
УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Сило

АТОМНОЕ ЯДРО И ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ*Л. Мейтнер Берлин-Далем**

Основой успешного построения периодической системы элементов Менделеевым и Лотар Мейером явилось представление о том, что атомный вес может служить подходящей константой для систематической классификации элементов. Современная атомная теория подошла, однако, к истолкованию периодической системы, совершенно не затрагивая атомного веса. Номер места какого-нибудь элемента в этой системе и вместе с тем его химические свойства однозначно определяются положительным зарядом атомного ядра, или, что то же самое, числом отрицательных электронов, расположенных вокруг него. Масса и строение атомного ядра не играют при этом никакой роли; так, в настоящее время мы знаем, что существуют элементы или, вернее, виды атомов, которые при одном и том же числе и расположении внешних электронов обладают значительно различающимися атомными весами. Такие элементы называются изотопами. Так, например, в плееде изотопов цинка атомный вес распределяется от 112 до 124. Наоборот, есть элементы, обладающие существенно различными химическими свойствами, которые обнаруживают одинаковый атомный вес; их называют изобарами. Примером может служить атомный вес 124, который найден для цинка, теллура и ксенона. Однако, если атомный вес, не определяя однозначно природу химических элементов, не может быть принят в качестве характерной постоянной для них, то для атомного ядра он представляет собой одну из важных характеристических констант. Тот факт, что несмотря на это, на основе атомного веса Менделееву удалось получить безошибочное распределение известных тогда элементов (около 70) и даже правильно предсказать еще неизвестные элементы, можно приписать его гениальной интуиции, а также тому удачному обстоятельству, что атомный вес в первом приближении пропорционален положительному заряду ядра, а следовательно, и номеру места элемента в периодической системе.

Для определения химического элемента достаточно одной константы, а именно — числа отрицательных электронов, расположен-

* Доклад, сделанный на съезде, посвященном столетию со дня рождения Д. И. Менделеева, в Ленинграде 11 сентября 1934 г. На немецком языке опубликован в *Naturwissenschaften* 22, 733, 1934, перев. А. А. Ильиной.

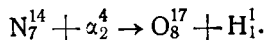
ных вокруг ядра, так как все химические процессы протекают среди этих электронов. Масса и строение атомного ядра не играют при этом никакой роли. Наоборот, для того чтобы охарактеризовать атомное ядро, необходимы две константы: атомный вес и заряд ядра. Так, уже упомянутый атомный вес 124 мы можем с одинаковым успехом приписать цинку, теллуру или ксенону, но как только станет известен заряд ядра, например 54, то можно уже совершенно однозначно указать на определенное атомное ядро, в данном случае ядро ксенона 124. Существование двух констант, необходимых для этого определения, можно рассматривать как указание на то, что атомное ядро построено из двух сортов элементарных частиц. В противном случае существование изотопов также было бы непонятным. Согласно сложившимся в настоящее время взглядам, опирающимся на многочисленные опыты, этими элементарными частицами нужно признать протоны и нейтроны.

Число протонов n_1 , находящихся в атомном ядре, определяет его положительный заряд Z , а тем самым и число внешних электронов, обуславливающих химические свойства этого элемента; некоторое число нейтронов n_2 , заключенных в этом же ядре, в сумме с n_1 дает его атомный вес $A = n_1 + n_2$. Обратно, порядковый номер Z дает число содержащихся в атомном ядре протонов, а из разности между атомным весом и зарядом ядра $A - Z$ получается число ядерных нейтронов. Например, не раз упоминавшееся ядро ксенона с атомным весом 124 и зарядом 54 состоит из 54 протонов и $124 - 54 = 70$ нейтронов. Согласно этим взглядам в ядре не существует ни положительных ни отрицательных электронов. Точное определение атомного веса позволяет между тем не только указать, из скольких элементарных частиц составлено атомное ядро, но дает возможность также оценить энергию, связанную с образованием атомного ядра. Масса атомного ядра обычно меньше, чем сумма отдельных масс составляющих его протонов и нейтронов. Известно, что масса не представляет собой неизменной величины, но может превращаться в энергию. Образование устойчивого ядра из отдельных частиц есть экзотермический процесс, и энергию, выделяющуюся при этом образовании, можно рассчитать из дефекта массы образуемого ядра, т. е. из разности между его атомным весом и суммой весов входящих в него протонов и нейтронов.

Тем обстоятельством, что округленный атомный вес правильно дает число содержащихся в ядре протонов и нейтронов, мы обязаны лишь счастливой интуиции Берцелиуса, предположившего при определении атомных весов принимать за основу атомный вес кислорода, равный 16. Если бы за единицу был принят атомный вес водорода, то следствием этого получились бы совершенно другие значения атомных весов, например, для Вi атомный вес оказался бы 207,3 вместо 209.

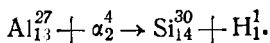
Многочисленными экспериментами установлено, что протоны и нейтроны действительно являются составными частями атомного ядра. Различными способами из тяжелых ядер можно выбить про-

тоны и нейтроны, причем одновременно с этим первоначальное атомное ядро переходит в новое. Давно известен процесс освобождения протонов, открытый Резерфордом и его учениками при бомбардировке α -частицами некоторых элементов, например азота:



Процесс протекает таким образом, что α -частица остается в ядре и выбрасывается один протон. Это будет процессом образования ядра, где возникающее атомное ядро содержит большее количество элементарных частиц, чем исходное.

Вторым примером процессов того же типа может служить превращение алюминия в Si при обстреле α -частицами:



На рис. 1 представлена полученная нами вильсоновская фотография, показывающая это искусственное преобразование. На ней можно видеть следы протонов, выброшенных из Al действием α -частиц полония, который находится в цилиндре, помещенном внутри камеры Вильсона. Передняя половина цилиндра сделана из алюминиевого листка такой толщины, что α -лучи и Н-лучи не могут пройти сквозь него во внешнее пространство. Поэтому все следы, выходящие из алюминия, могут быть приписаны только протонам, выброшенным из ядра.

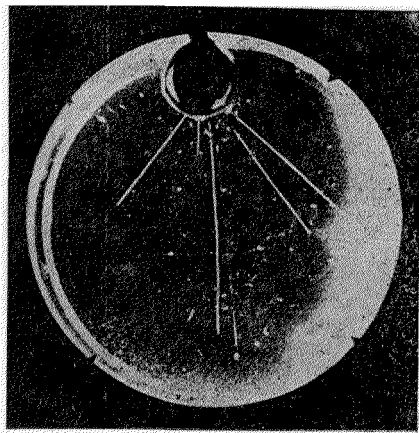


Рис. 1. Разложение алюминия α -частицами.

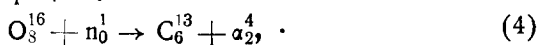
Существование нейтронов было обнаружено Чадвиком прежде всего для Li, B, Be, в связи с исследованиями Кюри и Жолио, которые продолжали наблюдения Боте и Беккера. Разыгрывающийся здесь процесс совершенно аналогичен разобранным выше:



т. е. α -частица захватывается ядром и выбрасывается один нейтрон. Таким образом не возникает никакого сомнения в том, что протоны представляют собой основные составные части атомного ядра. Наряду с этим выступают, но уже как вторичные образования, еще гелиевые ядра (α -частицы) и, вероятно, ядра тяжелого водорода H_2^2 . То, что α -частицы являются составными частями атомных ядер, известно уже давно из наблюдений над радиоактивными процессами, а в настоящее время многократно наблюдалось также и в процессах

искусственного преобразования элементов с отщеплением α -частиц из устойчивых атомных ядер как при обстреле нейтронами, так и протонами.

Примером такого разрушения, произведенного с помощью нейтрона, может служить процесс:



который представлен на полученной в нашем институте вильсоновской фотографии (рис. 2), где Ве-нейтроны пролетают через кислород.

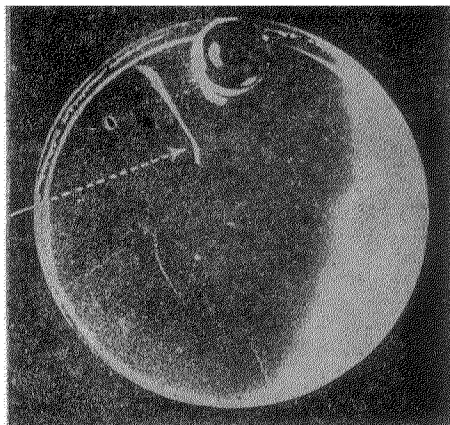
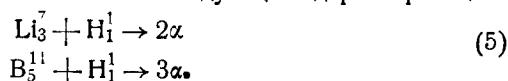


Рис. 2. Разложение кислорода нейтронами.

Один такой нейтрон, согласно вышеприведенному равенству, разбил ядро кислорода. Можно видеть длинный след выброшенной α -частицы и короткий путь возникшего ядра C_6^{13} .

При разрушении, полученном с помощью протонов (Коккрофт и Уолтон), установлены с достоверностью лишь те процессы, при которых могут возникать только ядра, построенные из α -частиц. По энергетическим соображениям можно сказать, что эти ядра, не будут стабильными и должны распадаться на свои составные части. Примером этого будут следующие ядерные реакции:



Одновременное возникновение двух α -частиц при разрушении Li и трех α -частиц из приведенного В-процесса получено, повидимому, Э. Кирхнером и Ди и Уолтоном, что можно видеть из рис. 3 и 4. Тот факт, что именно те элементы, которые способны разрушаться протонами, могут образовать с H_1^1 новую α -частицу, вследствие чего их масса станет целым кратным массы α -частиц, становится понятным, если принять во внимание, что α -частица представляет собой образование с очень большим дефектом массы, вследствие чего ее построение связано с высоким экзотермическим эффектом. Гамов, ссылаясь именно на это обстоятельство, дал объяснение того, что элементы с четным порядковым номером и четным атомным весом встречаются гораздо чаще, чем элементы с нечетным числом нейтронов или протонов. Разложение с помощью дейтонов (H_2^2) было исследовано прежде всего американскими исследователями (Лоренс, Лауритсен, Крэн, Тьюв, Гейфстэд, Ливингстон, Гендерсон), а в последнее

время также и Резерфордом с его учениками. В качестве примеров можно привести следующие процессы:

и

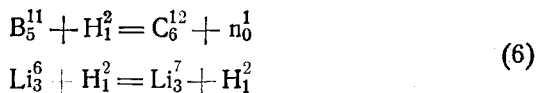
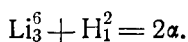


Рис. 3. Разложение лития протонами.

наряду с процессом



Во всех рассмотренных здесь процессах искусственного преобразования элементов вновь возникающие ядра устойчивы и все принад-

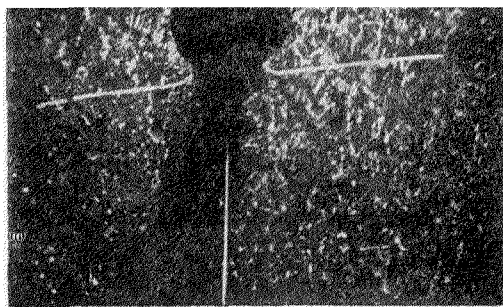


Рис. 4. Разложение бора протонами.

лежат к типам атомов, уже известных из исследований изотопов. Все это можно представить в виде реакций обмена:

1. $\alpha \rightleftharpoons \text{n}_0^1$
 2. $\alpha \rightleftharpoons \text{H}_1^1$
 3. $\text{H}_1^2 \rightarrow \alpha$
 4. $\text{H}_1^2 \rightarrow \text{H}_1^1$
 5. $\text{H}_1^2 \rightarrow \text{n}_0^1$
- (7)

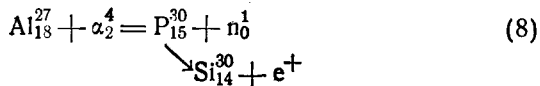
Реакция $H_1^1 \rightarrow \alpha$ известна до сих пор только в виде разрыва ядра на его составные части (см. выше). Для реакций 3, 4 и 5 обратные процессы еще не наблюдались. Точно так же для этого типа превращений отсутствуют процессы вида $p_0^1 \rightleftharpoons H_1^1$. Из энергетических соображений можно кое-что сказать об относительной вероятности указанных реакций обмена. Захват одного протона всегда будет наиболее экзотермическим процессом, так как масса свободного протона 1,0072, в то время как масса ядерного протона не превышает 1,000. Это ясно без дальнейших рассуждений из сравнения масс тех ядер, которые по своему строению различаются на один протон. Например, атомный вес C_6^{12} равен 12,0036, атомный вес B_5^{11} — 11,0110, разность между весами обоих ядер составляет 0,9921, т. е. новый протон, присоединяющийся к C_{12} от B_{11} обладает в ядре массой меньшей приблизительно на 0,015 единиц массы, что соответствует уменьшению энергии на $14 \cdot 10^6$ V по сравнению с энергией в свободном состоянии. Эта энергия освобождается при превращении ядра, захватывающего протон, и она действительно очень велика. Этим обусловлено также то, что уже протоны с наименьшей энергией до 20 000 V могут вызвать превращение, потому что как раз в дефекте массы протона имеется достаточный запас энергии.

Совершенно так же обстоит дело с нейтроном. Сравним два смежных изотопа, которые отличаются друг от друга на 1 нейтрон. Разность между их атомными весами всегда будет равна или меньше единицы. Масса же свободного нейтрона, о чем я еще буду говорить позже, по видимому, незначительно отличается от массы свободного протона.

Для α -частиц, однако, действительные соотношения будут иными. В свободном состоянии α -частица, с ее относительно небольшой массой в 4,0012 единиц, имеет очень большой дефект массы, соответствующий 30 млн. V. Она представляет собой устойчивое образование. Как составная часть тяжелых ядер, напротив, она будет относительно теряться. Если сравнить два ядра, которые отличаются друг от друга на одну α -частицу, например O_{16} и Ne_{20} , то разница атомных весов будет составлять 4,0004; различие в величине энергии по отношению к свободной α -частице не составляет даже и 15 V. Вследствие этого для осуществления разложения элемента с помощью α -частицы последняя должна обладать энергией гораздо большей, чем протон, а именно не меньшей $2.5 \cdot 10^6$ V, тогда как для протона нижняя граница составляет 20 000 V.

Из этих соображений следует, что процессы обмена $H_1^1 \rightleftharpoons \alpha$ будут происходить легче, чем процессы $H_1^1 \rightleftharpoons p$. Последние можно ожидать прежде всего для более высоких кинетических энергий H_1^1 и соответственно этому для нейтронов, что и наблюдалось в действительности для нейтронов с большей энергией, конечно, не для рассмотренных выше процессов превращения при прямом образовании устойчивых атомных ядер.

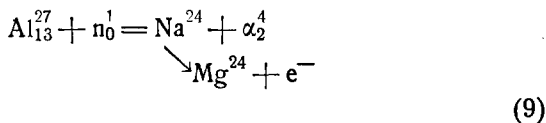
Наряду с этими процессами искусственного преобразования элементов, при которых возникают уже известные стабильные атомные ядра, Кюри и Жолио были открыты совсем недавно процессы искусственной радиоактивности, при которых возникающие сначала неустойчивые атомы переходят затем в устойчивый продукт путем радиоактивного распада с испусканием позитрона. Например:



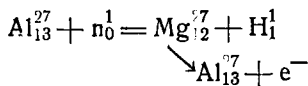
Атомное ядро P_{15}^{30} превращается в Si_{14}^{30} совершенно так же, как и обычные радиоактивные элементы, по экспоненциальному закону. Период полураспада в этом случае составляет 3'15".

Ферми и его сотрудниками было показано, что для образования радиоактивного ядра можно пользоваться также и нейтронами. Вследствие того что для нейтрона не существует кулонова поля, он особенно легко может проникать даже в тяжелые ядра. Действительно, итальянским исследователям удалось перевести в радиоактивное состояние почти все элементы. Исключение составляли легкие элементы H, Li, C, N, O и тяжелые Os, Rn, Tl, Pb, Bi.

Процессы этого типа могут быть представлены следующими примерами:

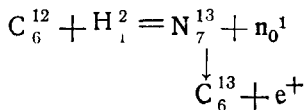


или



Соответственно этим двум типам превращения наблюдаются два периода полураспада, оказавшиеся из определений Ферми равными 12 час. для первого процесса и 12 мин. для второго. В полном согласии с этим мы нашли также для первого процесса 12—15 час. и 10 ± 1 мин. для второго.

Особенно интересен второй процесс, так как он приводит обратно к исходному атомному ядру. Процессы подобного же типа вполне достоверно установлены итальянскими исследователями для значительного количества элементов, например для P, S, Fe, Cr и др. Возникающие при этом радиоактивные атомные ядра переходят затем в устойчивые ядра с испусканием β -лучей. Подобные превращения получены и американскими исследователями при обстреле дейтонами, например:



Этот процесс показывает, что таким путем из одного типа атомов могут получиться более тяжелые изотопные ядра.

Все наблюдавшиеся до сих пор процессы искусственной радиоактивности протекают или с вылетом положительного электрона или с испусканием отрицательного. Искусственно полученные радиоактивные типы атомов, возникающие при обстреле ядер тяжелыми частицами, такими, как протон, нейтрон или α -частица, однако, не могут быть предугаданы заранее. Исследование этих ядер также не может производиться обычными методами, обнаруживающими изотопы известных элементов.

К 200 известным до сих пор устойчивым типам атомов 92-х элементов периодической системы теперь прибавляется еще целый

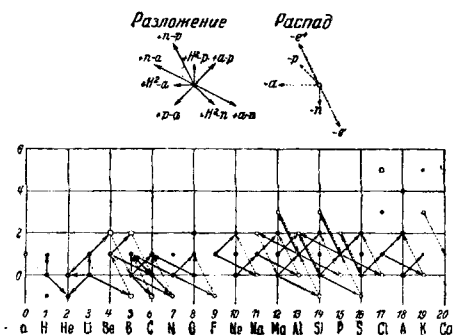
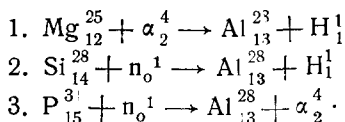


Рис. 5.

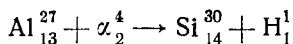
ряд радиоактивных ядер. На рис. 5 можно видеть часть графика периодической системы, составленной Дельбрюком в нашем институте. Этот график включает в себе все до сих пор известные типы атомов, устойчивых и неустойчивых. На приведенном рисунке помещена только часть этого графика, заключающая в себе атомы вплоть до кальция. Абсциссовые числа элементов, ординатами — величины $n_1 - n_2$, т. е. излишек нейтронов над числом протонов. Черными кружками обозначены устойчивые атомные ядра, незачерненными — ядра радиоактивные; квадратики изображают виды атомов, установленных еще не вполне достоверно. Стрелками показаны возможные процессы превращения одних атомов в другие по имеющимся экспериментальным данным. Это есть, так сказать, начало химии атомного ядра. Чрезвычайный интерес представляют следующие факты: одно и то же атомное ядро можно построить различными способами. Например мы знаем в настоящее время три реакции, ведущие к образованию одного и того же радиоактивного Al^{28} :



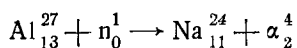
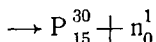
Ядра Al, возникающие в результате всех этих трех реакций, имеют одинаковые периоды полураспада и переходят в Si_{14}^{28} с испусканием отрицательного электрона.

Обратно этому одно и то же искусственное ядро путем раз-

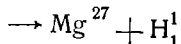
личных превращений может дать совершенно различные ядра, например:



или



или



Весьма вероятно, что обычные стабильные ядра известных элементов также могли возникать самыми разнообразными путями подобно тому, как одно и то же химическое соединение может быть получено самыми различными способами.

Колебание величины $n_1 - n_2$ (рис. 5), т. е. избытка нейтронов над протонами, дает при постоянной абсциссе Z область атомных весов, охватывающих плеяду изотопов какого-нибудь определенного элемента. Вообще же эта разность представляет собой меру того, насколько атомный вес увеличивается с увеличением порядкового номера. Для $n_1 = n_2$, т. е. для атомных ядер, состоящих из равного числа нейтронов и протонов, атомный вес вдвое больше порядкового номера, например O_8^{16} . Атомы этого типа известны только до Ca_{20}^{40} ; в ряду всех без исключения элементов, следующих за кальцием, атомный вес начинает возрастать быстрее, чем порядковый номер; n_1 становится больше n_2 , т. е. атомные ядра имеют гораздо больше нейтронов, чем протонов, и содержание нейтронов с возрастанием порядкового номера увеличивается также быстрее, чем содержание протонов.

Наличие изотопов показывает также, что при данном числе протонов должны иметься какие-то наиболее устойчивые конфигурации для разного числа нейтронов, подобно тому, как в обычной химии соединения типа FeCl_2 и FeCl_3 .

Как уже упоминалось, элементарными частицами ядра могут быть только протоны и нейтроны. Это не противоречит тому, что имеются такие превращения, в которых атомное ядро переходит в какое-то новое ядро с испусканием положительного или отрицательного электрона. В настоящее время, однако, принимается, что электроны не могут находиться внутри ядра. Это обосновано очень вескими экспериментальными и теоретическими данными, на которых здесь не придется останавливаться. Вылет положительного или отрицательного электрона в некотором ядерном процессе можно объяснить тем, что протон, входящий в состав возбужденного атомного ядра, может как-то переходить в нейтрон, причем ядро должно терять один положительный заряд, что и может быть замечено по испусканию одного положительного электрона из ядра. Обратное этому, нейтрон в возбужденном ядре может перейти в протон, вследствие чего ядро приобретет один положительный заряд и наружу будет выброшен отрицательный электрон.

Таким образом переход $H_1^1 \leftrightarrow n$ внутри атомного ядра сопровождается испусканием положительного или отрицательного электрона. Создать наглядное представление о деталях этого перехода пока едва ли возможно. Можно сказать только следующее: если в атомном ядре имеет место подобный переход нейтрона в протон или обратно, то получается более устойчивое состояние такого рода, что энергия нового ядра будет меньше энергии исходного ядра на величину, соответствующую массе вновь возникшего электрона плюс его кинетическая энергия. Принимая это положение, так противоречащее нашим взглядам, нужно представлять себе обе частицы — протон и нейтрон элементарными частицами, составляющими ядро, совершенно равноправными, способными переходить друг в друга при некоторой затрате энергии, причем этот переход, как мы уже знаем, будет сопровождаться появлением одного электрона. Обе частицы, однако, должны представлять собой устойчивые образования, так что спонтанный переход не может иметь места, а их массы должны отличаться друг от друга на незначительную величину, гораздо меньшую, чем масса одного электрона. В противном случае частица с большей массой должна была бы спонтанно переходить в частицу с меньшей массой при одновременном возникновении одного электрона (+ или —). Масса протона хорошо известна, и мы видим, что точное определение массы нейтрона становится совершенно необходимым.

Производились разнообразные исследования, имевшие целью как можно точнее определить массу нейтрона. Единственно возможным для этого способом в настоящее время является определение точного баланса энергии какого-нибудь ядерного превращения. Рассмотрим, например, использованный Чадвиком для этого определения процесс превращения бора под действием α -частиц. Если принять во внимание энергии входящих в реакцию и получающихся частиц, а также массы их перевести в эквивалентные им количества энергии, то можно написать следующее равенство:

$$B_5^{11} + \alpha_2^4 + E_\alpha = N_7^{14} + n_0^1 + E_n + E_N.$$

Массы B_5^{11} , N_7^{14} и He_2^4 (α) хорошо известны из измерений Астона, кинетическая энергия α -частиц, употребляемых для обстрела В, также известна. Кинетическая энергия нейтрона E_n определена Чадвиком косвенным путем, так же как и кинетическая энергия вновь образующегося ядра азота E_N . Если вышеприведенное равенство имеет место, то массы нейтрона действительно можно определить. Этим способом Чадвик получил для массы нейтрона величину 1,0068, т. е. массу, которая меньше массы протона на величину, несколько отличающуюся от массы электрона. Разность протон — нейтрон составляет по этим данным всего 0,0004 единиц массы, а масса электрона равна 0,00055 тех же единиц. Спонтанный переход $H_1^1 \rightarrow n_0^1$ при таком значении массы нейтрона не может иметь места, и протон, так же как и

нейтрон, будет устойчивым. Кюри и Жолио из рассмотрения процессов полученной ими искусственной радиоактивности пришли к совершенно другому значению для массы нейтрона. Из подсчетов баланса энергии в этом процессе они получили $m_n = 1,0010$, т. е. массу большую, чем масса протона, причем в этом случае разность обеих масс больше массы электрона, так что для этого значения m_n был бы возможен спонтанный переход нейтрона в протон.

Трудно притти к какому-нибудь определенному решению, какая из этих двух величин (1,0068 и 1,0010) более вероятна. И в тех и в других измерениях имеется целый ряд величин, предельная точность определения которых недостаточно велика. Против данных Чадвика можно было бы в качестве возражения привести то, что, может быть, положенный в основу всех расчетов процесс превращения В¹¹ ведет на самом деле не к азоту, как это предполагается, а к В¹⁰, чем все его расчеты будут сведены к нулю.

С другой стороны произведенное мной и Филиппом определение максимальной кинетической энергии Ве-нейтронов говорит против того значения массы нейтрона, которое дали Кюри и Жолио, и хорошо согласуется с данными Чадвика. Решающим обстоятельством в этом случае будет условие устойчивости, т. е. то, что разность протон—нейтрон должна быть меньше, чем масса электрона, и тем самым значение m_n , полученное Кюри и Жолио, отпадает.

В заключение можно сказать еще несколько слов относительно общих принципов построения тяжелых ядер из нейтронов и протонов. Гейзенберг показал, что с помощью сравнительно несложных предположений можно получить закон построения ядер, хорошо передающий некоторые характерные факты в отношении атомного ядра. Гейзенберг исходит из предположения, что сила притяжения, действующая на близких расстояниях между протоном и нейтроном, будет больше, чем для нейтрона и нейтрона или двух протонов, так что взаимодействие протона и нейтрона будет определять собой процесс построения атомных ядер. Вид этого взаимодействия определяется как раз вышеуказанной возможностью перехода нейтрона в протон или обратно. Из этих условий сразу же вытекает, что наиболее устойчивое образование (с максимальной энергией связи) будет получаться при числе протонов, равном числу нейтронов, т. е. то соотношение, которое действительно наблюдается в ряде элементов до Са⁴⁰. В области тяжелых ядер, где кулоновское отталкивание для протонов будет очень значительно, необходим излишек нейтронов над протонами для того, чтобы ядро было устойчивым. Это соответствует уже приведенному факту более быстрого нарастания атомного веса при увеличении порядкового номера в области тяжелых элементов.

Гейзенбергу удалось также рассчитать полную энергию, необходимую для построения различных атомных ядер, и построить на основании этого кривую дефекта масс, хорошо соответствующую

экспериментальным данным. Из этих расчетов получают далее границы α - и β -распада. На рис. 6, взятом из работы Гамова, показаны как раз эти области устойчивых и неустойчивых ядер. Эти результаты, качественно совпадая с наблюдениями, дают, однако, закономерное количественное отклонение, которое истолковано Гамовым как указание на возможность существования внутри ядра, кроме положительно заряженных протонов, еще и отрицательных протонов. Пока не представляется возможным сказать еще

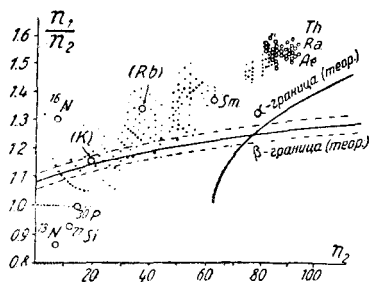


Рис. 6.

что-нибудь относительно этой до некоторой степени спекулятивной возможности.

С открытием нейтрона периодическая система получила некоторое пополнение в области малых порядковых номеров, так как нейтрон можно считать элементом с порядковым числом, равным нулю. В области высоких порядковых чисел, а именно от $Z = 84$ до $Z = 92$, все атомные ядра неустойчивы, спонтанно радиоактивны; поэтому можно предположить, что атом с зарядом ядра еще более высоким, чем у урана, если он только может быть получен, должен быть также неустойчивым. Ферми и его сотрудники недавно сообщили о своих опытах, в которых при обстреле урана нейтронами наблюдалось появление радиоактивного элемента с порядковым номером 93 или 94. Вполне возможно, что и в этой области периодическая система имеет продолжение. Остается прибавить только, что гениальным предвидением Менделеева рамки периодической системы так широко предусмотрены, что каждое новое открытие, оставаясь в объеме их, еще более укрепляет ее.