

Физика



Лябин Михаил Павлович

Доцент кафедры общей и неорганической химии Волгоградского государственного технического университета, кандидат химических наук, автор более 50 научных и научно-методических публикаций.



Иванов Владимир Алексеевич

В недавнем прошлом доцент кафедры общей и неорганической химии Волгоградского государственного технического университета, кандидат технических наук, автор более 70 научных и научно-методических публикаций, в настоящее время на пенсии.



Майзель Валентин Вениаминович

Доцент кафедры общей и неорганической химии Волгоградского государственного технического университета, кандидат химических наук, автор более 120 научных и научно-методических публикаций.



Лавникова Ирина Владимировна

Доцент кафедры общей и неорганической химии Волгоградского государственного технического университета, кандидат технических наук, автор более 25 научных и научно-методических публикаций.

Атом в теории Бора

Как объяснить и рассчитать основные параметры электронной структуры атомов? Самый простой и наглядный подход – использование теории Бора. В статье излагаются основные положения этой теории, а также разбираются задачи на её применение.

1. Введение

Известно, что в настоящее время доминирующей концепцией, описы-

вающей движение электронов и поведение других микрообъектов в

силовых полях, является крупнейшее достижение физики XX века – квантовая механика. Описание движения электронов в атомах и молекулах на основе квантово-механических представлений позволяет не только рассмотреть взаимодействие электронов с ядрами атомов и между собой, но и раскрыть физическую природу валентного взаимодействия атомов при образовании сложных химических частиц – молекул и кристаллов, дать правильное объяснение Периодическому закону и Периодической системе элементов, более строгое обоснование таких химических понятий, как степень окисления, координационные числа для комплексных соединений и др.



Вместе с тем математический аппарат квантовой механики является чрезвычайно сложным, а её представления – недостаточно наглядными.

Как в классической механике движение макрочастиц (обычных тел) описывается законами Ньютона, так в квантовой механике законы

движения микрочастиц выражаются уравнением Шрёдингера, получить точное решение которого даже для простейших атомов весьма проблематично.

При этом следует отметить, что решение данного уравнения для атома водорода приводит к тем же дискретным значениям энергии электрона в атоме, которые следуют из теории строения атома датского физика Нильса Бора. Кроме этого установлено, что полученные в результате квантово-механических расчётов значения наиболее вероятного расстояния электрона от ядра и его средней скорости также соответствуют расчётам Бора. Несомненно, уравнения квантовой механики позволяют хорошо описывать свойства атома. Однако необходимость знакомства учащихся с теорией Бора обусловлена наглядностью. Именно по этим причинам в учебных целях до сих пор наиболее разумно пользоваться боровскими представлениями, которые в целом не противоречат следствиям, выводимым из квантовой механики. Математический аппарат этой теории позволяет выполнять расчёты, касающиеся атома водорода и так называемых водородоподобных атомов, т.е. атомов с зарядом ядра $+Z$ ($Z = 2, 3, 4, \dots$), но имеющих лишь один электрон. Например, ${}_2\text{H}^+$ – атом (ион) с зарядом ядра $+2$, но лишённый одного электрона и, следовательно, оставшийся с одним электроном; ${}_3\text{Li}^{2+}$ – заряд ядра $+3$, лишён двух электронов (остался один); ${}_8\text{O}^{7+}$ – заряд ядра $+8$, лишён семи электронов (остался один). Так как в последнее время теория Бора в большинстве учебников физики и химии не находит должного освещения, а некоторые авторы вообще считают, что место этой концепции только в учебниках истории науки, представляется целесообразным напомнить её основные положения.

2. Постулаты Бора

В начале XX века английский физик Эрнест Резерфорд на основании экспериментов, проведённых сотрудниками его лаборатории Эрнстом Марсденом и Гансом Гейгером, разработал модель строения атома, получившую название планетарной. Согласно этой модели центральной частью атома любого химического элемента является очень маленькое (диаметр $\sim 10^{-14} - 10^{-15}$ м) положительно заряженное ядро, однако по массе почти равное массе всего атома. А на расстояниях в сотни тысяч раз больших, чем размер ядра, находятся отрицательно заряженные частицы – электроны, суммарная масса которых в тысячи раз меньше массы ядра.

Но выводы Резерфорда противоречили уже известным в то время положениям физики, называемым ныне классическими. Согласно этим представлениям ускоренное (с центростремительным ускорением) движение электрона вокруг ядра должно сопровождаться непрерывной потерей энергии, а следовательно, падением электрона на ядро атома и невозможностью существования линейчатых спектров.

Для разрешения возникших противоречий Бор предложил ряд постулатов, в которых был дан необычный подход к объяснению свойств атомных систем.

Согласно первому постулату существуют особые состояния атома, находясь в которых, последний не излучает энергию, хотя электроны совершают ускоренные (с центростремительным ускорением) движения относительно ядра. Такие состояния были названы Бором стационарными. Таким образом, узаконивалось движение электрона по вполне определённым стабильным (стационар-

ным) орбитам без потери энергии.

Наиболее устойчивое из стационарных состояний, для которого характерно минимальное значение энергии (E), называется основным. Другие состояния характеризуются номерами энергетических уровней n ($n = 1, 2, 3, \dots$), а n называется главным квантовым числом. Для электрона атома водорода в основном состоянии $n = 1$.

Второй постулат Бора гласит, что при переходе из одного стационарного состояния в другое атом испускает или поглощает квант электромагнитного излучения, частота которого определяется соотношением

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (1)$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, ν – частота излучения, E_m и E_n – значения энергий начального и конечного состояний электрона соответственно.

Уравнение (1) называется правилом частот Бора.

В XIX в. швейцарский учёный Иоганн Бальмер подобрал эмпирическую формулу, описывающую все известные в то время спектральные линии атома водорода в видимой части спектра. В дальнейшем аналогичные формулы были получены для линий ультрафиолетовой и инфракрасной областей. Их общий вид называется обобщённой формулой Бальмера:

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

где $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – постоянная Ридберга; $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \dots$; n принимает целочисленные значения, начиная с $(m+1)$. При одном и том же значении m и разных значениях n получается так называемая серия линий.

При $m = 1, n = 2, 3, 4 \dots$ $\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ – серия Лаймана (ультрафиолет).

При $m = 2, n = 3, 4, 5 \dots$ $\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ – серия Бальмера (видимая область).

При $\left. \begin{array}{l} m = 3, n = 4, 5, 6 \dots \text{ – серия Пашена} \\ m = 4, n = 5, 6, 7 \dots \text{ – серия Брэкета} \\ m = 5, n = 6, 7, 8 \dots \text{ – серия Пфунда} \\ m = 6, n = 7, 8, 9 \dots \text{ – серия Хемфри} \end{array} \right\}$ инфракрасная область.

Для перехода от расчёта частоты излучения к расчётам длины волны λ используется известная связь этих величин через скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме (часто упрощённо называемая скоростью света, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с):

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (3)$$

Электрон движется вокруг положительно заряженного ядра под действием электростатического притяжения. Поэтому сила взаимодействия электрона с ядром определяется законом Кулона:

$$F_{\text{притяж}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (4)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹ – электрическая постоянная, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль значения электрического заряда протона и электрона; r – расстояние между ядром и электроном.

Так как эта сила направлена к ядру, т. е. к центру круговой орбиты электрона, то она называется центростремительной и рассчитывается по формуле

$$F_{\text{цс}} = \frac{mv^2}{r}, \quad (5)$$

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, v – скорость движения электрона.

Согласно 2-му закону Ньютона

можно приравнять правые части выражений (4) и (5):

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

или, после сокращения на r :

$$mv^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (6)$$

Полная энергия электрона складывается из кинетической энергии его движения около ядра

$$T = \frac{mv^2}{2} \quad (7)$$



и потенциальной энергии U взаимодействия электрона с ядром. Выражение для потенциальной энергии электрона по модулю совпадает с правой частью уравнения (6). Поэтому скла-



дывая значения кинетической T и потенциальной U энергий, получим следующее выражение для полной энергии электрона в атоме:

$$E = T + U = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (8)$$

Учитывая соотношение (6), уравнение (8) можно преобразовать к более удобному виду:

$$E = \frac{mv^2}{2} - mv^2 = -\frac{mv^2}{2}. \quad (9)$$

Для определения радиуса стационарных орбит Нильс Бор предположил, что момент импульса электрона mvr квантуется, т. е. может принимать лишь определённые дискретные значения, кратные h :

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}. \quad (10)$$

Отсюда можно получить формулу для расчёта дискретных значений скорости его движения по орбите:

$$v = \frac{nh}{2\pi mr}. \quad (11)$$

3. Дальнейшее развитие теории Бора

В дальнейшем (1915 г.) значительно развил теорию Бора немецкий физик Арнольд Зоммерфельд, который допустил движение электрона как по круговым, так и по эллиптическим (с ядром в одном из фокусов эллипса) орбитам. Для характеристики вытянутости эллипса, т. е. формы орбиты, он ввёл второе квантовое число – орбитальное l , которое может принимать значения последовательных целых чисел от 0 до $(n-1)$.

В 1925 году Альфред Ланде (физик-теоретик, работал в Германии и США) для характеристики пространственной ориентации плоскости электронных орбит в магнитном поле ввёл третье квантовое число m , получившее название магнитного. Это число

После подстановки (11) в (6) получается выражение для расчёта радиусов электронных орбит в атоме водорода:

$$r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}. \quad (12)$$

При $n=1$ после подстановки значений соответствующих величин получаем радиус первой электронной орбиты

$$r \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 53 \text{ пм.}$$

Для водородоподобных атомов с зарядом ядра $+Z$:

$$r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{Z \pi m e^2}. \quad (13)$$

Комбинируя формулы (6), (8) и (12), получаем выражение для расчёта энергии электрона в атоме водорода:

$$E = -\frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2}, \quad (14)$$

а с учётом заряда ядра Z для водородоподобных атомов:

$$E = -\frac{Z^2 m e^4}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2}. \quad (15)$$

может принимать целочисленные значения от $-l$ до $+l$.



В том же году американские физики Сэмюэл Гаудсмит и Джордж Уленбек предположили, что помимо орбитального движения у электрона есть ещё и собственное движение. В резуль-

тате электрон приобретает собственный момент количества движения — спин m_s . Спин может иметь лишь два значения: $m_s = +1/2$; $m_s = -1/2$ и является четвёртым и последним квантовым

числом, которое используется для описания состояния электрона в атоме.

В заключение приведём примеры решения задач по рассматриваемой теме и задачи для самостоятельного решения.

4. Примеры решения задач

Задача 1. Какова длина волны и частота излучения, соответствующая переходу электрона с третьего на первый квантовый уровень в атоме водорода? К какому участку шкалы электромагнитных волн относится это излучение?

Решение. Для решения задачи необходимо использовать значения ряда констант: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

В соответствии с формулой (1):

$$E_3 - E_1 = h\nu.$$

Откуда

$$\nu = (E_3 - E_1)/h.$$

Значения E_1 и E_3 рассчитываем по формуле (14):

$$E_1 = -\frac{(9,1 \cdot 10^{-31})(1,6 \cdot 10^{-19})^4 \text{ Дж}}{8 \cdot 1 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6,625 \cdot 10^{-34})^2},$$

$$E_3 = -\frac{(9,1 \cdot 10^{-31})(1,6 \cdot 10^{-19})^4 \text{ Дж}}{8 \cdot 3^2 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6,625 \cdot 10^{-34})^2}.$$

Подставляя эти выражения в формулу для частоты, получим:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{(9,1 \cdot 10^{-31})(1,6 \cdot 10^{-19})^4}{8 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6,625 \cdot 10^{-34})^3} \times \\ &\times \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) = 2,9 \cdot 10^{15} \text{ (с}^{-1}\text{)}. \end{aligned}$$

Для вычисления длины волны используем формулу (3):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,9 \cdot 10^{15}} \approx 1,03 \cdot 10^{-7} \text{ (м)} = 103 \text{ (нм)}.$$

Излучение относится к ультрафиолетовой части спектра.

Задача 2. Чему равно значение полной энергии электрона, находящегося на первой стационарной орбите водородоподобного атома ${}_3\text{Li}^{2+}$?

Решение. Воспользуемся формулой (15):

$$E = -\frac{3^2(9,1 \cdot 10^{-31})(1,6 \cdot 10^{-19})^4 \text{ Дж}}{8 \cdot 1^2 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6,625 \cdot 10^{-34})^2}.$$

Окончательно получаем:

$$E = -1,95 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}.$$

Задача 3. Вычислите скорость движения электрона по первой орбите водородоподобного атома ${}_6\text{C}^{5+}$.

Решение. Комбинируя формулы (11) и (13), получаем выражение:

$$v = \frac{Ze^2}{2\varepsilon_0 h n},$$

где $n=1$, $Z=6$.

Расчёт по полученной формуле даёт значение скорости

$$v = 1,31 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

5. Задачи для самостоятельного решения

Задача 4. Какая энергия соответствует 1 кванту света длиной волны 650 нм?

Ответ. $3,06 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Задача 5. Максимальная длина

волны спектральной водородной линии серии Лаймана равна 0,12 мкм. Предполагая, что постоянная Ридберга неизвестна, определить максимальную длину волны линии серии Бальмера.

Ответ. 0,65 мкм.

Задача 6. Вычислите энергию, выделяемую водородоподобным атомом C^{5+} при переходе электрона с третьей орбиты на первую.

Ответ. $69 \cdot 10^{-18}$ Дж.

Задача 7. Определите скорость движения электрона, находящегося на круговой орбите с радиусом $5,3 \cdot 10^{-11}$ м в атоме водорода.

Ответ. $2,2 \cdot 10^6$ м/с.

Задача 8. Определите скорость электрона на третьей орбите атома водорода.

Ответ. $7,3 \cdot 10^5$ м/с.

Задача 9. Рассчитайте радиус водородоподобного атома ${}_4\text{Be}^{3+}$.



Ответ. 13,3 пм.

Задача 10. Определите скорость движения электрона по первой орбите водородоподобного атома ${}_7\text{N}^{+6}$.

Ответ. $1,53 \cdot 10^7$ м/с.

Литература

1. Глинка П.Л. Общая химия. Учебное пособие для вузов/ Под ред. А.Е. Ермакова. – 28-е изд., перераб. и доп. – Интеграл-Пресс, 2000.
2. Поллинг Л. Общая химия. – 3-е изд. – М.: Мир, 1974.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1994.
4. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. Учебное пособие для студентов вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 1996.
5. Дмитриев И.С. Электрон глазами химика. – 2-е изд., испр. – Л.: Химия, 1986.
7. Кемпбелл Дж. Современная общая химия в 3-х т. – М.: Мир, 1975.
8. Новейший справочник необходимых знаний. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: РИПОЛ, Классик, 2007.
9. Храмов Ю.А. Физики: Биографический справочник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1983.

Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор

Действенное устрашение

Известный русский писатель Алексей Толстой говорил своей старой тётушке, которую беспокоили телефонные звонки:

– Не подходи к телефону и не говори по нему. На улице ветер, мороз, надует тебе в уши – простудишься.