

А. В. ТРОФИМОВ

СТАТИСТИКА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ АТОМНЫХ ЯДЕР И СТАБИЛЬНОСТЬ ПРИРОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 10 VII 1950)

В настоящее время нельзя считать доказанным, что природные стабильные изотопы совершенно неизменны во времени. Можно предполагать, что они в известной мере так же „бренны“, по выражению В. И. Вернадского ⁽¹⁾, как и активные, но распад их идет столь медленно, что он не может быть обнаружен современными радиометрическими методами. Подсчеты показывают ⁽²⁾, что при самых благоприятных условиях активность элемента останется неуловимой, если его период полураспада $\tau > 10^{15}$ лет. Экспериментальные трудности и смешанность изотопов в природе могут снизить этот верхний предел измеримой активности в сотни раз. Во всяком случае наибольшее измеренное до сих пор значение τ для случаев α - и β -активности не превышает $\tau = 4 \times 10^{12}$ лет для изотопа рения Re^{187} .

Предположение о крайне медленном не наблюдаемом спонтанном распаде стабильных элементов теоретически допустимо по крайней мере для тех тяжелых атомных ядер, которые имеют избыток и энергии и массы по сравнению с наиболее плотно „упакованными“ ядрами элементов, близких по массе к железу.

Вопрос о вероятности распада элементов усиленно изучался и экспериментально и теоретически. Известна эмпирическая зависимость между константой распада и энергией α -частиц (Гейгер и Нуттол), а также теоретически выведенные соотношения, связывающие период τ с энергией отделяемых при распаде частиц и с другими параметрами ядра (радиусом, зарядом, проницаемостью потенциального барьера и т. д.) для α -распада ⁽³⁾ и для β -распада (Ферми) ⁽²⁾. Однако все формулы ядерного распада, весьма приближенные, непригодны для вычисления τ ненаблюдаемого распада, так как в них входит энергия вылетающих частиц, в этом случае экспериментально неопределимая.

Для решения вопроса об устойчивости стабильных элементов остается косвенный путь — рассмотреть общую картину распределения вероятности распада среди всех неустойчивых ядер, чтобы оценить статистически вероятность распада стабильных ядер.

В настоящее время накопился столь значительный фактический материал по распаду неустойчивых ядер, что его можно подвергнуть формально-статистической обработке для суждения о распространенности и вероятности разных сроков жизни среди атомных ядер.

Для статистической характеристики распада или „живучести“ атомов все известные неустойчивые атомные ядра, естественные и искусственные, вошедшие в ядерные таблицы Маттауха ⁽⁴⁾, были сгруппированы по порядкам их долговечности. Все нестабильные изотопы были разбиты на 28 групп, сообразно с изменением τ на 28 порядков от $\tau = 10^{-8}$ сек. до $\tau = 10^{20}$ сек. ($3,17 \cdot 10^{12}$ лет). Подсчиты-

валось число изотопов, „входящих“ в каждую декаду времени распада, т. е. имеющих значение τ в пределах от 10^{n-1} до 10^n сек.

На рис. 1 изображены результаты такого подсчета в виде вариационных кривых распада атомных ядер. Эти кривые построены при учете всех неустойчивых ядерных структур, вошедших в таблицы Маттауха, независимо от характера ядерных превращений; следовательно, ими охватываются α -распад, β -распад, K -захват и изомерный переход.

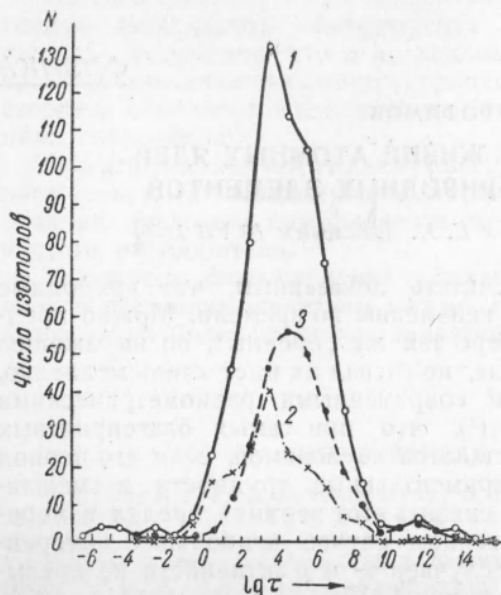


Рис. 1. Распределение неустойчивых изотопов по времени жизни. Кривая 1 — для всех элементов, 2 — для элементов легче Rb, 3 — для элементов тяжелее Xe

Такое теоретически не вполне законное смешение всех видов ядерной активности допущено здесь с целью получить большую статистическую сглаженность кривых распределения; как видно из дальнейшего, оно не вносит ощутимого искажения в описываемые закономерности. Общее число данных, охватываемых кривой 1 (рис. 1), 682 достаточно велико; это позволяет произвести подобный же статистический анализ порознь для более легких и более тяжелых атомов. Соответствующие кривые распределения долговечности для легких (от H до Rb) и для тяжелых атомов (тяжелее Xe) на рис. 1 показывают, что все они одного и того же „резонансного“ типа с явно выраженным максимумом встречаемости. Для более легких элементов и для суммарной кривой максимум приходится на значения τ от 10^3 до 10^4 , т. е. от 17 мин. до 2,8 часа; для тяжелых элементов он сдвинут вправо примерно на 1 порядок. Это правое смещение максимума встречаемости при увеличении массы ядер характерно для всех типов ядерного распада; оно сказывается на форме суммарной кривой, вызывая асимметрию ее. Обращает внимание полная симметричность кривой для группы тяжелых ядер. Возможно, что эта кривая своей чисто гауссовской формой обязана тому, что относительное изменение массы в пределах этой группы невелико сравнительно с группой легких ядер. Замечательно также, что максимум остальных кривых приходится на значение τ того же порядка, как и период полураспада нейтронов ($\lg \tau_n \approx 3,3$).

На рис. 2 изображены подобные же кривые распределения долговечности всех известных неустойчивых атомов (изотопов), построенные раздельно для 4 типов ядерных превращений, именно для α -распада, β -распада, $+\beta$ -распада вместе с K -захватом и для изомерных переходов.

Как видно из рис. 2, все типы ядерной активности имеют „резонансную“ форму встречаемости; максимальную встречаемость во всех случаях имеют значения τ 4-го или 5-го порядка, т. е. наиболее вероятное время полужизни активных ядер лежит в пределах от 10^3 до 10^5 сек.

Позитронный распад характеризуется очень правильной симметричной кривой распределения „гауссовского“ типа. Максимум встречаемости приходится на 5-й порядок периода полужизни ($\lg \tau \approx 4,5$).

Кривые распределения жизни — β -активных атомов имеют резкий максимум для „нейтронного“ порядка τ . Максимум группы тяжелых элементов (тяжелее Xe) тяготеет к значению τ на порядок выше ($\lg \tau \approx 4,5$).

Для β -распада более легких ядер положение максимума встречается не только формально совпадает с периодом распада нейтрона; оно, вероятно, определяется им. Повидимому, этот же фактор, не входящий явно в теоретические формулы распада ядер, в значительной мере определяет положение максимума кривых во всех остальных случаях активности ядер.

Кривые распределения для изомерных превращений (см. рис. 2) построены на небольшом числе данных (53 случая); поэтому они не

имеют достаточной сглаженности. Но характерный максимум встречаемости нейтронного порядка τ и быстрое „выклинивание“ кривой в стороны от максимума, особенно в правую, четко выступают и в этом случае.

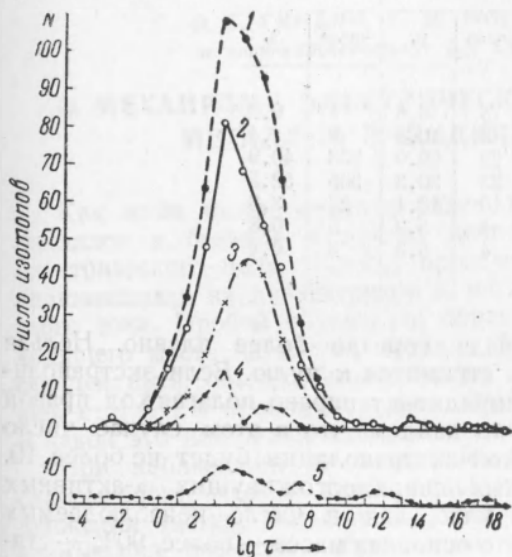


Рис. 2. Статистические кривые времени жизни ядер разного типа активности: 1 — все β и K -активные ядра, 2 — β -активные ядра, 3 — $+\beta$ и K -активные ядра, 4 — изомерные превращения ядер, 5 — α -активные ядра

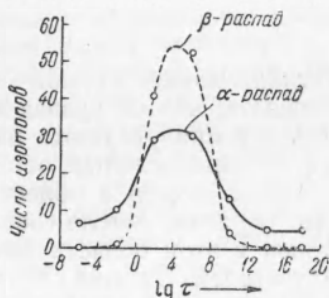


Рис. 3. Процентное распределение числа α - и β -активных изотопов по времени жизни

В случае α -распада наблюдается наибольший разброс встречаемости по оси τ по сравнению со всеми другими видами ядерной активности. Хотя главный максимум встречаемости и в этом случае приходится на 4-й „нейтронный“ порядок τ , но он сильно размыт; заметны вторичные максимумы, обязанные, вероятно, недостаточности числа „случаев“ α -распада (их всего 76) для сглаженности этой кривой.

Для характеристики „выклинивания“ кривых, которое имеет решающее значение для суждения о стабильности стабильных ядер, нами построена более сглаженная кривая распределения τ путем объединения α -активных ядер в большие группы, включающие 4 порядка значений τ . Этим приемом статистическая флуктуация кривых была сильно сглажена. Результаты такой укрупненной группировки приведены в табл. 1 и на рис. 3. Для сравнения такой же пересчет был сделан для данных по β -распаду.

Для оценки стабильности устойчивых изотопов в конечном счете существенна лишь правая ветвь статистических кривых рис. 3. Если экстраполировать эту ветвь кривой β -распада еще на 10 порядков в сторону больших значений периода полужизни, т. е. до $\tau = 10^{22}$ лет, то эта операция сможет прибавить не более пяти β -активных ядер

с огромным периодом полужизни. Таким образом, лишь очень небольшая часть стабильных изотопов (общее число их более 250) может быть подвержена β -распаду, неизмеримо медленно даже для космического масштаба времени. Этот вывод обоснован, если принять, что к настоящему времени подавляющее число всех возможных изотопов изучено и внесено в ядерные таблицы 1949 г.

Таблица 1
Распределение числа активных изотопов по периодам их полужизни

lg τ	α -излучатели		$\pm \beta$ -излучатели	
	число	%	число	%
От -8 до -4	5	6,6	1	0,2
" -4 " 0	8	10,5	9	1,4
" 0 " +4	22	29,0	238	40,9
" +4 " 8	23	30,3	305	52,5
" 8 " 12	10	13,1	22	3,8
" 12 " 16	4	5,3	5	0,8
" 16 " 20	4	5,3	2	0,4

Выклинивание кривой α -распада гораздо более плавно. Нельзя утверждать, что ее правая ветвь стремится к нулю. Если экстраполировать эту кривую также на 10 порядков τ вправо, полагая ход правой ветви ее параллельным оси lg τ , то найдем, что в этом случае число α -активных атомов в области такой экстраполяции будет не более 10. Таким образом, число возможных сверхдолгоживущих α -активных изотопов в этой области так же мало, как и число ненаблюдаемых β -излучателей. Отсюда следует, что основная масса — более 90% — стабильных изотопов не входит в систему ядер, охватываемых кривыми распределения жизни неустойчивых атомов и, повидимому, действительно не испытывает в земных условиях никакого даже ненаблюдаемого спонтанного распада.

Институт геохимии и аналитической химии
им. В. И. Вернадского
Академии наук СССР

Поступило
18 I 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. И. Вернадский, Очерки геохимии. ² Г. А. Бете и Р. Ф. Бечер, Физика ядра, ч. 1, 1938. ³ Г. А. Бете, Физика ядра, ч. 2, 1948. ⁴ J. Matthauch и. A. Flammersfeld, Isotopenbericht, 1949.