

40. Модель атома Бора. Постулаты Бора. Теория водородоподобного атома Бора. Опыт Франка и Герца

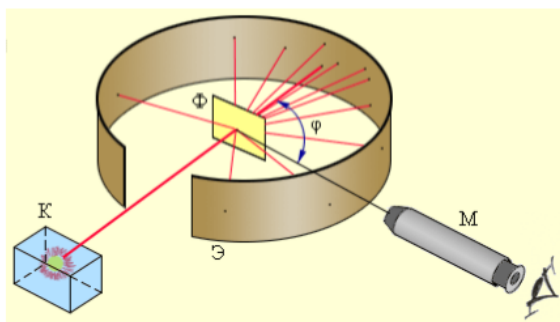
Первая модель строения атома была предложена Томсоном; согласно его модели атом - это шар с равномерным распределением положительного электричества по всему объему. Электроны погружены или вкраплены в шар и могут в нем двигаться. Пользуясь моделью Томсона, нельзя было объяснить прохождение α -частиц через тонкую металлическую фольгу, не вступив в противоречие с основным законом взаимодействия электрических зарядов.

Опыт показал, что α -частицы проходят через фольгу. Поэтому был сделан вывод о том, что α -частицы могут проходить сквозь такие положительно заряженные шары.

Классические опыты по изучению строения атома, проведенные Резерфордом в 1911 г., показали, что модель, предложенная Томсоном, неверна. Резерфорд ставил опыты по исследованию рассеяния α -частиц тонкими листочками металлической фольги. Главная цель этих опытов состояла в том, чтобы выяснить, распределено ли положительное электричество по всему объему или сосредоточено в ядре. В первом случае α -частицы не должны резко менять направление при соударении с атомами; во втором случае при соударении α -частиц с атомами должны наблюдаться самые разнообразные углы отброса α -частиц.

Бомбардируя атомы α -частицами, Резерфорд установил, что они свободно пронизывали атом во всех направлениях, кроме центра. Вблизи центра частицы явно отклонялись от прямолинейного пути, как бы испытывая отталкивающее воздействие, исходящее от центра атома. Когда же частицы были направлены прямо в центр атома, они отталкивались назад

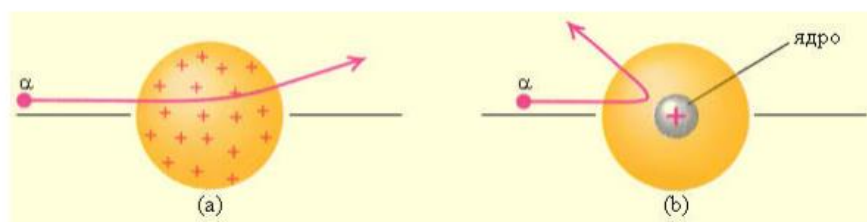
Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц



K – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом,
 \mathcal{E} – экран, покрытый сернистым цинком,
 Φ – золотая фольга,
 M – микроскоп.

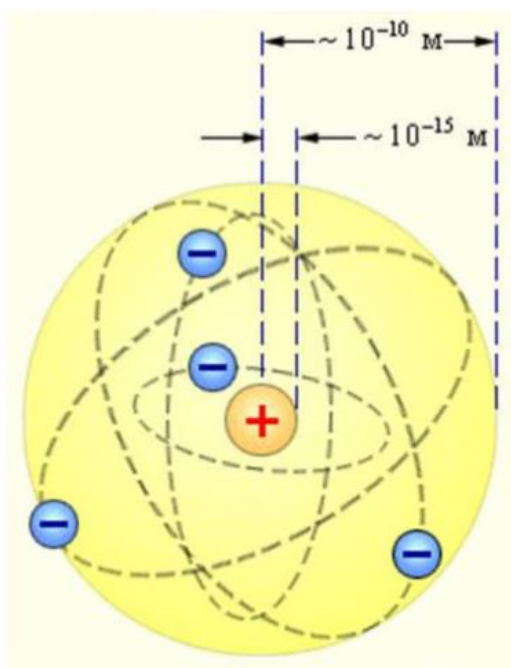
От радиоактивного источника, заключенного в свинцовый контейнер, α -частицы направлялись на тонкую металлическую фольгу. Рассеянные частицы попадали на экран, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, способных светиться под ударами быстрых заряженных частиц. Сцинтилляции (вспышки) на экране наблюдались глазом с помощью микроскопа.

Рассеяние α -частицы в атоме Томсона (a) и в атоме Резерфорда (b).



В модели атома Томсона положительный заряд распределен по всему объему атома. При таком распределении положительный заряд не может создать сильное электрическое поле, способное отбросить α -частицы назад.

Опыты Резерфорда и других исследователей показали, что положительный заряд атома действительно сосредоточен в ядре атома, как и почти вся масса атома, что ядро атома в сто тысяч раз меньше самого атома и что число электронов в атоме равно атомному номеру элемента в периодической системе Менделеева. Кроме того, было показано, что силы, связывающие электроны с ядром, подчинены закону Кулона.



Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель атома. Согласно этой модели в центре атома расположено тяжелое положительное ядро с зарядом Ze , вокруг которого по замкнутым орбитам движутся Z электронов. Ядро имеет размеры, не превышающие 10^{-14} м, и в котором сконцентрирована практически вся масса атома.

Моделью Резерфорда не удалось объяснить устойчивость атома. Напротив, по законам классической электродинамики вращение электронов вокруг ядра должно было бы вызвать неустойчивость; атом должен был бы излучать электромагнитные волны, в результате чего энергия электрона, а вместе с ней и скорость его движения вокруг ядра должны были бы постепенно убывать, и электрон неизбежно должен был бы упасть на ядро. Однако этого не происходит.

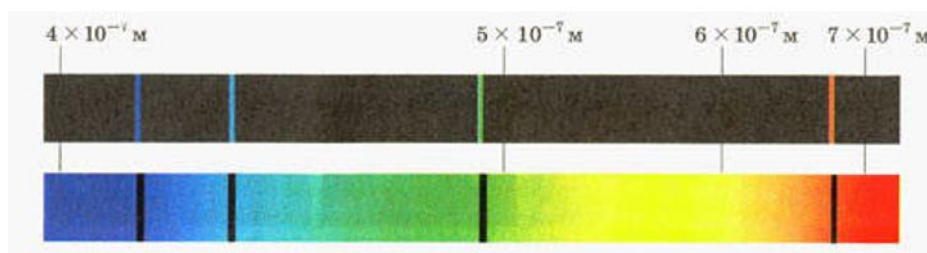
Следовательно, по законам классической электродинамики, атом должен быть неустойчивым и излучать непрерывный спектр. Однако это противоречит опыту.

Правильный вывод был сделан в 1913 г. Нильсом Бором; он предположил, что обычные законы электродинамики неприменимы к внутриатомным процессам, и показал, что внутриатомные процессы подчинены законам квантовой теории. К такому заключению Бор пришел на основе анализа строения линейчатых спектров.

Спектр атома водорода

Каждому разреженному газу (атому) соответствует определенный линейчатый спектр, состоящий из отдельных спектральных линий или групп близко расположенных линий.

Спектр излучения и поглощения водорода



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

– серия Бальмера

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

– серия Лаймана

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

– серия Пашена

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

– обобщенная формула Бальмера

$\omega = \frac{1}{\lambda}$ – волновое число (число волн, укладывающихся на длине в 1м)

Эмпирические формулы Бальмера показали, что спектральные линии находятся в определенной системе и что каждая серия имеет дискретный характер. Согласно же классической электродинамике спектры излучения должны быть непрерывными. Это противоречие убедительно подчеркивает неприменимость классической физики к внутриатомным процессам.

Идея о квантах, высказанная Планком в применении к излучению абсолютно черного тела, была перенесена Нильсом Бором (1913 г.) на внутриатомные процессы. В основу развитой им квантовой теории строения атома Бор положил три постулата:

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний)

В атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, в которых он не излучает энергии.

В стационарном состоянии атома электрон имеет дискретные значения момента импульса, удовлетворяющие условию

$$m_e v r_n = n \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

m_e – масса электрона, v – его скорость по n -й орбите радиуса r_n

Второй постулат Бора (правило частот)

При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией

$$\hbar \omega = E_n - E_m$$

E_n и E_m – энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения).

Набор возможных дискретных частот $\omega = (E_n - E_m)/\hbar$ квантовых переходов определяет линейчатый спектр атома.

Поглощение фотона атомом сопровождается переходом электрона с внутренней орбиты на внешнюю. Очевидно, что электрон, достигая самой внутренней орбиты, не может больше приблизиться к ядру, а, следовательно, не может излучать фотоны до тех пор, пока за счет поглощенной извне энергии не будет переведен на одну из внешних орбит. Когда электрон находится на самой близкой к ядру внутренней орбите, атом находится в основном состоянии (*нормальное состояние атома*); нахождение электрона на других орбитах соответствует *состояниям возбуждения атома*. Если электрон удален из атома в бесконечность, то атом считается ионизированным.

Теория водородоподобного атома Бора

Рассмотрим водородоподобный атом, состоящий из ядра Ze и одного электрона. Уравнение движения электрона

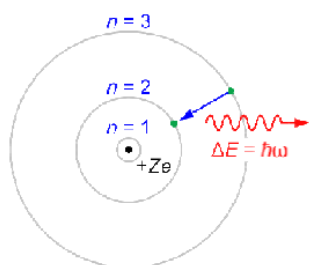
С учетом $m_e v r_n = n\hbar \quad \Rightarrow \quad r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e Z e^2} n^2 \quad (n=1,2,3, \dots)$

Радиус 1-й орбиты водорода $Z = 1$

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = 0,529 \text{ \AA} \quad - \text{ боровский радиус}$$

Полная энергия электрона (кинетическая + потенциальная)

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m_e e^4}{32\pi^2 \hbar^2 \epsilon_0^2} \quad (n=1,2,3, \dots)$$



При переходе атома водорода из состояния n в состояние m излучается фотон

$$\hbar\omega = E_n - E_m = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \hbar^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Откуда

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

где

$$R = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \hbar^3 \epsilon_0^2}$$

Опыт Франка и Герца

Квантовые постулаты Бора нашли экспериментальное подтверждение в опытах Франка и Герца. Идея опытов заключалась в следующем. Сквозь трубку (рис.4-4), наполненную ртутными парами, пропусклся поток электронов, летевших из накаливаемого катода K , к аноду A , перед которым расположена сетка C . Между сеткой и катодом прикладывалась разность потенциалов φ_1 , ускорявшая электроны, а между сеткой и анодом - разность потенциалов φ_2 , тормозившая электроны, пролетавшие сквозь отверстие сетки ($\varphi_2 < \varphi_1$). В результате опытов было выяснено следующее.

1. При скоростях электронов, меньших некоторой критической скорости, происходит упругий удар, т. е. электрон не передает атому своей энергии и отскакивает от него, изменяя лишь направление своей скорости.

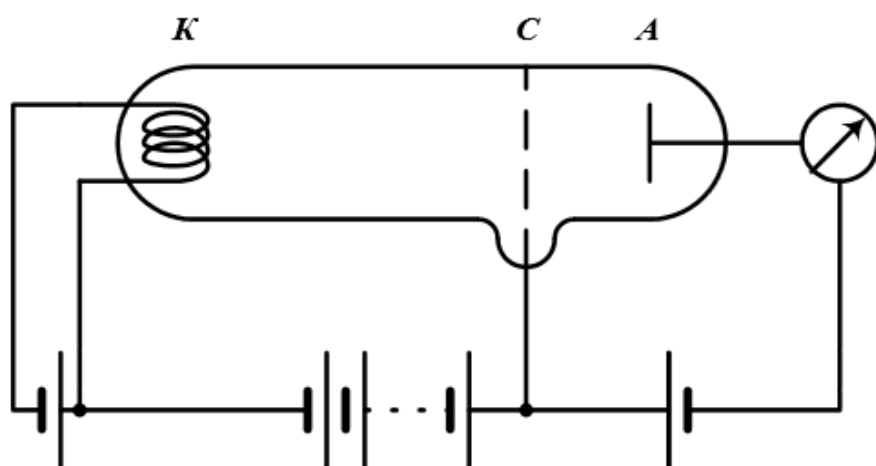


Рис. 4-4

2. При скоростях, достигающих критической, происходит неупругий удар, электрон передает свою энергию атому, который переходит в другое возбужденное состояние с большей энергией.

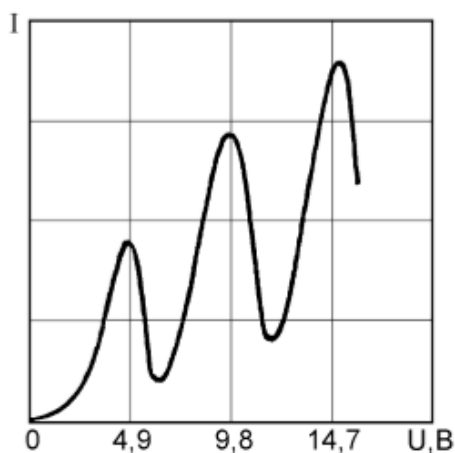


Рис.4-5

В опытах Франка и Герца исследовалась зависимость силы тока, проходящего через пары ртути, от разности потенциалов φ_1 . При увеличении ускоряющего потенциала от нуля ток первоначально возрастал (рис.4-5), причем кривая тока имела обычный вид вольтамперной характеристики катодных ламп.

Но при потенциале около 4,9 В ток достигал максимума, после чего с дальнейшим увеличением потенциала внезапно резко падал, а затем вновь начинал возрастать до того момента, когда потенциал становился равным 9,8 В. При этом значении потенциала вновь обнаруживалось резкое падение тока и новое его возрастание наблюдалось уже при значении потенциала, равном 14,7 В.

В результате измерений вместо плавной кривой, характерной для катодной лампы, получили кривую с резко выраженными максимумами

Таким образом, опыты Франка и Герца экспериментально подтверждают постулаты Бора.