

К ИСТОРИИ ПРАВИЛ ЩУКАРЕВА — МАТТАУХА

А. П. ГРИНБЕРГ (Ленинград)

В начале 20-х годов, когда число известных стабильных изотопов (нуклидов) [1, с. 5] уже достигло нескольких десятков, возникли попытки дать их систематику, выявить закономерности в данном множестве (см., например, [2, 3]); был предложен ряд эмпирических правил. Так, при нечетном Z элемент часто оказывался моноизотопным или, во всяком случае, имел не более двух изотопов («правило Астона» [4, с. 175]); зачатки этого правила содержались уже в работах В. Харкинса (см., например, [2]); у каждого из четных элементов (при $Z \geq 8$) число найденных стабильных изотопов равнялось трем или было больше трех.

Заметим, что различные правила в системе нуклидов в свое время формулировались на основании опытного материала, процесс накопления которого обычно был далек от завершения. Тем не менее авторы этих правил нередко предлагали распространять их на все множество нуклидов, в том числе на еще не открытые, и, исходя из этого, пытались делать научные предсказания. Эти предсказания часто не подтверждались.

При изучении естественных радиоактивных семейств было установлено, что существуют атомы с разными Z , но одинаковым A *. Например, $MsTh_1 = {}_{88}^{228}Ra$, $MsTh_2 = {}_{89}^{228}Ac$ и $RaTh = {}_{90}^{228}Th$. А. Стьюарт [5] предложил называть такие атомы изобарами (от греческих слов $\iota\sigma\sigma$ — равный, одинаковый, и $\beta\alpha\rho\varsigma$ — тяжесть, вес). Этот термин не совсем точен, так как у изобаров одинаковы не веса (массы), а лишь массовые числа. Отметим, что, основываясь на этом, С. А. Щукарев¹ в 1949 г. предложил для таких атомов вместо термина *изобары* термин *изонуклоны* [7], однако это название не получило распространения.

Первая пара изобаров среди стабильных нуклидов была установлена в конце 1922 г.: был открыт ${}_{20}^{40}Ca$ [8] — изобар ранее найденного ${}_{18}^{40}Ar$.

Правила изобаров, сформулированные С. А. Щукаревым

В 1922—1924 гг. С. А. Щукарев проанализировал известное в то время множество стабильных нуклидов и выявил некоторые закономерности, касающиеся свойств изобаров [3, 9]. Подобно другим исследователям (А. ван-ден-Брук [10], В. Харкинс [2] и др.), С. А. Щукарев допускал, что цепочки последовательных α - и β -распадов в каждом радиоактивном семействе можно продолжить в область стабильных нуклидов и таким образом получить представление о происхождении изотопов одного элемента из изотопов другого, более тяжелого. То, что в действительности рассматриваемые нуклиды не радиоактивны, можно было объяснить тем, что величины периодов полураспада

* В свое время массовое число определялось как целое число A — наиболее близкое к атомному весу нуклида, выраженному в определенных единицах; по современным представлениям A — число нуклонов в ядре данного атома: $A = Z + N$, где Z — число протонов (порядковый номер элемента), N — число нейтронов.

¹ Сергей Александрович Щукарев (1893—1984) — советский химик, профессор, заслуженный деятель науки РСФСР, на протяжении нескольких десятков лет заведовал кафедрой общей и неорганической химии Ленинградского университета им. А. А. Жданова [6].

таких ядер крайне велики, энергии испускаемых частиц соответственно очень малы. Поэтому чувствительность радиометрических методов не позволяет констатировать радиоактивный распад [3].

Рассматривая те звенья цепочки превращений (для *устойчивых* нуклидов), которые состоят из двух последовательных «выбросов» β -частиц, С. А. Щукарев отмечает, что в таких случаях мы имеем дело с цепочкой из трех изобаров: $\begin{pmatrix} A \\ Z-1 \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix}$ и

$\begin{pmatrix} A \\ Z+1 \end{pmatrix}$. Он предлагает следующие два правила (которые мы здесь изложим языком, более близким к современному по сравнению с оригиналом): 1) если массовое число A этих изобар нечетно, то в природе существует только средний изобар, а первый и третий если и существуют, то содержание их в плеяде изотопов данного элемента столь мало, что они не могут быть обнаружены масс-спектрометрически; 2) при четном массовом числе первый и третий изобары существуют в природе, а второго в природе нет (в указанном только что смысле). Первое правило констатирует, что в случае нечетного A не существует изобаров элементов, *соседних* с определенным элементом по периодической системе (для них $\Delta Z=1$), второе — что в случае четного A должны существовать изобары с $\Delta Z=2$ (но соседних изобаров и в этом случае нет). С отсутствием нечетных (по A) изобаров С. А. Щукарев связывает то, что изотопов с нечетным A бывает не более двух.

В то время, когда были сформулированы эти правила, в таблице известных стабильных нуклидов не только не было нечетных соседних изобаров, но (за исключением изобаров с $A=40$) не было и четных изобаров, с $\Delta Z=2$, предсказанных Щукаревым. В дальнейшем, однако, последние были открыты, и число их быстро росло. Но вместе с тем было открыто и несколько соседних нечетных изобаров, что противоречило первому правилу Щукарева. Эти исключения из правила будут подробно обсуждены ниже.

Правило изобаров, сформулированное И. Маттаухом

В 1934 г., уже после создания протонно-нейтронной модели строения ядра и открытия искусственной радиоактивности, И. Маттаух сформулировал правило изобаров [11], аналогичное предложенному Щукаревым. При этом Маттаух располагал уже сведениями о существенно большем числе стабильных нуклидов, а также о нескольких искусственно синтезированных радиоактивных нуклидах. В разных публикациях приводится несколько различных вариантов изложения правила Маттауха; дадим здесь формулировку автора [11]: «Для изотопов нечетных элементов не существует [стабильных] изобаров и, частично выходя за эти рамки, не существует изобаров с нечетным массовым числом». Остается неясным, относится ли вторая часть цитированной фразы только к нечетным элементам, о которых идет речь в первой части, или ко всем элементам. Из дальнейшего анализа статьи [11] следует, что автор, по-видимому, имеет в виду все элементы. В таком случае «правило Маттауха» означает, что если рассматривается существующий устойчивый изотоп с нечетным массовым числом, принадлежащий какому-либо элементу, то ни у какого другого элемента не может быть стабильного изотопа с таким же массовым числом.

Сравнивая правило Маттауха с первым правилом Щукарева, легко видеть, что они по существу идентичны, хотя формулировка Маттауха охватывает более широкий класс нуклидов с нечетным A , чем у Щукарева (в последнем случае речь идет об изобарах, соседних с данным, т. е. характеризуемых величиной $\Delta Z=1$, тогда как у Маттауха величина ΔZ не ограничена). Что касается второго правила Щукарева (относящегося к изобарам с четным A), у Маттауха аналогичного правила нет.

Работа [11] сопровождается заметкой Г. Бека [12], в которой эмпирическое правило Маттауха обосновывается исходя из общих теоретических соображений. Из теории β -распада, разработанной Ферми, следует, что при выполнении некоторого энергетического условия всегда будет происходить превращение одного ядра в изобарное с ним другое ядро, путем испускания β^- - или β^+ -частиц. Следовательно, не может существовать двух стабильных соседних изобаров (ССИ): какой-то один из них должен

быть радиоактивным и будет превращаться в другой член такой пары. Энергетическое условие возможности β -превращения Бек записывает в виде неравенства $\Delta M_n > (m_e + m_\nu)$, где ΔM_n — разность ядерных масс соответствующих изобаров, m_e и m_ν — массы покоя электрона и нейтрино². О величине m_ν делались разные предположения: по Ферми, $m_\nu = 0$, другие авторы допускали, что $m_\nu = m_e$, но во всяком случае величина $(m_e + m_\nu)$ гораздо меньше, чем ΔM_n . Поэтому лишь в каких-то специфических, крайне редких случаях β -превращение ядра в соседнее изобарное ядро может оказаться энергетически невозможным. Таким образом, теория хотя и не исключает полностью возможности существования двух ССИ, но предполагает, что такие случаи должны быть крайне редкими.

И. Маттаух отмечал, что экспериментальные данные тем не менее свидетельствуют о наличии довольно многочисленных исключений из «правила изобаров». К таким исключениям, например, относятся пары ${}_{48}^{113}\text{Cd} - {}_{49}^{113}\text{In}$, ${}_{49}^{115}\text{In} - {}_{50}^{115}\text{Sn}$, ${}_{51}^{123}\text{Sb} - {}_{52}^{123}\text{Te}$, ${}_{75}^{187}\text{Re} - {}_{76}^{187}\text{Os}$ и ряд других. Согласно Маттауху, эти исключения, по всей вероятности, кажущиеся: возможно, некоторых из перечисленных изобаров нет в природе, а констатация их существования связана с ошибками в масс-спектрометрических работах (такие ошибки бывали не раз, особенно если речь шла об очень мало распространенных изотопах). С другой стороны, полагал Маттаух, некоторые нуклиды, считающиеся стабильными, на самом деле радиоактивны. Вскоре К. Бейнбридж и Е. Иордан показали [13], что многие из отмеченных Маттаухом исключений действительно являются следствием масс-спектрометрических ошибок. В числе, по-видимому, стабильных пар соседних изобаров в работе [13] предлагалось оставить только первые три из перечисленных выше (с $A = 113, 115$ и 123).

Изучение проблемы стабильности соседних изобаров

Впервые вопрос о возможности существования пар ССИ был подвергнут подробному теоретическому анализу в обзоре Г. Бете и Р. Бечера [14, с. 198]³. К числу изобарных β -превращений кроме β^- - и β^+ -распадов авторы добавили один из теоретически возможных (но еще не открытых на опыте) «обратных β -процессов» — захват орбитального электрона ядром. Наиболее вероятен захват К-электрона. Процесс захвата, как и β^+ -распад, происходит при превращении одного из ядерных протонов в нейтрон; при этом имеет место переход $\begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A \\ Z-1 \end{pmatrix}$. При достаточно большой разности масс исходного и конечного ядер оба процесса — β^+ -распад и захват электрона — идут параллельно с тем или иным коэффициентом разветвления, величина которого зависит от конкретных условий перехода. Однако в некоторых случаях энергия перехода мала, и тогда может происходить только захват электрона. Наконец, при совсем малой энергии перехода может оказаться невозможным и захват электрона. Из сказанного очевидно, что если предполагается возможность существования ССИ как результат энергетического запрета β -превращения одного изобара в другой, то при анализе вопроса надо учитывать только β^- -распад и захват электрона. Энергетические условия для этих превращений получаются из баланса масс и кинетических энергий атомов и частиц, участвующих в процессе. Для β^- -распада этот баланс выглядит следующим образом:

$$M_Z = M_{Z+1} + \frac{W}{c^2}, \quad (1)$$

где M_Z и M_{Z+1} — точные массы нейтральных атомов соответствующих элементов, W — суммарная кинетическая энергия β -частицы и нейтрино, испускаемых при β -распаде (считается, что β -переход происходит с основного уровня исходного ядра на основной уровень конечного); другими словами, W — максимальная кинетическая энергия β -час-

² В дальнейшем вопрос о рассматриваемом энергетическом условии будет изложен подробнее.

³ Эту первую сводку данных, накопленных молодой ядерной физикой после открытия нейтрона и других замечательных событий 1932 г., многие современники шутили и одновременно с уважением называли «библией Бете и Бечера».

тиц. Выражение (1) получено в предположении, что массой покоя нейтрино можно пренебречь по сравнению с массой покоя электрона [15].

Условие энергетической возможности β^- -перехода, очевидно, записывается в виде $W > 0$, т. е.

$$M_Z - M_{Z+1} > 0. \quad (2)$$

Итак, достаточно сколь угодно малого превышения M_Z над M_{Z+1} , чтобы β^- -переход $\begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A \\ Z+1 \end{pmatrix}$ был энергетически возможен. Поэтому крайне мало вероятно, что в природе найдется случай, когда стабильны оба соседних изобара.

Если же массы соответствующих изобарных атомов таковы, что $M_{Z+1} > M_Z$, необходимо рассмотреть энергетическое условие возможности перехода $\begin{pmatrix} A \\ Z+1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix}$ путем захвата орбитального электрона ядром. Для этого процесса баланс масс и энергии имеет вид

$$M_{Z+1} = M_Z + W/c^2 + B_Z^2/c^2, \quad (3)$$

где W — кинетическая энергия нейтрино, B_Z^2 — энергия связи захватываемого электрона в данном атоме [15].

Условие энергетической возможности захвата электрона ядром:

$$W > 0, \text{ или } M_{Z+1} - M_Z - B_Z^2/c^2 > 0. \quad (4)$$

Таким образом, достаточно, чтобы M_{Z+1} превышала M_Z на величину B_Z^2/c^2 (которая по ядерным масштабам очень мала: например, даже для столь тяжелого элемента, как свинец, она составляет 88 кэВ в случае K -электрона и ~ 16 кэВ — в случае L -электрона), переход $\begin{pmatrix} A \\ Z+1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix}$ путем захвата электрона будет энергетически возможным. Следовательно, и в этом случае вряд ли в природе найдутся примеры, когда стабильны оба соседних изобара ⁴.

Чем же в таком случае можно было объяснить наличие таких пар ССИ, как $^{113}\text{Cd} - ^{113}\text{In}$ и др.? Бете и Бечер [14] дали следующий ответ. Если некоторый β^- -процесс энергетически возможен, он обязательно будет осуществляться. Однако сам по себе факт энергетической возможности ничего не говорит о скорости перехода. Последняя зависит от энергии перехода W , от величины Z и резко зависит от разности спинов исходного и конечного ядер (ΔI). Бете и Бечер подробно рассмотрели введенное Ферми разделение β^- -переходов на разрешенные и запрещенные. Последний термин не означает, что переход абсолютно запрещен, однако вероятность его может оказаться крайне низкой. Оценочные расчеты показали, что при $W \sim 100 - 500$ кэВ и $\Delta I \sim 3$ или 4 период полураспада для соответствующего β^- -превращения легко может достигнуть величины $T_{1/2} \sim 10^{15}$ лет. Столь слабую радиоактивность обнаружить в эксперименте чрезвычайно трудно.

Иными словами, кажущиеся исключения из правила Щукарева — Маттауха можно объяснить тем, что один из членов пары ССИ в действительности радиоактивен, но его β^- -распад характеризуется очень большой величиной $T_{1/2}$ и потому трудно наблюдаем. Кроме того, можно предположить, что в некоторых случаях ССИ трудность обнаружения радиоактивности, вероятно, усугубляется тем, что испускается очень мягкое (легко поглощаемое) β^- -излучение, или тем, что нуклид превращается путем захвата электрона — процесса, трудно регистрируемого.

Существование естественно-радиоактивных элементов (отдельных их изотопов) в средней области периодической системы, с периодами полураспада, сравнимыми с возрастом Земли ($\sim 10^9$ лет) или превышающими его, было установлено сравнительно давно. Это имело непосредственное отношение к проблеме ССИ.

В 1905 г. Дж. Дж. Томсон обнаружил, что калий и рубидий самопроизвольно

⁴ Заметим, что в свое время непосредственное применение критериев (2) и (4) для определения того, какой из членов пары ССИ должен быть радиоактивным, было невозможно, поскольку значения масс соответствующих атомов не были известны с необходимой точностью. Поэтому с помощью этих критериев проводились лишь качественные рассуждения.

испускают заряженные частицы, и предположил, что, возможно, речь идет о радиоактивности этих элементов [16]. Гораздо позже было установлено, что калий испускает β^- -частицы с энергией до 700 кэВ, а также γ -лучи с энергией ~ 2 МэВ. В нескольких работах было высказано предположение, что активным является еще не известный изотоп калия — ^{40}K , превращающийся в $^{40}_{20}\text{Ca}$ с $T_{1/2} \sim 10^{10} - 10^{13}$ лет [17—19]. В связи с работой [18] А. Нир тщательно исследовал изотопный состав калия и открыл изотоп ^{40}K , распространенность которого оказалась меньше распространенности ^{39}K в 8600 раз [20]. Через 2 года гипотеза о радиоактивности ^{40}K была подтверждена прямым опытом с помощью измерения активности изотопов калия, разделенных на масс-спектрометре [21]. Таким образом, ^{40}K , у которого есть стабильные соседние изобары $^{40}_{18}\text{Ar}$ и $^{40}_{20}\text{Ca}$, не попал в число исключений из второго правила Шукарева.

В 1937 г. К. Вайцзеккер предсказал, что ^{40}K превращается не только в ^{40}Ca (путем β^- -распада), но и в ^{40}Ar — путем захвата электрона [22]. В результате усилий нескольких групп (длившихся до 1962 г.) это предположение было подтверждено и уточнено. Оказалось, что превращение $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ происходит не только путем захвата электрона [23]; но и в результате испускания позитронов [24]. Тем самым был открыт первый случай естественной позитронной радиоактивности (равно как и естественной электронно-захватной активности).

Современные данные о ^{40}K и его радиоактивности [25]: $a = 0,0117\%$; $I^\pi = 4^-$, $T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9$ лет, относительные доли ветвей распада: $\beta^- = 89,3\%$, захват электрона — $10,7\%$, $\beta^+ = 0,001\%$; $W_{\text{гр}}(\beta^-) = 1,32$ МэВ, $W_{\text{гр}}(\beta^+) = 483$ кэВ, $W_\gamma = 1,46$ МэВ.

В 1905 г. была открыта радиоактивность рубидия, а позднее установлено, что он испускает β^- -частицы. В 1934 г. И. Маттаух [11] высказал предположение, что носителем активности является рубидий-87. Поэтому пара $^{87}_{37}\text{Rb} - ^{87}_{38}\text{Sr}$ не является исключением из правила изобаров. Позже Маттаух экспериментально подтвердил это предположение. О. Ган с сотрудниками выделили стронций из канадской слюды [26] и передали его Маттауху для масс-спектрометрического анализа. Оказалось [27], что образец состоит почти целиком из $\text{Sr}-87$, тогда как в обычных стронциевых рудах содержание $^{87}\text{Sr} \approx 7\%$. Маттаух сделал вывод: в слюде стронций образовался в результате β^- -распада ^{87}Rb , длившегося миллиарды лет. Тем самым подтверждалось, что радиоактивным является ^{87}Rb . Вскоре этот вывод был доказан измерением активности изотопов рубидия, разделенных на масс-спектрографе [28].

В работе [29] применялся интересный метод измерения периода полураспада ^{87}Rb : с помощью масс-спектрографа было определено, насколько возросло количество ^{87}Sr за время выдержки образца в течение ~ 7 лет. Было вычислено значение $T_{1/2}(^{87}\text{Rb}) = (4,72 \pm 0,04) \cdot 10^{10}$ лет.

Современные данные о ^{87}Rb и его радиоактивности [25]: $a = 27,83\%$, $I^\pi = 3/2^-$, $T_{1/2} = 4,8 \cdot 10^{10}$ лет, $W_{\text{гр}}(\beta^-) = 275$ кэВ.

В таблице приводится сводка результатов исследований проблемы ССИ. Ныне очевидно, что правило Шукарева — Маттауха исключений не имеет. Одним из наиболее трудных оказался случай $^{113}\text{Cd} - ^{113}\text{In}$. Радиоактивность ^{113}Cd была установлена только в 1970 г. [30] (использовался образец, в котором содержание ^{113}Cd было доведено до $\sim 96,4\%$).

Ранее были совершенно правильно предугаданы обстоятельства, которые долго не позволяли зафиксировать радиоактивность у некоторых членов пар соседних изобаров (большой период полураспада $\approx 10^{10} - 10^{15}$ лет; малая энергия β^- -частиц; например, у ^{187}Re $W_{\text{гр}} = 2,65$ кэВ [31]; в нескольких случаях распад идет в основном путем захвата электрона: ^{128}Te (?), ^{138}La).

Четыре триады изобаров, помещенные в таблицу, имеют четные A (40, 92, 138 и 176). Они иллюстрируют второе правило Шукарева. Однако пока можно отметить (см. [25]) два исключения из правила:

1. Триада $^{50}_{22}\text{Ti}$ (5,2%; 0+) — $^{50}_{23}\text{V}$ (0,250%; 6+) — $^{50}_{24}\text{Cr}$ (4,35%; 0+)!. По правилу, ^{50}V не может быть устойчивым. Однако до сих пор его радиоактивность не обнаружена. Можно предположить, что вероятность превращения $^{50}\text{V} \rightarrow ^{50}\text{Ti}$ или $^{50}\text{V} \rightarrow ^{50}\text{Cr}$ очень низка вследствие весьма высокой степени запрещения β^- -перехода ($6^+ \rightarrow 0^+$) *.

* В недавно опубликованной работе [31а] показано, что ядро ^{50}V радиоактивно, $T_{1/2} \approx 1,5 \cdot 10^{17}$ лет.

Сводка данных по изучению проблемы ССИ

| Изобарная группа | Относительная распространенность, % | $J\pi$ | Радиоактивный член группы | Период полураспада, годы | Тип распада | Дата установления радиоактивности | Библиографическая ссылка |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| ${}^3_1\text{H}$ | | 1/2 ⁺ | ${}^3_1\text{H}$ | 12,33 | β^- | 1939 г. | [32—34] |
| ${}^3_2\text{He}$ | 1,3·10 ⁻⁴ | 1/2 ⁺ | | | | | |
| ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ | 99,60 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{40}_{19}\text{K}$ | 0,0117 | 4 ⁻ | ${}^{40}\text{K}$ | 1,28·10 ⁹ | β^- , э. з. β^+ | 1905, 1937 гг. | [16, 21, 23, 24] |
| ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ | 96,94 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{87}_{37}\text{Rb}$ | 27,83 | 3/2 ⁻ | ${}^{87}\text{Rb}$ | 4,8·10 ¹⁰ | β^- | 1905, 1937 гг. | [16, 27, 29] |
| ${}^{87}_{38}\text{Sr}$ | 7,0 | 9/2 ⁺ | | | | | |
| ${}^{92}_{40}\text{Zr}$ | 17,1 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{92}_{41}\text{Nb}$ | ~2·10 ⁻¹¹ | 7 ⁺ | ${}^{92}\text{Nb}$ | 3,2·10 ⁷ | э. з. | 1972 г. | [35] |
| ${}^{92}_{40}\text{Mo}$ | 14,8 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{113}_{48}\text{Cd}$ | 12,2 | 1/2 ⁺ | ${}^{113}\text{Cd}$ | 9·10 ¹⁵ | β^- | 1969 г. | [30] |
| ${}^{113}_{49}\text{In}$ | 4,3 | 9/2 ⁺ | | | | | |
| ${}^{115}_{49}\text{In}$ | 95,7 | 9/2 ⁺ | ${}^{115}\text{In}$ | 5,1·10 ¹⁴ | β^- | 1950 г. | [36] |
| ${}^{115}_{50}\text{Sn}$ | 0,38 | 1/2 ⁺ | | | | | |
| ${}^{123}_{51}\text{Sb}$ | 42,7 | 7/2 ⁺ | | | | | |
| ${}^{123}_{52}\text{Te}$ | 0,89 | 1/2 ⁺ | ${}^{123}\text{Te}$ | 1·10 ¹⁵ | э. з. | 1962 г. | [37] |
| ${}^{138}_{56}\text{Ba}$ | 71,7 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{138}_{57}\text{La}$ | 0,089 | 5 ⁺ | ${}^{138}\text{La}$ | 1,03·10 ¹¹ | э. з., β^- | 1950 г. | [38] |
| ${}^{138}_{58}\text{Ce}$ | 0,254 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{176}_{70}\text{Yb}$ | 12,6 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{176}_{71}\text{Lu}$ | 2,61 | 7 ⁻ | ${}^{176}\text{Lu}$ | 3,6·10 ¹⁰ | β^- | 1938 г. | [39] |
| ${}^{176}_{72}\text{Hf}$ | 5,2 | 0 ⁺ | | | | | |
| ${}^{187}_{75}\text{Re}$ | 62,60 | 5/2 ⁺ | ${}^{187}\text{Re}$ | 4·10 ¹⁰ | β^- | 1948 г. | [31] |
| ${}^{187}_{76}\text{Os}$ | 1,6 | 1/2 ⁻ | | | | | |

Примечание. Приведенные характеристики взяты в основном из сводки [25]. Там, где в графе таблицы приводятся две даты, вторая относится к году доказательства активности определенного изотопа К и Rb.

2. Триада ${}^{180}_{72}\text{Hf}$ (35,2%; 0⁺) — ${}^{180}_{73}\text{Ta}$ (0,0123%; 0⁺) — ${}^{180}_{74}\text{W}$ (0,13%; 0⁺). Радиоактивность ${}^{180}\text{Ta}$ до сих пор достоверно не установлена [40].

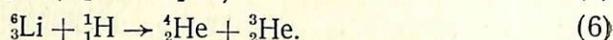
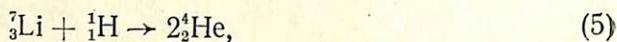
В 1948 г. Н. Фезер [41] выдвинул следующее утверждение, которое можно рассматривать как дополнение ко второму правилу Шукарева: в триаде изобаров средний изобар является радиоактивным и должен распадаться разветвленно: как в соседний изобар с меньшим значением Z , так и в соседний изобар с большим значением Z . Однако оказалось, что так происходит далеко не всегда: в ряде случаев разветвленного распада не наблюдается. Это относится и к нуклидам, вошедшим в таблицу (${}^{92}\text{Nb}$ и ${}^{176}\text{Lu}$) и ко многим другим. Например, в триаде ${}^{124}_{50}\text{Sn}$ (5,64%; 0⁺) — ${}^{124}_{51}\text{Sb}$ (3⁻) — ${}^{124}_{52}\text{Te}$ (4,61%; 0⁺) ядро ${}^{124}\text{Sb}$ превращается в ${}^{124}\text{Te}$ путем β^- -распада (с периодом 60 дн), но переход его в ${}^{124}\text{Sn}$ — путем β^+ -распада или захвата электрона не обнаружен.

«Правило Фезера» может быть сформулировано и следующим образом: если рассматриваются любые два соседних изобара $\begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} A \\ Z+1 \end{pmatrix}$, один из которых стабилен, то второй должен быть радиоактивным и должен происходить либо переход $\begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A \\ Z+1 \end{pmatrix}$, либо переход $\begin{pmatrix} A \\ Z+1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix}$. Оказывается, что последнее требование (о возможных переходах) выполняется для всех изобаров с нечетным A , но для изобаров с четным A — далеко не во всех случаях; например, в паре ^{124}Sn — ^{124}Sb изобар ^{124}Sb радиоактивен, но в ^{124}Sn не переходит. Можно сделать вывод, что в реальных условиях вероятность распада ядра по одной ветви по той или иной причине зачастую на много порядков величины превышает вероятность его распада по другой ветви.

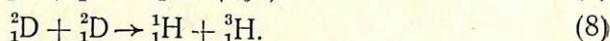
Изучение пары изобаров ^3H — ^3He

Изучение самой легкой изобарной пары ^3H — ^3He представляет интерес с точки зрения истории отечественной ядерной физики.

Одной из первых работ И. В. Курчатова в области ядерной физики была статья, написанная им в Ленинградском физико-техническом институте совместно с К. Д. Синельниковым и посвященная критическому анализу всех накопленных к тому времени данных о механизмах ядерных реакций, протекающих при бомбардировке лития протонами [42]. Как известно, это первая ядерная реакция, осуществленная с помощью ускоренных частиц (Дж. Коккрофт и Э. Уолтон, лаборатория Резерфорда в Кембридже, 1932 г. [43]). Дальнейшему изучению ее Резерфорд с сотрудниками уделяли много внимания. В работе [44] было высказано соображение о двух возможных механизмах реакции:



Тем самым предполагалось существование легкого изотопа гелия ^3He , о котором еще ничего не было известно. В 1934 г. М. Олифант, П. Гартек и Э. Резерфорд [45] предположили, что имеют место следующие ядерные реакции:



Таким образом, постулировалось появление новых нуклидов — ^3He и сверхтяжелого изотопа водорода ^3H (позже он получил название тритий).

И. В. Курчатов и К. Д. Синельников показали, что многие аргументы свидетельствуют в пользу предположения группы Резерфорда о протекании реакции (8). Таким образом, в продуктах реакции $\text{Li}+p$ должен находиться легкий изотоп гелия. Из двух соседних изобаров с $A=3$ один, согласно правилу Шукарева — Маттауха, должен быть радиоактивным. На основе значений масс атомов ^3H и ^3He (полученных из данных об энергетическом балансе соответствующих ядерных реакций) можно было утверждать, что эти массы очень близки друг к другу, однако невозможно было с достоверностью сказать, какой из этих двух атомов тяжелее. Возникла дилемма: ожидать ли процесса ${}^3_1\text{H} \xrightarrow{\beta^-} {}^3_2\text{He}$ или, наоборот, процесса ${}^3_2\text{He} \xrightarrow{\beta^+} {}^3_1\text{H}$. Поэтому И. В. Курчатов с сотрудниками [46] предприняли попытку экспериментально обнаружить радиоактивность ^3He .

В статье, где описана эта попытка, содержалось интересное замечание: «Одна из возможностей распада ^3He путем захвата электрона уже обсуждалась нами ранее». К сожалению, здесь нет ссылки. Нам не удалось найти какой-либо статьи Курчатова или его сотрудников, в которой рассматривался бы этот вопрос. Каким образом в марте 1934 г. (время написания статьи [46]) могло появиться обсуждение такой проблемы, как радиоактивное превращение ядра путем захвата орбитального электрона? Обычно считается, что первая работа, в которой указана возможность такого процес-

са и дается расчет его вероятности, это статья Х. Юкавы и С. Сакаты, опубликованная в 1935 г. [47]. Как оказалось, некоторые общие высказывания о возможности захвата орбитального электрона ядром можно найти в более ранних публикациях. Отметим, например, статью Г. Бека [48], в которой приводится указание на то, что он произвел расчет вероятности захвата электрона тяжелым ядром из окружающей его атомной оболочки; причем этот расчет показал, что по порядку величины вероятность такого процесса мало отличается от вероятности β -распада. Примечательно, что идея о возможности захвата электрона возникла у Г. Бека до опубликования работы Э. Ферми по теории β -распада [49]. Только после ее разработки стало ясно, что (если верны допущения, положенные в ее основу) должны существовать различные обратные β -процессы [50]; одним из них и является захват орбитального электрона ядром.

Дж. Вик [51] распространил теорию Ферми на случай позитронного распада. Вик указал также на возможность захвата орбитального электрона ядром, оценил величину отношения вероятностей захвата электрона и испускания позитрона в случаях, когда для данного неустойчивого ядра энергетически возможны оба эти процесса, и отметил, что захват электрона будет трудно наблюдать, так как он связан только с испусканием (помимо нейтрино) рентгеновского излучения и электронов Оже.

Статья Вика увидела свет 4 марта 1934 г. Возможно, хотя и мало вероятно, что Курчатов познакомился с нею до отправки в печать работы [46] (она поступила в редакцию 10 апреля 1934 г.).

Надо отметить также, что Г. Бек принял участие в работе 1 ядерной конференции в Ленинграде (24—30 сентября 1933 г.). Вполне возможно, что в его беседах с И. В. Курчатовым обсуждалась идея о существовании в природе явления захвата орбитального электрона ядром.

Курчатов, по-видимому, обсуждал вопрос о возможности распада ${}^3\text{He}$ путем захвата орбитального электрона с Д. Д. Иваненко (работавшим в то время в том же институте). Об этом можно судить на основании следующих слов в заметке Д. Д. Иваненко [52] (дается перевод с английского текста, в котором интересующая нас фраза звучит более четко [52, р. 156], чем в русском тексте): «Анализируя несколько возможностей обнаружения ${}^3\text{He}$, Курчатов и Синельников отметили (ДАН, в печати), что этот изотоп гелия, возможно, превращается в изотоп водорода ${}^3\text{H}$, захватывая электрон из внешних оболочек». К сожалению, упомянутая статья, будто бы отправленная в печать, в журнале «Доклады АН СССР» (и в других журналах, как показали тщательные поиски) не появилась.

Экспериментальная работа группы Курчатова [46] была первым исследованием, посвященным поискам позитронной активности ${}^3\text{He}$. Идея заключалась в следующем: в ядерной реакции ${}^6\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ получить ${}^3\text{He}$ и попытаться обнаружить позитронную активность мишени (в которой «застревали» нейтральные атомы ${}^3\text{He}$). Ускоренными протонами с энергией до 350 кэВ облучалась мишень из Li_2O . Ее активность детектировалась с помощью тонкостенного счетчика Гейгера — Мюллера. Активность, однако, обнаружить не удалось, и авторы пришли к выводу, что ядро ${}^3\text{He}$ либо устойчиво, либо его период полураспада более трех лет.

Вспоминая об этих работах, А. К. Вальтер позднее писал: «Не прошло и трех месяцев с тех пор, как в Кембридже и Ленинграде для объяснения короткопробежных частиц при расщеплении лития была выдвинута гипотеза легкого гелия», как «легкий гелий» перестал быть гипотезой, превратясь в достоверность, благодаря работе группы американских ученых» [53, с. 222]. Однако заметка американских специалистов по масс-спектрометрии [54], о которой говорил Вальтер, оказалась ошибочной [55]. Вопрос о том, существует ли в природе «легкий гелий» и какой из соседних изобаров ${}^3\text{H}$ или ${}^3\text{He}$ является радиоактивным, еще в течение длительного времени оставался открытым. При этом распространенным было мнение, что ядро ${}^3\text{H}$ устойчиво (см., например, последнюю, опубликованную незадолго до смерти, статью Резерфорда [56]).

Только в 1939 г. было надежно установлено, что ядро ${}^3\text{He}$ устойчиво. Эту работу выполнили Л. Альварец и Р. Корног [32] в Радиационной лаборатории Калифорнийского университета. По современным данным, содержание ${}^3\text{He}$ в природном атмосферном гелии составляет всего $\sim 1,3 \cdot 10^{-4}\%$. Неудивительно, что гелий-3 так долго не удавалось найти ни в масс-спектрометрических, ни в оптико-спектрометрических измерениях. Вскоре Альварец и Корног показали, что ${}^3\text{H}$ (тритий) радиоактивен и распадается

ется с испусканием очень мягких β -частиц [33, 34]. По современным данным, верхняя граница β -спектра трития составляет $\sim 18,6$ кэВ, период полураспада $\sim 12,3$ года.

Автор глубоко признателен В. Я. Френкелю за обсуждение и внимание к работе.

Литература

1. Трифонов Д. Н., Кривомазов А. Н., Лисневский Ю. И. Химические элементы и нуклиды. М.: Атомиздат, 1980.
2. Harkins W. D. The constitution and stability of atom nuclei. (A contribution to the subject of inorganic evolution).—Phil. Mag., 1921, ser. 6, v. 42, № 249, p. 305—339.
3. Шукарев С. А. Периодическая система химических элементов с точки зрения учения об изотопах.—В кн.: Новые идеи в химии. Сб. № 9. Изотопы. Пг., 1924, с. 61—120.
4. Aston F. W. Mass-spectra and isotopes. L.: Arnold, 1933.
5. Stewart A. W. Atomic structure from the physico-chemical standpoint.—Phil. Mag., 1918, ser. 6, v. 36, № 214, p. 326—336.
6. Мищенко К. П. Сергей Александрович Шукарев. [К 80-летию со дня рождения.]—Журн. общ. химии, 1974, т. 44, № 3, с. 473—476.
7. Шукарев С. А. Правила изонуклон и распределение устойчивых элементов по артадам и перисадам.—Журн. общ. химии, 1949, т. 49, № 3, с. 380—390.
8. Dempster A. J. Positive-ray analysis of potassium, calcium and zinc.—Phys. Rev., 1922, v. 20, № 6, p. 631—638.
9. Шукарев С. А. Система химических элементов и учение об изотопах.—ЖРФХО, часть хим., 1924, т. 55, вып. 5—9, с. 447—476.
10. Broek A. van den. Über die Isotopen sämtlicher chemischen Elemente.—Phys. Z., 1916, Jg. 17, № 12, S. 260—262.
11. Matthauch J. Zur Systematik der Isotopen.—Z. Phys., 1934, B. 91, H. 5/6, S. 361—370.
12. Beck G. Anhang. Z. Phys., 1934, B. 91, H. 5/6.
13. Bainbridge K. T., Jordan E. B. Mass spectrum analysis. 1. The mass spectrograph. 2. The existence of isobars of adjacent elements.—Phys. Rev., 1936, v. 50, № 4, p. 282—296.
14. Bethe H. A., Bacher R. F. Nuclear physics. A. Stationary states of nuclei.—Rev. Mod. Phys., v. 8, № 2, p. 82—229. Русск. перевод: Бете Г. А., Бечер Р. Ф. Физика ядра. Ч. I. Устойчивые состояния ядер. Харьков: ГНТИ Украины, 1938.
15. Huges A. L. Energy diagrams for beta-distintegrations.—Amer. J. Phys., 1948, v. 16, № 8, p. 415—420.
16. Thomson J. J. On the emission of negative corpuscles by the alkali metals.—Phil. Mag., 1905, ser. 6, v. 10, № 59, p. 584—590.
17. Meißner L. Einige Bemerkungen zur Isotopie der Elemente.—Naturwiss., 1926, B. 14, H. 30, S. 719—720.
18. Klemperer O. On the radioactivity of potassium and rubidium.—Proc. Roy. Soc. (London), 1935, v. A148, № 865, p. 638—648.
19. Hevesy G. von. Die Radioaktivität des Kaliums.—Naturwiss., 1935, B. 23, H. 34, S. 583—585.
20. Nier A. O. Evidence for the existence of an isotope of potassium of mass 40.—Phys. Rev., 1935, v. 48, № 3, p. 283—284.
21. Smythe W. R., Hemmendinger A. The radioactive isotope of potassium.—Phys. Rev., 1937, v. 51, № 3, p. 178—182.
22. Weizsäcker C. F. von. Über die Möglichkeit eines dualen β -Zerfalls von Kalium.—Phys. Z., 1937, B. 38, H. 16, S. 623—624.
23. McNair A., Glover R. N., Wilson H. W. The decay of potassium 40.—Phil. Mag., 1956, ser. 8, v. 1, № 2, p. 199—211.
24. Engelkemeier D. W., Flynn K. F., Glendenin L. E. Positron emission in the decay of K^{40} .—Phys. Rev., 1962, v. 126, № 5, p. 1818—1822.
25. Table of isotopes. Seventh edition/Ed. by Lederer C. M., Shirley V. S. N. Y. [a. o.]: J. Wiley, 1978.
26. Hahn O., Strassmann F., Walling E. Herstellung wägbarer Mengen des Strontiumisotops 87 als Umwandlungsprodukt des Rubidium aus einem kanadischen Glimmer.—Naturwiss., 1937, B. 25, H. 12, S. 189.
27. Matthauch J. Das Paar ^{87}Rb — ^{87}Sr und die Isobarenregel.—Naturwiss., 1937, B. 25, H. 12, S. 189—191.
28. Hemmendinger A., Smythe W. R. The radioactive isotope of rubidium.—Phys. Rev., 1937, v. 51, № 12, p. 1052—1053.
29. McMullen C. C., Fritze K., Tomlinson R. H. The half-life of rubidium-87.—Canad. J. Phys., 1966, v. 44, № 12, p. 3033—3038.
30. Greth W. E., Gangadharan S., Wolke R. L. Beta instability in ^{113}Cd .—J. Inorgan. Nucl. Chem., 1970, v. 32, № 7, p. 2113—2117.
31. Huster E., Verbeek H. Das β -Spektrum des natürlichen Rhenium 187.—Z. Phys., 1967, B. 203, H. 5, S. 435—442.
- 31a. Alburger D. E. a. o. Phys. Rev., 1984, v. C29, № 6, p. 2294.
32. Alvarez L. W., Cornog R. He^3 in helium.—Phys. Rev., 1939, v. 56, № 4, p. 379.

33. *Alvarez L. W., Cornog R.* Helium and hydrogen of mass 3.—Phys. Rev., 1939, v. 56, № 6, p. 613.
34. *Alvarez L. W., Cornog R.* Radioactive hydrogen—a correction.—Phys. Rev., 1940, v. 58, № 2, p. 197 (Abstr. 47).
35. *Nethaway D. R., Pringle A. L., Konynenburg R. A. van.* Half-life ^{92}Nb .—Phys. Rev., 1978, v. C17, № 4, p. 1409—1413.
36. *Pfeifer L., Mills A. P., Jr., Chandross E. A., Kovacs T.* Beta spectrum of ^{115}In .—Phys. Rev., 1979, v. C19, № 3, p. 1035—1041.
37. *Watt D. E., Glover R. N.* A search for radioactivity among naturally occurring isobaric pairs.—Phil. Mag., 1962, ser. 8, v. 7, № 73, p. 105—114.
38. *Sato J., Hirose T.* Half-life of ^{138}La .—Radiochem. Radioanal. Lett., 1981, v. 46, № 3, p. 145—152.
39. *Sguigna A. P., Larabee A. J., Waddington J. C.* The half-life of ^{176}Lu by a γ - γ coincidence measurement.—Canad. J. Phys., 1982, v. 60, № 3, p. 361—364.
40. *Bauminger E. R., Cohen S. G.* Natural radioactivity of V^{50} and Ta^{180} .—Phys. Rev., 1958, v. 110, № 4, p. 953—957.
41. *Feather N.* Radioactive branching.—Rep. Progr. Phys., 1948, v. 11, p. 19—31.
42. *Курчатов И., Синельников К.* К вопросу о дезинтеграции ^6Li протонами.—ЖЭТФ, 1934, т. 4, вып. 6, с. 548—549.
43. *Cockcroft J. D., Walton E. T. S.* Disintegration of lithium by swift protons.—Nature, 1932, v. 129, № 3261, p. 649.
44. *Oliphant M. L. E., Kinsey B. B., Rutherford E.* The transmutation of lithium by protons and by ions of the heavy isotope of hydrogen.—Proc. Roy. Soc. (London), 1933, v. A141, № 845, p. 723—733.
45. *Oliphant M. L. E., Hartek P., Rutherford E.* Transmutation effects observed with heavy hydrogen.—Proc. Roy. Soc. (London), 1934, v. A144, № 853, p. 692—703.
46. *Курчатов И., Синельников К., Шенкин Г., Вибе А.* К вопросу о радиоактивности ^3He .—ЖЭТФ, 1934, т. 4, вып. 6, с. 545—547.
47. *Yukawa H., Sakata S.* On the theory of the β -disintegration and the allied phenomena.—Proc. Phys.-Mat. Soc. Japan, 1935, v. 17, № 11, p. 467—479.
48. *Beck G.* Energiesatz und Reversibilität der Elementarprozesse.—Z. Phys., 1933, B. 84, H. 11/12, S. 811—813.
49. *Fermi E.* Versuch einer Theorie der Beta-Strahlen.—Z. Phys., 1934, B. 88, H. 3/4, S. 161—177.
50. *Bethe H., Peirls R.* The neutrino.—Nature, 1934, v. 133, № 3366, p. 689—690.
51. *Wick G. C.* Sugli elementi radioattivi di F. Joliot e I. Curie.—Atti accad. Lincei. Rendiconti. Classe di scienze fisiche, 1934, t. 19, f. 5, p. 319—324.
52. *Иваненко Д. Д.* Возможно ли превращение водорода в нейтрон?—Докл. АН СССР, 1934, т. 2, № 3, с. 155—156.
53. *Вальтер А. К.* Физика атомного ядра. Научно-популярный очерк. Л.—М.: ОНТИ, 1935.
54. *Bleakney W., Harnwell G. P., Lozier W. W., Smith P. T., Smyth H. D.* Production and identification of helium of mass three.—Phys. Rev., 1934, v. 46, № 1, p. 81—82.
55. *Smyth H. D., Harwell G. P., Bleakney W., Lozier W. W.* The production of helium of mass three?—Phys. Rev., 1935, v. 47, № 10, p. 800 (Abstr. 79).
56. *Rutherford E.* The search for the isotopes of hydrogen and helium of mass 3.—Nature, 1937, v. 140, № 3538, p. 303—305.