

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших задач курса физики состоит в формировании у студентов представлений о современной физической картине мира. Окружающие нас тела образуют макромир. В классической физике, описывающий этот макромир, считается, что материя существует в виде вещества и поля. Вещество, в свою очередь, состоит из атомов и молекул. Атомы и молекулы хотя и малы, но принадлежат к числу наиболее крупных по размеру представителей микромира, объекты которого имеют характерные размеры, меньше 10^{-9} м. Следующие, более мелкие по размерам объекты микромира – составные части атомов: электроны и атомные ядра. Электроны и нуклоны (протоны и нейтроны, входящие в состав ядра) считаются по традиции элементарными частицами. Причем, электроны относятся к так называемым фундаментальным элементарным частицам (неделимым), а протоны и нейтроны составные частицы. Они образованы из более мелких частиц, называемых кварками. Какие мощные силы заставляют одноименно заряженные протоны притягиваться друг к другу в ядре, почему отрицательный электрон не падает на положительное ядро. Какие сильные и слабые взаимодействия осуществляются между элементарными частицами. Как связать их с гравитационным взаимодействием, присущим всем телам и частицам. Эти и другие вопросы мы будем обсуждать в данном разделе общего курса физики. От этих вопросов во многом зависит ускорение развития науки и техники.

В последние десятилетия мир переживает невиданный по своим масштабам научно-технический прогресс, который базируется на фундаментальных физических исследованиях, особенно в области современной физики. Достижение нового теоретического и экспериментального понимания физических процессов и явлений, послужит основой создания новейших технических решений, технологий, приборов и устройств.

Совершенно очевидно, что быстро ориентироваться и успешно работать в современном мире могут только те выпускники вузов, которые получили в процессе обучения достаточно широкую и глубокую фундаментальную подготовку и навыки самостоятельной исследовательской работы.

Тема 1. МОДЕЛИ АТОМОВ. АТОМ ВОДОРОДА ПО ТЕОРИИ БОРА

1.1. Закономерности в атомных спектрах

Итак, что же такое атом? Изолированные атомы в виде разреженного газа или паров металлов испускают спектр, состоящий из отдельных спектральных линий (*линейчатый спектр*). Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов.

Прежде всего, в экспериментах было замечено, что линии в спектрах расположены не беспорядочно, а сериями. Расстояние между линиями в серии закономерно уменьшается по мере перехода от длинных волн к коротким.

Швейцарский физик Й. Бальмер в 1885 году установил, что *длины волн серии в видимой части спектра водорода* могут быть представлены формулой:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}, \quad (1.1.1)$$

где $\lambda_0 = \text{const}$, $n = 3, 4, 5, \dots$

В спектроскопии принято характеризовать спектральные линии не частотой, а величиной обратной длине волны:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}; \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} \quad (1.1.3)$$

Если преобразовать (1.1.1) с учетом (1.1.2), то получим:

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1.1.3)$$

где $R' = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга, $n = 3, 4, 5, \dots$

В физике постоянной Ридберга называют и другую величину, равную: $R = R' \cdot c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

Формулу (1.1.3) можно переписать в виде:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (1.1.4)$$

Дальнейшие исследования показали, что в спектре водорода имеется еще несколько серий:

Серия Лаймона	$\nu = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$
Серия Пашена	$\nu = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$
Серия Брэкета	$\nu = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$
Серия Пфунда	$\nu = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$

Обобщенная формула Й. Бальмера

$$\nu = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right) \text{ или } \frac{1}{\lambda} = R'\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad (1.1.2)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots, n = k + 1, k + 2, \dots$

Ясно было, что атом сложная система, имеющая сложные атомные спектры (рисунок 1.1).

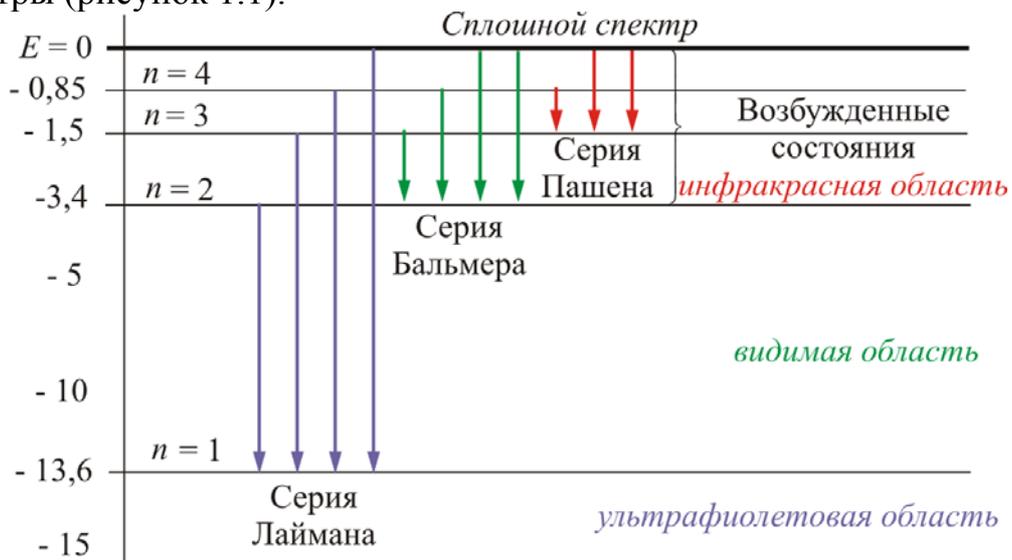


Рисунок 1.1

В то время учеными рассматривались многие модели атомов (рисунок 1.2, а, б, в).

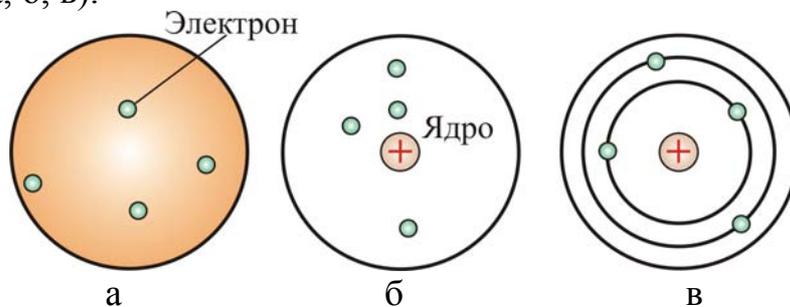
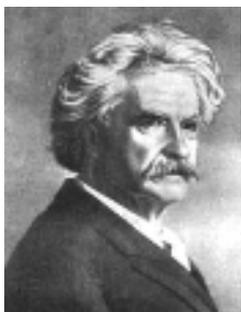


Рисунок 1.2

В 1903 году Дж. Дж. Томсон, предложил модель атома: сфера, равномерно заполненная положительным электричеством, внутри которой находятся электроны (рисунок 1.2, а). Суммарный заряд сферы равен заряду электронов. Атом в целом нейтрален. Теория такого атома давала, что спектр должен быть сложным, но никоим образом не линейчатым, что противоречило экспериментам. Модель атома изображенная на рисунке 1.2, б состояла из сферы, в центре которой находилось положительно заряженное ядро, а вокруг него располагались электроны. Эта модель также не вписывалась в эксперименты. Наиболее известна в то время была модель, предложенная Э. Резерфордом (рисунок 1.2, в).

1.2. Ядерная модель атома (модель Резерфорда)

Большую роль в развитии представлений о строении атома сыграли опыты английского физика Э. Резерфорда.



Резерфорд Эрнест (1871 – 1937) – английский физик, основоположник ядерной физики. Исследования посвящены радиоактивности, атомной и ядерной физике. Своими фундаментальными открытиями в этих областях заложил основы современного учения о радиоактивности и теории строения атома. В 1899 г. открыл альфа- и бета-лучи. Вместе с Ф. Содди в 1903 г. разработал теорию радиоактивного распада и установил закон радиоактивных превращений. В 1903 доказал, что альфа-лучи состоят из положительно заряженных частиц. Предсказал существование трансурановых элементов. В 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия.

Резерфорд и его сотрудники наблюдали прохождение α -частиц через тонкие слои вещества (золотую фольгу). Скорость α -частиц = 10^7 м/с = 10^4 км/сек.

Экспериментальная установка позволяла наблюдать α -частицы отклоненные золотой фольгой под разными углами.

В то время было известно, что α -частица имеет положительный заряд равный $+2e$.

Опыт осуществлялся по схеме, изображенной на рисунке 1.3.

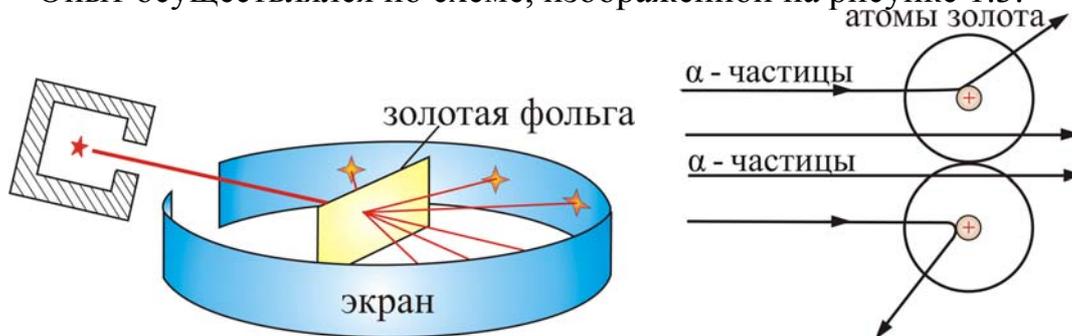


Рисунок 1.3

Узкий пучок α -частиц испускался радиоактивным веществом и падал на фольгу. При прохождении через фольгу α -частицы отклонялись на различные углы. Рассеянные частицы ударялись об экран, покрытый ZnS и вызываемые им вспышки света, *сцинтилляции*, наблюдались в микроскоп. Микроскоп и связанный с ним экран можно было вращать вокруг оси, проходящей через центр фольги. Т.е. можно было всегда измерить угол отклонения. Весь прибор помещался в откачиваемый объем, чтобы устранить рассеяние α -частиц за счет столкновений с молекулами воздуха.

Обнаружилось, что некоторые α -частицы отклонялись на большие углы, до 180° . Резерфорд понял, что такое отклонение возможно лишь при встрече с положительно заряженной частицей большей массы. А малая вероятность отклонения на большие углы говорила, что эта положительная частица имеет малые размеры, порядка 10^{-14} м. Электроны, по мнению Резерфорда, движутся вокруг ядра.

Однако такая модель была в явном противоречии с классической электродинамикой, т.к. электрон, двигаясь по окружности, т.е. с нормальным ускорением, должен был излучать энергию, следовательно, замедлять скорость и упасть на ядро. Таким образом, *применение классической электродинамики к ядерной модели атома привело к полному противоречию с экспериментальными фактами*. Согласно классической теории, должны иметь место:

- непрерывная потеря электроном энергии в виде излучения электромагнитных волн и неустойчивость атома;
- существование только непрерывного спектра. Спектральных линий не должно быть.

В действительности оказывается, что:

- атом является устойчивой системой;
- атом излучает энергию лишь при определенных условиях;
- излучение атома имеет линейчатый спектр, связанный со строением и свойствами его электронной оболочки.

Эти выводы относятся не только к атому водорода, но и к другим атомам.

Размеры ядер можно определить, используя дифракционное рассеяние при высоких энергиях, а также упругое рассеяние электронов или поглощение нейтронов. Оказалось, что радиус ядра $R \approx (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}) A^{1/3}$.

Если электрон «нацелен» в край ядра, имеющего заряд Ze и радиус R , то, согласно классической механике, его угол отклонения определяется соотношением

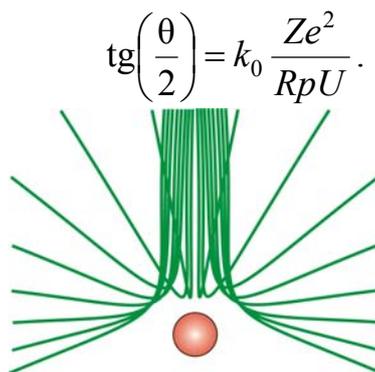


Рисунок 1.4

На рисунке 1.4 изображена компьютерная модель процесса рассеяния электронов на ядре.

1.3. Элементарная теория Бора

Выход из тупика был найден датским ученым Нильсом Бором в 1913 году, получивший Нобелевскую премию в 1922 году.



БОР Нильс Хендрик Давид (1885 – 1962) – Выдающийся датский физик-теоретик, один из создателей современной физики. Сформулировал идею о дискретности энергетических состояний атомов, в свете новых идей построил атомную модель, открыв условия устойчивости атомов, и объяснил большой круг явлений. Создал первую квантовую модель атома, основанную на двух постулатах, которые прямо противоречили классическим представлениям и законам. Бор много сделал для развития ядерной физики. Он – автор теории составного ядра, один из создателей капельной модели ядра и теории деления атомного ядра.

Бор высказал предположения, которые были названы *постулатами Бора*.

- **Первый постулат** (*постулат стационарных состояний*): электроны движутся только по определенным (стационарным) орбитам. При этом, даже двигаясь с ускорением, они не излучают энергию.

- **Второй постулат** (*правило частот*): излучение и поглощение энергии в виде кванта $h\nu$ происходит лишь при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое. Величина светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается скачок электрона $h\nu = E_n - E_k$.

Отсюда следует, что изменение энергии атома, связанное с излучением при поглощении фотона, пропорционально частоте ν :

$$v = \frac{E_n}{h} - \frac{E_k}{h} \text{ или } \omega = \frac{E_n}{\hbar} - \frac{E_k}{\hbar}. \quad (1.3.1)$$

Правило квантования орбит: из всех орбит электрона возможны только те, для которых момент импульса равен целому кратному постоянной Планка

$$m_e v r = n \hbar, \quad (1.3.2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число.

Получим выражение для энергии электрона в атоме.

Рассмотрим электрон, движущийся в поле атомного ядра с зарядом Ze (при $Z = 1$ – атом водорода). Уравнение движения электрона имеет вид:

$$m_e \frac{v^2}{r} = k_0 \frac{Ze^2}{r^2}. \quad (1.3.3)$$

Из (1.3.3) видно, что центробежная сила равна кулоновской силе, где

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

Подставим значение v из (1.3.2) в (1.3.3) и получим выражение для радиусов орбит

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{k_0 m_e Z e^2}. \quad (1.3.4)$$

Радиус первой орбиты водородного атома называют *Боровским радиусом* (рисунок 1.5). При $n = 1, Z = 1$ для водорода имеем:

$$r_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2 k_0} = 0,529 \text{ \AA} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

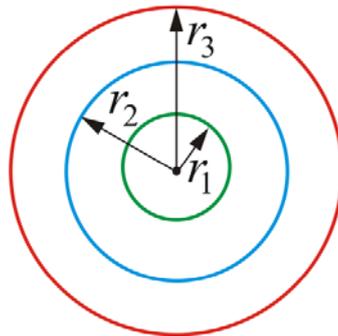


Рисунок 1.5

Внутренняя энергия атома складывается из кинетической энергии электрона (ядро неподвижно) и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{k_0 r}.$$

Из уравнения движения электрона следует, что $\frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{k_0 2r}$ кинетическая энергия равна потенциальной. Тогда можно записать:

$$E_n = -\frac{1}{2} k_0 \frac{Ze^2}{r_0}.$$

Подставим сюда выражение для радиуса и получим:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}. \quad (1.3.5)$$

Здесь учтено, что $4\pi^2 \hbar^2 = h^2$.

Для атома водорода, при $Z = 1$ имеем:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}. \quad (1.3.6)$$

Из (1.3.6), видно, что E_n принимает только дискретные значения энергии, т.к. $n = 1, 2, 3, \dots$

Схема энергетических уровней определяемых (1.3.6) показана на рисунках 1.1 и 1.6.

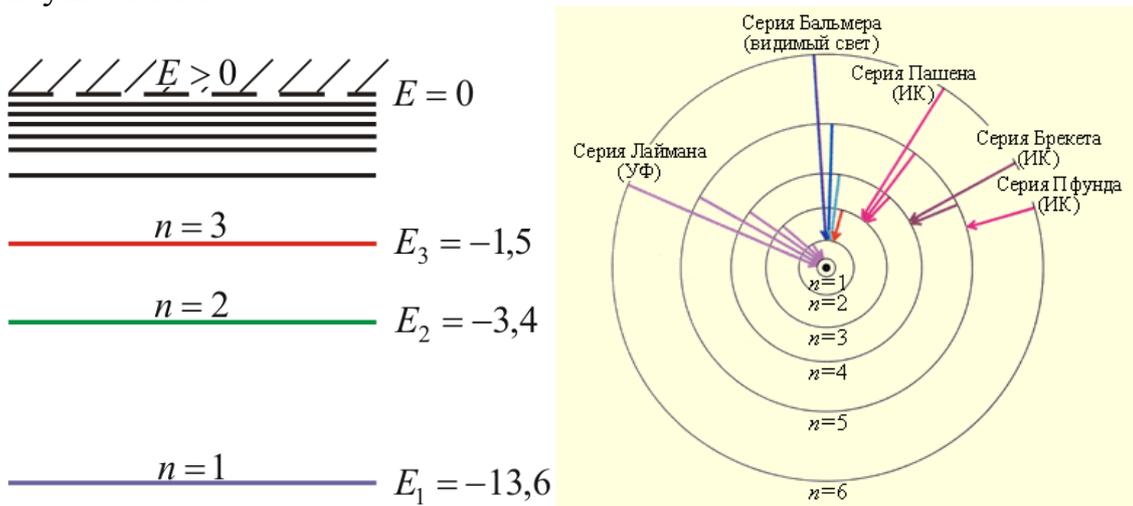


Рисунок 1.6

При переходе электрона в атоме водорода из состояния n в состояние k излучается фотон с энергией:

$$\hbar\omega = h\nu = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Частота излучения:

$$\nu = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Мы получили обобщенную формулу Бальмера, которая хорошо согласуется с экспериментом, где постоянная Ридберга:

$$R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Серьезным успехом теории Бора явилось вычисление постоянной Ридберга для водородоподобных систем и объяснение структуры их линейчатых спектров. Бору удалось объяснить линии спектра *ионизованного* гелия. Бор теоретически вычислил отношение массы протона к массе электрона $m_p / m_e = 1847$, это находится в соответствии с экспериментом. Все это было важным подтверждением основных идей, содержащихся в теории Бора. Теория Бора сыграла огромную роль в создании атомной физики. В период ее развития (1913 – 1925) были сделаны важные открытия, навсегда вошедшие в сокровищницу мировой науки.

Однако наряду с успехами в теории Бора, с самого начала, обнаружили существенные недостатки. Главнейшим из них была – *внутренняя противоречивость* теории: механическое соединение классической физики с квантовыми постулатами. Теория не могла объяснить вопрос об *интенсивностях* спектральных линий. Серьезной неудачей являлась абсолютная невозможность применить теорию для объяснения спектров атома гелия, содержащего два электрона на орбите и тем более для много электронных атомов.

Стало ясно, что теория Бора является лишь переходным этапом на пути создания более общей и правильной теории. Такой теорией и являлась квантовая механика.

1.4. Опыт Франка и Герца

Существование дискретных энергетических уровней атома подтверждается опытом Франка и Герца. Немецкие ученые Джеймс Франк и Густав Герц, за экспериментальные исследования дискретности энергетического уровня получили Нобелевскую премию в 1925 г.

В трубке (рисунок 1.7), заполненной парами ртути при давлении $p \approx 1$ мм. рт. ст., три электрода: катод, сетка и анод.

Электроны ускорялись разностью потенциалов U между катодом и сеткой. Эту разность потенциалов можно было изменять с помощью потенциометра Π . Между сеткой и анодом тормозящее поле 0,5 В (метод задерживающих потенциалов).

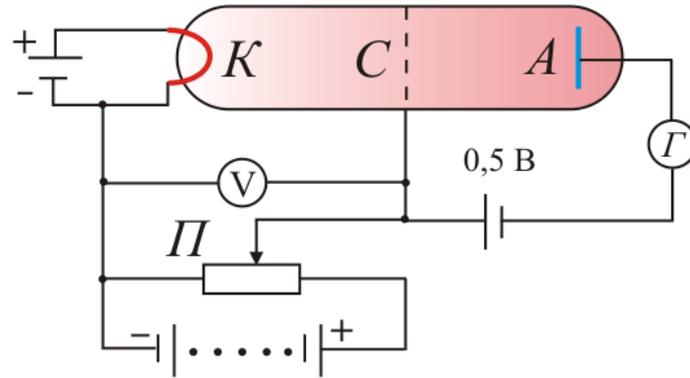


Рисунок 1.7

Определялась зависимость тока через гальванометр Γ от разности потенциалов между катодом и сеткой U . В эксперименте была получена зависимость, изображенная на рисунке 1.8. Здесь $U = 4,86$ В – соответствует первому потенциалу возбуждения.

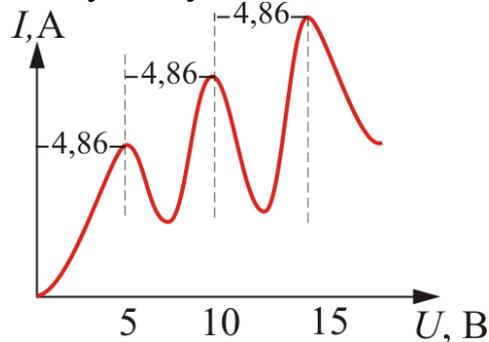


Рисунок 1.8

Согласно Боровской теории. Каждый из атомов ртути может получить лишь вполне определенную энергию, переходя в одно из возбужденных состояний поэтому если в атомах действительно существуют стационарные состояния, то электроны, сталкиваясь с атомами ртути, должны терять энергию дискретно, определенными порциями, равными разности энергии соответствующих стационарных состояний атома.

Из опыта следует, что при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,86 В анодный ток *возрастает монотонно*, его значение проходит через максимум (4,86 В), затем резко уменьшается и возрастает вновь. Дальнейшие максимумы наблюдаются при $2 \cdot 4,86$ В и $3 \cdot 4,86$ В.

Ближайшим к основному, невозбужденному состоянию атома ртути является возбужденное состояние, отстоящее по шкале энергий на 4,86 В. Пока разность потенциалов между катодом и сеткой меньше 4,86 В, электроны, встречая на своем пути атомы ртути, испытывают с ними только упругие соударения. При $e\varphi = 4,86$ эВ энергия электрона становится достаточной, чтобы вызвать неупругий удар, при котором элек-

трон отдает атому ртути всю кинетическую энергию, возбуждая переход одного из электронов атома из нормального состояния в возбужденное. Электроны, потерявшие свою кинетическую энергию уже не смогут преодолеть тормозящий потенциал и достигнуть анода. Этим и объясняется резкое падение анодного тока при $e\varphi = 4,86$ эВ. При значениях энергии, кратных 4,86, электроны могут испытывать с атомами ртути 2, 3, ... неупругих соударения, потеряв при этом полностью свою энергию и не достигнуть анода, т.е. должно наблюдаться резкое падение анодного тока. Что действительно наблюдалось на опыте.

Таким образом, опыт показал, что электроны передают свою энергию атомам ртути порциями, причем 4,86 эВ – наименьшая возможная порция которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии. Следовательно, идея Бора о существовании в атомах стационарных состояний блестяще выдержала проверку экспериментом.

Атомы ртути, получившие при соударении с электронами энергию ΔE , переходят в возбужденное состояние и должны вернуться в основное, излучая при этом, согласно второму постулату Бора, квант света с частотой $\nu = \Delta E / h$. По известному значению $\Delta E = 4,86$ В можно вычислить длину волны светового кванта $\lambda = hc / \Delta E \approx 255$ нм. Таким образом, если теория верна, то атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией 4,86 эВ, должны являться источником ультрафиолетового излучения с $\lambda \approx 255$ нм. Опыт действительно обнаруживает одну ультрафиолетовую линию с $\lambda \approx 255$ нм. Таким образом, опыты Франка и Герца экспериментально подтвердили не только первый, но и второй постулат Бора. Эти опыты сыграли огромное значение в развитии атомной физики.