

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

211-53
2 13

БИБЛИОТЕКА

Атомная энергия

147471

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
А. Н. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ,
Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), П. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАНИНИН,
П. Ф. КВАРЦХАВА, П. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора),
А. К. КРАСНЦ, А. В. ЛЕВЕДИНСКИЙ, А. И. МЕНЦУВСКИЙ,
М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор),
Н. И. НОВИКОВ, В. С. ФУРСОВ, В. В. ЦЕВЧЕНКО,
К. Э. ЭРГЛИС, М. И. ЯКУТОВИЧ

ЯНВАРЬ
ТОМ 14 1963 ВЫП. 1

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. Ф. СКОРИНЫ



О ВОЗРАСТЕ ЯДЕР И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В. А. Давиденко

Рассмотренные в этой статье способы определения возраста ядер обсуждались с И. В. Курчатовым в 1947 г.

Для уточнения оценок вместе с И. В. Курчатовым был намечен план измерений нейтронных сечений и времен жизни ряда ядер, но измерения не были выполнены; работа не получила в то время должного развития и не была опубликована. Тем не менее отдельные аспекты дискуссии, по-видимому, интересны и сейчас.

Время, прошедшее с момента прекращения активного синтеза ядер, принято называть возрастом элементов. Его величина определяется экспериментально по наблюдаемым в метеоритах и земной коре изотопическим соотношениям изотопов, происшедшим благодаря распаду долгоживущих радиоактивных ядер [1—5].

Применение этого метода само по себе подразумевает определение времени, прошедшего от момента последнего крупномасштабного явления в ближайшей к нам части Вселенной, в результате которого установилось и затем уже заметно не менялось наблюдаемое в метеоритах и земной коре «начальное» распределение ядер. Это еще не значит, что определенная часть ядер не могла образоваться задолго до этого события и что понятие «возраст элементов» имеет буквальный смысл. Точнее было бы говорить о возрасте естественнорадиоактивных ядер, поскольку именно этот возраст определяется экспериментально.

Учитывая эту оговорку, рассмотрим способы оценки возраста ядер на основе внутренних закономерностей таблицы изотопов.

Оценки проводятся в предположении, что наблюдаемые на Земле относительные распространения изотопов соответствуют начальному распределению, установившемуся к концу синтеза ядер. Кроме того, предполагается, что продолжительность фазы активного синтеза была пренебрежимо мала по сравнению с временем жизни естественных радиоактивных ядер, и, следовательно, начальные распространения этих ядер были такими, каких следует ожидать из их положения в изотопной систематике [6].

Этим условиям лучше всего соответствует схема быстрого синтеза ядер, но, как будет отмечено в пункте 3, имеются некоторые основания считать, что часть изотопов появилась в результате медленного нейтронного синтеза с характерным временем $\sim 10^8$ лет. Это, однако, не противоречит принятым предположениям.

1. Имеются два нечетно-нечетных радиоактивных ядра K^{40} и Lu^{176} , которые находятся в одинаковом по отношению к соседним ядрам положении. Оба ядра «закрыты» как со стороны нейтроновизбыточных, так и со стороны нейтроноподостаточных изобар стабильными ядрами и при ядерном синтезе могли образоваться в основном только в результате (n, γ) -реакций из K^{39} и Lu^{175} . Поэтому относительные распространения K^{40} и Lu^{176} вполне могут сравниваться между собой.

К сожалению, мы не знаем величин сечений (n, γ) -реакций на быстрых нейтронах для ядер K^{39} , K^{40} , Lu^{175} и Lu^{176} , чтобы с большим основанием выбрать наиболее вероятное значение начальной относительной распространения K^{40} , но для оценки можно

принять, что к концу ядерного синтеза отношение K^{40}/K^{39} было таким же, как и отношение Lu^{176}/Lu^{175} . Тогда возраст калия определяется из соотношения

$$t_K = \frac{1}{\lg 2} \frac{T_{Lu} T_K}{T_{Lu} - T_K} \left[\lg \left(\frac{Lu^{176}}{Lu^{175}} \right)_t - \lg \left(\frac{K^{40}}{K^{39}} \right)_t \right],$$

где T_{Lu} и T_K — периоды полураспада Lu^{176} и K^{40} , равные соответственно $2,4 \cdot 10^{10}$ и $1,25 \cdot 10^9$ лет; Lu^{176}/Lu^{175} и K^{40}/K^{39} — отношения наблюдаемых распространенностей изотопов, равных соответственно: Lu^{176} — 2,6%; Lu^{175} — 97,4%; K^{40} — 0,0119% и K^{39} — 99,988%. Подставляя численные значения, получим $t_K = 10,2 \cdot 10^9$ лет. Соответственно начальное отношение распространенностей изотопов калия:

$$\left(\frac{K^{40}}{K^{39}} \right)_{t=0} = \left(\frac{K^{40}}{K^{39}} \right)_t 2^{t_K/T_K} = 0,036,$$

т. е. это отношение было в 280 раз больше, чем сейчас.

Авторы работы [7] приняли для средних значений (n, γ) -сечений K^{39} и K^{40} соответственно 8 и 100 *мбарн* и нашли, что в начальный момент K^{40} было в 260 раз больше, чем сейчас.

Такая оценка дает скорее всего верхний предел возраста калия, так как ядро K^{39} «магическое» (20 нейтронов) и в отличие от K^{40} , Lu^{175} и Lu^{176} более устойчиво к нейтронному выгоранию, а это ведет к уменьшению отношения K^{40}/K^{39} по сравнению с отношением Lu^{176}/Lu^{175} . Но несмотря на это, значение $10,2 \cdot 10^9$ лет не может сильно отличаться от истинного, так как выражение для t слабо зависит от начального отношения распространенностей, если для вычисления берется сильно распавшийся изотоп.

2. Изотопы U^{235} и U^{238} образовывались главным образом благодаря α -распаду своих предшественников с атомными весами A , равными $4n + 3$ и $4n + 2$, т. е. в результате иного механизма, чем стабильные ядра. Поэтому в данном случае нет достаточных оснований для нахождения начального отношения U^{235}/U^{238} из систематики стабильных изотопов. Кроме того, на начальные распространенности изотопов урана могли сильно влиять два противоположных фактора: с одной стороны U^{235} и его α - предше-

ственники при наличии нейтронов должны были выгорать быстрее, чем U^{238} и его α -предшественники; с другой стороны, последние имели больший избыток нейтронов и поэтому образовывались более быстро и могли успевать сгорать за то время, пока первые еще претерпевали β -превращения. Таким образом, начальное отношение U^{235}/U^{238} должно быть очень чувствительным к продолжительности быстрого нейтронного синтеза.

С этими оговорками можно все же произвести сопоставление урана с ближайшими к нему элементами: иттербием и ртутью, имеющими точно такие же число и распределение β -стабильных изотопов.

По положению на полосе β -стабильности урану-235 соответствуют ядра Yb^{173} и Hg^{201} , урану-238 — ядра Yb^{176} и Hg^{204} . Их отношения равны соответственно $\frac{Yb^{173}}{Yb^{176}} = 1,28$ и

$\frac{Hg^{201}}{Hg^{204}} = 1,93$. Здесь нет оснований ни для

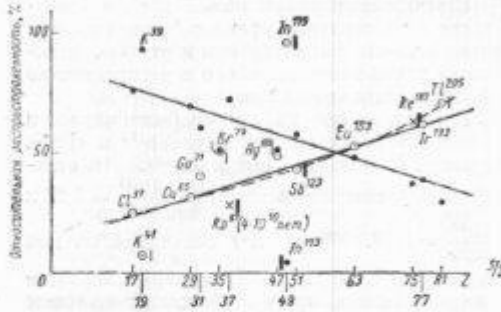
усреднения, ни для экстраполяции, но интересно отметить, что в обобщенном расчете вероятностей образования изотопов урана в условии синтеза в сверхновых звездах типа I авторы работы [7] нашли для начальных распространенностей $\frac{U^{235}}{U^{238}} = 1,64$, т. е. как раз среднее из предыдущих двух значений: 1,28 и 1,93. Соответствующий этому отношению возраст урана составляет $6,6 \cdot 10^9$ лет.

Значения возраста калия $10,2 \cdot 10^9$ лет и урана $6,6 \cdot 10^9$ лет довольно близки, но по причинам, указанным в оговорках, оба значения недостаточно надежны. Истинный возраст ядер (если отбросить предположение, что уран моложе калия) лежит, по-видимому, где-то посредине между этими числами.

Было бы очень интересно измерить зависимость (n, γ) -сечений от энергии для изотопов калия и лютетия и вычислить возраст калия более точно. Знание сечений изотопов лютетия в этом случае было бы полезным для более точного выбора спектра нейтронов, роль же других процессов в образовании K^{40} можно было бы учесть следующим образом: три остальных нечетно-нечетных ядра V^{50} , La^{138} и Ta^{180} не имеют стабильных (n, γ) -предшественников и могли образовываться только за счет других малоэффективных процессов. Относительные распространенности этих ядер обнаруживают линейную зависи-

мость от Z . Близкая экстраполяция от V^{50} к K^{40} свидетельствует о том, что вклад этих процессов в начальную распространенность K^{40} должен составлять около 0,27% по отношению к K^{41} .

3. Как известно, все элементы с нечетным Z имеют всего один или два стабильных изотопа, причем стабильны только изотопы с четным числом нейтронов (ядра K^{40} , V^{50} , La^{138} , Lu^{174} и Ta^{180} не составляют исключения, так как они радиоактивны).



Зависимость относительных распространенностей нечетно-четных изотопов от величины Z .

Точки обозначены распространяемостью легких изотопов (кружки) — тяжелых изотопов (квадраты). Радиоактивные ядра Rb^{87} и Rb^{187} отмечены крестиками. Жирная черточка обозначает, что ядро открыто стабильным изобаром, тонкая черточка указывает на наличие долгоживущего изобара с периодом полураспада $>10^4$ лет. Черточки слева относятся к изобарам с $Z-1$, справа — к $Z+1$.

Если представить на графике относительные распространенности пар нечетно-четных изотопов, то можно заметить вполне отчетливую зависимость их от величины Z (см. рисунок). Тяжелые и соответственно легкие изотопы располагаются на прямой или плавной кривой (пунктирная линия).

При медленном синтезе такая закономерность могла получиться из-за плавного изменения отношения средних α - β сечений рассматриваемых пар изотопов по мере возрастания величины Z , при быстром синтезе — из-за статистического уравнивания вероятностей образования этих изотопов по большому числу предшествующих. Необходимо понять, какой из этих механизмов синтеза мог привести к наблюдаемой закономерности и почему имеются заметные отклонения от нее для ряда ядер.

Прежде всего, само наличие закономерности, а также отклонений от нее, указывает

на преобладание нейтронного синтеза для всех рассматриваемых ядер, включая изотопы хлора. Отклонение ядер K^{39} и Ga^{71} можно объяснить тем, что эти ядра имеют магическое число нейтронов (20 и 40 соответственно) и поэтому более устойчивы к нейтронному выгоранию, чем ядра K^{41} и Ga^{69} (в этом отношении более удивительно, что этой закономерности хорошо следуют ядра хлора).

Отклонение от закономерности, наблюдаемое у изотопов рублидия, естественнее всего объяснить распадом ядра Rb^{87} и по величине этого отклонения вычислить возраст рублидия. Но в данном случае речь может идти только о порядке величины, так как Rb^{87} имеет слишком большой период полураспада и поэтому слишком мало отклонение от графика, чтобы можно было таким способом получить приемлемую точность. Кроме того, на распространенность этого ядра могли влиять еще два противоположных фактора: магичность должна была вести к увеличению его распространенности, а наличие стабильного ядра Sr^{87} , закрывающего Rb^{87} со стороны больших Z , — к уменьшению его распространенности. Наличие со стороны больших Z стабильного ядра, как мы видим на примере ядер Sb^{123} и Re^{187} , практически не проявляется, но в случае Rb^{87} , у которого отклонение от графика мало, этим фактором пренебрегать нельзя. Изложенные здесь соображения целиком относятся и к ядру Re^{187} , для которого, кроме того, нет пока надежных прямых измерений периода полураспада. Если последний окажется больше 10^{11} лет, то положение изотопов рения на кривой станет понятным. Приняв, что отклонение Rb^{87} от графика, составляющее ~25%, целиком объясняется только его распадом, найдем для возраста рублидия (при $T_{Rb} = 4 \cdot 10^{10}$ лет)

$$t_{Rb} \approx 1,7 \cdot 10^{10} \text{ лет.}$$

Значительное отклонение, наблюдаемое для ядра In^{113} , объясняется тем, что оно закрыто со стороны нейтроноизбыточных изобар стабильным ядром Cd^{113} .

Большое число случаев уменьшения распространенности изотопов, закрытых со стороны нейтроноизбыточных изобар, заставляет предположить, что ядра Br^{79} и Ag^{107} по той же причине выпадают из общей закономерности. Оба эти ядра «прикрыты» долгоживущими ядрами: первое — ядром Se^{79} с

Абсолютная распространенность синтетических изотопов и их (μ , ν)-продвинутых по Зору и Юра [8],
а в скобках — по Гольдшту

Синтетические изотопы и их абсолютная распространенность	Относительная частота парных изотопов		Синтетические изотопы и их абсолютная распространенность	Относительная частота парных изотопов	Относительная частота парных изотопов		Синтетические изотопы и их абсолютная распространенность	Относительная частота парных изотопов		
	с меньшим Z	с большим Z			с меньшим Z	с большим Z		с меньшим Z	с большим Z	
Cl ³⁶ (3800)	S ³⁴ 15 700 (4 800)	Нет	Ini ¹⁰ 0,0046 (0,007)	0,044	Ini ¹⁰ 0,105 (0,22)	0,044	Закрыто	Sn ¹¹⁴ 0,256 (0,75)	Sn ¹¹⁴ 0,0134 (0,29)	0,052 (0,39)
Cl ³⁷ (1240)	S ³⁴ 51 (15,5)	Ar ³⁶ 120 000 (—)	Ini ¹⁰ 0,105 (0,22)	0,044	Ini ¹⁰ 0,105 (0,22)	0,044	Закрыто	Sn ¹¹⁴ 0,256 (0,75)	Sn ¹¹⁴ 0,0134 (0,29)	0,052 (0,39)
K ⁴⁰ (6400)	Ar ³⁶ 24 000 (—)	Нет	Sb ¹²¹ 0,141 (0,412)	1,35	Sb ¹²¹ 0,141 (0,412)	1,35	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
K ⁴¹ (480)	Ar ³⁶ —	Ca ⁴⁰ 47 500 (55 000)	Sb ¹²¹ 0,141 (0,412)	1,35	Sb ¹²¹ 0,141 (0,412)	1,35	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Ca ⁴² (316)	Ni ⁶⁴ 1000 (1682)	Нет	Eu ¹⁴⁷ 0,089 (0,134)	0,91	Eu ¹⁴⁷ 0,089 (0,134)	0,91	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Ca ⁴⁴ (143)	Ni ⁶⁴ 318 (53)	Zn ⁶⁴ 238 (176)	Eu ¹⁴⁷ 0,089 (0,134)	0,91	Eu ¹⁴⁷ 0,089 (0,134)	0,91	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Ga ⁶⁹ (11,5)	Zn ⁶⁴ 90,9 (67,0)	Нет	Re ¹⁸⁵ 0,05 (0,044)	0,59	Re ¹⁸⁵ 0,05 (0,044)	0,59	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Ga ⁷¹ (7,7)	Zn ⁶⁶ 3,35 (2,5)	Ge ⁷⁰ 40,4 (39,0)	Re ¹⁸⁵ 0,05 (0,044)	0,59	Re ¹⁸⁵ 0,05 (0,044)	0,59	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Br ⁷⁹ (21,7)	Se ⁷⁸ 10 (3,55)	Kr ⁷⁸ 0,175 (—)	Re ¹⁸⁷ 0,085 (0,075)	0,59	Re ¹⁸⁷ 0,085 (0,075)	0,59	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Br ⁸¹ (21,2)	Se ⁸⁰ 33,8 (7,5)	Kr ⁸⁰ 1,14 (—)	Re ¹⁸⁷ 0,085 (0,075)	0,59	Re ¹⁸⁷ 0,085 (0,075)	0,59	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Rb ⁸⁵ (4,9)	Kr ⁸⁴ 29,3 (—)	Sr ⁸⁴ 0,108 (0,224)	Ir ¹⁹¹ 0,315 (0,223)	0,63	Ir ¹⁹¹ 0,315 (0,223)	0,63	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Rb ⁸⁷ (1,9)	Kr ⁸⁶ 8,94 (—)	Закрыто	Ir ¹⁹¹ 0,315 (0,223)	0,63	Ir ¹⁹¹ 0,315 (0,223)	0,63	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Ag ¹⁰⁷ (1,65)	Pd ¹⁰⁶ 0,184 (0,49)	Cd ¹⁰⁶ 0,0109 (0,032)	Ti ²⁰⁵ 0,0319 (0,105)	0,42	Ti ²⁰⁵ 0,0319 (0,105)	0,42	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9
Ag ¹⁰⁹ (1,56)	Pd ¹⁰⁸ 0,48 (0,48)	Cd ¹⁰⁸ 0,0079 (0,023)	Ti ²⁰⁵ 0,0319 (0,105)	0,42	Ti ²⁰⁵ 0,0319 (0,105)	0,42	Sn ¹²⁰ 0,43 (9,5)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	Ti ¹¹⁰ 0,0042 (0,0302)	6,9

РЕПОЗИТОРИЙ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

периодом полураспада $7 \cdot 10^4$ лет, а второе — ядром Pd^{107} с периодом полураспада $7 \cdot 10^6$ лет (на величину отношения распространенностей изотопов серебра, кроме того, могли повлиять осколки деления).

Если приведенное объяснение наблюдающегося для брома отклонения справедливо и других причин для аномалии не имеется, то появляется средство для оценки продолжительности периода медленного нейтронного синтеза ядер.

Действительно, наличие долгоживущего β -предшественника может повлиять на распространенность конечного ядра только в двух случаях: либо когда быстрый синтез повторялся за время существования предшественника, либо когда продолжительность медленного синтеза была сравнима со временем жизни этого ядра.

В таблице приведены распространенности синтезируемых ядер и их ближайших (n, γ)-предшественников по данным различных авторов.

Сравнение второго столбца, в котором даны отношения распространенностей синтезируемых ядер, с пятым, где даны отношения сумм распространенностей исходных ядер, показывает определенную корреляцию. Сильные расхождения этих величин для хлора, калия и таллия могут объясняться как различиями нейтронных сечений у синтезируемых и исходных ядер, так и тем, что принятые сейчас абсолютные распространенности серы, аргона и свинца сильно занижены.

Изотопы брома, сурьмы и рения при медленном синтезе могли образовываться в основном только за счет (n, γ)-реакции на изотопах своих прямых предшественников: селена, олова и вольфрама. Поэтому для них есть экспериментальная возможность решения вопроса о типе синтеза путем измерения соответствующих (n, γ)-сечений.

Если окажется, что и в этих трех случаях основная доля ядер возникла в результате медленного синтеза, то по известным сечениям, известному периоду полураспада Se^{79} и величине отклонения Br^{79} от рассмотренной выше закономерности (см. рисунок) можно будет оценить характерное время медленного ядерного синтеза. Пока можно ожидать, что оно больше 10^3 лет и меньше или равно 10^5 лет. Это следует из того, что присутствие ядра Co^{62} с временем жизни ~ 180 лет, закрывающего ядро Cu^{63} , не сказалось на распространенностях изотопов меди, а присутствие ядра Se^{79} с временем жизни $\sim 10^3$ лет, закрывающего ядро Br^{79} привело к уменьшению распространенности Br^{79} в два раза по сравнению с ожидаемым из графика.

В работе [7] изотопы брома, рения, серебра, сурьмы (Sb^{123}), европия, рения и иридия в отличие от изотопов хлора, калия, индия и таллия отнесены к разряду ядер, образующихся в результате быстрого нейтронного синтеза в сверхновых звездах. Не исключено, что отклонения для брома и серебра объясняются именно этим обстоятельством, но тогда трудно объяснить, почему так удачно ложатся на прямую остальные перечисленные ядра, возникшие в результате быстрого и медленного синтеза.

Еще одно полезное следствие наблюдающейся на рисунке закономерности проявляется в связи с определением промежутка времени от окончания синтеза ядер до образования твердой фазы по методу Рейнольдса [2]. Уравнение для вычисления этого времени по наблюдаемому в метеорите избытку Xe^{139} содержит начальное отношение $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$. Поскольку для открытых и немагических ядер нет ни одного случая отклонения от закономерности, то можно ожидать, что в конце ядерного синтеза это отношение было близко к единице.

Поступила в Редакцию 12/XI 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Кошман. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **62**, 505 (1956).
2. I. Reynolds. *Phys. Rev. Lett.*, **4**, 8 and 354 (1957).
3. W. Fowler, F. Hoyle. *Ann. phys.*, **10**, 280 (1953).
4. P. Kuroda. *Geochim. et cosmochim. acta*, **24**, 40 (1961).
5. E. Anders. *Revs. Mod. Phys.*, **34**, 287 (1962).
6. И. П. Селинов. Периодическая система изотопов. М., Изд-во АН СССР, 1962.
7. E. Burbidge et al. *Revs. Mod. Phys.*, **29**, 547 (1957).
8. H. Suess, H. Urey. *Revs. Mod. Phys.*, **28**, 53 (1956).