

ЛЕКЦИЯ 3

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Модель атома Резерфорда. Атомные спектры.
2. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца.
3. Элементарная боровская теория водородного атома.

МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА

Из школьного курса физики: атомное ядро открыл английский физик Резерфорд в 1911 году в опытах по изучению рассеяния α -частиц на тонких фольгах.

Небольшая доля α - частиц отклонялась на большие углы (до 180°). Резерфорд предположил, что в центре атома расположено тяжелое (до 99,98% массы атома) положительно заряженное ядро очень малых размеров (10^{-13} - 10^{-12} см).

Вокруг ядра на относительно очень больших расстояниях ($\sim 10^{-8}$ см) вращаются Z электронов. Z - порядковый номер элемента в периодической таблице Менделеева.

Модель названа ядерной или планетарной. Строение атома напоминает Солнечную систему. Роль Солнца выполняет ядро, роль планет – электроны, роль гравитационного притяжения – кулоновское взаимодействие между ядром и электронами.

МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА

Противоречия модели.

1. Модель не удовлетворяет условию устойчивости.

Заряженная частица, движущаяся с ускорением, в соответствии с законами электродинамики должна тратить энергию на излучение. Из-за потерь энергии электрон должен в итоге упасть на ядро.

2. Модель допускает испускание атомами светового излучения *любой* длины волны.

Из опытов было известно, что конкретные атомы испускают излучение только *строго определенных* длин волн.

АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ.

Излучение невзаимодействующих друг с другом атомов состоит из отдельных спектральных линий.

Такой спектр называется *линейчатым*

Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов.

Исследования показали: линии в спектрах атомов расположены не беспорядочно, а объединяются в группы или *серии линий*.

Отчетливее всего это обнаруживается в спектре простейшего атома – водорода.

Швейцарский физик Бальмер в 1885 году обнаружил, что длины волн в видимой и близкой ультрафиолетовой области спектра излучения водорода могут быть точно представлены формулой

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

λ_0 - константа, n - целое число, принимающее значения 3, 4, 5 и т.д.

АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ.

Если заменить длину волны частотой, получится:

$$\omega = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 3, 4, 5, \dots) \quad R' - \text{постоянная Ридберга.}$$

$$R' = 2.07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}.$$

Это *формула Бальмера*, а соответствующая серия спектральных линий атома водорода называется *серией Бальмера*.

В справочниках часто приводится $R = 1.09737 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, входящая в формулу вида

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

С учетом выражения $\nu = c/\lambda$, эта же формула может быть переписана для частот:

$$\nu = R'' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R'' = Rc = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

В спектре атома водорода кроме серии Бальмера есть еще серии.

В ультрафиолетовой части спектра - *серия Лаймана*. Формула линий -

$$\omega = R' \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$(n=2, 3, 4, \dots)$$

АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ.

В инфракрасной части спектра находится *серия Пашена*. Линии этой серии описываются формулой

$$\omega = R' \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n=4, 5, 6, \dots)$$

И т.д. Частоты всех линий в спектре атома водорода можно представить одной формулой - *обобщенной формулой Бальмера*

$$\omega = R' \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

В этой формуле $m = 1$ для серии *Лаймана*, 2 для серии *Бальмера* и т.д. При заданном m число n принимает все целые значения, начиная с $m+1$.

Приведенные формулы подобраны эмпирически и долго не имели теоретического обоснования, хотя и были подтверждены экспериментально с высокой точностью.

Простой вид формул, универсальность постоянной Ридберга свидетельствуют о глубоком физическом смысле найденных закономерностей, открыть которые в рамках классической физики оказалось невозможным.

ПОСТУЛАТЫ БОРА

Нильс Бор (датский физик), 1913 год - попытка построить качественно новую – квантовую – теорию атома.

Цель Бора: создать теорию, которая связала бы в единое целое эмпирические закономерности линейчатых спектров, устойчивость ядерной модели атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света.

Основа теории Бора - два постулата:

1) Существуют стационарные состояния атома с соответствующими дискретными значениями энергии W_1, W_2, \dots, W_n , причем в этих состояниях атом не излучает и не поглощает энергию. В стационарных состояниях атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию: $m_e v r_n = n \hbar$ ($n = 1, 2, 3$),

v - скорость электрона на n -ой орбите с радиусом r_n .

n – главное квантовое число.

ПОСТУЛАТЫ БОРА

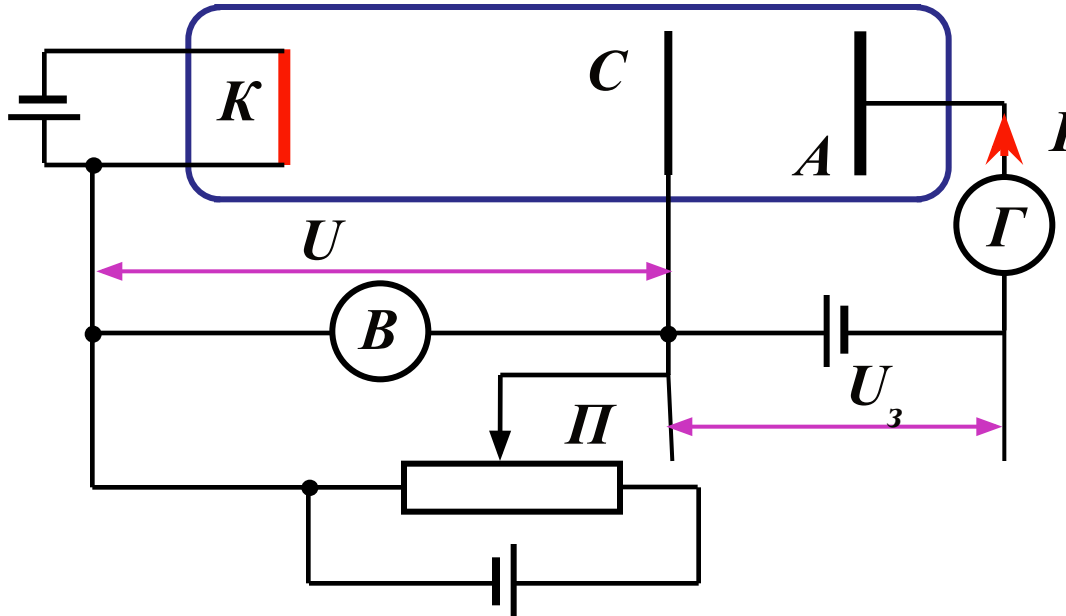
2) поглощение и испускание энергии (излучения) атомом происходит скачкообразно при его переходах из одного стационарного состояния в другое. Частота ω_{mn} испускаемого или поглощаемого атомом света при переходах определяется формулой:

$$\omega_{mn} = \frac{W_m - W_n}{\hbar} \quad (\text{правило частот Бора}),$$

W_m и W_n - энергии атома в m и n - состояниях, \hbar - постоянная Планка.

Постулат Бора о наличии дискретных энергетических уровней у атомов подтверждается многими экспериментами, в частности, опытами Франка и Герца (1913г.).

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

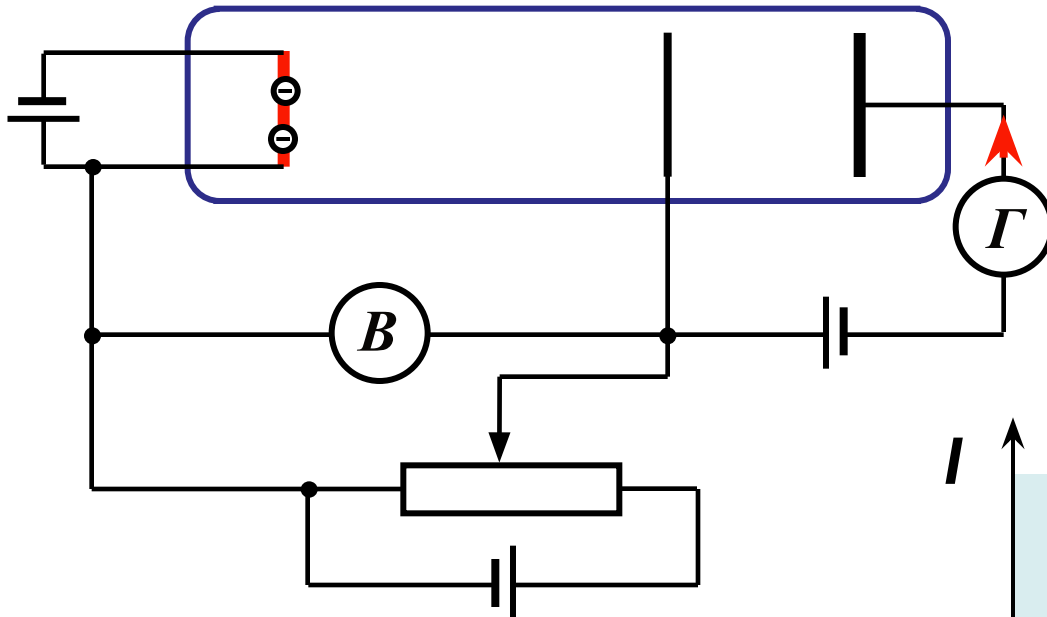
Схема опыта*K* - катод*A* - анод*C* - сетка*П* - потенциометр*B* - вольтметр*Г* - гальванометр

U - ускоряются разностью потенциалов между катодом и сеткой

U_3 - тормозящая разность потенциалов между сеткой и анодом

I - анодный ток

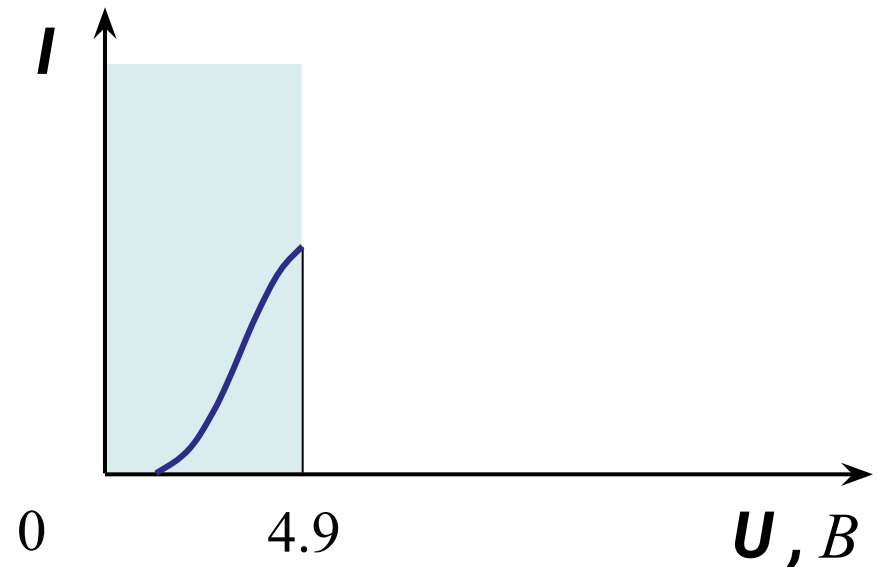
ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

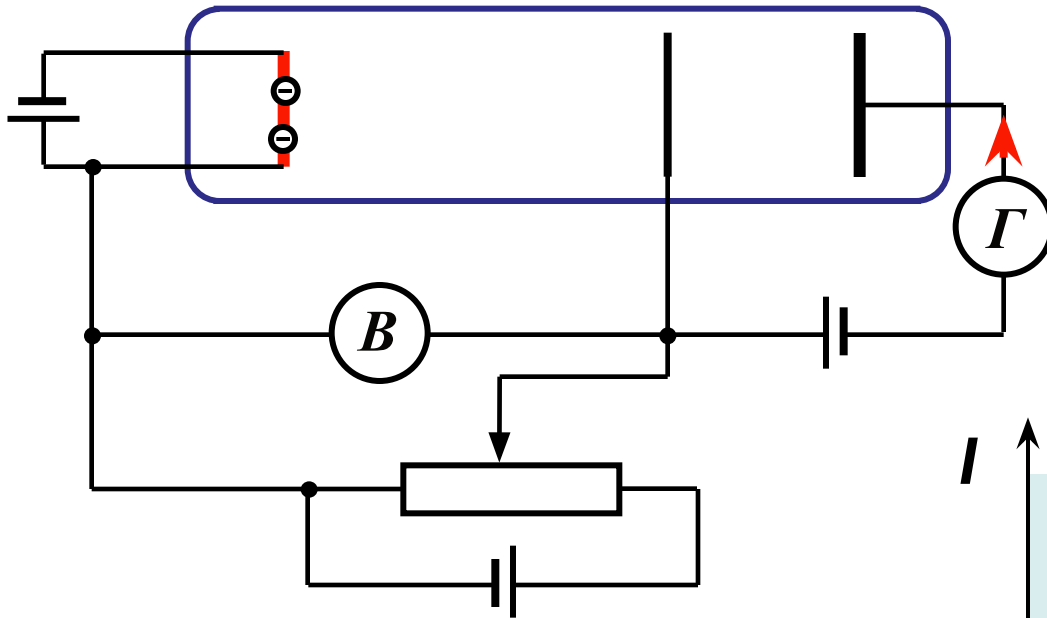
При $U < 4,9$ В кинетическая энергия электронов $W_k < 4,9$ эВ, столкновения электронов с атомами ртути упругие. Ток плавно нарастает.

Исследовалась зависимость анодного тока от разности потенциалов между катодом и сеткой.

$$1) \quad U_3 = 0,5 \text{ В}, \\ 0,5 \text{ В} < U < 4,9 \text{ В}$$



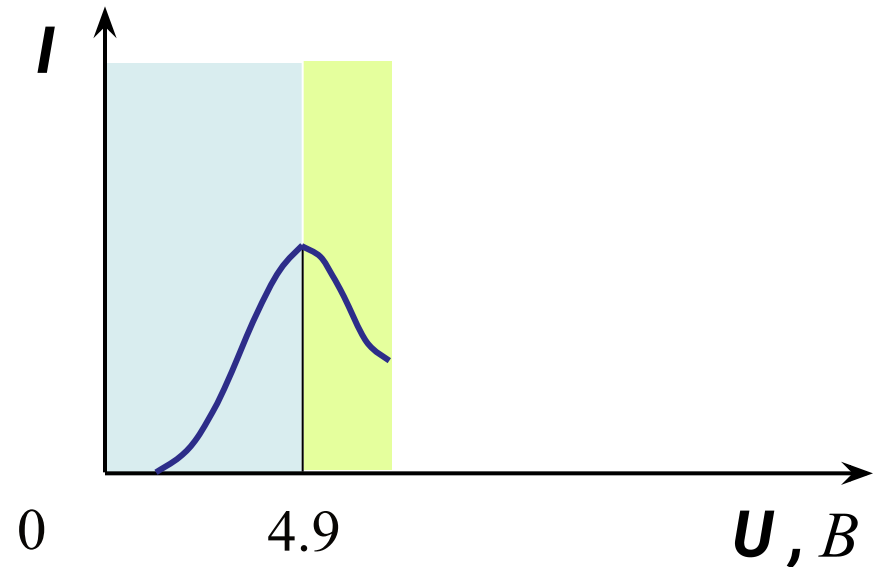
ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

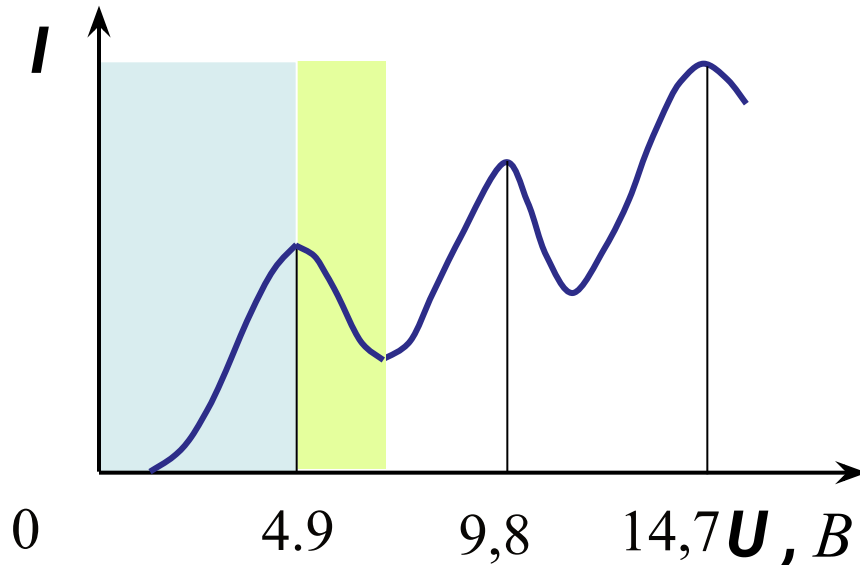
При $U \geq 4,9$ В кинетическая энергия электронов $W_k \geq 4,9$ эВ, столкновения электронов с атомами ртути с большой вероятностью становятся неупругими.

$$2) U_3 = 0,5 \text{ В}, \\ U > 4,9 \text{ В}$$

Электроны отдают часть энергии атомам, их энергия уменьшается, снижается анодный ток.



ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

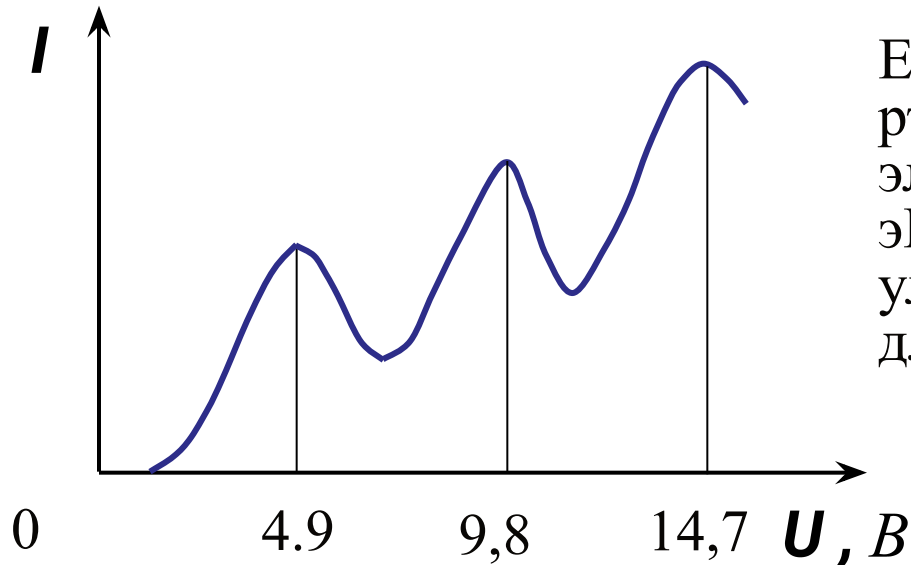
При значениях U , кратных 4,9 В электроны могут несколько раз испытывать неупругие столкновения, отдавая каждый раз по 4,9 В атому ртути.

Это приводит к резкому спаду тока при U , кратных 4,9 В.

Атомы, получившие при соударении с электронами энергию $W_k = 4,9$ эВ или кратную ей, переходят в возбужденное состояние, из которого они спустя время порядка 10^{-8} с, возвращаются в основное состояние, излучая фотон с частотой $\omega = W_k / \hbar$

По известному значению W_k можно вычислить длину волны излучения: $\lambda = hc / W_k$.

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

Если теория верна, то атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией $W_k = 4,9$ эВ, должны являться источником ультрафиолетового излучения с длиной волны около 255 нм.

В опыте такая линия была обнаружена.

Таким образом, опыт Франка и Герца подтвердил постулаты Бора и показал, что 4,9 В – наименьшая возможная порция энергии (наименьший квант энергии), которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии, что и является проявлением дискретности уровней энергии в атоме.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Постулаты, выдвинутые Бором, позволили рассчитать спектр атома водорода и водородоподобных систем, т.е. систем, состоящих из ядра с зарядом **Ze** и одного электрона, а также теоретически вычислить постоянную Ридберга.

В соответствии с теорией Бора рассмотрим движение электрона в водородоподобной системе, ограничиваясь круговыми стационарными орбитами.

Для круговых орбит условие квантования Бора выглядит следующим образом:

$$m_e v r_n = n \hbar$$

$m_e v r_n$ - момент импульса электрона относительно ядра атома.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Полная квантованная механическая энергия электрона в поле неподвижного ядра в водородоподобном атоме равна:

$$W_n = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} + \frac{m_e v^2}{2}$$

Первый член – потенциальная энергия взаимодействия электрона с зарядом $-e$, с ядром, заряд которого Ze ; второй член – кинетическая энергия вращающегося по орбите электрона.

В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\frac{m_e v^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}$$

Здесь v^2/r_n - центростремительное ускорение электрона;
 $Ze^2/4\pi\epsilon_0 r_n^2$ - кулоновская сила притяжения электрона к ядру.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Из последнего уравнения следует:

$$\frac{m_e v^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

Подставим это выражение в соотношение для полной механической энергии электрона, получим:

$$W_n = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} + \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad \Rightarrow \quad W_n = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

Преобразуем полученное выше уравнение следующим образом.

Используя условие квантования Бора $m_e v r_n = n\hbar$, получим соотношение для r_n . Для этого в уравнении избавимся от скорости.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

$$W_n = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

$$\left. \begin{aligned} m_e v^2 &= \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \\ v &= \frac{n\hbar}{m_e r_n} \\ m_e v r_n &= n\hbar \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{m_e}{2} \left(\frac{n\hbar}{m_e r_n} \right)^2 = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

После преобразований получим:

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e Ze^2} n^2$$

Используя выражения для r_n , запишем формулу для полной механической энергии электрона в виде

$$W_n = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

$$W_n = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{m_e Z e^2} n^2$$

Частота ω_{mn} испускаемого или поглощаемого атомом света при переходах в соответствии с постулатом Бора выражается формулой

$$\omega_{mn} = \frac{W_m - W_n}{\hbar}$$

Используя выражение для W_n , запишем

$$\omega_{mn} = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \frac{1}{m^2} + \frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \frac{1}{n^2} = \frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

$$\omega_{mn} = \frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Поскольку $\frac{1}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi c}$, перепишем формулу в виде

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = \frac{Z^2 e^4 m_e}{64\pi^3 c \varepsilon_0^2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

В полученном выражении
- постоянная Ридберга.

$$R = \frac{e^4 m_e}{64\pi^3 c \varepsilon_0^2 \hbar^3} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$$

Значение R , найденное по этой формуле, хорошо совпадает с его значением, найденным экспериментально.

Таким образом, Бор, используя квантовую постоянную \hbar , показал, что эта величина определяет также и движение электронов в атоме, законы которого существенно отличаются от законов классической механики.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Теория Бора сыграла большую роль в развитии квантовой механики. Однако, она не лишена недостатков:

1. Она внутренне противоречива: с одной стороны, использовалась механика Ньютона, с другой – привлекались чуждые этой механике искусственные правила квантования.
2. «Полуклассическая» или «полуквантовая» теория Бора не также не смогла ответить на вопрос, как движется электрон при переходе с одного уровня энергии на другой.
3. Теория не позволяла описывать атомы с числом электронов больше единицы.

Дальнейшее развитие теории микрочастиц привело к убеждению, что движение электрона в атоме нельзя описывать с помощью законов классической механики и что необходима новая теория.

Такая (квантовая) теория была создана к 1927 году усилиями многих ученых, среди которых выдающуюся роль сыграли В. Гейзенберг, Э.Шрёдингер, М.Борн, П.Дирак.