

ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР ВИКТ. И. СПИЦЫН

К ВОПРОСУ О СООТНОШЕНИИ ЧИСЛА НЕЙТРОНОВ И ПРОТОНОВ
В АТОМНЫХ ЯДРАХ

Соотношение числа нейтронов и протонов, входящих в состав атомных ядер, неоднократно подвергалось исследованию. Е. Н. Гапон и Д. Д. Иваненко ⁽¹⁾ указывали, что число нейтронов равно или больше числа протонов, имеющихся в атомном ядре. Гейзенберг ⁽²⁾ подсчитал, что границы устойчивости атомных ядер определяются выражением

$$\frac{n_1}{n_2} = C_1 + C_2 \frac{n_2}{\sqrt{n}} ,$$

где n_1 — число нейтронов, n_2 — число протонов, n — общее число частиц в ядре, C_1 и C_2 — некоторые коэффициенты, различные для верхней и нижней границ устойчивости атомных ядер. Широкая у легких элементов область возможных отношений n_1/n_2 повышается с возрастанием атомных номеров и значительно сужается при переходе к тяжелым элементам. Гейзенберг, однако, не изучал условий наибольшей стабильности атомных ядер внутри указанной области.

В. В. Чердынцев ⁽³⁾ рассмотрел модель ядра, состоящего из альфа-частиц и свободных нейтронов, полагая, что последние в невозбужденном состоянии расположены по уровням энергии, как вырожденный газ Ферми. Учитывался также механический момент ядра. Наиболее устойчивыми и распространенными должны быть изотопы данного элемента с максимальным атомным весом, так как у них все клетки фазового пространства нейтронов заполнены. Однако этот вывод далеко не всегда подтверждается на практике. Ланде ⁽⁴⁾ еще ранее показал на примере ксенона, образующего много изотопов, что для каждого возможного типа ядер по массе ($4n$, $4n+1$, $4n+2$ и $4n+3$) доминирующий изотоп характеризуется обычно средним по величине атомным весом. Изотопы с более высоким или, наоборот, более низким атомным весом содержатся в плеяде в меньшем количестве.

Особая роль изотопов наибольшего содержания в плеяде подчеркивается и М. А. Левитской ⁽⁵⁾, отметившей неустойчивость ядер, содержание нейтронов в которых меньше или, наоборот, больше, чем в преобладающем изотопе данного элемента, при условии наличия стабильного изобара у соседнего элемента. А. П. Знойко ⁽⁶⁾ рассмотрел изотопы элементов с точки зрения величин удельных зарядов ядер, Z/A (т. е. по существу, $N_p/(N_p + N_n)$), и изотопических чисел ($A - 2Z$). На диаграмме, построенной по значениям Z/A и A , изотопы каждого элемента располагаются в точках пересечения почти прямолинейных диагоналей с гиперболами, соответствующими постоянным изотопическим числам. В цитируемой работе указывается, что свойства атом-

ных ядер закономерно изменяются по каждой изотопической кривой и по диагоналям приведенной диаграммы.

Автором данной статьи⁽⁷⁾ в 1938 г. была высказана мысль о связи между распространенностью элементов в природе и соотношением числа нейтронов и протонов (N_n/N_p) в их преобладающих изотопах. На рис. 1 нанесены отношения N_n/N_p для доминирующих изотопов всех элементов в порядке роста атомных номеров.

В начале периодической системы наиболее распространенные элементы характеризуются отношением $N_n/N_p = 1$. После кальция, на протяжении первого большого периода системы Менделеева, величина отношений N_n/N_p быстро возрастает и достигает у селена значения 1,35. Указанный рост происходит здесь неравномерно, со значительными колебаниями. После рубидия возрастание отношения N_n/N_p становится менее резким и более равномерным.

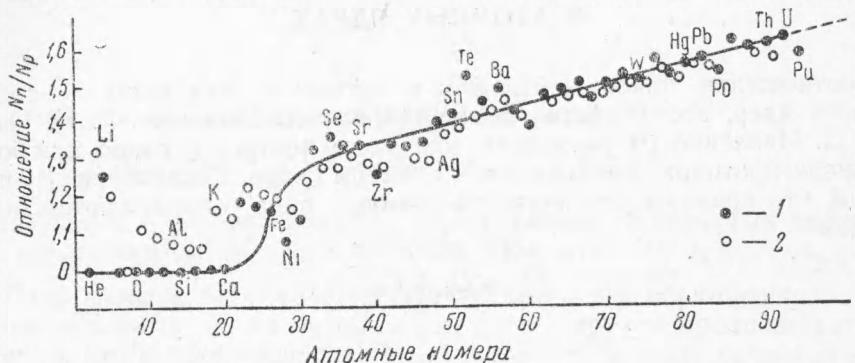


Рис. 1. Соотношение числа нейтронов и протонов (N_n/N_p) в атомных ядрах преобладающих изотопов элементов: 1 — четные элементы, 2 — нечетные элементы

На рис. 1 соединены сплошной линией величины отношений N_n/N_p для элементов, которые в соответствующих периодах системы Менделеева характеризуются повышенным содержанием в земной коре (O, Si, Ca, Fe, Sr, Ce, W, Pb, Th, U). Эту линию можно назвать нормальной кривой отношений N_n/N_p для наиболее стабильных ядер. Особенно примечательно то, что между стронцием и ураном она превращается в прямую линию, на которой располагаются или непосредственно к ней примыкают величины отношения N_n/N_p большинства наиболее распространенных элементов данной части периодической системы. Расчет ожидаемых значений N_n/N_p для этого участка кривой может быть произведен по формуле:

$$N_n/N_p = 1,13 + 0,005 Z. \quad (1)$$

Вычисленные таким путем величины отношений N_n/N_p в большинстве случаев хорошо совпадают с фактическими данными (см. табл. 1).

Следует также иметь в виду, что каждому элементу соответствует не только определенное «нормальное» отношение N_n/N_p , но и определенный тип массы ядра его наиболее распространенного изотопа⁽⁸⁾. Из возможных ядер этого типа в плеяде изотопов доминирует в большинстве случаев то, которое по своему строению ближе всего соответствует нормальной кривой отношений N_n/N_p . С увеличением отклонения отношения N_n/N_p от нормальной кривой уменьшается содержание изотопов данного типа в плеяде или же проявляются радиоактивные свойства, тем более интенсивные, чем значительнее указанное отклонение. Если же доминирующий изотоп элемента харак-

Таблица 1

Соотношение числа нейтронов и протонов в атомных ядрах преобладающих изотопов некоторых элементов ($Z > 37$)

Элемент	Z	A (для преобла- дающего изо- топа)	Отношение N_n/N_p		Элемент	Z	A (для преобла- дающего изо- топа)	Отношение N_n/N_p	
			найд.	выч.				найд.	выч.
Sr	38	88	1,32	—	La	57	139	1,44	1,42
Zr	40	90	1,25	1,33	Ce	58	140	1,41	1,42
Mo	42	98	1,33	1,34	W	74	184	1,49	1,50
Cd	48	114	1,38	1,37	Hg	80	202	1,53	1,53
Sn	50	120	1,40	1,38	Pb	82	208	1,54	1,54
J	53	127	1,40	1,40	Ra	88	226	1,57	1,57
Cs	55	133	1,42	1,41	Th	90	232	1,58	1,58
Ba	56	138	1,47	1,41	U	92	238	1,59	—

теризуется отношением N_n/N_p , точно соответствующим нормальной кривой, его атомные ядра, повидимому, отличаются повышенной устойчивостью, а данный элемент — значительной распространенностью в земной коре.

Некоторые элементы рассматриваемой части периодической системы (Zr, Nb, Ba и др.) отличаются тем, что из двух изотопов доминирующего типа, ближайших по своим величинам N_n/N_p сверху и снизу к нормальной кривой, у них преобладает в плеяде изотоп, дальше отстоящий от этой кривой. Однако и здесь соблюдается то правило, что доминирующий изотоп элемента является с точки зрения величины N_n/N_p ближайшим к нормальной кривой отношений N_n/N_p либо со стороны более высоких, либо со стороны более низких значений N_n/N_p .

Из стабильных элементов только у теллура доминирующий изотоп, ^{130}Te , имеет отношение $N_n/N_p = 1,50$, превышающее как теоретически вычисленное (1,39), так и соответствующее другому изотопу того же типа по массе, ^{126}Te ($N_n/N_p = 1,42$). Следует, однако, иметь в виду, что в плеяде теллура два наиболее распространенных изотопа содержатся почти в одинаковых количествах: ^{130}Te , типа $4n + 2$ (33,1%), и ^{128}Te , типа $4n$ (32,8%). Изотоп ^{128}Te не проявляет указанной аномалии.

Изложенное показывает, что соотношение числа нейтронов и протонов в преобладающих изотопах стабильных элементов подчиняется определенным закономерностям. При $Z \geq 38$ оптимальное соотношение N_n/N_p дается уравнением (1). Для элементов с $Z \leq 20$ отношение стремится к 1. Отклонения, наблюдавшиеся у распространенных в земной коре нечетных легких элементов (Al, Na и др.), вызваны доминирующим типом атомных ядер этих элементов ($4n + 3$), при котором отношение N_n/N_p не может равняться 1.

На участке между кальцием и стронцием поведение нормальной кривой отношений N_n/N_p нуждается в дальнейшем исследовании.

Необходимо отметить, что после празеодима ($Z = 59$) преобладающим изотопам нечетных элементов соответствуют величины N_n/N_p , всегда ближайшие меньшие в сравнении с вычисленными теоретически по нашему уравнению, а у протактиния главный изотоп ^{231}Pa характеризуется даже вторым из таких возможных значений N_n/N_p . Последнее, повидимому, свойственно сильно радиоактивным элементам конца периодической системы.

Подавляющее большинство четных элементов после платины ($Z = 78$) имеет для своих доминирующих изотопов отношение N_n/N_p или равное теоретическому или ближайшее меньшее. Исключениями являются

радон (в сторону повышенного значения N_n/N_p против нормы) и полоний (пониженное значение N_n/N_p).

Описанные в этой статье закономерности могут быть использованы для подсчета атомных весов наиболее стабильных изотопов мало изученных элементов. Например, в случае экацезия ($Z = 87$) теоретически ожидаемое отношение N_n/N_p составляет 1,57. Тип ядра по массе у наиболее стабильного изотопа этого элемента, как нами показано ранее (8), должен быть $4n + 1$. Ближайшие меньшие атомные веса, отвечающие этому типу, будут 221 и 217 с отношениями N_n/N_p , соответственно, 1,54 и 1,49. Поскольку изотоп экацезия с массой 221 мало устойчив ($T = 4,8$ мин.), следует ожидать, что наиболее устойчивым будет изотоп с атомным весом 217.

Для экаиода ($Z=85$) теоретически ожидаемое отношение $N_n/N_p=1,56$. Наиболее стабильный изотоп должен иметь (8) ядро типа $4n + 3$. Ближайшие меньшие атомные веса, удовлетворяющие этим условиям, будут 215 и 211 с отношениями N_n/N_p для соответствующих ядер 1,53 и 1,48. Оба эти изотопа известны ($^{215}_{85}\text{At}$, $T=10^{-4}$ сек., $^{211}_{85}\text{At}$, $T=7,5$ час.). Повидимому, последний является наиболее прочным среди изотопов экаиода с нечетной массой. Описанные в литературе изотопы экаиода с четными массами вызывают сомнения.

Для нептуния теоретически вычисленное отношение N_n/N_p составляет 1,60. Принимая здесь доминирующим тип ядра $4n + 1$, находим, что изотопу $^{241}_{93}\text{Np}$ соответствует отношение N_n/N_p , равное 1,59, а изотопу $^{237}_{93}\text{Np}$ — 1,55. По аналогии с протактинием, изотоп $^{237}_{93}\text{Np}$ ($T = 2,25 \cdot 10^6$ лет) должен являться у нептуния наиболее устойчивым.

Описанный в литературе долго живущий изотоп плутония $^{239}_{94}\text{Pu}$ ($T = 24\ 110$ лет) имеет нечетный атомный вес типа $4n + 3$, что, как известно, нехарактерно для элементов с четными атомными номерами. Кроме того, отношение N_n/N_p составляет у него всего лишь 1,54, тогда как для $Z=94$ теоретически подсчитывается значение $N_n/N_p=1,60$. Как и другие четные элементы, плутоний должен иметь массу самого устойчивого изотопа типа $4n + 2$ или (по аналогии с Sm и Os) $4n$. В последнем случае для $^{244}_{94}\text{Pu}$ отношение $N_n/N_p = 1,60$ как раз равнялось бы теоретическому. Повидимому, этот изотоп и должен быть наиболее стабильным.

В отношении плутония наши выводы совпадают с предположениями А. П. Знойко (6).

Институт физической химии
Академии наук СССР

Поступило
15 II 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. Н. Гапон и Д. Д. Иваненко, Naturwiss., **20**, 792 (1932). ² W. Heisenberg, Zs. Phys., **77**, 1 (1932). ³ В. В. Чердынцев, Тр. Гос. рад. ин-та, **3**, 101 (1937). ⁴ A. Landé, Phys. Rev., (2), **43**, 624 (1933). ⁵ М. А. Левитская, ДАН, **55**, 399 (1947). ⁶ А. П. Знойко, ДАН, **69**, 169 (1949). ⁷ Викт. И. Спицын, Сборн. Современные проблемы физико-химии и химической технологии, **2**, изд. ВХО им. Д. И. Менделеева, 1938. ⁸ Викт. И. Спицын, ДАН, **71**, № 6 (1950).