключевой величиной в зонной теории, она определяет оптические и электрические свойства материала.

22.8 Лазеры.

Еще одним применением квантовой физики было создание нового вида источников света — лазеров.

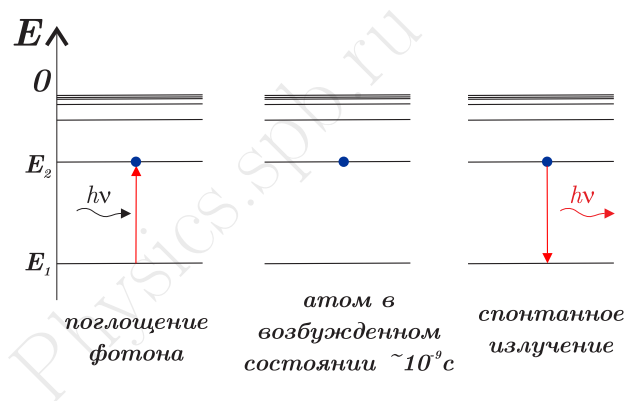
Def. Лазер или потический квантовый генератор — устройство преобразующее какой-либо вид энергии в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

LASER это акроним от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — «Усиление света посредством вынужденного излучения»

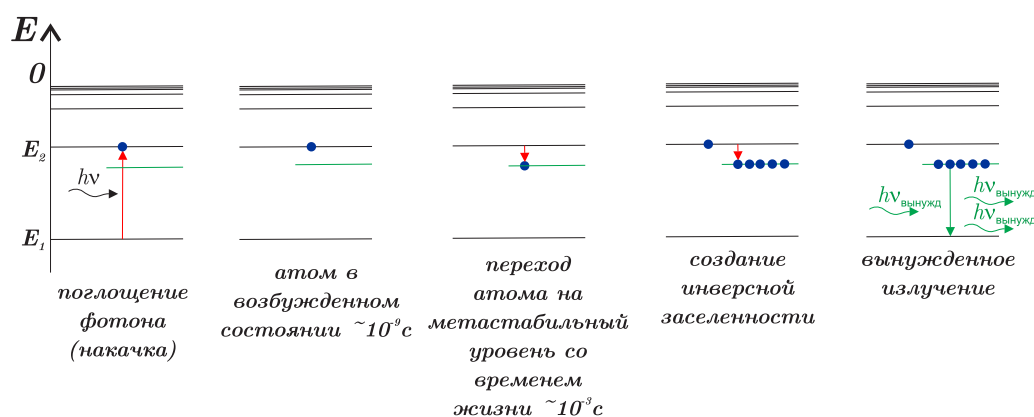


22.8.1 Спонтанное и вынужденное излучение.

Сложность в получении когерентного излучения связана с тем, что атомы излучают независимо друг от друга и непредсказуемо, в произвольные моменты времени. Т.е. не будет выполнено одно из условий когерентности, а именно — постоянство сдвига фаз.



Если получить среду, в которой большинство атомов будет находиться в возбужденном состоянии достаточно долго $\sim 10^{-3}$ с, то как было показано Эйнштейном, фотон, частота которого равна частоте излучения при переходе из возбужденного состояния в основное, может вызвать такой переход. Причем процесс будет лавинообразным и большая часть возбужденных атомов перейдет в основное состояние практически одновременно, и полученное излучение будет одной частоты с постоянным сдвигом фаз, не зависящим от времени.



Для этого берут среду, в которой есть так называемый метастабильный уровень энергии. Время жизни атома в метастабильном состоянии составляет $\sim 10^{-3}$ с, а время жизни атома в обычном возбужденном состоянии составляет $\sim 10^{-9}$ с. Поэтому можно накопить достаточно большое количество атомов в возбужденном состоянии на метастабильном уровне, их будет больше чем атомов в основном состоянии.

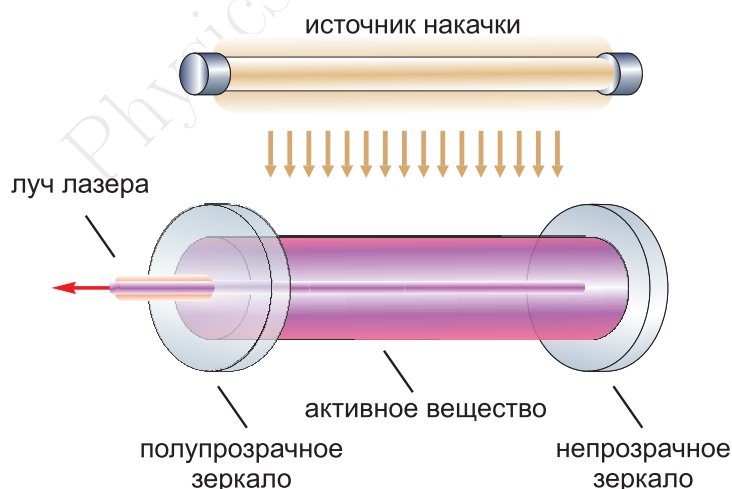
Def. Среда в состоянии, при котором количество атомов в возбужденном состоянии превышает количество атомов в основном состоянии, называется средой с инверсной заселенностью.

В результате для работы лазера необходимо выполнить следующие условия:

- создание среды с инверсной заселенностью;
- создание индуцированного излучения;

22.8.2 Принципиальная схема лазера.

Лазер состоит из трех основных частей: активного вещества (в котором, возможно создание инверсной заселенности), источника накачки (который обеспечивает перевод атомов в активной среде в возбужденное состояние) и оптического резонатора (в простейшем варианте это два параллельных непрозрачного и полупрозрачного зеркала).



Источник накачки переводит атомы активной среды в возбужденное состояние. После чего они спонтанно переходят на метастабильный энергетический уровень. Таким образом формируется среда с инверсной заселенностью. Далее один из атомов спонтанно переходит из метастабильного состояния в основное, испуская фотон уже с частотой лазерного излучения. Если скорость фотона направлена не в сторону зеркала, он покидает активную среду, практически не индуцируя лазерное излучение. Те же фотоны, у которых скорость направлена вдоль оси по нормали к зеркалам, начинают многократно отражаясь проходить через активную среду индуцируя вынужденное излучение других атомов с переходом с метастабильного уровня на основной. В результате образуется лавина фотонов с одинаковой частотой у которых сдвиг фаз не меняется с течением времени.

Наружу поток фотонов выходит при этом через полупрозрачное зеркало, формируя узконаправленный когерентный во времени и пространстве пучок света.

При этом энергия источника накачки должна превышать потери в резонаторе.

22.8.3 Изобретение лазера.

За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн (создание молекулярных генераторов и усилителей) советские физики Н. Г. Басов и А. М. Прохоров в 1959 году были награждены Ленинской премией, а в 1964 году им совместно с американским физиком Ч. Х. Таунсом (создателем мазера) за «фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей на лазерно-мазерном принципе», была присуждена Нобелевская премия по физике.

Стоит отметить, что сам лазер, впрочем, не сделал никто из лауреатов Нобелевской премии, это удалось в 1960 году другому американскому физiku - Теодору Мейману.



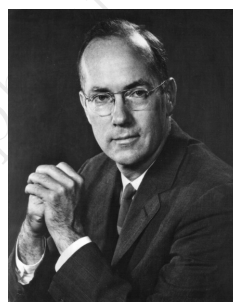
Теодор Мейман
(1927-2007)



Басов Н.Г.
(1922-2001)



Прохоров А.М.
(1916-2002)



Чарлз Таунс
(1915-2015)

22.8.4 Классификация лазеров.

Лазеры принято классифицировать по типу активной среды, в которой можно создать инверсную заселенность. По способу накачки, т.е. каким образом создается инверсная заселенность и по времени излучения.



22.8.5 Применение лазеров.



22.9 Предпосылки создания квантовой механики. Волна де Бройля.

Теория Н. Бора не могла объяснить уже строение такого простого атома, как гелий. Также она не давала ответов по вопросу интенсивности излучения в каждой линии спектра. Ошибочность взглядов Нильса Бора заключалась в том, что он попытался объединить законы классической физики с квантовыми представлениями.

В 1923 году произошло событие, которое смогло объяснить смысл правила квантования Бора. Французский физик Луи де Бройль предположил, что частицы вещества тоже обладают таким же дуализмом, как и свет, т.е. частицы вещества должны описываться волновым процессом.

Рассмотрим длину волны фотона:

$$h \frac{c}{\lambda} = mc^2 \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{h}{mc} = \frac{h}{p}$$

Предположим, что для электрона будет справедлива аналогичная формула:

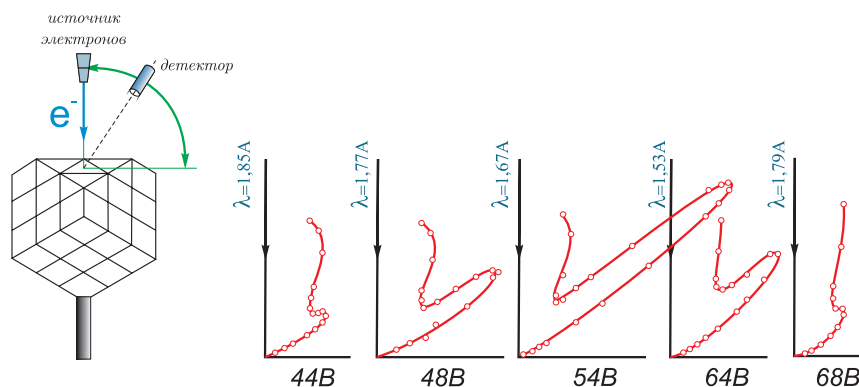
$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Тяжело представить, что электрон может быть волной, но уже через четыре года это удивительное свойство было подтверждено опытом.

Американские физики К. Дэвиссон, Л. Джермер и Дж. П. Томсон открыли дифракцию электронов на кристаллах. Электрон действительно ведет себя как волна!



Луи де Бройль
(1892-1987)



Пучок электронов разогнался в ускоряющей разности потенциалов и направлялся на поверхности монокристалла никеля. При этом регистрируя отразившиеся электроны под различными углами.

В опытах Дэвиссона и Джермера максимальное отражение электронов наблюдалось при ускоряющей разности потенциалов 54 В, что соответствовало длине волны де Бройля

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_k}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e e \Delta\varphi}} = 0,167 \text{ нм}$$

Учитывая, что постоянная решетки никеля составляет $2,15 \cdot 10^{-10}$ м из условия дифракции $2d \sin \varphi = n\lambda$, получилось, что расчетное значение волны де Бройля должно быть

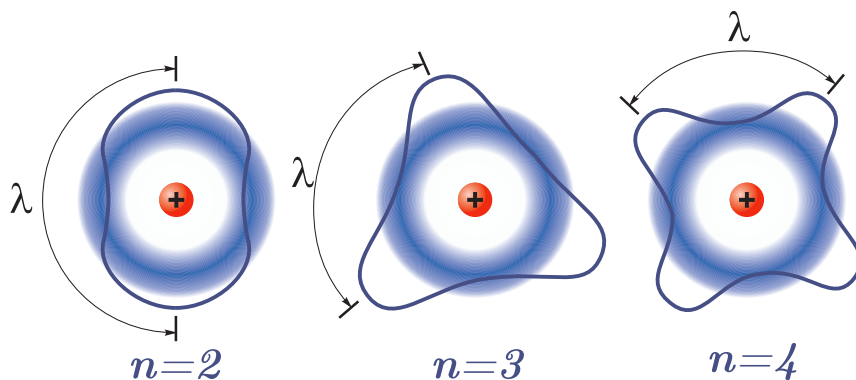
$$\lambda_B = \frac{d \sin \varphi}{n} = 0,165 \text{ нм}$$

Совпадение экспериментальных и расчетных значений длины волны де Бройля служит прекрасным подтверждением гипотезы де Бройля о наличии у частиц волновых свойств.

Гипотеза де Бройля позволила объяснить правило квантования Бора:

$$mvr = n\hbar = \frac{nh}{2\pi} \Rightarrow \frac{h}{\lambda_B} r = \frac{nh}{2\pi} \Rightarrow \boxed{2\pi r = n\lambda_B}$$

Def. Разрешены те орбитали, на которых может уложиться целое количество длин волн де Бройля.



Для того чтобы более отчетливо представлять себе порядок величины длины волны де Бройля микрочастиц, найдем длину волны де Бройля электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 150 В. Для определенности будем считать электрон нерелятивистским. В этом случае

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2m_e e \Delta \varphi}} \sim 10^{-10} \text{ м}$$

получается, что длина волны равна приблизительно размеру атома водорода.

Найдем теперь длину волны де Бройля у макроскопического тела, но достаточно малого объекта - пылинки, масса которой 1 мг, а скорость 1 мм/с

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{10^{-9} \text{ кг} \cdot 10^{-3} \text{ м/с}} = 6,6 \cdot 10^{-22} \text{ м}$$

Найденная длина волны значительно меньше не только размеров самой пылинки, но и наименьшего известного в физике размера - радиуса ядра,

Только гениальным озарением можно объяснить появление этой теории (волновых свойств вещественных частиц) в то время на таких шатких основаниях! Эйнштейн сказал по этому поводу: «Это высшая музыкальность в области теоретической мысли.»

Подтвердилась не только волновая природа электрона, но и в точности формула де Бройля для длины электронной волны. История повторилась в обратной последовательности: в случае света была сначала изучена волновая природа, а затем корпускулярная, а у электрона - наоборот.

В 1949 г. в Москве Л. М. Биберманом, Н. Г. Сушкиным и В. А. Фабрикантом были осуществлены опыты по дифракции одиночных, поочередно летящих электронов. Интенсивность электронного пучка в этих опытах была столь малой, что на тонкую пленку вещества одновременно попадал только один электрон. Таким образом, волновые свойства характерны не только для пучка движущихся частиц, но и для отдельной движущейся частицы.



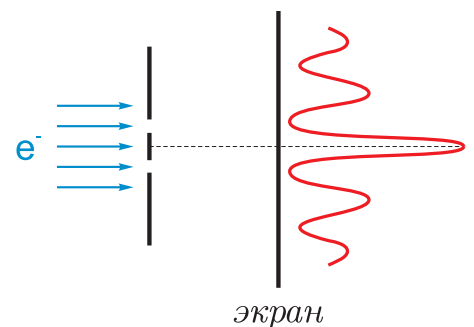
22.10 Принцип неопределенности.

Открытие волновых свойств у вещественных микрочастиц показывает, что в физике микромира мы имеем дело с принципиально новым типом объекта. В отдельных экспериментах микрочастицы проявляют волновые свойства, в других ведут себя подобно частицам (корпускулам), при этом ни волнами, ни частицами в полном смысле слова они не являются.

Для описания поведения таких новых объектов законы классической физики не применимы. Например, нельзя для новых объектов использовать такое понятие, как траектория.

Проиллюстрируем это утверждение результатами опыта по дифракции электронов на двух щелях. В ряде учебных пособий этот опыт называют мысленным экспериментом, на практике он был осуществлен Клаусом Йенсеном в 1961 г.

Пусть пучок электронов попадает на диафрагму с двумя щелями. Т.к. электроны обладают волновыми свойствами,



на экране, расположенном за диафрагмой, который может реагировать на попадания электронов, возникнет интерференционная картина из чередующихся максимумов и минимумов. Если по очереди закрывать первую и вторую щель, то напротив открытой щели будет яркая полоса, как если бы электрон проходил через открытую щель.

Т.е. электрон проходя через две открытые щели, ведет себя как волна.

При этом любая попытка определить, через какую именно щель прошел электрон, приводит к нарушению интерференционной картины

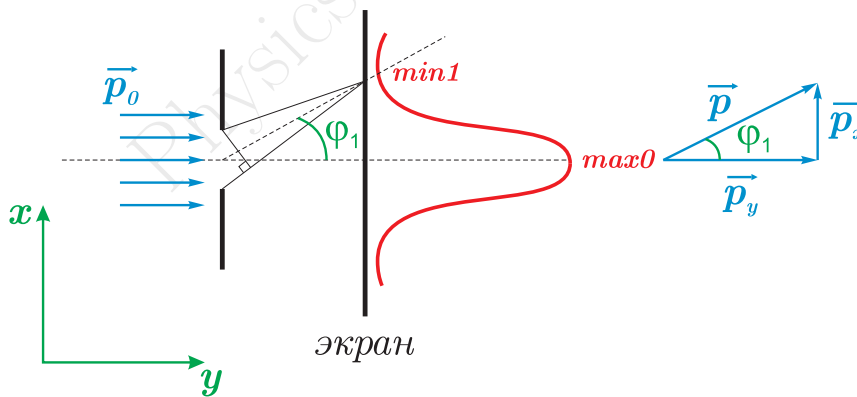
NB!

Таким образом для электрона не применимо понятие траектории. Какие же свойства классических частиц сохраняются в области микромира?

Классические характеристики сохраняемые в микромире: масса, электрический заряд и энергия, которая при взаимодействии частицы с другими телами расходуется так, как если бы частица была сосредоточена в одной точке.

NB!

Корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц накладывает ограничения на точность определения некоторых физических величин, характеризующих состояние частицы. Причем эти ограничения никак не связаны с точностью измерений, достижимой в конкретном эксперименте, а имеют принципиальное значение. Рассмотрим в качестве примера дифракцию электрона на щели.



Большая часть электронов, пройдя через щель, будут попадать в дифракционный максимум нулевого порядка, граница которого, определяется углом φ_1 , определяющим положение первого минимума. Из дифракции волн нам известно, что для минимума первого порядке выполняется следующее соотношение:

$$\Delta x \cdot \sin \varphi_1 = \lambda_B$$

т.к. электрон при прохождении щели ведет себя как волна де Бройля, то в формуле дифракции справа стоит именно длина волны де Бройля для электрона, поэтому

$$\Delta x \cdot \sin \varphi_1 = \lambda_B = \frac{h}{p_y} = \frac{2\pi\hbar}{p_y}$$

Т.к. угол φ_1 очень мал, то $\sin \varphi_1 = \operatorname{tg} \varphi_1$, тогда с учетом того, что $\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{p_x}{p_y} = \frac{\Delta p_x}{p_y}$ получим

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda_B}{\Delta x} = \frac{2\pi\hbar}{p_y \Delta x} \approx \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\Delta p_x}{p_y}$$

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \approx 2\pi\hbar \Rightarrow \Delta p_x \cdot \Delta x \approx h$$

Т.к. в выводе были некоторые упрощения, то соотношение получилось приближенным. При строгом выводе получается следующий результат:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Это соотношение было получено в 1927 г немецким физиком В. Гейзенбергом и называется соотношением неопределенностей Гейзенберга. Из него следует, что чем точнее мы определяем координату частицы, т.е. чем меньше Δx , тем более неопределенной становится проекция импульса Δp_x частицы на эту координатную ось и наоборот. Соотношение неопределенностей является математическим выражением принципа неопределенностей.

St. →

В природе не существует состояния частицы с точно определенными значениями координаты и проекции импульса на эту координатную ось.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга связывает неопределенность координаты частицы с неопределенностью проекции импульса именно на данную координатную ось. В то же время не существует никаких принципиальных ограничений на точность определения координаты и проекции импульса на другую координатную ось.

Пример 1: Покажем, каким образом соотношение неопределенностей позволяет сделать вывод об устойчивости атома водорода.

Возьмем электрон в атоме водорода. Его энергия составляет порядка 10 эВ, что соответствует скорости 10^6 м/с. Если мы хотим измерить скорость с точностью в 1%, тогда $\Delta v_x = 10^{-4}$ м/с

$$\Delta p_x = m\Delta v_x \sim 10^{-26} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

и точность определения местоположения электрона будет равна

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{2\Delta p_x} \sim 10^{-10} \text{ м}$$

что сопоставимо с размерами атома водорода, следовательно радиус первой орбитали электрона не может быть меньше величины погрешности, т.е. 10^{-10} м.

Пример 2: Соотношение неопределенностей позволяет также очертить границы применимости классической механики.

Рассмотрим пылинку массой $m = 1$ мг. Такая пылинка будет являться макрочастицей. Будем считать разумной погрешностью определения координат величину $\Delta x = 10^{-6}$ м. Тогда

$$\Delta v_x = \frac{\hbar}{2m\Delta x} \sim 10^{-22} \text{ м/с}$$

Такая погрешность определения скорости, явно на много порядков меньше погрешности измерения лучших установок в мире, поэтому для данной пылинки, как и для любого макротела, соотношение неопределенностей не играет никакой роли. Для описания движения таких тел, достаточно воспользоваться законами классической механики.

22.11 Квантовая механика. Волновая функция. Уравнение Шредингера.

Первоначально, теория, в которой описывается движение частиц с волновыми свойствами, была названа волновой механикой. Но достаточно быстро название было изменено на квантовую механику, т.к. оказалось, что физические величины характеризующие состояние таких частиц имели дискретный характер, т.е. они не могли принимать любые значения, а следовательно имели квантовую природу.

Def. Квантовая механика - раздел физики, устанавливающий способ описания и законы движения атомных и субатомных частиц, обладающих волновыми свойствами.

Квантовая механика является более общей физической теорией, чем классическая механика. При выполнении условия $\lambda_B \ll L$, когда волновыми свойствами частицы можно пренебречь, выводы квантовой механики совпадают с результатами классической механики.

St. →

Первый постулат квантовой механики: Состояние частицы в квантовой механике описывается заданием волновой функции $\Psi(x, y, z, t)$, являющейся функцией пространственных координат и времени.

Невозможность задания состояния микрочастицы в любой момент времени при помощи ее координат и скорости и отказ от понятия траектории приводит к *вероятностному способу описания движения микрочастицы*. Это означает, что в квантовой механике, определяя состояние микрочастицы, следует указать способ определения вероятности обнаружения частицы в различных точках пространства в данный момент времени.

В 1926 г. М.Борн сформулировал вероятностный смысл волновой функции в квантовой механике.

St. →

Второй постулат квантовой механики: Квадрат модуля волновой функции определяет плотность вероятности того, что в момент времени t частица может быть обнаружена в точке пространства с координатами (x, y, z) .

Можно отметить, что волновая функция в общем случае является комплексной функцией, то есть содержит действительную и мнимую части. Физический смысл, поэтому, имеет не сама волновая функция, а ее квадрат модуля $|\Psi|^2$ - действительная величина.



Вероятностный смысл волновой функции накладывает определенные ограничения или условия на волновые функции в задачах квантовой механики. Эти стандартные условия часто называют условиями регулярности волновой функции. Они включают в себя:

1. Условие конечности волновой функции. Волновая функция должна быть квадратично интегрируемой. В частности, в задачах с нормированной волновой функцией квадрат модуля волновой функции должен стремиться к нулю на бесконечности.

2. Условие однозначности волновой функции. Волновая функция должна быть однозначной функцией координат и времени, так как плотность вероятности обнаружения частицы должна определяться в каждой задаче однозначно.
3. Условие непрерывности волновой функции. В любой момент времени волновая функция должна быть непрерывной функцией пространственных координат. Кроме того, непрерывными должны быть также частные производные волновой функции.
4. Если в качестве области пространства взять все пространство, то обнаружение частицы во всем пространстве является достоверным событием, вероятность которого равна единице. Следовательно, из вероятностного смысла волновой функции вытекает, что

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x, t) dx = 1$$

Из этого следует, что:

Def. Радиус разрешенных орбиталей - это такое расстояние от ядра, которому соответствует наибольшая вероятность обнаружить электрон.

В 1927 году немецкий физик Эрвин Шредингер написал уравнения описывающие стационарные состояния. В одномерном случае оно выглядит следующим образом

$$\frac{d^2\Psi(x, t)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar}(E - U(x))\Psi(x, t) = 0 \quad (8)$$

Это уравнение является дифференциальным уравнение второго порядка. Если известна полная энергия частицы и ее потенциальная энергия $U(x)$, то решение этого дифференциального уравнения позволяет найти волновую функцию, а следовательно и вероятность обнаружить частицу в определенном состоянии.

Уравнение Шредингера является важнейшим соотношением нерелятивистской квантовой механики, играющим основную роль в атомной физике. Функции $\Psi(x, t)$ удовлетворяющие уравнению Шредингера при данном значении $U(x)$, называются собственными функциями. Значения кинетических энергий, при которых существуют решения уравнения Шредингера, называются собственными значениями.



Эрвин Шредингер
(1887-1961)