

Атом Бора

Темы кодификатора ЕГЭ: постулаты 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 движется вокруг ядра по замкнутой орбите, 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 предсказывает неустойчивость атомов, устроенных согласно планетарной модели. Этот вывод находится в глубоком противоречии с опытом: ведь на самом деле ничего такого не наблюдается. Предметы нашего мира вполне устойчивы и не коллапсируют на глазах! Атом может сколь угодно долго пребывать в невозбуждённом состоянии, не излучая при этом электромагнитные волны.

Постулаты Бора

Оставалось признать, что внутри атомов перестают действовать известные законы классической физики. Микромир подчиняется совсем другим законам.

Первый прорыв в познании законов микромира принадлежит великому датскому физiku Нильсу Бору. Он предложил три постулата¹, резко расходящиеся с механикой и электродинамикой, но тем не менее позволяющих правильно описать простейший из атомов — атом водорода.

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 постулат Бора. *Всякий атом (и вообще, всякая атомная система) может находиться не во всех состояниях с любым, наперёд заданным значением энергии. Возможен*

¹Напомним, 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.

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.

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

$$h\nu = E_n - E_k. \quad (1)$$

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.

Для примера на рис. 1 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.

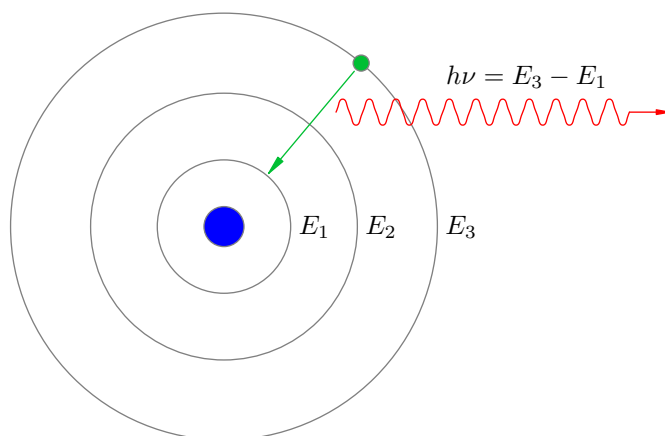


Рис. 1. Излучение фотона атомом

Формула (1) 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.

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 . Попросту говоря,

атомы забирают из непрерывного спектра те линии, которые сами же и излучают; вот почему тёмные линии спектра поглощения холодного атомарного газа находятся как раз в тех местах, где расположены яркие линии спектра испускания этого же газа в нагретом состоянии.

Качественного объяснения характера атомных спектров, однако, недостаточно. Хотелось бы иметь теорию, позволяющую *вычислить* частоты наблюдаемых спектров. Бору удалось это сделать в самом простом случае — для атома водорода.

Атом водорода

Атом водорода состоит из ядра с зарядом $+e$, которое называется *протоном*, и одного электрона с зарядом $-e$ (через e обозначена абсолютная величина заряда электрона). При построении своей теории атома водорода Бор сделал три дополнительных предположения.

1. Прежде всего, мы ограничиваемся рассмотрением только *круговых* орбит электрона². Таким образом, электрон движется вокруг протона по окружности радиуса r с постоянной по модулю скоростью v (рис. 2).

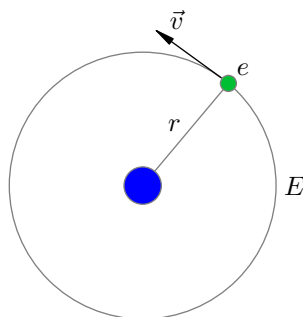


Рис. 2. Модель атома водорода

2. Величина mvr , равная произведению импульса электрона mv на радиус орбиты r , называется *моментом импульса* электрона. В каких единицах измеряется момент импульса? Смотрим:

$$[mvr] = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м} = \left(\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) \cdot \text{м} \cdot \text{с} = \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} = \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

Это в точности размерность постоянной Планка! Именно здесь Бор увидел появление дискретности, необходимой для квантового описания атома водорода.

Правило квантования (третий постулат Бора). *Момент импульса электрона может принимать лишь дискретный набор значений, кратных «перечёркнутой» постоянной Планка:*

$$mvr = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (2)$$

3. Выше мы говорили, что классическая физика перестаёт работать внутри атома. Так оно в действительности и есть, но вопреки этому мы предполагаем, что электрон притягивается к протону с силой, вычисляемой по закону Кулона, а движение электрона подчиняется второму закону Ньютона:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2}. \quad (3)$$

²Впоследствии теория Бора была распространена на общий случай эллиптических орбит.

Эти три предположения позволяют довольно просто получить формулы для уровней энергии атома водорода. Переписываем соотношение (3) в виде:

$$mv^2 = \frac{ke^2}{r}. \quad (4)$$

Из правила квантования (2) выражаем v :

$$v = \frac{n\hbar}{mr},$$

и подставляем это в (4):

$$\frac{n^2\hbar^2}{mr^2} = \frac{ke^2}{r}.$$

Отсюда получаем формулу для допустимых радиусов орбит электрона:

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{kme^2}. \quad (5)$$

Теперь перейдём к нахождению энергии электрона. Потенциальная энергия кулоновского взаимодействия электрона с ядром равна:

$$W = \frac{k(+e)(-e)}{r} = -\frac{ke^2}{r}.$$

(Она отрицательна, так как отсчитывается от бесконечно удалённой точки, в которой достигает максимального значения.)

Полная энергия E электрона равна сумме его кинетической и потенциальной энергий:

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

Вместо mv^2 подставим правую часть выражения (4):

$$E = \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r}. \quad (6)$$

Полная энергия, как видим, отрицательна. Если на радиус орбиты никаких ограничений не накладывается, как это имеет место в классической физике, то энергия может принимать любые по модулю значения. Но согласно (5) существует лишь дискретный набор возможных значений радиуса; подставляя их в (6), получаем соответствующий набор допустимых значений энергии атома водорода:

$$E_n = -\frac{ke^2}{2r_n} = -\frac{k^2me^4}{2\hbar^2 n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (7)$$

Основное состояние атома водорода — это состояние с наименьшей энергией E_1 . В основном состоянии атом может находиться неограниченно долго. Вычисление даёт:

$$E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ}.$$

Мы видим, что если атом находится в основном состоянии, то для выбивания электрона нужно сообщить атому энергию, равную как минимум 13,6 эВ. Эта величина носит название *энергии ионизации* атома водорода.

По формуле (5) легко вычислить радиус орбиты основного состояния:

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{kme^2} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ см}.$$

То есть, диаметр атома оказывается равным как раз 10^{-8} см — величине, известной из опыта. Таким образом, теория Бора впервые смогла объяснить размер атома!

Кроме того, в рамках теории Бора удаётся получить формулы для вычисления частот (или длин волн) спектра атома водорода. Так, согласно второму постулату Бора и формуле (7) имеем:

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} = \frac{k^2 m e^4}{4\pi \hbar^3} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (8)$$

На практике чаще имеют дело с длинами волн. Учитывая, что $\nu = c/\lambda$, формулу (8) можно переписать так:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{k^2 m e^4}{4\pi \hbar^3 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (9)$$

Константа $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ называется *постоянной Ридберга*. Теория Бора даёт значение этой постоянной, очень хорошо согласующееся с экспериментом.

Длины волн спектра атома водорода образуют *серии*, характеризующиеся фиксированным значением k в формуле (9). Все длины волн данной серии излучаются при переходах на уровень E_k с вышележащих энергетических уровней E_n ($n = k + 1, k + 2, k + 3, \dots$).

Переходы в основное состояние:

$$E_2 \rightarrow E_1, \quad E_3 \rightarrow E_1, \quad E_4 \rightarrow E_1, \quad \dots$$

образуют *серию Лаймана*. Длины волн этой серии описываются формулой (9) при $k = 1$:

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

Линии серии Лаймана лежат в ультрафиолетовом диапазоне.

Переходы на второй уровень:

$$E_3 \rightarrow E_2, \quad E_4 \rightarrow E_2, \quad E_5 \rightarrow E_2, \quad \dots$$

образуют *серию Бальмера*. Длины волн этой серии подчиняются формуле (9) при $k = 2$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Первые четыре линии серии Бальмера лежат в видимом диапазоне (рис. 3)³, остальные — в ультрафиолетовом.



Рис. 3. Видимый спектр атома водорода (серия Бальмера)

Переходы на третий уровень:

$$E_4 \rightarrow E_3, \quad E_5 \rightarrow E_3, \quad E_6 \rightarrow E_3, \quad \dots$$

образуют *серию Пашена*. Длины волн этой серии описываются формулой (9) при $k = 3$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Все линии серии Пашена лежат в инфракрасном диапазоне.

Имеются ещё три «именованных» серии: это *серия Брэкетта* (переходы на уровень $k = 4$), *серия Пфунда* (переходы на уровень $k = 5$) и *серия Хэмфри* (переходы на уровень $k = 6$). Все линии этих серий лежат в далёкой инфракрасной области.

³Изображение с сайта dic.academic.ru.

Достоинства и недостатки теории Бора

О достоинствах модели атома водорода, предложенной Бором, мы так или иначе уже сказали. Резюмируем их.

- Теория Бора продемонстрировала, что для описания атомных объектов принципиально недостаточно представлений классической физики. В микромире работают другие, совершенно новые законы.

Для микромира характерно *квантование* — дискретность изменения величин, описывающих состояние объекта. В качестве меры квантования, как показала теория Бора, может выступать постоянная Планка \hbar , которая является универсальной константой и играет фундаментальную роль во всей физике микромира (а не только в явлениях излучения и поглощения света).

- Теория Бора впервые и совершенно точно указала на факт наличия стационарных энергетических состояний атома, образующих дискретный набор. Этот факт оказался общим свойством объектов микромира.
- 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.

Однако теория Бора, разумеется, не могла претендовать на роль общей теории, описывающей микромир. Модель Бора обладала рядом существенных недостатков.

- 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 орбите⁴.
- Теория Бора не смогла дать адекватное описание самого простого после водорода атома гелия. Подавно не могло быть и речи о распространении теории Бора на более сложные атомы⁵.
- Даже в самом атоме водорода теория Бора смогла описать не всё. Например, дав выражения для частот спектральных линий, модель Бора не объясняла различие в их интенсивностях. Кроме того, неясен оставался механизм образования молекулы водорода из двух атомов.

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.

⁴Как шутливо замечал известный физик Брэгг, в теории Бора по понедельникам, средам и пятницам надо применять классические законы, а по вторникам, четвергам и субботам — квантовые.

⁵Как опять-таки шутили физики, атом Бора — это не атом бора, а атом водорода.