

электродами  $P_1$  и  $P_2$  и вызывается потоком электронов, движущихся перпендикулярно к плоскости чертежа и пересекающих эту плоскость в точке  $S$  (фокусировка пучка электронов на точке  $S$  осуществляется магнитным полем соленоида  $J$ ). Образующиеся в этой области ионы втягиваются слабым электрическим полем в щель пластины  $P_2$ . Далее эти ионы, имеющие почти одинаковые скорости, ускоряются сильным электрическим полем между  $P_2$  и  $P_3$ , и, проходя щель  $P_3$ , попадают в поперечное магнитное поле. Совокупное действие приводит к расщеплению потока ионов на пучки с различными массами. Подбирая должным образом напряженности магнитного и электрического полей, можно добиться, что,

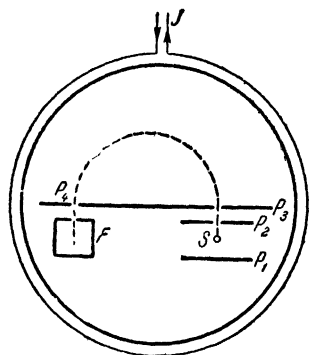


Рис. 343. Схема масс-спектрометра Блэки.

одинаковой массой попадут через щель  $P_4$  в цилиндр Фарадея  $F$ , стекание заряда с которого измеряется гальванометром.

## § 86. Состав ядер. Изотопы. Атомные единицы массы и энергии

Изучение масс-спектрограмм позволило устанавливать состав ядер. Это, однако, оказалось возможным только после того, как были открыты (в начале 30-х годов) нейтроны (§ 90) и выяснилось, что ядра состоят из протонов и *нейтронов* — незаряженных частиц, обладающих массой, близкой к массе протона, имеющих, так же как и протон и электрон, спин, равный  $\frac{1}{2}$  (в единицах  $\frac{h}{2\pi}$ ), и магнитный момент, несколько меньший, чем у протона (почти в 1000 раз меньший, чем у электрона).

В первый период развития ядерной физики считали, что ядра состоят из протонов и электронов и заряд ядра равен разности числа протонов и числа электронов. Однако по мере накопления экспериментальных данных стало выясняться, что такое представление о строении ядра находится в противоречии с опытом.

Действительно, атомные ядра имеют магнитные моменты по порядку величины такие же, как у протона и нейтрона; это было бы необъяснимо, если предполагать, что внутри ядер находятся электроны, магнитные моменты которых в 1000 раз больше. Предположение о наличии электронов в ядрах противоречит также экспериментально наблюдаемым значениям их спинов <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Например, по спектроскопическим данным найдено, что спин ядра  ${}^7\text{N}^{14}$  равен 1. Если бы в ядре находились электроны (т. е. ядро состояло бы из 14 про-

Советский ученый Д. Д. Иваненко на основании подобных соображений первый (в 1932 г.) установил, что электроны не входят в состав атомных ядер и что, стало быть, *заряд ядра*, как это общепризнано сейчас, *полностью определяется числом протонов в ядре*.

Поскольку число протонов в ядре любого атома совпадает с атомным номером элемента, а массы протона и нейтрона различаются весьма мало, то, следовательно, число нейтронов в ядре дополняет атомный номер  $Z$  (число протонов) до атомного веса  $M$  или, вернее, до ближайшего к атомному весу целого числа  $A$ , которое называют *массовым числом*. Таким образом, ядро любого атома состоит из  $Z$  протонов и  $A - Z$  нейтронов. Так задача выяснения состава атомных ядер свелась к точному определению истинных атомных весов по измеренным величинам масс ионов.

Атомные веса некоторых элементов, найденные химическим путем, иногда значительно отличаются от целого числа. Причина этого была вскрыта еще в 1919 г. Астоном при первых же исследованиях масс-спектрограмм таких элементов, а именно: Астон обнаружил, что элементы, атомные веса которых значительно отличаются от целых чисел, дают в масс-спектрограмме, по меньшей мере, две и часто три, четыре и больше линий. Это означает, что такие элементы представляют собой в действительности смесь химически тождественных, но различающихся по весу атомов. Атомные ядра, которые имеют одинаковый заряд, но различную массу, называют *изотопами*. Ядра изотопов одного элемента состоят, следовательно, из одинакового числа протонов и разного числа нейтронов (ядра с одинаковым числом нейтронов и разным числом протонов носят название *изотонов*).

Изучение масс-спектрограмм показало, что во всех случаях атомные веса изотопов выражаются числами, которые отличаются от целых только на тысячные доли единицы (причина этого небольшого отличия атомного веса изотопов от целочисленного значения, т. е. от массового числа изотопа, разъяснена в § 113). Так, например, хлор, который по химическим данным имеет атомный вес 35,46, представляет собой смесь двух изотопов с атомными весами, очень близкими к числам 35 и 37; их обозначают символами  $\text{Cl}^{35}$ ,  $\text{Cl}^{37}$  (имеются и другие изотопы хлора, но ядра их неустойчивы). Аргон имеет изотопы с атомными весами, которые близки к числам 36, 38 и 40; в природной смеси эти изотопы дают средний атомный вес аргона 39,9 и т. д.

---

тонов и 7 электронов), то при любой комбинации их спинов, ориентированных параллельно или антипараллельно друг другу, результирующий спин ядра, как состоящего из нечетного числа частиц ( $14 + 7 = 21$ ), очевидно, был бы равен целому числу. Поскольку в действительности ядро  ${}^7\text{N}^{14}$  состоит из 7 протонов и 7 нейтронов, то легко объясняется, почему спин этого ядра равен 1: спины 12 частиц попарно ориентированы антипараллельно, а спины последних двух — параллельно.

Химические элементы, имеющие стабильные (т. е. нерадиоактивные) изотопы, входят в соединения, всегда сохраняя некоторую характерную для каждого элемента природную пропорцию изотопов. Так, для магния природным изотопическим составом является: 78,6% изотопа с атомным весом 24 ( $Mg^{24}$ ), 10,1% изотопа с атомным весом 25 ( $Mg^{25}$ ) и 11,3% изотопа с атомным весом 26 ( $Mg^{26}$ ).

В настоящее время для всех элементов известно всего около тысячи изотопов, большая часть которых, однако, является неустойчивыми, радиоактивными изотопами. Наибольшее число стабильных изотопов имеют элементы с четными атомными номерами. Так, молибден, ртуть, барий, неодим, иттербий (у всех этих элементов атомные номера четные) имеют по 7 нерадиоактивных изотопов, кадмий 8, а олово даже 10 стабильных изотопов. У элементов с нечетными атомными номерами, как правило, существует не более двух стабильных изотопов, а остальные радиоактивны. Многие из элементов с нечетными атомными номерами (например, фтор, натрий, алюминий, фосфор, кобальт и др.) имеют только по одному стабильному изотопу.

В ряде случаев изотопы соседних элементов имеют одинаковые массовые числа и, следовательно, почти совпадающие атомные веса. Например, массовое число 13 имеют изотоп углерода и изотоп азота; два изотопа азота обладают такими же массовыми числами (15 и 16), как и два изотопа кислорода, и т. д. Встречаются и тройные и даже четверные совпадения: например, изотопы с массовым числом 70 имеются у цинка, галлия и германия; изотопы с массовым числом 210 существуют у таллия, свинца, висмута, полония и т. д. Атомы с одинаковыми массовыми числами, но с различными порядковыми номерами и, следовательно, с неодинаковыми химическими свойствами называют *изобарами*.

Оба рода ядерных частиц, протоны и нейтроны, объединяют под общим названием *нуклоны*. Изобарные ядра характеризуются равенством суммарного числа протонов и нейтронов в ядре, т. е. равенством числа нуклонов.

На рис. 344 дана диаграмма, характеризующая состав ядер стабильных и некоторых радиоактивных изотопов. По оси абсцисс этой диаграммы отложено число протонов в ядре или, что то же, атомный номер элементов, символы которых для удобства пользования проставлены над осью абсцисс диагонально. На оси ординат отложено число нейтронов в ядре  $A-Z$ . Стабильные изотопы изображены черными кружками, радиоактивные — светлыми. Эта диаграмма показывает, что у легких элементов числа нейтронов и протонов в ядре почти одинаковы, и поэтому их массовые числа примерно равны удвоенному атомному номеру:  $A \approx 2Z$ . В ядрах тяжелых элементов число нейтронов значительно превышает число протонов; однако и для самых тяжелых элементов оно остается меньшим, чем удвоенное число протонов; для этих элементов все точки,

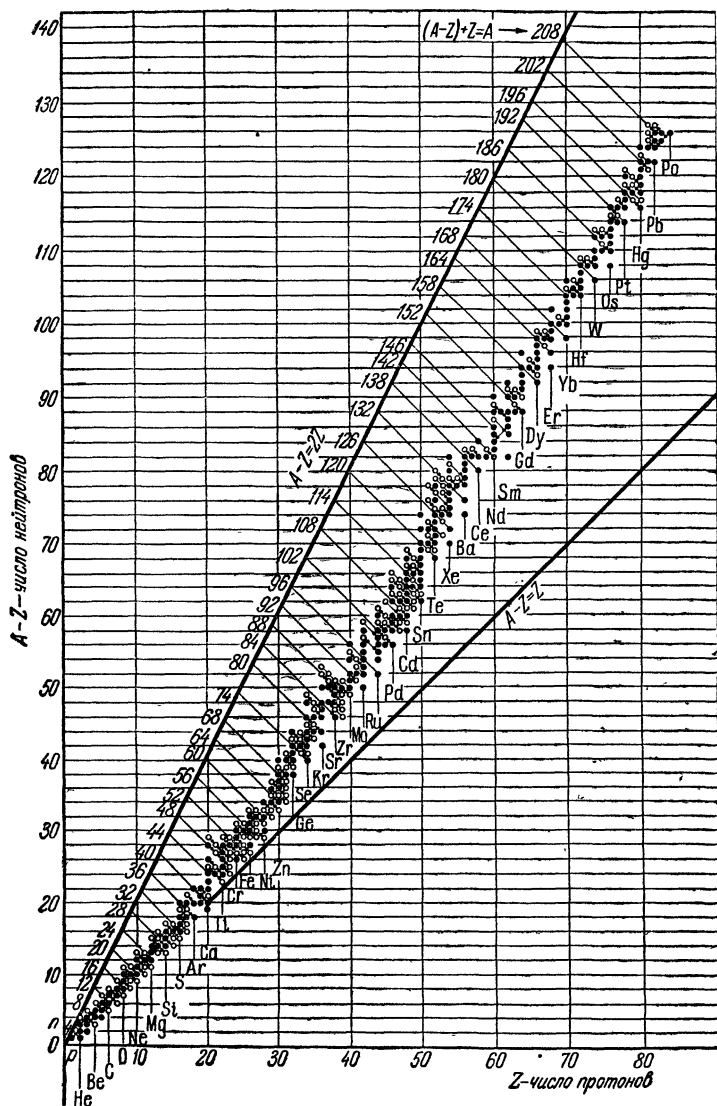


Рис. 344. Протонно-нейтронная диаграмма стабильных и некоторых радиоактивных ядер.

изображающие состав их ядер, лежат между прямыми  $A-Z=Z$  и  $A-Z=2Z$ . На второй из упомянутых прямых проставлены суммарные числа нуклонов в ядре, т. е. массовые числа  $A$ . Наклонные прямые, проведенные от этих чисел, объединяют изобарные ядра.

Мы видим, что в *протонно-нейтронной диаграмме* все существующие изотопы образуют сравнительно узкую полосу. Это означает, что даже относительно небольшие отклонения от нормального состава ядра делают их совершенно неустойчивыми.

Разделение изотопов, которое в ничтожных количествах осуществляется масс-спектрографом, в более или менее значительных масштабах является весьма трудным делом, так как химические свойства изотопов каждого элемента тождественны. Как уже упоминалось, во всех химических реакциях элементы сохраняют свой природный изотопный состав. Однако косвенно обменные химические реакции при их многократном повторении иногда позволяют получить обогащение элемента его наиболее легким или наиболее тяжелым изотопом; при этом используют то обстоятельство, что когда продукты реакции получают в виде двухфазной системы (жидкости и ее пара), то процентное содержание легкого изотопа в газообразной фазе оказывается несколько большим, чем в конденсированной.

Одним из методов разделения изотопов является метод, основанный на явлении диффузии. Коэффициент диффузии зависит от массы частиц и поэтому несколько различен для изотопов одного и того же элемента. Диффузионные аппараты для разделения изотопов (вернее, для обогащения нужным изотопом исходных веществ) состоят из множества звеньев, в каждом из которых осуществляется процесс диффузии. Во всех звеньях диффузионного аппарата диффузия происходит через пористое вещество или же осуществляется диффузия газа в струю паров ртути, уносящих газ, несколько обогатившийся легким изотопом.

На рис. 345 представлена схема процессов, применяемых при диффузионном методе обогащения природного урана актиноураном. Природный уран на 99,3% состоит из изотопа с массовым числом 238 и содержит только 0,7% актиноурана с массовым числом 235. Единственным соединением урана, имеющим высокую упругость пара, является шестифтористый уран; его и используют при диффузионном обогащении природного урана.

Газообразный  $UF_6$  сжимают в компрессоре, пропускают через холодильник (для отведения теплоты сжатия) и подают в камеры, где газ протекает вдоль одной стороны пористой перегородки, тогда как с другой ее стороны поддерживается более низкое давление. Скорость течения газа и режимы давления устанавливают такие, чтобы половина газа успевала продиффундировать через перегородку, а половина возвращалась в предыдущую ступень многокаскадной схемы обогащения. Продиффундировавший газ, имеющий

более низкое давление, сжимается вспомогательным компрессором и подается на точно такую же последующую ступень, а непродиффундировавший газ через дроссельный клапан, регулирующий величину давления, возвращается в предыдущую ступень. Высокое обогащение достигается в нескольких тысячах ступеней. Диаметр отверстий в пористой перегородке должен быть в несколько раз меньше длины свободного пробега для данного газа (т. е. должен быть не более 0,01 мк).

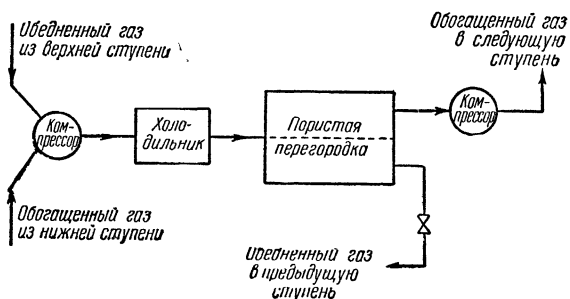


Рис. 345. Схема ступени диффузионного обогащения урана (газ  $UF_6$ ).

Существует метод разделения изотопов, основанный на использовании явления термодиффузии. Это явление заключается в том, что когда один конец трубки, содержащей смесь газов, сильно нагрет, а другой охлажден, то процентный состав смеси в нагретой и охлажденной частях трубки оказывается не вполне одинаковым.

Для разделения изотопов применяют также центрифуги, фракционную перегонку и другие методы.

**Тяжелый водород и тяжелая вода.** Для физики атомного ядра особый интерес представляют изотопы первых двух элементов периодической системы: водорода и гелия. Этот особый интерес к изотопам водорода и гелия объясняется тем, что электронная оболочка атомов указанных элементов, состоящая у водорода из одного электрона, а у гелия из двух, сравнительно легко может быть «сдрана» и в различных экспериментах могут быть исследованы ядра этих атомов.

В 1932 г. Юреем был открыт изотоп водорода с массовым числом 2. Этот изотоп в отличие от обычного водорода  $^1H$  называют *тяжелым водородом* или чаще *дейтерием* и обозначают символом  $^2H$  или D. В водороде, получаемом обычными химическими способами, дейтерий содержится в незначительных количествах: примерно из 30 000 атомов только один является атомом дейтерия.

При электролизе воды улетучивается главным образом обычный водород и оставшаяся вода обогащается тяжелым водородом. В сочетании с обменными реакциями электролиз воды позволяет

получить воду, у которой более чем 99,99% молекул содержит вместо атомов  $^1\text{H}$  атомы дейтерия  $^2\text{H}$ ; такая вода получила название *тяжелой воды*. Уже в 1933 г. Герц получил практически чистый газообразный дейтерий, в котором даже спектроскопическим путем нельзя было обнаружить присутствие атомов  $^1\text{H}$ . В настоящее время свойства дейтерия хорошо изучены; некоторые величины, характеризующие свойства этого вещества, приведены в помещенной ниже таблице.

Сопоставление физических свойств дейтерия и обычного водорода

	Дейтерий $^2\text{H}_2$ ( $\text{D}_2$ )	Обычный водород $^1\text{H}_2$
Тройная точка ( $\approx$ точка плавления), $^\circ\text{K}$ . . . . .	18,6	13,9
Точка кипения, $^\circ\text{K}$ . . . . .	23,5	20,4
Давление насыщенного пара, мм Hg		
при $13,9^\circ\text{K}$ . . . . .	5	54
» 18,6 . . . . .	121	429
» 20,4 . . . . .	257	760
» 23,5 . . . . .	760	1740
Теплота плавления 1 моля, кал . . . . .	48,9	28,0
Теплота испарения 1 моля, кал . . . . .	308,3	216,8
Мольный объем твердой фазы в тройной точке, $\text{см}^3$ . . . . .	24,17	26,15
Характеристическая температура $\Theta$ для $C_p$ твердой фазы (по Дебаю), $^\circ\text{K}$ . . . . .	89	91
Процент молекул, диссоциированных на атомы		
при $2500^\circ\text{K}$ . . . . .	0,6	1,3
» 3000 . . . . .	4	8

Из этой таблицы мы видим, что в данном случае масса атомного ядра довольно сильно влияет на молекулярные свойства, которые, вообще говоря, определяются не ядром, а строением электронной оболочки. Существенное различие молекулярных свойств дейтерия и обычного водорода, не наблюдаемое у изотопов других элементов, объясняется тем, что в данном случае отношение масс ядер несравненно более велико, чем у других элементов. Все приведенные в таблице числа свидетельствуют о том, что интенсивность молекулярного взаимодействия у дейтерия больше, чем у обычного водорода; соответственно этому дейтерий плавится и закипает при несколько большей температуре, чем обычный водород, требует больших затрат теплоты на плавление и испарение, имеет меньшую упругость пара и меньший мольный объем конденсированных фаз. Энергия междуатомного взаимодействия у дейтерия также несколько превышает энергию взаимодействия атомов обычного водорода, что сказывается в большей устойчивости молекул дейтерия при температурах, вызывающих термическую диссоциацию.

Физические свойства тяжелой воды, как видно из приведенной ниже таблицы, тоже заметно отличаются от свойств обычной воды. Плотность тяжелой воды при комнатной температуре почти на 11% превышает плотность обычной воды. Известно, что обычная вода имеет минимальный удельный объем при 4° С; у тяжелой воды минимум удельного объема наблюдается при 11,6° С. Тяжелая вода при охлаждении замерзает раньше обычной, при 3,8° С, и кипит при температуре, на 1,4° более высокой. Давление насыщенного пара у тяжелой воды меньше, чем у обычной, а мольная теплота испарения на 259 кал больше.

В отношении биологического действия тяжелая вода является плохим (а для некоторых простейших организмов и вредоносным) заменителем обычной воды.

Сопоставление физических свойств тяжелой и обычной воды

	Тяжелая вода	Обычная вода
Плотность при 20° С . . . . .	1,1059	0,9982
Температура максимальной плотности, °С . . . . .	11,60	4,0
Тройная точка (точка плавления), °С . . . . .	3,82	0,0
Точка кипения, °С . . . . .	101,42	100,0
Теплота парообразования, кал/моль . . . . .	9960	9700
Теплота плавления, кал/моль . . . . .	1510	1436
Поверхностное натяжение при 20° С, дин/см . . . . .	67,8	72,75
Диэлектрическая постоянная при 20° С . . . . .	80,7	81,5
Показатель преломления . . . . .	1,32844	1,33300
Вязкость при 0° С . . . . .	0,01685	0,01309

При облучении обычной воды нейтронами бóльшая их часть захватывается протонами водородных атомов, причем образуются ядра тяжелого водорода. Когда поток быстрых нейтронов попадает в тяжелую воду, то в результате соударений нейтронов с ядрами тяжелого водорода и кислорода их скорость быстро уменьшается, но захвата нейтронов не происходит и их число остается практически неизменным. В связи с этим тяжелую воду широко используют в ядерных реакторах (§ 107) как лучший *замедлитель нейтронов*. Для этой цели, несмотря на трудности и дороговизну производства, тяжелую воду вырабатывают в очень больших количествах (сотни тонн).

Газообразный дейтерий, ионизированный электрическими разрядами, применяют наряду с обычным водородом в качестве источника анодных лучей. В обоих этих случаях анодные лучи (*p*-лучи и *d*-лучи) представляют собой поток атомных ядер. В связи с широким использованием в ядерной физике *d*-лучей ядер атомов дейтерия присвоено особое название: *дейтоны* или *дейтроны*. Кроме



дейтерия существует еще сверхтяжелый изотоп водорода — *третий Н<sup>3</sup>*. Ядра трития называют *тритонами*.

В помещенной ниже таблице (стр. 428) приведены массы атомов ряда легких и средних элементов. Массы атомов в этой таблице выражены в *атомных* (или, что то же, в *ядерных*) *единицах массы*. Как уже упоминалось, в качестве атомной единицы массы в физической шкале принята  $1/16$  массы атома изотопа кислорода  $O^{16}$  (в отличие от химической шкалы, где за единицу массы принята  $1/16$  массы природной смеси изотопов кислорода: 99,76%  $O^{16}$ , 0,04%  $O^{17}$  и 0,2%  $O^{18}$ ). Так как грамм-атомом называют такое число граммов вещества, которое указывает, во сколько раз масса атома превышает единицу атомной массы, то в физической шкале, где атомный вес изотопа  $O^{16}$  считается точно равным 16, число Авогадро определяет количество атомов в 16 г изотопа кислорода  $O^{16}$ , тогда как в химической шкале под числом Авогадро понимают количество атомов в 16 г природной смеси изотопов кислорода:

$$\text{по физической шкале } N_{\text{Ав}} = 6,0247 \cdot 10^{23};$$

$$\text{по химической шкале } N'_{\text{Ав}} = 6,023 \cdot 10^{23}.$$

Из сказанного ясно, что

$$1 \text{ атомная единица массы} = \frac{1}{N_{\text{Ав}}} g = 1,6603 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Очевидно, что эта единица массы меньше химической в  $\frac{N'_{\text{Ав}}}{N_{\text{Ав}}} \approx 1,0003$  раза. Поэтому, чтобы получить массы атомов в физической шкале, нужно химические атомные веса умножить на 1,0003. Так, в химической шкале масса атома бериллия  $Be^9$  равна 9,012, а в физической она равна 9,015.

Энергетические величины в ядерной физике принято измерять в миллионах электроновольт (*Мэв*), а также в *атомных единицах энергии*, причем под атомной единицей энергии подразумевают энергию, связанную по закону  $E = c^2 m$  с одной атомной единицей массы:

$$1 \text{ атомная единица энергии} = \frac{c^2}{N_{\text{Ав}}} \text{ эрг,}$$

где  $c$  — скорость света в вакууме, равная приблизительно  $3 \cdot 10^{10}$  см/сек.

Чтобы выразить эту энергию в *Мэв*, вспомним (т. II, § 8), что поскольку 1 в равен  $1/300$  абсолютной электростатической единицы потенциала, то

$$1 \text{ эв} = e \cdot \frac{1}{300} \text{ эрг,} \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона, выраженный в абсолютных электростатических единицах и равный в этих единицах  $4,802 \cdot 10^{-10}$ . Если заряд электрона выразить в кулонах, то

$$1 \text{ эв} = e_{\text{кул}} \cdot 10^7 \text{ эрг, т. е. } 1 \text{ эрг} = \frac{10^{-7}}{e_{\text{кул}}} \text{ эв.}$$

Стало быть,

$$1 \text{ атомная единица энергии} = \frac{c^2}{N_{\text{Ав}} e_{\text{кул}}} \cdot 10^{-7} \text{ эв.}$$

Подставляя сюда  $c=2,9979 \cdot 10^{10}$  см/сек и заряд Фарадея (для  $N_{\text{Ав}}$  в физической шкале  $N_{\text{Ав}} e_{\text{кул}}=96\,522$  кулонам), получаем:

$$1 \text{ атомная единица энергии} = 931,15 \text{ Мэв.} \quad (2)$$

Таким образом, применяя атомные единицы массы и выражая энергию в Мэв, закон пропорциональности массы и энергии можем записать так:

$$E_{\text{Мэв}} = 931,15 m \text{ ат. ед.} \quad (3)$$

Заметим, что из соотношения (1) следует:

$$1 \text{ Мэв} = 1,602 \cdot 10^{-6} \text{ эрг} = 3,83 \cdot 10^{-17} \text{ ккал.}$$

## § 87. Радиоактивный распад ядер. Закон радиоактивного смещения. Изомеры.

Основой теории радиоактивного распада является предположение, что этот процесс происходит спонтанно (самопроизвольно), как следствие неустойчивости ядер, и подчиняется статистическим законам. При радиоактивном распаде или, как говорят иначе, при радиоактивном превращении происходит изменение строения и состава исходного ядра, причем это изменение совершается внезапно в момент, определяемый какими-то внутриядерными причинами. Для отдельного неустойчивого ядра, не зная деталей внутриядерных движений, мы не можем предсказать момент, когда произойдет радиоактивное превращение этого ядра. Но по закону больших чисел в среднем за единицу времени в любом радиоактивном веществе распадается вполне определенная, характерная для данного радиоактивного вещества доля атомов. Так, из биллиона ( $10^{12}$ ) атомов радия каждую секунду распадается приблизительно 14 атомов.

Мерой быстроты радиоактивного превращения служит промежуток времени, в течение которого распадается половина атомов любого количества элемента. Этот промежуток времени называют *периодом полураспада*.

Для радия указанное выше число каждую секунду распадающихся атомов соответствует периоду полураспада в 1590 лет. Радон (эманация радия) распадается приблизительно в 150 000 раз быстрее, чем радий: из миллиона атомов в секунду распадается примерно два; период полураспада равен 3,8 дня.

Вероятность  $\lambda$  того, что отдельный нестабильный атом испытает радиоактивное превращение в единицу времени, не изменяется со временем, но является величиной, различной для разных радиоактивных атомов. Величину  $\lambda$  называют иначе *радиоактивной*