

§ 43. Модели атомов Томсона и Резерфорда

В течение длительного времени, вплоть до конца XIX в., в науке господствовало убеждение, что мельчайшие частицы химически простых тел — атомы — являются неделимыми частицами материи, «кирпичиками мироздания». Движение материи понималось как механическое перемещение этих частиц. Изменение химического состава сложных веществ представлялось в виде взаимозамещения таких неизменных атомов, переходящих от одних соединений — молекул — к другим.

Такая картина строения материи — совокупности неизменных корпускул — «атомов», взаимодействующих при помощи сил, «действующих на расстоянии» (без материального носителя взаимодействия), — была механистической. Это — метафизическая картина, так как она основывалась на неизменности, косности, непревращаемости основных элементов материи — атомов, в которых ученые видели «последнюю сущность» материи. В правильности этой картины сомневался уже в прошлом веке Д. И. Менделеев, полагавший, что атомы являются сложными частицами материи, не делимыми лишь известными в то время химическими методами.

К концу XIX в. начали накапливаться сведения о свойствах атомов, указывавшие на сложную структуру последних.

Кинетическая теория газов связала величины коэффициентов переноса (диффузии, теплопроводности, внутреннего трения) с длиной свободного пробега и диаметром молекул. Измеряя эти коэффициенты на опыте, можно было оценить с помощью формул т. I, гл. VII, что диаметры молекул порядка 10^{-8} см = 1 А.

При электрическом разряде в газе были обнаружены и исследованы катодные лучи, представлявшие собой потоки отрицательно заряженных частиц, получивших название электронов. Было установлено, что электроны вырываются из атомов, которые при этом становятся положительно заряженными ионами. Измерения удельного заряда e/m электронов и ионов показали, что масса электрона в тысячи раз меньше массы атомов.

Таким образом, было установлено, что нейтральные атомы на самом деле являются сложными системами электрически заряженных частиц, причем во всех атомах имеются совершенно одинаковые по свойствам частицы вещества, несущие отрицательные электрические заряды — электроны. Положительный заряд оказался связанным с основной массой атома, но о распределении этого заряда внутри атома сведений не было.

Наличие внутри атомов электрических зарядов подтверждалось и тем, что атомы способны испускать и поглощать электро-

магнитные волны — свет — отдельных, характерных для каждого элемента частот. Подробные систематические исследования преимущественно швейцарских физиков (Бальмера, Лаймана и др.) показали, что атомы испускают линейчатые спектры, и различные испускаемые атомом частоты находятся между собой в определенных соотношениях.

Первая попытка создания на основе накопленных сведений «модели» атома, т. е. представления о его структуре, принадлежит Д. Д. Томсону (1910 г.). Томсон полагал, что атом представляет собой сферу, заполненную положительно заряженной материей, в которой «плавают» отрицательно заряженные корпускулы — электроны (рис. 2.1).

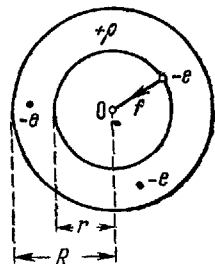


Рис 2.1.

Рассмотрим сферу радиуса R , заполненную заряженным веществом с объемной плотностью заряда $+\rho$. На расстоянии r от центра находится электрон — точечный заряд $-e$. Разделим весь объем сферы на тонкие concentрические шаровые слои. Напряженность поля каждого такого слоя внутри него равна нулю, а снаружи такова, как если бы весь электрический заряд слоя был сконцентрирован в центре сферы (см. т. II, § 7). Таким образом, на электрон $-e$ будет действовать заряд $q(r)$, находящийся в сфере радиуса r , причем испытываемая им сила f будет такова, как если бы этот заряд находился в точке O . Имеем:

$$\left. \begin{aligned} q(r) &= \frac{4}{3} \pi r^3 \rho, \\ f &= \frac{-eq}{r^2} = -\frac{4}{3} \pi \rho r = -\kappa r. \end{aligned} \right\} \quad (43.1)$$

Таким образом, электрон будет двигаться под действием квазиупругой силы (если трение отсутствует), т. е. совершать гармонические колебания около точки O . При этом он должен испускать монохроматическое излучение с частотой $\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{m}}$, где m — масса электрона (см. т. I, § 51 и т. II, § 53). Этим путем Томсон пытался объяснить линейчатый спектр атомов. Однако получить таким образом линейчатый спектр, а не одну линию, невозможно. Эта модель не могла также объяснить таблицы Менделеева — периодичности свойств атомов. Таким образом, было очевидно, что модель Томсона неудовлетворительна. Вопрос о структуре атомов оставался открытым. Требовались новые идеи и эксперименты. Особенно существенными в этом смысле оказались опыты по рассеянию α -частиц в веществе.

В 1909 г. прямыми опытами было доказано (см. § 57), что α -частицы, возникающие при радиоактивных превращениях, представляют собой дважды ионизованные атомы гелия. При прохождении быстрых α -частиц в веществе большая часть их испытывает лишь небольшие отклонения, на углы в $2\text{--}3^\circ$. Однако незначительная часть, порядка $0,01\%$, отклоняется весьма сильно на углы, достигающие почти 180° . Преимущество α -частиц перед другими видами излучения — в их высокой монохроматичности (все α -частицы, вылетающие из атомов данного сорта, имеют практически одну и ту же скорость) и в их большой массе (масса α -частицы превышает массу электрона в 7296 раз). Последнее обстоятельство имеет особое значение в том смысле, что α -частицы не могут отклоняться при столкновениях с электронами, содержащимися в атомах, и по их рассеянию в веществе можно судить о распределении положительно заряженной материи в атоме, масса которой практически совпадает с массой всего атома.

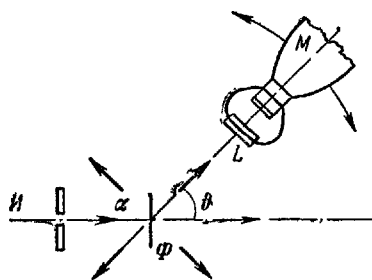


Рис. 2.2.

Особенно интересными оказались опыты сотрудников Резерфорда — Гейгера и Марсдена, исследовавших рассеяние α -частиц

в тончайшей металлической фольге. Толщина фольги Φ (золотой, платиновой, медной, серебряной) (рис. 2.2) составляла примерно $0,0004\text{ см}$ — десятки тысяч атомных слоев. Выделенный тонкий пучок α -частиц от источника I рассеивался. После прохождения фольги рассеянные α -частицы регистрировались по сцинтилляциям. При этом маленький экран, покрытый флуоресцирующим веществом L , на котором наблюдались вспышки света — сцинтилляции, укреплялся неподвижно на объективе длиннофокусного микроскопа M с малым увеличением, с помощью которого велись наблюдения. Микроскоп поворачивался, для того чтобы можно было определить количество частиц, рассеянных под разными углами к направлению первичного пучка.

Как уже указывалось, подавляющая часть α -частиц отклонялась после прохождения фольги лишь на небольшой угол θ . На угол, превышающий 90° , рассеивалась примерно одна из $2 \cdot 10^4$ частиц. Некоторые, весьма немногие, частицы отклонялись почти на 180° .

Для того чтобы сделать правильные заключения из этих опытов, следовало, во-первых, выяснить, является ли рассеяние на большие углы результатом многократных столкновений α -частиц

с атомами преграды или это результат однократного столкновения. Теоретическое исследование показало, что наблюдаемые большие отклонения не могут происходить в результате многократных отклонений на небольшие углы. Анализируя эти результаты, Резерфорд пришел к заключению, что отклонение на большой угол происходит в результате однократного взаимодействия α -частицы с положительным зарядом, связанным с большой массой, и, что очень существенно, заключенной в объеме, очень малом по сравнению с объемом атома.

В первом приближении отклонение α -частицы можно описать как результат ее электрического отталкивания от неподвижного (в этом и состоит приближение) положительного заряда, мимо которого пролетает α -частица. Угол отклонения θ тем больше, чем меньше величина ρ (рис. 2.3), называемая «параметром удара». Если обозначить величину положительного заряда ядра через Ze (e — заряд электрона), то заряд α -частицы будет равен $2e$. Обозначим далее массу α -частицы через M , скорость ее через v , число рассеивающих зарядов, проходящихся на 1 см^2 рассеивающей поверхности (т. е. число атомов), через n .

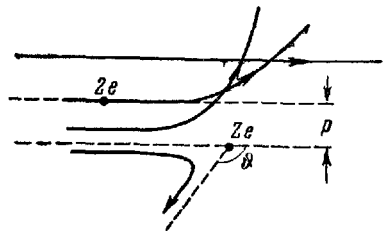


Рис. 2.3.

Законы динамики позволяют рассчитать зависимость угла отклонения θ от параметра удара ρ , а методами теории вероятностей можно найти вероятность пролетания α -частицы на данном расстоянии ρ от ядра и тем самым вероятность ее отклонения на данный угол θ . Этот расчет показывает, что из общего числа рассеянных α -частиц N в телесном угле $d\Omega$, составляющем угол θ с исходным направлением их движения, рассеется частиц

$$dN = nN \left(\frac{Ze2e}{mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{4 \sin^4 \frac{\theta}{2}}. \quad (43.2)$$

Таким образом, согласно формуле (43.2), полученной Резерфордом для данного опыта,

$$\frac{dN}{d\Omega} \sin^4 \frac{\theta}{2} = \text{const}. \quad (43.3)$$

Эта закономерность была проверена для различных материалов, толщин листов и скоростей α -частиц, причем во всех случаях применения тяжелых металлов (когда предположение о неподвижности ядра, испытывающего отдачу, допустимо) получилось хорошее согласие с опытом. Так, при изменении $\sin^4 \frac{\theta}{2}$

примерно в 3500 раз произведение $\frac{dN}{d\Omega} \sin^4 \frac{\theta}{2}$ меняется в пределах 30%.

Это доказывает правильность сделанного предположения: рассеяние α -частиц в веществе есть результат их отклонения от тяжелых, положительно заряженных частиц. Дальнейшие опыты показали, что закон Кулона остается верным вплоть до расстояний между центрами α -частицы и рассеивающей частицы, по порядку величины равных 10^{-12} см . Это означает, что тяжелые положительно заряженные массы в атоме занимают ничтожный объем.

Исходя из этого, Резерфорд предложил «ядерную» модель атома. В центре атома находится положительно заряженное «ядро», масса которого почти равна массе атома. Вокруг ядра под действием электрических сил движутся легкие электроны. Так как кулоновские силы убывают с расстоянием по тому же закону, что и силы ньютоновского тяготения (как $\frac{1}{r^2}$), то атом, по представлениям Резерфорда, подобен солнечной системе («Солнце» — ядро, «планеты» — электроны).

Так как атомы нейтральны, то при заряде ядра Ze вокруг ядра должно двигаться Z электронов.

Формула (43.2) позволяет по результатам рассеяния α -частиц определить заряд ядра. Таким путем для меди (атомный номер 29) было получено $Z = 29,3$, для платины (атомный номер 77) — 77,4, серебра (атомный номер 47) — 46,3. По смыслу Z может быть только целой величиной, дробные значения — результат неточности опыта. Приведенный результат, как и другие, аналогичные, показывает, что число элементарных положительных зарядов, сосредоточенных в ядре атома, равно атомному номеру соответствующего элемента в таблице Менделеева. Этой величине равно и число электронов, вращающихся вокруг ядра. Приведенный результат, подтвержденный в дальнейшем самыми различными и очень точными методами, верен для всех элементов таблицы Менделеева без исключений.

При исследовании рассеяния α -частиц атомами с небольшими атомными номерами, т. е. малыми зарядами ядер, рассеяние на большие углы уже не описывается формулой Резерфорда. Анализ показал, что при приближении α -частиц к ядрам на расстояния порядка 10^{-12} см и меньше между ядром и α -частицей начинают действовать очень большие силы притяжения. Вопрос о природе этих сил мы рассмотрим ниже (§ 62).

Модель Резерфорда явилась существенным шагом вперед, поскольку она представляла атом как динамическую систему движущихся электрических зарядов. Для электрона, движущегося по определенной орбите вокруг ядра, так же как и для планеты, вращающейся вокруг Солнца, имеет место второй закон Ньютона: произведение массы на центростремительное ускорение равно силе (кулоновского) притяжения, т. е.

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze \cdot e}{r^2}, \quad (43.4)$$

где r — радиус орбиты, а v — скорость электрона на этой орбите. Однако и эта модель в таком виде, как ее предложил Резерфорд, не являлась удовлетворительной.

Во-первых, уравнение (43.4) содержит два неизвестных: v и r — и ему отвечает бесчисленное множество возможных орбит на различных расстояниях от ядра. Любому значению r соответствует вполне определенная скорость v и энергия E электрона на данной орбите. Величины r , v и E могут меняться непрерывно и при переходе с одной орбиты на другую может испускаться любая, а не вполне определенная порция энергии. Согласно этой

модели, спектры атомов должны были бы быть не линейчатыми, а непрерывными.

Во-вторых, являясь, согласно (43.4), механически устойчивой, модель Резерфорда оказалась неустойчивой с точки зрения законов классической электродинамики. Электроны-корпускулы (крупинки вещества), несущие отрицательные заряды, движущиеся по круговым орбитам, обладают нормальным ускорением

$$\omega_n = \frac{v^2}{r}.$$

При радиусе орбиты $r = 10^{-8}$ см из (43.4) можно оценить скорость электрона $v \sim 10^8$ см/сек, частоту обращения

$$v = \frac{v}{2\pi r} \sim 10^{15} \text{ сек}^{-1}$$

и ускорение $\frac{v^2}{r} \sim 10^{24}$ см/сек². При таких огромных ускорениях электроны должны интенсивно излучать электромагнитные волны. Их энергия будет быстро уменьшаться, вследствие чего они должны непрерывно приближаться к ядру. Атом — «солнечная система» Резерфорда не может существовать дольше миллионных долей секунды.

§ 44. Постулаты Бора

Первая попытка разобраться в особенностях, свойственных атомам, была сделана известным датским физиком Н. Бором. Бор указал на некоторые закономерности, которые должны иметь место, коль скоро атомы оказываются устойчивыми, и которые позволяют вычислить спектр простейшего, водородного атома (а также одноэлектронных ионов He^+ , Li^{++} и др.).

Бор исходил из того опытного факта, что элементарные излучатели — атомы — отдают излучение в виде порций:

$$e = h\nu, \quad (44.1)$$

причем набор возможных значений e_i (или ν_i) образует не непрерывную последовательность, но дискретный ряд.

Отсюда Бор сделал вывод, что энергия атомов не может меняться непрерывно. Возможные состояния атома образуют дискретную последовательность, и энергии атома в этих состояниях образуют дискретный ряд

$$E_1, E_2, \dots, E_n, \dots \quad (44.2)$$

Находясь в одном из таких, по терминологии Бора — «разрешенных», состояний, атом не испускает и не поглощает излучения, его энергия не меняется. Изменение состояния (и энергии) атома