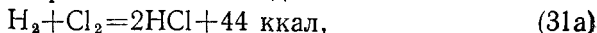


В качестве примера рассмотрим сгорание газообразного водорода в атмосфере хлора. Эта реакция имеет вид



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.*)

Рассмотрим ядро с массовым числом A и зарядовым числом Z . Обозначим его массу через $M(A, Z)$. Величина

$$\Delta(A, Z) = (ZM_p + (A-Z)M_n) - M(A, Z) \quad (33c)$$

называется *дефектом массы ядра*. Дефект массы всегда *положителен*. Действительно, величина $\Delta(A, Z) c^2$ равна энергии связи ядра, т. е. энергии, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на

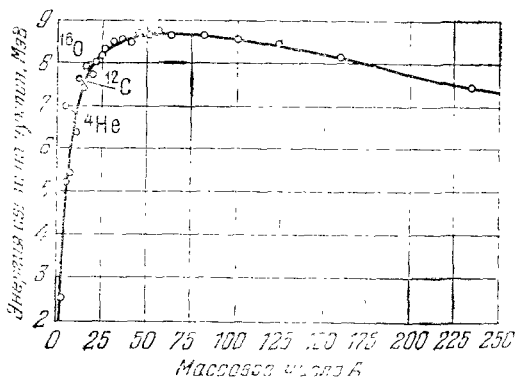


Рис. 33А. Зависимость энергии связи на нуклон $\Delta(A, Z) c^2 / A$ от массового числа A . Точки отвечают определенным ядрам, часть которых указана на графике. В области легких ядер существуют нерасулярности, и для $A > 25$ экспериментальные точки хорошо ложатся на сплошную кривую. Энергия связи на один нуклон в среднем близка к 8 МэВ и при возрастании массового числа постепенно уменьшается. Это систематическое уменьшение происходит из-за увеличения электростатического отталкивания между протонами ядра.

протоны и нейтроны. Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, *приблизительно* постоянна для всех стабильных ядер и близка к

$$\Delta(A, Z) c^2 / A \sim 8 \text{ МэВ}. \quad (33d)$$

Это надежно установленный *опытный* факт. Среди легких ядер есть несколько заметных исключений из этого правила. Кроме того, имеет место систематическое уменьшение энергии связи на нуклон по мере возрастания A . Это хорошо показано на рис. 33А.

34. Следует помнить, что записанные в большинстве таблиц значения масс «ядер» в действительности относятся к нейтральным атомам.

Пусть $M(A, Z)$ — масса ядра, а $\bar{M}(A, Z)$ — масса соответствующего атома, тогда

$$\bar{M}(A, Z) = M(A, Z) + Zm - B(Z). \quad (34a)$$

Здесь m — масса электрона, а положительная величина $B(Z)$ есть энергия связи всех электронов в атоме.

При вычислении энергетического баланса некоторой ядерной реакции в большинстве случаев все равно, пользуемся ли мы значениями истинных масс ядер или значениями масс соответствующих атомов. Действительно, в последнем случае вклады от электронных масс компенсируются, а энергия связи $B(Z)$ очень мала по сравнению

с ядерной энергией связи, близкой к 8 МэВ на нуклон, и ею почти всегда можно пренебречь.

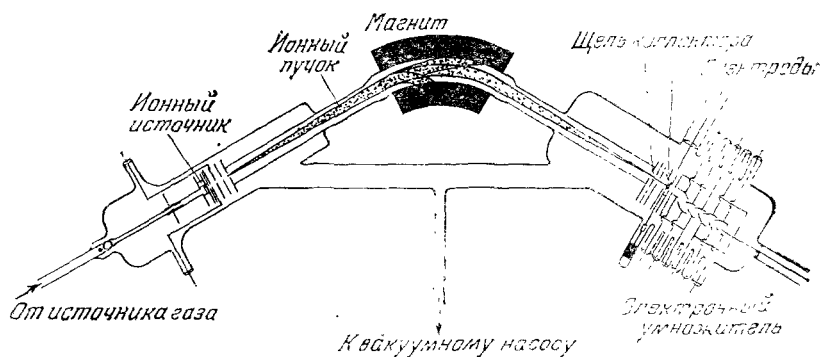
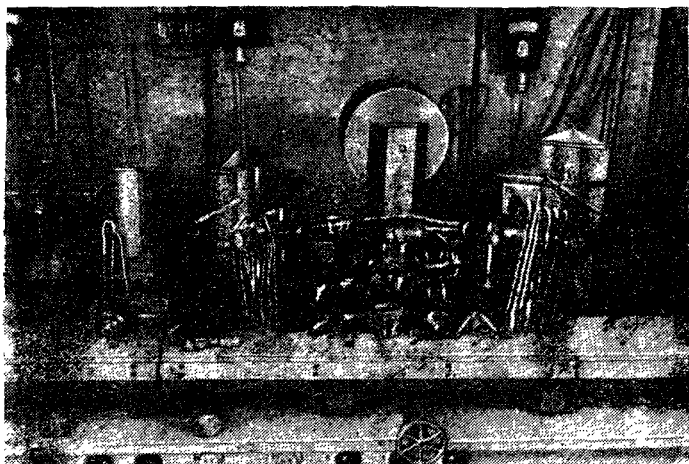


Рис. 34А. Масс-спектрометр для анализа малых количеств благородного газа в метеоритах. Назначение прибора — не точное измерение атомных масс, а определение относительной распространенности различных изотопов ксенона. Полученные данные используются для определения возраста метеоритов, что очень важно для понимания происхождения и эволюции Солнечной системы (Reinolds J. H. The Age of the Elements in the Solar System. — Scientific American, 1960, v. 203, p. 171). Вверху дана фотография масс-спектрометра, а внизу — его схема. Благородный газ, выделенный из метеорита, ионизуется ударами электронов в специальном ионном источнике. Ускоренные электрическим полем ионы отклоняются магнитом. Разные изотопы испытывают различное отклонение, и, меняя индукцию магнитного поля, можно измерить ток на коллектор, соответствующий каждому изотопу. Распространенность изотопа пропорциональна этому току. Краевая неоднородность магнитного поля помогает фокусировке ионов на щель коллектора

Причина, по которой в таблицах приведены массы атомов, а не ядер, заключается в том, что массы атомов легче измерить. Отклоняя ионы различных атомов в электрическом и магнитном полях, можно определить отношение их заряда к массе. Соответствующие приборы называются *масс-спектрометрами*. Масс-спектрометриче-

ские исследования, начатые работами Дж. Дж. Томсона и Ф. Астона, дали нам точные значения атомных масс *).

Другим источником сведений о массах ядер является изучение кинематики ядерных реакций.

35. С увеличением массового числа A отношение Z/A обнаруживает систематическое изменение. Для не слишком тяжелых ядер,

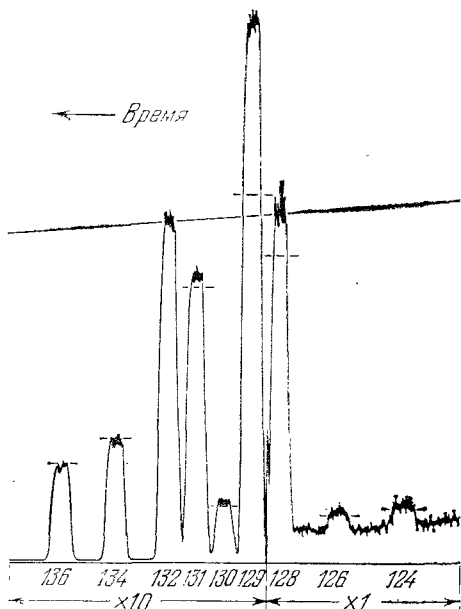


Рис. 34В. Спектр масс, полученный с помощью прибора, показанного на рис. 34А, для ксенона в метеоритах. Короткими горизонтальными линиями показана распространенность изотопов ксенона в земных образцах. Мы видим, что метеоритный ксенон обогащен изотопом ^{129}Xe . Заметим, что кривая распространенности изображена в двух различных вертикальных масштабах

когда A меньше 50, отношение Z/A близко к 0,5. С увеличением A отношение Z/A медленно уменьшается, и, например, для изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$ оно равно 0,39. Для очень малых A мы опять обнаруживаем нерегулярность: водород, например, имеет три изотопа — ^1_1H , ^2_1H (дейтерий) и ^3_1H (тритий).

Некоторые ядра стабильны, тогда как другие нестабильны и испускают частицы или γ -излучение. Обычно встречающиеся в природе ядра либо абсолютно стабильны, либо имеют чрезвычайно большие времена жизни. Если бы этого не было, то они распались бы еще в ранней стадии истории Земли и не существовали бы в настоящее время. Ядра, образующиеся в ядерных реакциях, могут иметь весьма короткие времена жизни — порядка малых долей секунды. Если время жизни *очень* мало, мы часто говорим

*) Aston F. W. Isotopes and Atomic Weights.— Nature, 1920, v. 105, p. 617; см. также: Астон Ф. Масс-спектры и изотопы.— М.: ИЛ, 1948.

о возбужденном состоянии ядра, особенно в том случае, когда оно испускает γ -излучение и, следовательно, A и Z ядра остаются неизменными.

В настоящее время известно около 900 ядер, из них 280 стабильных. Если мы изобразим эти ядра точками на плоскости (A, Z),

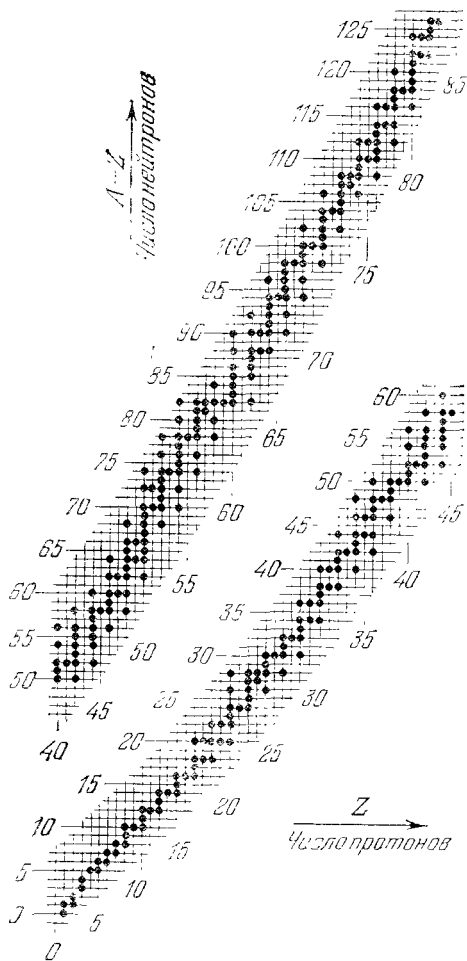


Рис. 35А. Стабильные и почти стабильные ядра. Показаны известные ядра, период полураспада T которых больше $5 \cdot 10^{10}$ лет. Это значение T несколько произвольно и взято потому, что оно приблизительно в десять раз больше оценки времени существования Солнечной системы. Таким образом, включенные в диаграмму ядра являются долгоживущими даже в геологическом масштабе времени. По оси абсцисс диаграммы (разделенной для удобства на две части) отложено число протонов Z , а по оси ординат — число нейтронов $A-Z$. Очевидно, что все ядра группируются в пределах довольно узкой полосы. Для легких ядер число нейтронов приблизительно равно числу протонов, но с увеличением A рост $A-Z$ опережает рост Z . Наиболее важным выводом из этой диаграммы является зависимость стабильности ядер от того, будут ли числа $A-Z$ и Z четными или нечетными. Эта зависимость имеет следующий характер: четно-четные ядра наиболее стабильны, четно-нечетные (и нечетно-четные) ядра менее стабильны, а нечетно-нечетные ядра наименее стабильны. Проверьте эту зависимость, тщательно изучив диаграмму. Вы обнаружите на ней всего несколько нечетно-нечетных ядер. При некоторых значениях $A-Z$ и Z стабильные ядра вообще отсутствуют. Этим «пробелам» всегда соответствуют нечетные значения $A-Z$ и Z .

то, в соответствии со сказанным выше, точки расположатся вдоль широкой полосы (рис. 35А). Чем дальше ядро отстоит от центральной области этой полосы, тем более оно нестабильно.

36. Эксперименты показали, что ядро в первом приближении можно считать сферой, радиус которой

$$r \approx r_0 A^{1/3}, \text{ где } r_0 \approx 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ см} = 1,2 \text{ ферми} \quad (36a)$$

(единица 10^{-13} см часто используется в ядерной физике в качестве единицы длины; она названа ферми в честь Энрико Ферми). Объем ядра пропорционален r^3 , а следовательно [см. формулу (36a)], пропорционален массовому числу A . Отсюда мы делаем заключение, что плотность ядерного вещества приблизительно постоянна.

Многочисленные экспериментальные методы позволили определить размеры ядра. Наиболее прямой из них заключается в измерении эффективной поверхности поперечного сечения, которую образует ядро для пучка частиц высокой энергии в опытах по рассеянию.

37. Попытаемся дать характеристику тех главных свойств ядерных сил, которые удерживают протоны и нейтроны в пределах ядра. Эксперименты показали следующее.

1) Ядерные силы невозможно свести к силам электромагнитной природы. Они гораздо больше электромагнитных сил.

2) Радиус действия ядерных сил мал. Он не превышает 10^{-12} см. Поэтому их называют короткодействующими силами.

3) Ядерные силы между двумя протонами и двумя нейтронами равны. Кроме того, ядерные силы, действующие между двумя протонами, имеют ту же природу, что и силы, действующие между протоном и нейтроном. Можно было бы сказать, что они просто равны, но это утверждение требует пояснений.

Экспериментальные доказательства трех перечисленных утверждений следуют из опытов по рассеянию нуклонов, а также из систематического изучения энергетических уровней стабильных и радиоактивных ядер. Так, короткодействующий характер ядерных сил можно подтвердить следующим образом. Направим на ядра полученный на ускорителе пучок протонов большой энергии и будем изучать их рассеяние. Когда протоны находятся далеко от ядра (на расстоянии 10^{-11} — 10^{-12} см), единственной силой, действующей на них, является кулоновское отталкивание. Это отталкивание не дает протонам приблизиться к зоне действия ядерных сил, если только энергия протонов не очень велика. Поэтому, если утверждение о малом радиусе действия ядерных сил справедливо, то протоны (или другие заряженные частицы, например α -частицы в опыте Резерфорда) не слишком большой энергии будут рассеиваться так, как если бы кулоновское отталкивание было единственной испытываемой ими силой. Таким образом, второе утверждение можно проверить с помощью опытов по рассеянию. Эти опыты подтверждают короткодействующий характер ядерных сил.

Поскольку протоны заряжены, то на них могут действовать также электромагнитные силы, а два протона в ядре, несомненно, испытывают кулоновское отталкивание. На расстояниях, много больших 10^{-12} см, остаются практически одни лишь электромагнитные силы, а на малых расстояниях преобладают ядерные силы. Электромагнитные силы играют некоторую роль в строении ядра, но роль эта второстепенная.

К сказанному необходимо добавить, что электроны совершенно не испытывают действия ядерных сил. На них действуют лишь электромагнитные силы.

38. Рассмотрим некоторые следствия из короткодействующего характера ядерных сил. Согласно современным представлениям о характере этих сил, эффективный потенциал взаимодействия между двумя нуклонами для расстояний r , больших 10^{-13} см, можно представить функцией *)

$$U(r) \approx C \frac{b}{r} \exp\left(-\frac{r}{b}\right). \quad (38a)$$

Константа b задает порядок радиуса действия сил; ее значение $b = 1,4 \cdot 10^{-13}$ см. Константа C определяет значение силы. Природа сил на расстояниях, меньших 10^{-13} см, оказывается более сложной. Ее нельзя выразить потенциалом (38a).

Следует иметь в виду, что функция $U(r)$ не дает точного описания взаимодействия между двумя нуклонами. Она передает, однако, наиболее существенное свойство этого взаимодействия, а именно экспоненциальное падение потенциала с расстоянием.

Посмотрим, что означает такое падение. На расстоянии $r = b$ мы имеем $U(b) = C/e$. (Эта величина порядка 10 МэВ.) Когда расстояние увеличивается до $r = 10b = 1,4 \cdot 10^{-12}$ см, потенциал принимает значение $U(10b) = 0,1C \exp(-10) \approx 5 \cdot 10^{-6} C$, а на расстоянии $r = 100b = 1,4 \cdot 10^{-11}$ см потенциал равен

$$U(100b) = 0,01 C \exp(-100) \approx 10^{-15} C.$$

Этот численный пример показывает, что ядерными силами можно практически полностью пренебречь, если расстояние между нуклонами превосходит 10^{-11} см. Читателю следует тщательно обдумать выражение (38a). На первый взгляд этот потенциал напоминает кулоновский, однако, как видно из нашего примера, экспоненциальный множитель коренным образом меняет ситуацию.

Благодаря такому свойству ядерных сил они не играют практически никакой роли в молекулах и твердых телах. Здесь все явления почти полностью определяются электромагнитными силами. На малых расстояниях ($r \sim 10^{-13}$ см) ядерные силы значительно превосходят электромагнитные и роль последних становится второстепенной. Справедливость этого утверждения непосредственно следует из самого факта существования ядер. Электростатические силы отталкивания стремятся растолкать протоны

*) В гл. 9 мы дадим теоретическое объяснение такой форме потенциала $U(r)$

в ядре, тогда как \sum ядерные силы действуют в противоположном направлении. Ядро существует, и, следовательно, ядерные силы преобладают.

39. Энергия связи ядер имеет порядок 8 МэВ на нуклон, поэтому можно ожидать, что различные превращения ядер требуют энергии порядка 1 МэВ. Действительно, энергии различных частиц и γ -квантов, испускаемых ядрами, лежат в пределах примерно от 100 кэВ до 10 МэВ. Эти величины на 5—7 порядков отличаются от энергий, характерных для химических реакций, и это объясняет нам, почему химические процессы не затрагивают ядер. С точки зрения химии и атомной физики ядро представляет собой очень малую, жесткую, тяжелую и неделимую заряженную сферу.

При рассмотрении атома мы показали, что длина волны оптического γ -кванта велика по сравнению с размерами атома. Аналогичная ситуация существует и в ядерной физике. Рассмотрим γ -квант с энергией 1 МэВ. Эта величина типична для ядерных переходов. Соответствующая длина волны ($\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10}$ см = = 1200 ферми) велика по сравнению с размерами ядер.

Гравитационные и электромагнитные силы

40. Теперь мы объясним, почему, рассматривая атомы, молекулы и ядра, можно пренебречь гравитационными силами. Для отношения гравитационной и электромагнитной сил, действующих между двумя протонами, мы имеем следующее выражение:

$$\frac{M_p^2 G / r^2}{e^2 / r^2} = \frac{M_p^2 G}{e^2} = 8,1 \cdot 10^{-37}, \quad (40a)$$

где $G = 6,6720 \cdot 10^{-8}$ дин·см²/г² — гравитационная постоянная.

Это отношение чрезвычайно мало, и при наличии электромагнитного взаимодействия силами гравитации можно полностью пренебречь. Они имеют значение только в том случае, если остальные известные нам взаимодействия не играют роли. Примером может служить гравитационное взаимодействие между двумя (большими) электрически нейтральными телами, расстояние между которыми велико по сравнению с характерными атомными размерами.

Общая теория относительности Эйнштейна является чисто *геометрической* теорией гравитации. Это великолепная теория, обладающая внутренней согласованностью. Но, несмотря на многие попытки Эйнштейна и других физиков, до сих пор не удалось охватить этой теорией другие силы природы. Таким образом, явление гравитации занимает особое положение и отделено от взаимодействий, определяющих строение вещества на микроскопическом уровне. Кажется, что к микрофизике гравитация не имеет никакого отношения, поэтому мы исключаем ее из этой книги.

Читатель, возможно, заметил, что отношение (40a) представляет собой отношение гравитационной постоянной в естественных микроскопических единицах к постоянной тонкой структуры. В со-