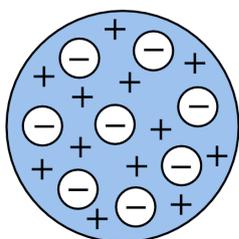

ПОСТУЛАТЫ БОРА. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ

Предыстория: модель атома Томсона

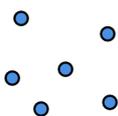
Первую модель атома предложил Джозеф Джон Томсон в 1904 году.

Модель «пудинга»/«булочки с изюмом»/«кекса»: сфера, равномерно заполненная положительным электричеством, внутри которой находятся электроны. Суммарный заряд этой сферы равен заряду электронов, атом в целом нейтрален.

Идея: существуют твердые тела, следовательно, атом должен быть чем-то заполнен. Данная идея выглядела правдоподобно.



Много плотно расположенных атомов, следовательно, пустого места нет и тела твердые.



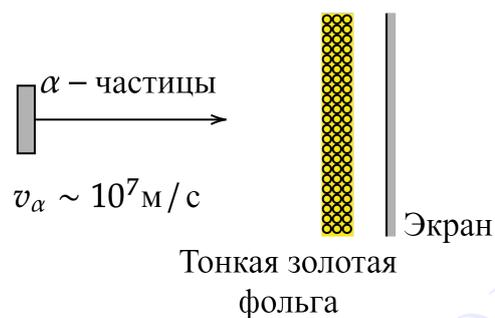
Увеличим расстояние между атомами и получим жидкости и газы.

Противоречие: согласно модели Томсона спектр атома должен быть сложным, но никак не линейчатым. Это противоречило экспериментам. Теория строения атома по Томсону **была опровергнута** экспериментами, проведенными Эрнестом Резерфордом в 1911 году.

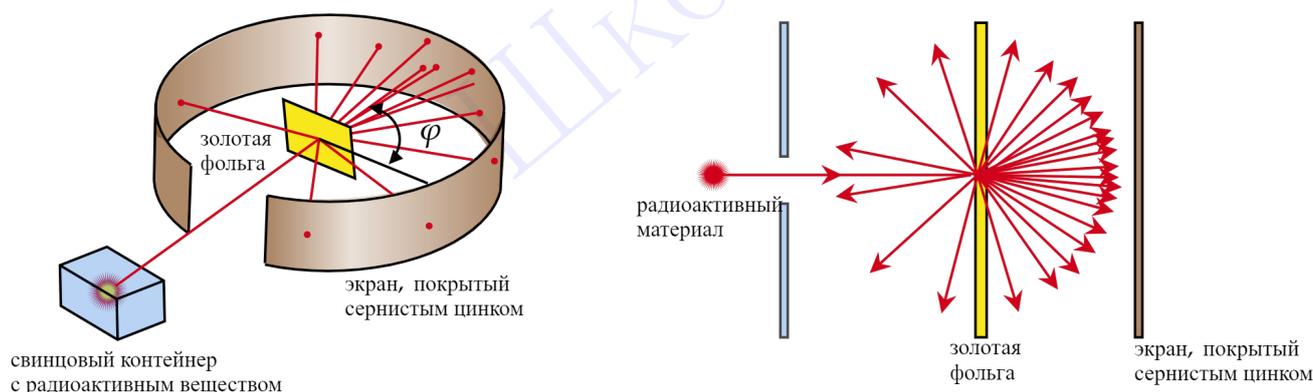
Модель атома Резерфорда

На момент экспериментов Резерфорда ученым уже было известно о существовании радиоактивных элементов, законах радиоактивного распада и о трех основных типах распада (альфа-, бета- и гамма-распады), при этом было также известно, что альфа-распад имеет самые тяжелые частицы — ядра гелия.

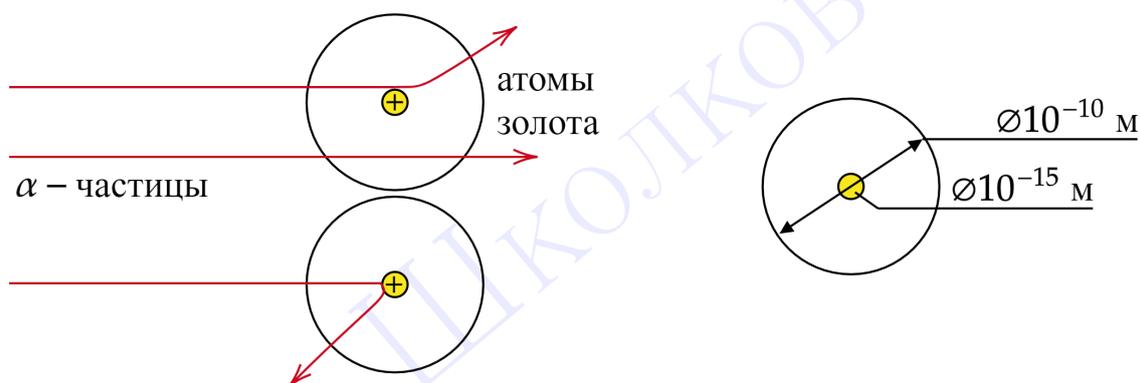
Резерфорд предположил, что, если направить поток альфа-частиц на тонкую золотую фольгу, состоящую согласно модели атома Томсона из плотно расположенных атомов, то альфа-частицы в теории не должны пройти сквозь нее.



Проведя эксперимент, Резерфорд получил, что рассеянные альфа-частицы ударялись об экран, покрытый сернистым цинком, и вызывали вспышки света.

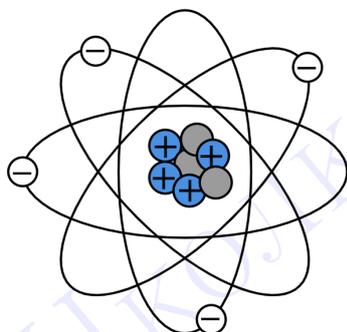


Большинство альфа-частиц рассеивались на углы порядка 3° . **Отдельные** альфа-частицы (одна из нескольких тысяч) отклонялись на большие углы, до 150° . Такое отклонение возможно лишь при взаимодействии практически точечного положительного заряда — ядра атома — с близко пролетающей альфа-частицей. Малая вероятность отклонения на большие углы говорит о малых размерах ядра.



Вывод: модель атома Томсона не «работает». Положительные и отрицательные частицы не расположены в атоме равномерно. Ядро атома не нейтрально. На основании полученных результатов была предложена планетарная модель атома.

Планетарная модель атома: в середине атома существует плотный клубок частиц, то есть в ядре атома находятся положительно заряженные протоны и нейтральные нейтроны. На значительном расстоянии от ядра по орбитам вокруг него обращаются отрицательно заряженные частицы — электроны.

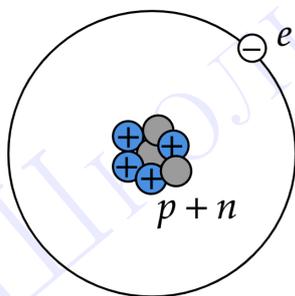


Так как положительный заряд равен по величине отрицательному, то в целом атом электрически нейтрален. Он не несет никакого заряда. Но само ядро — это сосредоточие положительного заряда.

Противоречие: планетарная модель атома была в явном противоречии с классической электродинамикой. Электрон, двигаясь по окружности с нормальным ускорением, должен излучать энергию, следовательно, замедлять скорость и упасть на ядро. Модель Резерфорда не могла объяснить, почему атом устойчив.

Элементарная теория Бора

Нильс Бор сформулировал идею о дискретности энергетических состояний атомов, построил атомную модель, открыв условия устойчивости атомов. Также ученый создал первую квантовую модель атома, основанную на двух постулатах, которые прямо противоречили классическим представлениям и законам.



I. Первый постулат Бора: атом следует описывать как «пирамиду» стационарных энергетических состояний. Пребывая в одном из стационарных состояний, атом не излучает энергии. Другими словами, электроны в атоме движутся только по определенным (стационарным) орбитам, при этом излучения энергии не

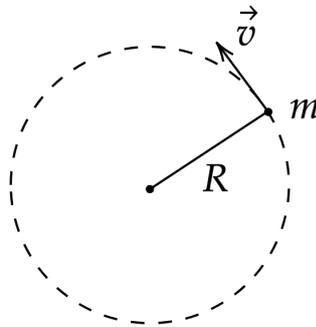
происходит.

Условие для стационарных орбит: из всех орбит электрона возможны только те, для которых момент импульса электрона равен целому числу, кратному постоянной Планка. То есть момент импульса электрона **квантуется**.

$$L_e = n\hbar$$

где L_e — момент импульса электрона, n — натуральные числа ($n = 1, 2, 3, \dots$)
 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ — приведенная постоянная Планка, h — постоянная Планка.

Квантование в узком смысле — это деление какой-либо физической величины (энергии, момента импульса, электрического заряда и др.) на дискретные порции (кванты), в классической теории эти величины могут иметь только непрерывные значения.

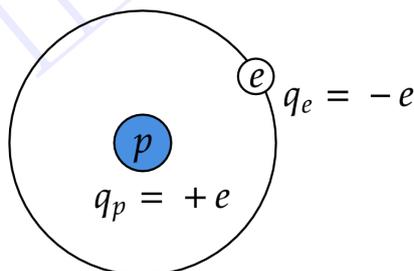


Момент импульса — произведение импульса p и плеча R (для аналогии можно вспомнить момент силы $M = Fl$).

$$L = mvR$$

«Исторический» вывод I постулата Бора

Рассмотрим первый и самый простой элемент периодической системы химических элементов — водород. Атом водорода H_1^1 состоит из одного протона и одного электрона. Обозначим за e элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.



Энергия электрона состоит из кинетической и потенциальной энергии:

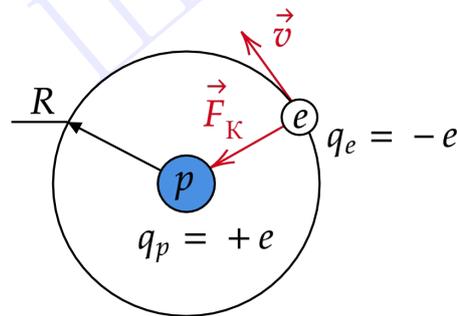
$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{пот}}$$

Потенциальная энергия взаимодействия двух электрических частиц:

$$E_{\text{пот}} = k \frac{q_1 q_2}{R}$$

Тогда общая энергия электрона:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{ke^2}{R}$$



В рамках классической механики на электрон действует сила Кулона $F_{\text{К}}$, которая создает центростремительное ускорение $a_{\text{ц}}$. По второму закону Ньютона:

$$F_{\text{К}} = ma_{\text{ц}} = m \frac{v^2}{R}$$

Силу Кулона по определению можно найти как

$$F_{\text{К}} = \frac{k|q_1||q_2|}{R^2} = \frac{ke^2}{R^2}$$

Приравняем два последних выражения и выразим величину mv^2 :

$$\frac{ke^2}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow mv^2 = \frac{ke^2}{R}$$

С учетом этого общая энергия электрона равна:

$$E = \frac{ke^2}{2R} - \frac{ke^2}{R} = -\frac{ke^2}{2R}$$

Вспомним правило квантования:

$$mvR = n\hbar$$

Из приравненных выражений для второго закона Ньютона и силы Кулона выразим скорость:

$$\frac{ke^2}{R^2} = m\frac{v^2}{R} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{ke^2}{Rm}}$$

С учетом этого запишем правило квантования и выразим радиус:

$$m\sqrt{\frac{ke^2}{Rm}}R = n\hbar \Rightarrow R = \frac{n^2\hbar^2}{ke^2m}$$

Подставим полученное выражение для радиуса в формулу для полной энергии электрона:

$$E = -\frac{ke^2}{2} \cdot \frac{ke^2m}{n^2\hbar^2} = -\frac{k^2e^2m}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Подставим вместо коэффициентов при $\frac{1}{n^2}$ их численные значения:

$$\frac{(9 \cdot 10^9 (\text{Н} \cdot \text{м}^2)/\text{Кл}^2)^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{2 \cdot 1,05457 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} \approx 2,176 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

Переведем полученное значение в электронвольты:

$$2,176 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}$$

1 эВ — это энергия приобретаемая электроном при прохождении им разности потенциалов в 1 В.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

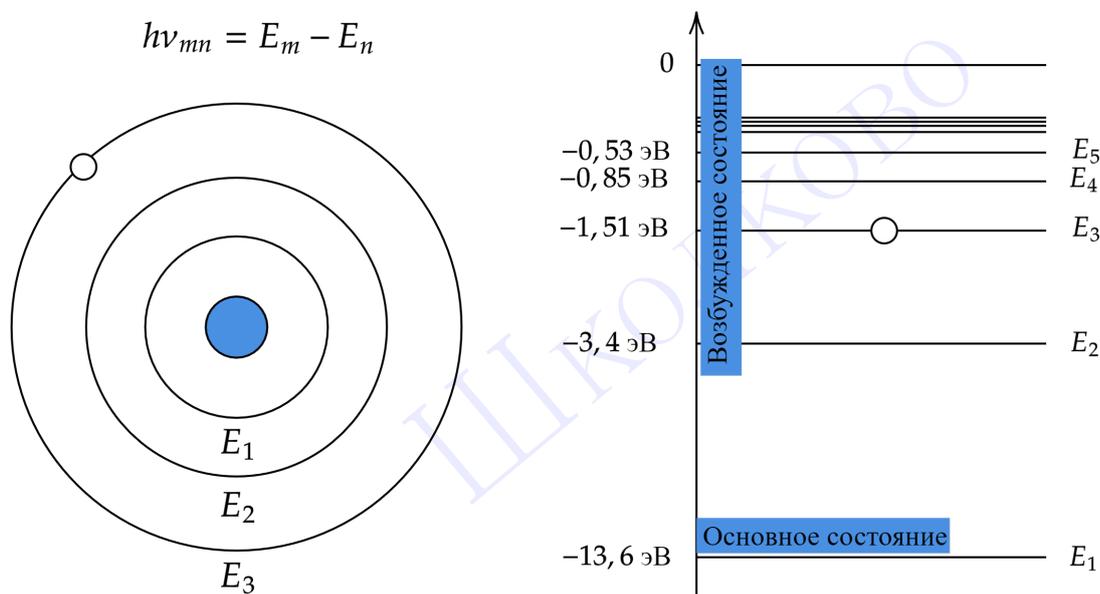
Таким образом, получаем следующую **зависимость для энергетических уровней атома водорода**:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}, \text{ эВ}$$

где n — номер энергетического уровня.

Электрон может обладать одной из энергий E_n и находиться на соответствующую

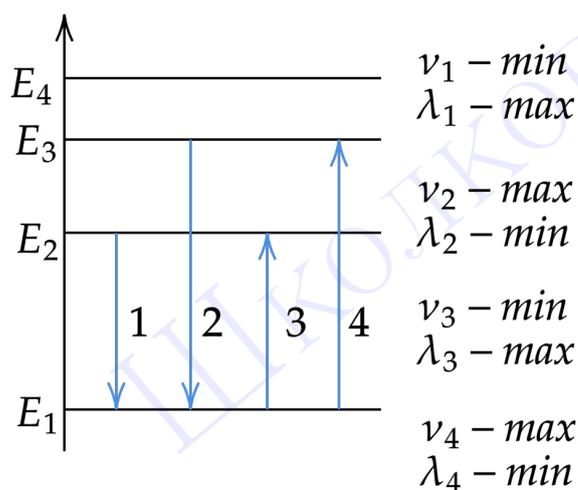
щей орбите. Никаких промежуточных стадий в стабильных атомах быть не может. Энергия излучается или поглощается дискретными порциями (то есть квантами). Электрон не может излучить или поглотить дробное число фотонов.



II. Второй постулат Бора: при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается или поглощается один фотон с энергией

$$h\nu = E_m - E_n$$

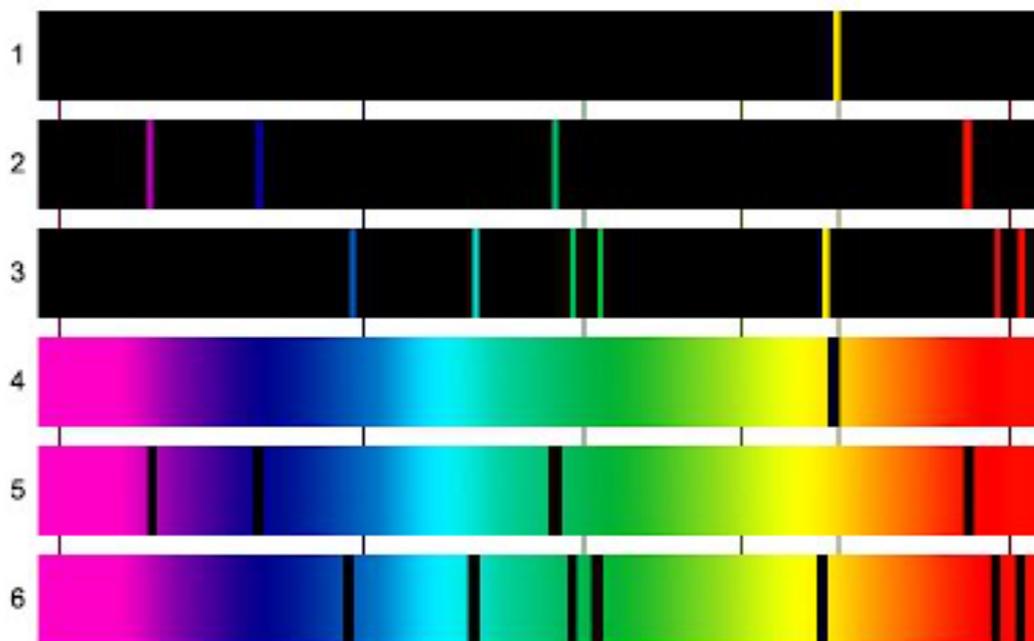
Энергия светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона.



Поглощение энергии : 3, 4

Излучение энергии : 1, 2

Отсюда появляются **спектры излучения и поглощения** — набор электромагнитных частот, которые атом может излучать или поглощать соответственно. Благодаря спектрам излучения и поглощения можно идентифицировать каждый химический элемент.



Спектры испускания: 1 - натрия; 2 - водорода; 3 - гелия.
Спектры поглощения: 4 - натрия; 5 - водорода; 6 - гелия.

Недостатки теории Бора

— Внутренняя противоречивость: механическое соединение классической физики с квантовыми постулатами.

— Абсолютная невозможность применить теорию для объяснения спектров хотя бы атома гелия He_2^4 (два электрона на орбите — и уже теория Бора не справляется). Даже для молекулы водорода H_2 она не применима.

Теория Бора является лишь переходным этапом на пути создания более общей и правильной теории. Такой теорией стала квантовая механика.

Для задач*

Если в задаче нужно посчитать аналитически уровни для водородоподобного атома (атом, вокруг которого вращается лишь один электрон), то можно повторить ту же самую идею с расчетами и получить необходимую формулу.

Все уравнения, которые были ранее записаны для атома водорода, остаются справедливыми. Единственным отличием по сравнению с атомом водорода яв-

ляется то, что сила кулоновского взаимодействия валентного электрона с ядром водородоподобного атома равна $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r^2}$. Следовательно, мы можем воспользоваться готовым результатом для энергии E_n электрона на n -й стационарной орбите, если заменим в ранее выведенной формуле e^2 на Ze^2 . В результате получим:

$$E_n = -\frac{m_e e^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$