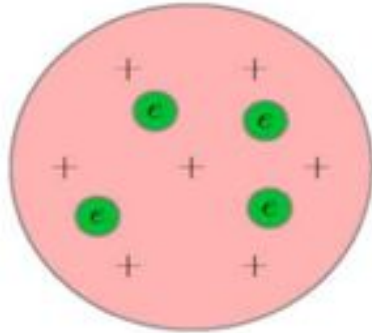


Строение атома



Атомы каждого химического элемента имеют строго индивидуальный линейчатый спектр, присущий только данному элементу и не меняющийся от опыта к опыту. Как это можно объяснить? Как вывести формулу, дающую весь набор частот атомного спектра? Чтобы сделать это, нужно узнать, как устроен атом.

Модель Томсона

Первую модель строения атома придумал английский физик Джозеф Джон Томсон (удостоенный Нобелевской премии за открытие электрона). В конечном счёте она оказалась неверной, но сыграла важную роль, будучи стимулом последующих экспериментальных исследований Резерфорда. Физики называли модель Томсона «пудинг с изюмом».

Согласно Томсону атом представляет собой шар размером порядка 10^{-8} см. По этому шару некоторым образом распределён положительный заряд, а внутри шара, подобно изюминкам, находятся электроны (рис.).

Суммарный заряд электронов в точности равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом электрически нейтрален.

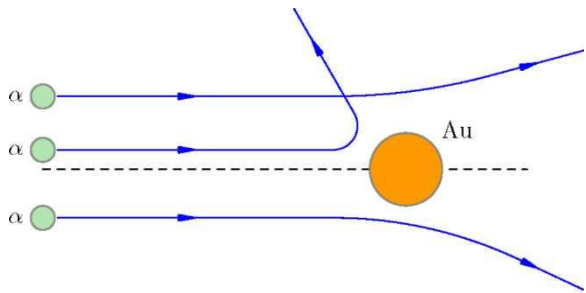
Излучение атомов объясняется колебаниями электронов около положений равновесия (как вы помните, любой ускоренно движущийся заряд излучает электромагнитные волны).

Однако вся совокупность экспериментальных данных по атомным спектрам не укладывалась в модель Томсона. Например, были подобраны формулы, хорошо описывающие спектр излучения атома водорода, но эти формулы из модели Томсона никак не следовали.

Опыты Резерфорда

Ученик Томсона, знаменитый английский физик Эрнест Резерфорд предложил с этой целью бомбардировать атом высокоэнергетичными α -частицами и смотреть, как они будут отклоняться положительным зарядом атома.

Что такое α -частицы? Потoki этих частиц — так называемые «альфа-лучи» — были обнаружены при радиоактивном распаде некоторых элементов (например, радия). В результате тщательных исследований, проведённых опять-таки Резерфордом, было установлено, что каждая α -частица имеет положительный заряд, равный по модулю удвоенному заряду электрона, и массу, превышающую массу электрона примерно в 8000 раз. То есть, α -частица оказалась полностью ионизованным (лишённым электронов) атомом гелия.



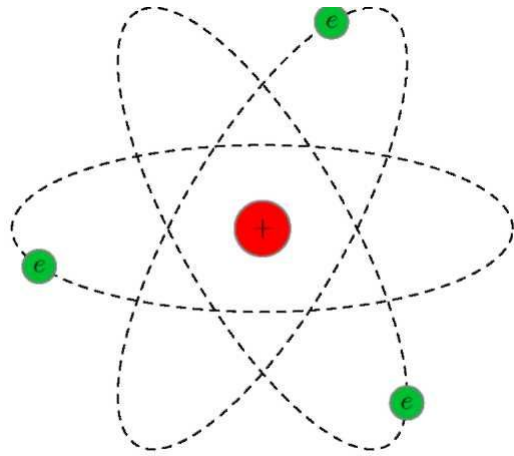
Пучок α -частиц направлялся на тончайшую золотую фольгу. Как гласит история, Резерфорд не сомневался в том, что углы отклонения должны быть весьма малы: имея столь огромную энергию, α -частицы должны проходить сквозь фольгу как нож сквозь масло. Только «для очистки совести», на всякий случай, он попросил учеников посмотреть, не возникает ли рассеяния - α частиц на большие углы.

Каково же было всеобщее удивление, когда такие частицы обнаружили! Действительно, как и следовало ожидать, подавляющая доля α -частиц отклонялась несущественно. Но совсем небольшая их часть (примерно одна частица из нескольких тысяч) отклонялась на угол, больший 90° (рис.). Эти отклонения казались совершенно невероятными. По словам Резерфорда, дело выглядело так, словно артиллерийский снаряд налетел на кусок бумаги и от удара повернул назад. А «бумагой» в образном сравнении Резерфорда служил атом, устроенный согласно модели Томсона. Расчёты, однако, показывают, что такое поле оказывается слишком слабым — его тормозящего действия никак не хватит для того, чтобы остановить α -частицу и отбросить её назад!

Таким образом, наличие α -частиц, отброшенных фольгой, опровергло модель Томсона.

Планетарная модель атома

Чтобы отбросить α -частицу, положительный заряд атома должен создавать куда более сильное электрическое поле, чем то, которое получается в модели Томсона. А чтобы создать такое поле, положительный заряд должен быть сосредоточен в области, гораздо меньшей размера атома. Размер этой области можно вычислить.



Вычисления, проведённые Резерфордом, дали следующий результат:

$$r \sim 10^{-13} \text{ см.}$$

Эта величина на пять порядков (в сто тысяч раз!) меньше размера атома. Так на смену модели Томсона пришла *планетарная модель атома* (рис.).

В центре атома находится крошечное положительно заряженное ядро, вокруг которого, словно планеты вокруг Солнца, движутся электроны. Между ядром и электронами действуют силы кулоновского притяжения, но упасть на ядро электроны не могут за счёт своего движения — точно так же, как и планеты не падают на Солнце, хоть и притягиваются к нему.

Заряд ядра по модулю равен суммарному заряду электронов, так что атом в целом электрически нейтрален. Однако электроны могут быть выбиты из своих орбит и покинуть атом — тогда атом превращается в положительно заряженный ион.

Масса электронов составляет очень малую часть общей массы атома. Например, в атоме водорода всего один электрон, и его масса в 1836 раз меньше массы ядра. Следовательно, почти вся масса атома сосредоточена в ядре — и это при том, что ядро в сто тысяч раз меньше самого атома.

Атом Бора

Планетарная модель атома, успешно истолковав результаты опытов по рассеянию α -частиц, в свою очередь столкнулась с очень серьёзными трудностями.

Как мы знаем, любой заряд, движущийся с ускорением, излучает электромагнитные волны. Это — неоспоримый факт классической электродинамики Максвелла, подтверждаемый многочисленными наблюдениями. Нам также хорошо известно, что электромагнитные волны несут энергию. Стало быть, ускоренно движущийся заряд, излучая, теряет энергию, которая этим излучением уносится.

А теперь давайте возьмём произвольный электрон в планетарной модели. Он двигается вокруг ядра, так что направление его скорости постоянно меняется. Следовательно, электрон всё время имеет некоторое ускорение (например, при равномерном движении по окружности это будет центростремительное ускорение), и поэтому должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Расходуя свою энергию на излучение, электрон будет постепенно приближаться к ядру: в конце концов, исчерпав запас своей энергии полностью, электрон упадёт на ядро.

Если исходить из того, что механика Ньютона и электродинамика Максвелла работают внутри атома, и провести соответствующие вычисления, то получается весьма озадачивающий результат: расход энергии электрона на излучение (с последующим падением электрона на ядро) потребует совсем малого времени — порядка 10^{-8} секунды. За это время атом должен полностью «коллапсировать» и прекратить своё существование.

Таким образом, классическая физика предрекает неустойчивость атомов, устроенных согласно планетарной модели. Этот вывод находится в глубоком противоречии с опытом: ведь на самом деле ничего такого не наблюдается.

Волновое уравнение Шредингера

Как было показано ранее, скорость частицы связана с длиной волны соотношением де Бройля

$$\lambda = h/mV$$

где m -масса частицы

Это уравнение относится к свободному движению частицы. Если же частица движется в силовом поле, то связанные с ней волны описываются так называемой волновой функцией. Общий вид этой функции определил Шредингер (1926), используя некоторые аналогии между механикой и оптикой.

$$\nabla^2 \Psi + 8\pi^2 m/h^2 (E - E_n) \Psi = 0.$$

Решая уравнение Шредингера, находят вид Ψ функций, характеризующих все возможные стационарные состояния электрона в данном силовом поле, и значения полной энергии в этих состояниях.

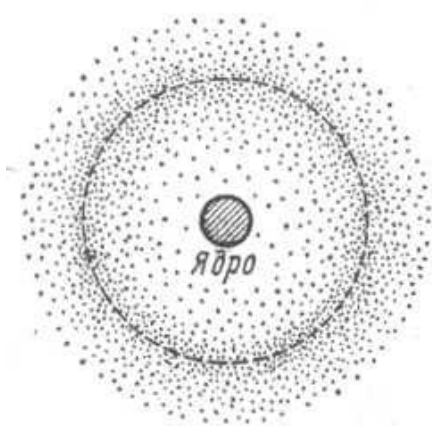
Уравнение Шредингера — дифференциальное уравнение в частных производных и может иметь множество решений. Однако физический смысл имеют лишь те функции (так называемые *собственные функции*), которые удовлетворяют ряду условий. **Во-первых**, эти функции *должны быть непрерывными, конечными, однозначными и обращаться в нуль на бесконечном расстоянии*.

Во-вторых, собственным функциям соответствуют не любые, а *только дискретные значения полной энергии E* . Как дискретные значения энергии, так и вид собственных функций определяются совокупностью квантовых чисел n, l, m , которые хотя и не содержатся в самом уравнении Шредингера, но вводятся в него при решении.

Таким образом, квантование энергии естественно и неизбежно вытекает из коренных свойств материальных объектов и не нуждается в особом постулировании, которое было сделано Н. Бором при разработке планетарной модели атома.

Физическое объяснение волновой функции. Квантово-механическая модель атома.

Волновая функция Ψ была определена как амплитуда фазовой волны. Понятие о фазовой волне формально и применение его оправдывается только тем, что связанные с ним выводы квантовой механики не противоречат опыту. Казалось бы, таким же формальным и не имеющим физического смысла должно быть и понятие об амплитуде фазовой волны Ψ . Однако специальный анализ, сделанный М. Бором, показал, что квадрат волновой функции выражает вероятность местонахождения электрона в определенной точке пространства. Соответственно этому произведение $\Psi^2 dv$ означает вероятность нахождения электрона в элементарном объеме dv .



Таким образом, волновая функция в отличие от обычной волны дает статистическую картину поведения электрона в атоме или молекуле. Двигаясь около ядра, электрон может в любой момент находиться в любом месте; в той же области атомного пространства,

Статистическая совокупность мест локализации электрона в атоме или, как говорят, *электронное облако*, обладающее определенным распределением *электронной плотности*, называется *квантово-механической моделью атома*.

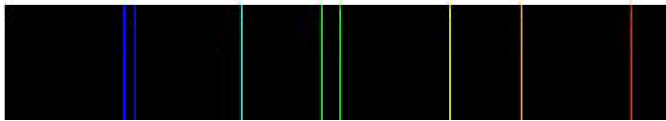
Возможное местонахождение электрона изображено на рисунке в виде облака переменной интенсивности, которое характеризует вероятность (частоту) пребывания электрона в разных точках вокруг ядра.

Пунктирная линия в облаке соответствует орбите, около которой электрон пребывает наиболее часто. Эта линия совпадает с основной орбитой в модели атома Бора. Таким образом, орбиты Бора характеризуют не единственно возможные положения электрона в атоме, а лишь его наиболее вероятные местонахождения. На это обстоятельство указывает и густота точек на рисунке, убывающая в обе стороны от средней пунктирной линии. **Форму электронного облака для различных стационарных состояний электрона в атоме находят, решая уравнение Шредингера относительно Ψ -функции.** Решение представляет собой сложную математическую задачу.

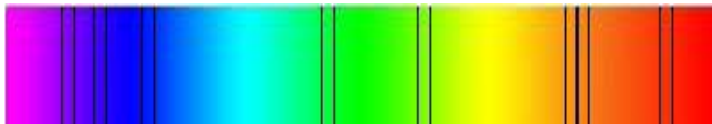
Непрерывный спектр солнца



Линейчатый спектр испускания разряженных газов



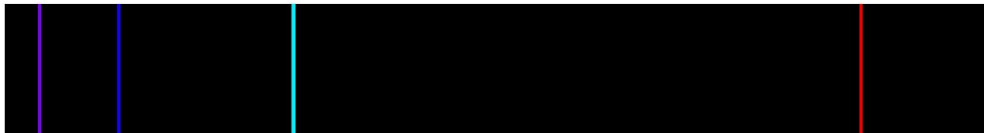
Линейчатый спектр поглощения



Постулаты Бора

Оставалось признать, что внутри атомов перестают действовать известные законы классической физики. Микромир подчиняется совсем другим законам. Классическая физика хорошо описывает непрерывные процессы — движение материальной точки, изменение состояния идеального газа, распространение электромагнитных волн. Энергия объекта, подчиняющегося механике или электродинамике, в принципе может принимать любые значения. **Однако линейчатые спектры указывают на дискретность процессов, происходящих внутри атомов.** Эта дискретность должна фигурировать в законах новой теории.

Первый прорыв в познании законов микромира принадлежит великому датскому физiku Нильсу Бору. Он предложил три постулата, резко расходящиеся с механикой и электродинамикой, но тем не менее позволяющих правильно описать простейший из атомов — атом водорода.



Первый постулат Бора.

Всякий атом (и вообще, всякая атомная система) может находиться не во всех состояниях с любым, наперёд заданным значением энергии. Возможен лишь дискретный набор избранных состояний, называемых стационарными, в которых энергия атома принимает значения $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$

Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает электромагнитные волны.

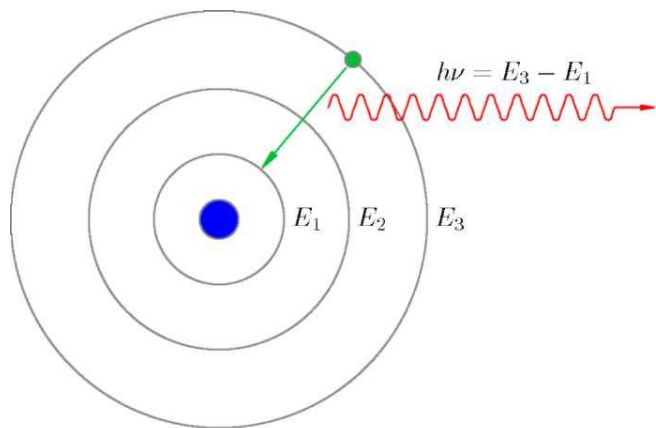
Напомним, что постулат — это базовое, первичное утверждение физической теории, обобщающее опытные данные. Постулат не следует из каких-то других утверждений, он просто констатирует факт: так, мол, ведёт себя природа.

Как видим, первый постулат Бора вопиющим образом противоречит классической физике: налагается запрет на любые значения энергии, кроме избранного прерывистого набора, и признаётся, что электроны, вроде бы движущиеся ускоренно, на самом деле не излучают.

Выглядит фантастически, не правда ли? Однако в том же 1913 году, когда Бор предложил свои постулаты, существование стационарных состояний было подтверждено экспериментально — в специально поставленном опыте немецких физиков Франка и Герца. Таким образом, стационарные состояния — это не выдумка, а объективная реальность.

Значения разрешённого набора $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$ называются уровнями энергии атома. Что происходит при переходе с одного уровня энергии на другой?

Второй постулат Бора



Если атом переходит из стационарного состояния с большей энергией E_n в стационарное состояние с меньшей энергией E_k , то разность этих энергий может высвободиться в виде излучения. В таком случае излучается фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_k$$

Формула даёт качественное представление о том, почему атомные спектры испускания и поглощения являются линейчатыми.

В самом деле, атом может излучать волны лишь тех частот, которые соответствуют разностям значений энергии разрешённого дискретного набора $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$; соответственно, набор этих частот также получается дискретным. Вот почему спектр излучения атомов состоит из отдельно расположенных резких ярких линий.

Для примера на рис. показано излучение фотона при переходе атома с энергетического уровня E_3 на уровень E_1 . Переход заключается в том, что электрон «соскакивает» с одной орбиты на другую, расположенную ближе к ядру.

Эта же формула работает и при поглощении света: в результате столкновения с фотоном атом переходит из состояния E_k в состояние с большей энергией E_n , а фотон при этом исчезает.

Вместе с тем, атом может поглотить не любой фотон, а только тот, энергия $h\nu$ которого в точности равна разности $E_n - E_k$ каких-то двух разрешённых значений энергии E_n и E_k . Переходя в состояние с более высокой энергией E_n , атомы поглощают ровно те самые фотоны, которые способны излучить при обратном переходе в исходное состояние E_k .

Достоинства и недостатки теории Бора

Теория Бора продемонстрировала:

1. Для описания атомных объектов принципиально недостаточно представлений классической физики. В микромире работают другие, совершенно новые законы.
2. Для микромира характерно квантование — дискретность изменения величин, описывающих состояние объекта. В качестве меры квантования, как показала теория Бора, может выступать постоянная Планка K , которая является универсальной константой и играет фундаментальную роль во всей физике микромира (а не только в явлениях излучения и поглощения света).
3. Теория Бора впервые и совершенно точно указала на факт наличия стационарных энергетических состояний атома, образующих дискретный набор. Этот факт оказался общим свойством объектов микромира.
4. В рамках модели Бора удалось получить формулы для вычисления частот спектра атома водорода и объяснить размер атома. Классическая физика была не в состоянии решить эти проблемы.

Недостатки:

1. Теория Бора непоследовательна. С одной стороны, она отвергает описание атома на основе классической физики, так как постулирует наличие стационарных состояний и правила квантования, непонятных с точки зрения механики и электродинамики. С другой стороны, классические законы — второй закон Ньютона и закон Кулона — используются для записи уравнения движения электрона по круговой орбите.
2. Теория Бора не смогла дать адекватное описание самого простого после водорода атома гелия.

Несмотря на свои недостатки, теория Бора стала важнейшим этапом развития физики микромира. Полуклассическая - полуквантовая модель Бора послужила промежуточным звеном между классической физикой и последовательной квантовой механикой, построенной десятилетием позже — в 1920-х годах.