

понять поведение квантовомеханических систем, особенно когда мы рассматриваем макроскопические следствия квантовых явлений.

Важной особенностью теплового движения в системе является его *беспорядочность*. Это вводит в поведение системы элемент случайности. Можно сказать, что беспорядочное тепловое движение является «шумом в чистой симфонии квантовой механики». И следует добавить, что часто шум настолько велик, что заглушает музыку. В принципе тепловое движение можно подавить, если поддерживать исследуемую систему и ее окружение при температуре, очень близкой к 0 К. Действительно, при абсолютном нуле тепловое движение исчезает. На практике полного подавления достичь нельзя. Тепловое движение является характерной особенностью мира, в котором мы живем.

Порядки величин в атомной и молекулярной физике

19. Представим себе атом в виде некоторой динамической системы, состоящей из очень малого ядра, окруженного облаком электронов. Электроны притягиваются к ядру и взаимодействуют друг с другом с помощью электромагнитных сил. Наша вера в то, что электромагнитные силы являются единственными силами, которые надо учитывать для понимания свойств атомов и молекул, основана на постоянном сравнении предсказаний теории с опытом.

Квантовая теория, описывающая взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем, называется *квантовой электродинамикой*. Она включает в себя законы специальной теории относительности. В настоящее время это наиболее успешная теория фундаментальных процессов, происходящих с элементарными частицами. Она позволила описать строение атомов и молекул, а также испускание и поглощение этими объектами электромагнитного излучения.

20. Как показывает эксперимент, размер ядра порядка 10^{-13} см, а атома 10^{-8} см. Таким образом, объем ядра ничтожно мал по сравнению с объемом всего атома.

Масса ядра велика по сравнению с массой электрона, равной 0,0005486 а. е. м. Действительно, отношение масс электрона и протона равно

$$m/M_p = 1/1836. \quad (20a)$$

Разумно ожидать, что по крайней мере в первом приближении движение ядра не играет существенной роли и ядро можно считать «бесконечно тяжелым» и фиксированным в пространстве. Так как ядро очень мало, то сделаем еще одно упрощение и будем считать его «точкой». В такой атомной модели роль ядра сводится к созданию электростатического поля, описываемого потенциалом

$$V(r) = eZ/r, \quad (20b)$$

где e — элементарный заряд; Z — атомный номер.

Задачей теории атома, в первом приближении, является исследование движения электронов в этом электростатическом поле. Читатель должен помнить, что, говоря о «движении», мы имеем в виду движение в квантовомеханическом смысле. Позже мы поясним, что это значит.

21. Квантовая электродинамика описывает взаимодействие электронов с электромагнитным полем. Рассмотрим физические величины, входящие в эту теорию, т. е. массу электрона m , заряд электрона e , скорость света c и постоянную Планка \hbar . С помощью констант m , c и \hbar можно образовать так называемые *естественные единицы квантовой электродинамики*, о которых мы говорили в п. 13: m — единица массы, mc^2 — единица энергии, \hbar/mc — единица длины, \hbar/mc^2 — единица времени.

До сих пор мы не говорили об элементарном заряде e . Эта величина играет роль *константы связи*; она показывает, как сильно электрон связан с электромагнитным полем*). Попытаемся получить безразмерную величину, характеризующую силу этой связи. Для этого вычислим в указанных выше единицах *электростатическую энергию отталкивания двух электронов, находящихся на расстоянии \hbar/mc* . Обозначая эту величину через α , имеем

$$\alpha = \frac{e^2 \cdot (\hbar/mc)}{mc^2} = \frac{e^2}{\hbar c} = (7,29720 \pm 0,00003) \cdot 10^{-3} \approx \frac{1}{137}. \quad (21a) **$$

Константа α играет фундаментальную роль в атомной физике и известна под названием *постоянной тонкой структуры*; она представляет собой квадрат элементарного заряда в естественных единицах. Постоянная α характеризует этот заряд таким способом, который не зависит от произвольных макроскопических физических

Таблица 21А. Физические константы

Энергия покоя электрона

$$mc^2 = (0,511006 \pm 0,000002) \text{ МэВ}$$

Комптоновская длина волны электрона

$$\lambda_e = \hbar/mc = (3,86144 \pm 0,00003) \cdot 10^{-11} \text{ см}$$

Первый боровский радиус

$$a_0 = \hbar^2/me^2 = \alpha^{-1} \lambda_e = (5,29167 \pm 0,00002) \cdot 10^{-9} \text{ см}$$

Ионизационный потенциал водорода при бесконечно большой массе протона

$$R_\infty = \alpha^2 mc^2/2 = (13,6053 \pm 0,00013) \text{ эВ}$$

Постоянная Ридберга при бесконечно большой массе протона

$$\tilde{R}_\infty = \alpha/4\pi a_0 = R_\infty/hc = (109\,737,31 \pm 0,01) \text{ см}^{-1}$$

*) Так принято говорить. Правильнее было бы сказать, что константа связи показывает, как сильно элементарная частица взаимодействует с себе подобной. Электромагнитное же поле можно считать некоторой мысленной конструкцией, введенной для объяснения взаимодействия между зарядами.

***) Выражение для α написано в системе СГС. В системе СИ

$$\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c.$$

стандартов. Численное значение величины α весьма мало, что отражает «слабость» электромагнитного взаимодействия: электростатическая энергия двух электронов, находящихся на расстоянии \hbar/mc , мала по сравнению с их энергией покоя. *Постоянная тонкой структуры является одной из истинно фундаментальных констант природы.* В настоящее время это чисто эмпирическая константа, так как у нас нет теоретического объяснения ее величины. Если бы она имела большее значение, мир выглядел бы совершенно по-другому, можно сказать, *невообразимо* иначе.

Заметим, что масса электрона не входит в формулу (21a) для величины α , поэтому α является константой связи с электромагнитным полем для *любой* элементарной частицы, заряд которой равен e .

В табл. 21А приведены некоторые величины, играющие важную роль в атомной физике, которые можно образовать из констант m , \hbar , c и e , и указаны наименования этих величин.

22. В п. 51 гл. 1 мы имели дело с полуклассической теорией атома водорода, предложенной Бором, и обсуждали, в частности, вопрос о размерах такого атома. Там было показано, что константа a_0 , определяемая равенством (51c), дает этот размер. Нетрудно заметить, что эта константа a_0 , называемая *первым боровским радиусом* (для атома водорода), совпадает с одной из констант табл. 21А. В гл. 1 постоянная a_0 имела смысл радиуса круговой орбиты в планетарной модели атома, и отсюда ее название. При квантовомеханическом рассмотрении атома водорода константа a_0 имеет другой смысл: $1/a_0$ равно среднему значению $1/r$ для основного состояния атома водорода (r — расстояние между электроном и протоном). В обоих случаях физический смысл величины a_0 одинаков: она дает представление о «типичном» расстоянии между электроном и протоном.

23. Продолжим полуклассическое рассмотрение, начатое в гл. 1, и постараемся оценить энергию связи электрона в атоме водорода. Если электрон движется со скоростью v (его импульс $p=mv$) и находится на расстоянии r от протона, то его полная энергия

$$E = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{r} = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{r}. \quad (23a)$$

Для электрона на круговой орбите радиуса $r=a_0$ условие динамического равновесия имеет вид

$$\frac{mv^2}{a_0} = \frac{e^2}{a_0^2}. \quad (23b)$$

Из уравнений (23a) и (23b) следует

$$E = \frac{e^2}{2a_0} - \frac{e^2}{a_0} = -\frac{e^2}{2a_0} = -\frac{\alpha^2 mc^2}{2} = -R_\infty. \quad (23c)$$

Итак, энергия электрона на этой орбите равна $-R_\infty$, что близко к $-13,6$ эВ. Эту энергию нужно сравнивать с полной энергией электрона, удаленного от протона на бесконечность и покоящегося. Из равенства (23a) следует, что она равна нулю. Таким образом, что-

бы удалить электрон с рассматриваемой круговой орбиты, мы должны затратить энергию, R_∞ . Эта энергия называется *энергией ионизации*. Волновое число, эквивалентное энергии ионизации, носит название *постоянной Ридберга*. Мы обозначим ее через \tilde{R}_∞ *).

Оказывается, что выполненная нами простая оценка, основанная на неверной планетарной модели атома, дает *точно* то же самое значение энергии ионизации R_∞ , что и строгая квантовомеханическая теория. Таким образом, R_∞ является действительным значением энергии ионизации атома водорода, а $-R_\infty$ — *энергия основного состояния* этого атома.

Заметим, что энергия ионизации любых атомов, т. е. работа, которую нужно затратить для удаления одного внешнего электрона из атома, имеет порядок 10 эВ. Мы обсудим этот вопрос позднее.

24. Рассмотрим теперь, каким образом слабость электромагнитных сил, т. е. малость константы связи α , проявляется в строении атома водорода. При константе связи порядка единицы следовало бы ожидать, что размеры атома будут порядка естественной единицы длины в квантовой электродинамике. Эта единица равна, как мы знаем, комптоновской длине волны $\lambda_e = \hbar/mc$. В действительности константа связи гораздо меньше единицы ($\alpha = 1/137$), и кулоновское поле ядра поэтому недостаточно сильно, чтобы удержать электрон на расстоянии порядка комптоновской длины волны. В естественных квантовомеханических единицах орбита электрона оказывается *большой*, радиус ее $a_0 = \hbar/\alpha$.

Скорость электрона на орбите мы получим, решая уравнение (23b) относительно v :

$$v = \sqrt{e^2/ma_0} = \alpha c, \quad (24a)$$

что в 137 раз меньше нашей естественной единицы скорости, равной скорости света c . Такое значение скорости подтверждает сделанное нами выше предположение о нерелятивистском характере задачи.

Кинетическая E_k и потенциальная E_p энергии электрона в атоме равны соответственно

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m(\alpha c)^2}{2} = R_\infty, \quad (24b)$$

$$E_p = -e^2/a_0 = E - E_k = -2R_\infty = -2E_k. \quad (24c)$$

Мы приходим к выводу, что атом водорода есть относительно слабо связанная протяженная система.

Читателю следует тщательно обдумать как этот результат, так и роль постоянной тонкой структуры в теории атома.

25. Полуклассическое рассмотрение привело нас к выводу, что скорость электрона в атоме мала. Поэтому можно надеяться, что для описания атома окажется достаточной нерелятивистская квантовая механика. В этой теории скорость света c не играет никакой

*) Индекс ∞ в R_∞ и \tilde{R}_∞ означает, что мы имеем дело с моделью, в которой масса протона бесконечно велика. Действительное значение энергии ионизации немного меньше.

роли, а фундаментальными константами являются m , \hbar и e . В частности, боровский радиус и энергия ионизации могут быть выражены лишь через эти константы:

$$a_0 = \hbar_e / \alpha = \hbar^2 / m e^2, \quad (25a)$$

$$R_\infty = \alpha^2 m c^2 / 2 = e^2 / 2 a_0 = e^4 m / 2 \hbar^2. \quad (25b)$$

В правой части этих формул скорость света отсутствует. Заметим также, что длина a_0 — это единственное значение длины, а энергия R_∞ — единственное значение энергии, которую можно образовать из констант \hbar , m и e . Эти величины возникают в нерелятивистской квантовой механике, которая пока читателю неизвестна. Мы можем ожидать, что любые значения длины и энергии, вычисляемые в такой теории, будут выражаться через некоторый численный множитель и константы a_0 или R_∞ соответственно. (Под выражением «численный множитель» мы понимаем здесь число, которое не зависит от трех констант m , \hbar и e ; можно ожидать, что в «разумной» теории эти числа будут «порядка единицы».)

26. По-видимому, все эти «выводы» и оценки вызывают у читателя чувство неудовлетворения. Действительно, какое значение могут иметь доводы, основанные на применении боровской модели, если мы сами объявили ее совершенно неверной? И насколько можно принимать всерьез выводы, полученные из соображений размерности? Чему все же равны численные множители «порядка единицы», которые должны давать правильные значения энергии в единицах R_∞ ? Может быть, они равны, скажем, 4711 или $(2\pi)^{-4}$? Такое различие в численных множителях весьма существенно скажется на наших оценках.

Ответ заключается в том, что этот множитель в действительности равен единице. По поводу «простых выводов» такого типа скептик мог бы заметить, что они хороши в тех случаях, когда нам заранее известны результаты опыта или более полной теории.

Чтобы отстоять ход наших рассуждений, заметим следующее:

1) Наша цель заключается в определении порядка величин атомной и молекулярной физики. Вместо того чтобы просто сообщить читателю, что энергия ионизации водорода равна $13,6$ эВ, мы пытались выразить эту величину через фундаментальные константы. Оказалось, что

$$13,6 \text{ эВ} = \alpha^2 m c^2 / 2, \quad 0,53 \text{ \AA} = (1/\alpha) (\hbar/mc).$$

Это очень красивые результаты. Обсуждение идей квантовой электродинамики в приложении к атому водорода дало нам *некоторое* понимание полученных зависимостей. Высказанные идеи находят свое подтверждение в полной теории. Наши «выводы» можно, таким образом, считать некоторым мнемоническим правилом.

2) Теорию Бора нельзя считать верной. Читатель мог видеть, что в некоторых случаях она дает правильные результаты и совершенно неправильные в других. По-видимому, такая теория содержит в себе какие-то элементы истины. Теория Бора ввела в физику

постоянную Планка в виде соотношения $gr \sim \hbar$, связывающего координату и импульс электрона. В классической физике эти величины независимы.

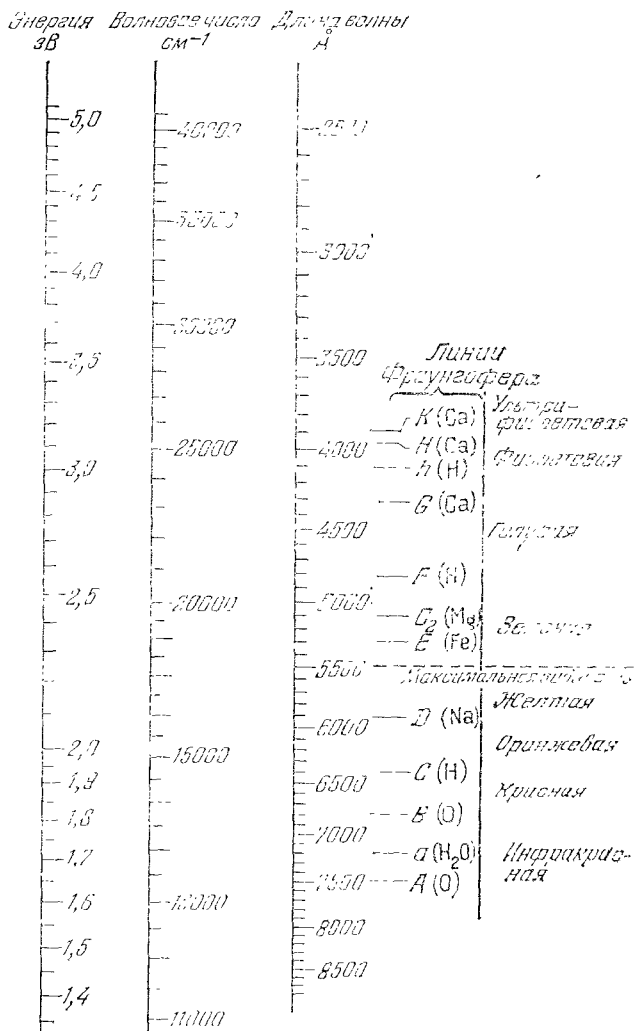


Рис. 26А. Видимая часть спектра и примыкающие к ней области. Линиями Фраунгофера называют знаменитые линии поглощения (темные линии) в спектре Солнца. В левом столбце приведены старые обозначения этих линий, а в скобках указаны химические обозначения атомов или молекул, вызывающих поглощение. Цвета, указанные для различных областей спектра, являются, конечно, приблизительными. Заметим, что максимальная «видимость» приходится на длину волны 5500 Å.

Все выводы, сделанные нами из теории Бора, были следствием этого соотношения $gr \sim \hbar$, являющегося частным случаем принципа неопределенностей. В дальнейшем мы не один раз к нему обратимся.

В частности, принцип неопределенностей позволит нам оценить энергию ионизации атома водорода.

3) Рассмотренные в п. 25 соображения размерности вызывают большее доверие после серьезного изучения квантовомеханической теории атома водорода. Эта теория основана на так называемом уравнении Шредингера. Чтобы понять, почему числа, подобные

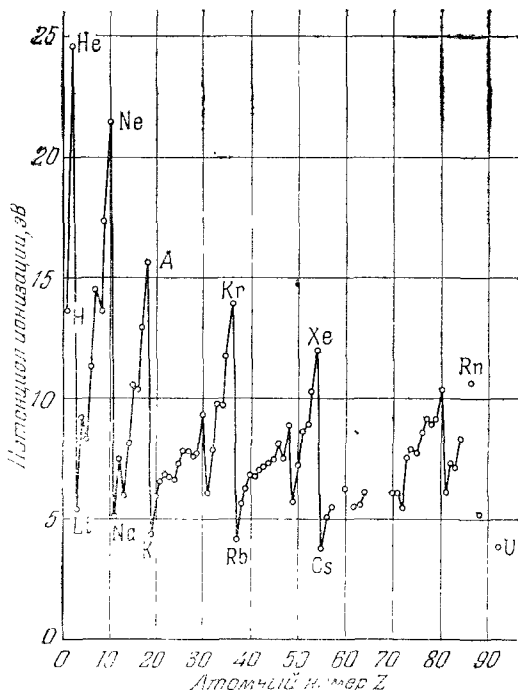


Рис. 27А. Зависимость потенциала ионизации атома от атомного номера. Потенциалом ионизации называется энергия, необходимая для вырывания электрона из нейтрального атома. Для всех атомов порядок величины этой энергии близок к 10 эВ. Читатель, немного знакомый с химией, заметит корреляцию между потенциалом ионизации и химическими свойствами элементов. Потенциал ионизации имеет наибольшее значение у благородных газов и наименьшее у щелочных металлов

4711 или $(2\pi)^{-4}$, появиться не могут, нет необходимости решать это дифференциальное уравнение, нужно знать его свойства. Соображения размерности работают лучше, если они сопровождаются хорошим пониманием общих свойств теории.

Наши выводы, основанные на простых соображениях размерности, были введением в рассуждения такого рода. Читатель слышал, что существует «хорошая» теория. Чего же можно ожидать от нее? Позже мы ответим на этот вопрос.

27. Вернемся к изучению атомной физики и попытаемся получить общее представление о строении тяжелых атомов, т. е. атомов с большим значением атомного номера Z . Читатель, без сомнения, слышал, что электронное облако таких атомов имеет слоистую, или оболочечную, структуру, т. е. состоит из нескольких слоев, и мы

постараемся понять, почему это происходит. Вообразим, что мы строим атом. Начав с голого ядра, мы последовательно прибавляем один за другим всё новые электроны. Какова энергия связи первого электрона? В этом случае энергия системы

$$E = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2 Z}{r}. \quad (27a)$$

Очевидно, что сказанное об атоме водорода сохранит свое значение и здесь, если только постоянную тонкой структуры α заменить на αZ . Таким образом, энергия связи первого электрона равна

$$E_1 = -Z^2 R_\infty = -Z^2 13,6 \text{ эВ}, \quad (27b)$$

а его «расстояние» от ядра

$$r_1 = a_0 / Z. \quad (27c)$$

Для больших Z это расстояние мало по сравнению с боровским радиусом a_0 атома водорода. Следующий прибавленный нами электрон будет, подобно первому, находиться на малом расстоянии, и его энергия связи также будет велика по сравнению с энергией связи электрона в атоме водорода. Заметим, что электростатическая сила отталкивания обоих электронов при этом примерно в Z раз меньше силы их притяжения к ядру. Рассмотрим свойства иона, образовавшегося после добавления нескольких электронов. Электроны удерживаются на малых расстояниях от ядра, и если их число равно n , то на больших расстояниях ион действует как «ядро» с зарядом $(Z-n)e$. Каждый следующий электрон будет сильно связан, если $(Z-n)$ не мало, но эта связь будет слабее, чем связь первого электрона. Легко понять, что последующие электроны окажутся все менее и менее сильно связанными. После прибавления $Z-1$ электронов электростатическое поле иона будет подобно полю облака с зарядом e . Размер этого облака будет сравним с боровским радиусом a_0 . Поэтому энергия связи последнего прибавленного электрона будет порядка R_∞ , т. е. около 10 эВ. Окончательный размер атома из Z электронов будет порядка боровского радиуса a_0 .

28. Рассмотренная схема, конечно, слишком груба. Заметим, что мы не только не доказали, но и не сделали правдоподобным представление о слоистом строении атома.

Чтобы понять строение атома, необходимо познакомиться с новым фундаментальным физическим законом, о котором мы до сих пор не упоминали и который совершенно чужд классической физике. Этот закон носит название *принципа Паули*, или *принципа исключения*. Принцип Паули гласит, что *в атоме не может быть двух электронов в одном и том же состоянии движения*. Электроны «избегают» друг друга. (Это явление не имеет ничего общего с кулоновским отталкиванием двух одинаково заряженных частиц. Понимание действительного значения и смысла принципа Паули требует знания квантовой механики.) Принцип Паули является основой понимания атомной структуры. Его значение огромно, и, если бы природа не следовала этому принципу, мир выглядел бы невообразимо иначе.

Принцип исключения был открыт Вольфгангом Паули в 1924 г. при исследовании эмпирических закономерностей в атомных спектрах *).

29. Итак, хотя наша модель атома весьма несовершенна, она все же дает некоторое представление о свойствах тяжелых атомов. Из нашей модели следует, например, что изменение состояния движения внешних (так называемых *оптических*) электронов связано с изменениями энергии, которые имеют порядок электрон-вольта. Эта энергия может быть излучена атомом в виде фотонов, принадлежащих к *видимой области* спектра. Энергия таких фотонов лежит в интервале 1,8—3,0 эВ, что отвечает длинам волн: 7000—4000 Å. Переходы, совершаемые *внутренними электронами*, отвечают значительно большим энергиям, доходящим до 70 кэВ, что соответствует длине волны 0,2 Å. Такие фотоны относятся к ультрафиолетовой или рентгеновской части спектра. Энергия, освобождающаяся при изменении состояния внутренних электронов, квадратично зависит от атомного номера Z , как видно из формулы (27b).

Мы отмечали уже, что атом, размеры которого близки к 1 Å, мал по сравнению с длиной волны оптических фотонов. Покажем, что это является непосредственным следствием малости константы связи α .

Энергия связи оптического электрона имеет порядок $\alpha^2 mc^2$. Таков же или меньше порядок энергии, освобождающейся при переходах, совершаемых оптическими электронами. При переходе такого электрона между двумя квазистационарными состояниями происходит поглощение или испускание фотона, энергия которого равна разности энергий обоих состояний. Соответствующая таким фотонам длина волны имеет порядок

$$\lambda_{\text{опт}} \approx 2\pi\hbar c / \alpha^2 mc^2 = 2\pi a_0 / \alpha \approx 1000 a_0, \quad (29a)$$

что объясняет порядок величины отношения размеров атома к длине волны.

30. Мы теперь довольно хорошо познакомились с численными значениями различных физических величин, характеризующих атом. Нам остается сказать кое-что о молекулах. Здесь основной проблемой является природа молекулярной связи. Почему некоторые комбинации атомов образуют стабильные молекулы, а другие их не образуют? Чтобы ответить на подобные вопросы, необходимо глубокое понимание квантовой механики. Тем не менее мы попытаемся ответить на наш вопрос хотя бы частично, но сперва займемся другим. Установив, что в некоторых случаях данные атомы образуют стабильную молекулу, зададимся вопросом: какова соответствующая энергия связи этих атомов в молекуле и какого порядка будет расстояние между атомами?

Обратимся к простейшему случаю, каким является молекула водорода, которая представляет собой связанное состояние двух про-

*) *Pauli W. Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur des Spectren.*— Zs. f. Phys. 1925, v. 31, p. 765.

Таблица 30А. Свойства некоторых двухатомных молекул

Молекула	Расстояние между ядрами, Å	Энергия диссоциации, эВ	Молекула	Расстояние между ядрами, Å	Энергия диссоциации, эВ
AgH	1,62	2,5	HF	0,92	6,4
BaO	1,94	4,7	HgH	1,74	0,38
Br ₂	2,28	1,97	KCl	2,79	4,42
CaO	1,82	5,9	N ₂	1,09	9,76
H ₂	0,75	4,5	O ₂	1,20	5,08
HCl	1,27	4,4			

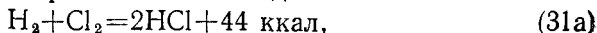
тонов и двух электронов. Попытаемся подойти к вопросу об энергии связи и расстоянии между протонами, исходя из соображений размерности. Заметим, что мы рассматриваем те благоприятные случаи, когда связь заведомо существует, как в молекуле водорода.

Поскольку масса протонов много больше массы электронов, опять можно пренебречь движением протонов при определении энергии основного состояния молекулы водорода. В первом приближении можно считать, что оба протона находятся на фиксированном расстоянии d друг от друга и окружены «облаком» из двух электронов. Допустим, что мы нашли энергию основного состояния двух электронов и ее зависимость от расстояния d . Для определенного значения d , соответствующего стабильной молекуле, эта энергия будет минимальной. Наша задача является нерелятивистской, и поскольку мы считаем протоны бесконечно тяжелыми, то в нашем распоряжении остаются константы m , \hbar и e . Единственной «естественной» энергией при этом будет R_∞ , а единственной «естественной» длиной — боровский радиус a_0 . Эти величины и характеризуют молекулу водорода. Более подробное рассмотрение подтверждает эту оценку, которая к тому же находится в согласии с опытом. Энергия связи молекулы водорода равна 4,5 эВ, а среднее расстояние между протонами составляет 0,75 Å (табл. 30А). Эти значения вообще типичны для молекул: их энергии связи лежат в пределах 1—10 эВ, а межъядерное расстояние имеет порядок 1 Å (10^{-8} см).

В твердом теле действует тот же «механизм» связи, что и в молекуле, и расстояние между двумя соседними атомами твердого тела также имеет порядок 1 Å.

31. Приведенные оценки дают понятие об энергии, выделяемой или поглощаемой в химических реакциях. Элементарный процесс в случае химических реакций заключается в том, что две или несколько молекул сталкиваются, образуя одну или несколько других молекул. Связанная с этим элементарным процессом энергия должна быть порядка молекулярной энергии связи, т. е. лежит в пределах 1—10 эВ. Полная энергия реакции, приходящаяся на моль вещества, будет порядка $(1-10)N_0$ эВ/моль, что составляет около 20—200 ккал/моль.

В качестве примера рассмотрим сгорание газообразного водорода в атмосфере хлора. Эта реакция имеет вид



и количество выделяющейся теплоты находится в согласии с нашими оценками.

32. Среди макроскопических единиц существует одна, заслуживающая более подробного рассмотрения. Мы отмечали, что такие единицы, как *сантиметр*, *грамм* и *секунда*, взяты из повседневного человеческого опыта, поэтому неудивительно, что они оказываются малоудобными в мире атомных явлений. Существует, однако, одна макроскопическая единица, находящаяся в особом положении. Мы имеем в виду единицу потенциала *вольт*. После умножения вольта на заряд электрона получаем новую единицу — *электрон-вольт*, которая кажется специально созданной для атома. Случайно ли это?

Нет, не случайно. Первоначальный выбор вольта в качестве единицы разности потенциалов был связан с тем, что э. д. с. гальванических элементов как раз такого порядка. Например, э. д. с. кадмиево-ртутного элемента очень близка к 1 В. Мы знаем, что действие гальванических элементов основано на происходящих в них электрохимических реакциях и каждому электрону, покидающему катод батареи, соответствует некоторый элементарный химический процесс. В этом процессе освобождается некоторое количество энергии (равное, скажем, X), которая может перейти в работу или в некоторое количество теплоты, выделяемое за пределами батареи. Если э. д. с. батареи равна U , то $Ue = X$, и поскольку в качестве единицы э. д. с. мы принимаем вольт, то энергия, выделяемая в элементарном электрохимическом процессе, будет порядка электрон-вольта. Вот почему электрон-вольт оказывается единицей, как бы специально придуманной для мира атомов и молекул.

Наиболее важные факты физики ядра

33. Ядра построены из протонов и нейтронов. Эти частицы имеют очень близкие свойства, и их часто рассматривают как два различающихся *зарядами* состояния одной частицы, называемой *нуклоном*. Таким образом, возможны два состояния нуклона: заряженное состояние (протон) и нейтральное состояние (нейтрон)*).

Число A нуклонов в ядре называется *массовым числом* или *нуклонным числом* ядра. Число Z протонов называется *зарядовым числом* ядра или *атомным номером*, если мы имеем в виду соответствующий атом.

Массы протона и нейтрона равны:

$$\begin{aligned} M_p &= (1,00727663 \pm 0,00000008) \text{ а. е. м.} = \\ &= (938,256 \pm 0,005) \text{ МэВ}/c^2, \end{aligned} \quad (33a)$$

$$\begin{aligned} M_n &= (1,0086654 \pm 0,00000004) \text{ а. е. м.} = \\ &= (939,550 \pm 0,005) \text{ МэВ}/c^2. \end{aligned} \quad (33b)$$

*) Нейтрон был открыт Чадвиком в 1932 г. (*Chadwick J. The Existence of a Neutron.— Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 1932, v. 136, p. 692.*)