

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

539.163(09)

К ИСТОРИИ ИЗУЧЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ИЗОМЕРИИ*А. И. Гринберг*

Путь к полному пониманию физической природы явления ядерной изомерии, как и в ряде других подобных случаев, не был простым и коротким. Это был путь постепенного накопления сначала непонятных фактов, выдвижения нескольких гипотез для теоретического объяснения экспериментальных данных, отказа от неудачных гипотез и подтверждения одной с помощью ряда целенаправленных опытов. Сначала подтверждения были хотя и убедительными, но не прямыми, а позже было получено и прямое доказательство. Разумеется, на этом пути были и упущения, и ошибки.

История изучения ядерной изомерии, несомненно, интересная и поучительная, до сих пор не освещалась в литературе подробно. Краткие исторические замечания, встречающиеся в статьях и учебниках, зачастую выявляя поверхностный подход и незнание авторов с первоисточниками.

Настоящий очерк имеет целью восполнить указанный пробел, прокомментировать ранние исследования с современной точки зрения, а также осветить без искажений большую роль, которую сыграли работы группы И. В. Курчатова на пути к выяснению природы ядерной изомерии.

В очерке будут изложены или упомянуты далеко не все работы, даже если они относятся к выбранному отрезку времени; отмечены такие работы, которые помогают проследить эволюцию идей в области ядерной изомерии. Будет рассмотрен период до 1941 г., поскольку к этому времени были выяснены основные черты ядерной изомерии.

* * *

1896—1921 гг. В первые десятилетия после открытия явления радиоактивности (А. Беккерель, 1896) ученые многих стран очень интенсивно и плодотворно исследовали новое явление. Открытие следовало за открытием. В результате работ Г. Шмидта, Марии и Пьера Кюри, Э. Резерфорда, А. Дебьерна, С. Мейера, Э. Швайдлера, К. Фаянса и многих других были добыты сведения и созданы представления, которые и сегодня составляют основу учения о радиоактивности. Многочисленные члены радиоактивных рядов урана-радия, тория и актиния с причудливыми названиями UI, UII, AcU, RaAc, MsTh₁ и т. д. при помощи химических и других методов были размещены в периодической системе Менделеева (в некоторых случаях это было сделано ошибочно и впоследствии исправлялось). При этом выяснилось, что многие радиоактивные вещества попадают в одну и ту же клетку таблицы, т. е. что они химически неразделимы. Постепенно возникло, уточнялось и, наконец, было четко сформулировано представление об изотопии химических элементов. Ф. Содди в 1913 г.

предложил называть изотопами такие разновидности атомов, которые при одинаковом порядковом номере элемента имеют различный атомный вес. Вскоре на основе исследований Г. Мозли появился новый метод, с помощью которого можно было точно установить, что те или иные различные по радиоактивным свойствам вещества являются изотопами. Для этого достаточно получить спектр характеристического рентгеновского излучения данного вещества.

Таким образом, первая важная характеристика данного сорта атомов (данного нуклида, по современной терминологии), а именно его порядковый номер, или зарядовое число Z , была определена для всех известных тогда членов радиоактивных семейств.

Иначе обстоит дело со второй характеристикой элемента — его атомным весом. На определение этой величины были направлены усилия многих исследователей. Например, уже в 1902 г. М. Кюри определила, что атомный вес радия равен 225; она ошиблась только на единицу ($A = 226$). Во многих случаях, особенно при малом времени жизни вещества, его атомный вес оценивался по данным о материнском или дочернем веществе при помощи правил сдвига (К. Фаянс, 1913). Однако пользование этими правилами иногда приводило к накоплению ошибок: если атомный вес какого-либо нуклида был определен неправильно, то и атомные веса *всех* дочерних нуклидов указывались с той же ошибкой *).

В результате таких ошибок сложилось следующее положение, которое мы проиллюстрируем только на одном примере (таких случаев было много): актинию-С был приписан атомный вес 210 и такой же вес был приписан радью-Е; однако было известно, что оба эти нуклида являются изотопами висмута ($Z = 83$). Таким образом, получалось, что два нуклида имеют не только одинаковый порядковый номер, но и одинаковый атомный вес, однако при этом они отнюдь не идентичны: у AcC период полураспада составляет 2,16 мин, у RaE — 5 дней **). Анализ нескольких подобных случаев привел Ф. Содди к следующему заключению, которое он высказал в докладе, прочитанном 18 мая 1917 г.¹: «Радиоактивные свойства зависят не только от [массы] ядра, но и от его состава. Могут существовать изотопы с идентичными атомными весами и одинаковым химическим характером, которые различны по их стабильности и по способу распада. Мы можем предположить, что эта более тонкая степень изотопии может существовать и среди устойчивых элементов: в этих случаях не будет никакой возможности обнаружить ее с помощью современных средств» ***).

Позже, в лекции 19 декабря 1918 г.³ Содди повторил более подробно свои соображения об изобарных изотопах и высказал интересную мысль о том, что если в результате разветвления ряда действительно получаются неидентичные изобарные изотопы, то такая пара ядер будет отличаться не только периодами полураспада, но и запасом внутренней энергии. Заметим, что сведения об энергии α -, β - и γ -переходов, на основании кото-

*) В современной формулировке в «законе радиоактивных смещений (сдвигов)» фигурирует не атомный вес (масса), а массовое число нуклида.

**) В действительности для AcC атомный вес $A = 211$.

***) Иногда указывают, что первое высказывание о возможности существования изобарных изотопов, отличающихся по своим радиоактивным свойствам, содержится в известной в свое время монографии по радиоактивности, написанной С. Мейером и Э. Швайцлером² (см. с. 344). Рассматривая разветвленный распад RaC , авторы отмечают, что RaC' после α -распада превращается в RaD , а продукт β -распада RaC' пока не известен. Этот неизвестный продукт должен быть изотопом RaD и иметь тот же атомный вес. Далее авторы пишут: «Все же остается под вопросом, идентичен ли этот продукт с RaD , т. е. распадается ли он, как и RaD , в RaE и Po ». Несомненно, у Содди идея сформулирована более четко, в более общем виде.

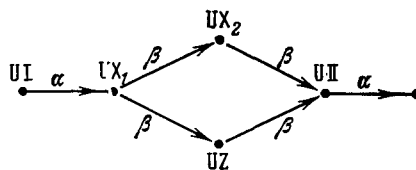
рых Содди пришел к выводу об энергетическом различии соответствующих ядер, впоследствии оказались ошибочными, как и предположение о том, что после разветвления ряда обе ветви не сходятся на одном и том же ядре. Однако мысль о том, что, возможно, изобарные изотопы отличаются по энергии, оказалась правильной.

Насколько известно, Содди в дальнейшем не занимался специальными исследованиями, имевшими целью подтвердить существование неидентичных изобарных изотопов. Напротив, Мейер уделил этому вопросу много внимания. Была опубликована подробная статья: «К вопросу о существовании изотопов с одинаковым атомным весом. Конечные продукты ториевого распадного ряда»⁴. В этой статье Мейер пользуется термином «изотопы более высокого порядка», который был введен им и Швайцлером в конце 1917 г.⁵

В результате анализа накопившегося обширного материала Мейер приходит к выводу, что не существует ни одного достоверно установленного случая такой изотопии. Этот же вывод повторяется и в его более поздней статье⁶.

Как мы видим, история изучения явления, которое позже получило название ядерной изомерии, началась с ошибки: было констатировано, что явление существует, а позже выяснилось, что для такого утверждения нет оснований.

1921—1934 гг. В январе 1921 г. О. Ган открыл в семействе урана новый радиоактивный продукт, которому он дал название UZ⁷. Это — β -активный изотоп протактиния ($Z = 91$) с периодом полураспада $\sim 6,8$ ч. Ган предложил в качестве рабочей гипотезы следующую схему распада в этой части ряда урана:



Вскоре Ган публикует подробную статью о свойствах UZ и его положении в урановом ряду⁸. Он указывает, что если верна предложенная им схема, то можно констатировать никогда ранее не наблюдавшийся тип разветвления: как в одной, так и в другой ветви распад происходит путем испускания β -частиц. Любопытно, что автор не развивает дальше этого замечания и не констатирует, что здесь, возможно, имеет место именно тот случай «изотопов высшего порядка», который тщетно искал Мейер: у ядер UZ и UX₂ один и тот же порядковый номер и один и тот же атомный вес (234). Периоды же у них разные: $T_1 \sim 6,7$ ч и $T_2 \sim 1,14$ мин.

Указанная пара ядер впервые была отмечена как пример «изотопов высшего порядка» в статье М. Нойбургера⁹ (статья чисто умозрительная, без новых экспериментальных данных).

В начале 1923 г. появилась еще одна статья Гана, в которой описаны его дальнейшие радиохимические эксперименты, связанные с проблемой «урановой вилки»¹⁰. Автор приходит к выводу: в высшей степени вероятно, что предложенная им схема «вилки» верна.

В последующие годы было выполнено множество исследований, авторы которых стремились получить возможно более полные и надежные сведения о деталях распада ядер UZ и UX₂. Это естественно, так как указанная пара ядер оставалась единственным известным примером «изо-

топов высшего порядка». Несмотря на то, что утверждение об изотопичности и изобаричности этих двух ядер никем не было опровергнуто, отношение к этому «казусу» в урановом ряду оставалось скептическим. Надо полагать, причина заключалась в том, что в течение многих лет не было предложено никакой гипотезы, которая могла бы объяснить наличие разных периодов у ядер одного и того же состава.

Забегая вперед, следует сказать, что схема «вилки», предложенная Ганом, оказалась правильной. Но, разумеется, по современным правилам ее следует изображать иначе. Полная схема уровней и переходов для цепочки $UI \rightarrow UX_1 \rightarrow (UX_2 + UZ) \rightarrow UII$, или, в современных обозначениях, $^{238}U \rightarrow ^{234}Th \rightarrow ^{234}Pa \rightarrow ^{234}U$ оказалась исключительно сложной (содержащей огромное число уровней). Об этой схеме еще будет сказано ниже.

В настоящее время известно, что среди естественно радиоактивных ядер изомеры ^{234}Pa — не единственный случай. Например, у $ThC'(^{212}Po)$, у которого в основном состоянии $T = 0,3$ мкс, имеется изомерное состояние с $T = 46$ с.

В 1934 г. Г. Гамов, находясь в институте Н. Бора в Копенгагене, опубликовал заметку, содержащую очень важные идеи о сущности явления «изотопии высшего порядка»¹¹. Этому явлению он дал более короткое и в дальнейшем принятое всеми название «ядерная изомерия»^{*}).

Исходная посылка Гамова — предположение о том, что в состав ядра наряду с протонами могут входить и антипротоны, — оказалась неправильной. Вероятно, для него главным в этой заметке был не анализ ядерной изомерии (на примере «урановой вилки»), а попытки найти доказательства гипотезы об антипротонах. Но для нас гораздо более существенно то, что было сказано об изомерии.

Важные положения, содержащиеся в заметке, можно сформулировать следующим образом. 1) Два изомерных ядра могут отличаться по энергии и по величине спина. 2) В таких случаях ядро, находящееся на более высоком энергетическом уровне, т. е. ядро, находящееся в возбужденном состоянии, обычно за очень короткое время $\sim 10^{-13} - 10^{-15}$ с путем испускания γ -лучей переходит в основное состояние. 3) Но в данном случае этот быстрый переход не имеет места — иначе не наблюдалось бы двух разных периодов полураспада; поэтому надо предположить, что в случае изомерии возбужденный уровень ядра имеет необычный характер — он отличается сравнительно большим временем жизни. 4) Если сделать это последнее предположение, легко можно объяснить происхождение двух разных периодов, приписываемых одним и тем же ядрам.

Можно почти с уверенностью сказать, что до этой работы физики, обдумывавшие подход к пониманию природы ядерной изомерии, были в плену предвзятой идеи — они считали, что каждое из двух изомерных ядер находится в своем основном состоянии. Поэтому и было полностью непонятно, как у таких ядер могут оказаться неодинаковыми периоды полураспада. Приходилось говорить нечто неопределенное — что ядра-изомеры отличаются по своей структуре. Гамов выдвинул физически ясные положения, которые очень многое разъясняют. Они были большим шагом вперед в понимании сущности ядерной изомерии. Теперь известно, что все перечисленные положения правильны — они полностью соответствуют современным представлениям о ядрах-изомерах.

Однако есть еще один вопрос, и его можно считать главным в теории ядерной изомерии: по какой причине время жизни некоторых возбужден-

^{*}) Название было дано явно по аналогии с изомерией молекул. Однако по современным представлениям о структуре ядра никакой аналогии в самих явлениях нет.

ных ядерных уровней в десятки или сотни триллионов раз больше, чем у обычных возбужденных уровней? Отвечая на этот вопрос, Гамов предположил, что в одном из пары изомерных ядер вместо двух нейтронов находятся протон и антипротон и что одновременное превращение двух частиц, p и \bar{p} , в два нейтрона (что необходимо для перехода одного изомера в другой) будет событием очень маловероятным.

Предположение Гамова об антипротонах, входящих в состав ядра, несомненно, было встречено скептически. В дальнейшем оно не подтвердилось *). Поэтому ошибочной была и его гипотеза о причине аномально большого времени жизни некоторых возбужденных ядерных уровней.

Как ни странно, эта ошибка Гамова привела к тому, что оказались незамеченными или забытыми и все его глубоко верные положения. Характерный пример: после доклада И. Е. Тамма «Проблема атомного ядра», сделанного на сессии АН СССР в марте 1936 г.¹², в прениях выступил И. В. Курчатов, рассказавший о новых данных, касающихся ядерной изомерии. В заключительном слове И. Е. Тамм отметил отставание теории от эксперимента и сказал: «Вопрос об ядерных изомерах, который был здесь поставлен И. В. Курчатовым, относится к тем вопросам, на которые теория пока еще ничего разумного ответить не может» (см.¹², с. 348). Любопытно, что И. В. Курчатов был знаком с заметкой Гамова — он упомянул ее в своем выступлении, и из нее взял термин «изомерия».

На протяжении 1934—1935 гг. Гамов еще несколько раз возвращался к вопросу об антипротоне и о ядерной изомерии^{13, 14}. В одной из заметок¹⁴ Гамов пользуется термином «метастабильный» для обозначения возбужденного уровня с аномально большим временем жизни.

1934—1936 гг. Начало 1934 г. ознаменовалось важным открытием — И. Кюри и Ф. Жолио открыли искусственную радиоактивность. Они пользовались для бомбардировки мишеней α -частицами полония. Вскоре число известных радионуклидов было увеличено в результате использования различных ускорителей для получения быстрых частиц, которыми бомбардировали мишени. Особенно много новых радионуклидов было получено, когда в качестве бомбардирующих частиц начали пользоваться нейтронами (группа Ферми в Риме). Естественно, что наличие обширного экспериментального материала поставило изучение различных сторон радиоактивности и свойств ядерных реакций на новую основу.

Первой экспериментальной характеристикой каждого нового радионуклида был его период полураспада (а также, в большинстве случаев, вид и энергия связанных с ним излучений). Далее вставала задача «нуклидной идентификации», т. е. задача приписания данному радиоактивному ядру зарядового числа Z и массового числа A . Определение числа Z обычно не представляло затруднений и производилось с помощью разработанных уже давно методов радиохимии. Значительно труднее было достоверное определение числа A . В те годы техника ядерно-физического эксперимента находилась на уровне, далеком от современного. Экспериментаторы пользовались натуральными, не изотопно-обогащенными мишенями, не имели прямых сведений о том, какая именно ядерная реакция привела к образованию данного радионуклида (например, реакция типа (p, n) или (p, γ) ?),¹ и т. д. Поэтому приписание массового числа новому радионуклиду производилось с помощью логических построений, основанных на знании свойств различных ядерных реакций, а во многих случаях² — с помощью очень эффективного метода «перекрестных ядерных реакций».

*) Антипротон в свободном состоянии был открыт в 1955 г. при бомбардировке мишени протонами, ускоренными в «Бэватроне» до 6,2 ГэВ.

Спустя короткое время после начала широкого изучения искусственных радионуклидов возникли необъяснимые ситуации, загадки, которые можно назвать «проблемой избыточного числа периодов». Первый такой случай был описан в работе Л. Сциларда и Т. Чалмерса¹⁵. До этой работы было известно, что в реакции ($\text{In} + n$) образуются два радиоактивных изотопа индия, с периодами 13 сек и 54 мин, причем их интенсивность сильно возрастала при замедлении нейтронов. В работе¹⁵ был обнаружен третий период $\sim 3,5$ ч. По масс-спектрометрическим данным было известно, что у индия — два стабильных изотопа, причем содержание одного из них — ^{115}In — в натуральном индии более чем в 10 раз превышает содержание другого — ^{113}In . С медленными нейтронами может идти только реакция (n, γ), следовательно, при облучении натурального индия медленными нейтронами могут образоваться два радионуклида — ^{114}In и ^{116}In . Какой же нуклид является носителем периода 3,5 ч? Радиохимического определения величины Z этого носителя авторы не сделали. Они предположили, что он является изотопом индия ($Z = 49$), на том основании, что реакции типа $\text{In} (n, \alpha)$ и $\text{In} (n, p)$, которые привели бы к образованию нуклидов с другим Z , никогда не наблюдались с ядрами-мишенями, более тяжелыми, чем цинк ($Z = 30$), если пользоваться нейтронами из источника ($\text{Rn} + \text{Be}$).

Не был выполнен также эксперимент, который показал бы, усиливается ли активность нового нуклида при окружении мишени водой (т. е. при замедлении нейтронов *).

Авторы отмечают, что обнаружение третьего периода при облучении индия нейтронами приводит к пока непонятной ситуации. Этот случай «заслуживает дальнейшего изучения, но в настоящее время у нас нет адекватных инструментов для наблюдения». Вопрос поставлен, но решения авторы не дают и никаких гипотез не выдвигают.

Теперь известно, что $\text{In} (13 \text{ с})$ — это ^{116}In , $\text{In} (54 \text{ мин})$ — это $^{116\text{m}}\text{In}$ (так обозначают изомерное метастабильное состояние), а для $\text{In} (3,5 \text{ ч})$ величина периода позже была уточнена — она равна 4,5 часа, и носителем этого периода является $^{115\text{m}}\text{In}$, который может быть получен, в частности, в реакции $^{115}\text{In} (n, n')$. Таким образом, авторы работы¹⁵, выполненной в 1934 г., фактически наблюдали две изомерные пары ядер, — но установить это им не удалось.

Никто из исследователей, обсуждавших в свое время загадки «избыточного числа периодов», не высказал предположения, что в список ядерных реакций, которые, возможно, ответственны за образование какого-либо рассматриваемого радионуклида, следует внести и неупругое рассеяние нейтронов или заряженных частиц — реакции типа (n, n'), (p, p') и т. п. Это упущение естественно, поскольку речь идет о самом раннем этапе изучения свойств искусственных радионуклидов.

Отметим, что если бы Сцилард и Чалмерс обладали более совершенной аппаратурой и проводили бы облучение индия нейтронами более длительное время, то в химическом осадке, соответствующем индию, они обнаружили бы еще два радионуклида — с периодами 50 дней и 99,4 мин. Первый — это ^{114}In , результат реакции $^{113}\text{In} (n, \gamma)$, второй — $^{113\text{m}}\text{In}$, образующийся в реакции $^{113}\text{In} (n, n')$ **).

*) Через несколько месяцев после опубликования работы¹⁵ появилась обзорная статья группы Ферми — о радионуклидах, полученных при облучении мишеней нейтронами¹⁶. В этой статье было отмечено, что нуклид с периодом ~ 3 часа, как установлено химически, — это изотоп индия и что он практически не чувствителен к замедлению нейтронов.

**) Что касается реакции $^{113}\text{In} (n, \gamma)$, которая привела бы к образованию еще одного радиоизотопа индия — ^{114}In (72 с), то по известным причинам сечение ее крайне мало¹⁷, так что она практически ненаблюдаема.

Легко себе представить, что обнаружение пяти радиоизотопов индия при облучении индия нейтронами поставило бы исследователей в тупик и еще гораздо большей степени, чем обнаружение трех изотопов.

Вторая загадка «избыточного числа периодов» возникла после появления работы Б. В. Курчатова, И. В. Курчатова, Л. В. Мысовского и Л. И. Русинова¹⁸ и нескольких работ, которые были вскоре выполнены в связи с нею *). Изучая γ -активность радионуклидов, образующихся при облучении брома нейтронами от источника ($Rn + Be$), авторы обнаружили три радионуклида, с периодами 18 мин, 4,5 ч и 36 ч. Первые два уже были найдены группой Ферми, которая сначала привела значения ~ 30 мин и 6 ч, а затем — 18 мин и 4,2 ч^{19, 16}. В работах римской группы было установлено, что эти два нуклида являются изотопами брома и отличаются высоким «коэффициентом чувствительности к воде». Так как бром состоит из двух изотопов — ^{79}Br и ^{81}Br (примерно в равных количествах), в работе¹⁹ было принято, что найденные периоды могут быть приписаны ^{80}Br и ^{82}Br — разумеется, без указания, какой период к какому изотопу брома относится, поскольку для такого уточнения еще не было данных. Реакция образования этих двух нуклидов не вызывала сомнений — это реакция (n, γ). В работе И. В. Курчатова и др. по химическим данным было установлено, что радионуклид с периодом 36 ч является изотопом брома. Итак, из двух стабильных изотопов брома в результате облучения нейтронами образуются три радиоактивных изотопа, причем два из них должны быть приписаны ^{80}Br и ^{82}Br . Какое же массовое число можно приписать третьему радиоизотопу брома? Пытаясь решить этот вопрос, авторы перечисляют следующие возможности: 1) может быть, под действием нейтрона ядро брома испускает одновременно две частицы, положительную и отрицательную (по-видимому, речь идет о протоне и электроны; в этом случае мог бы получиться ^{78}Br); 2) может быть, здесь проявляется возможность существования изомерных ядер. Однако авторы считают, что эти гипотезы следует «исключить как специальные».

Первая из них, очевидно, являлась бы попыткой в затруднительной и непонятной ситуации объяснить одно новое явление при помощи никогда ранее не наблюдавшегося другого явления. Что касается гипотезы об изомерии, то, исходя из того, что ее сочли «специальной», можно не сомневаться в том, что здесь имелась в виду изомерия по Гамову, основанная на гипотезе об антипротонах как составных частях ядра. Такую гипотезу авторам принимать всерьез не хотелось.

Тем не менее, это первое упоминание о том, что загадка «избыточного числа периодов» в принципе могла бы быть решена с помощью понятия об изомерных ядрах, имеет большое значение, в особенности потому, что оно было опубликовано в распространенном журнале.

Откинув две гипотезы, авторы остановились на третьей: возможно, что происходит реакция ($n, 2n$) и в результате образуется ^{78}Br , который и является носителем периода 36 ч **). Статья заканчивается замечанием: для проверки предложенной гипотезы необходимо исследовать выход реакции в зависимости от энергии нейтронов. Действительно, для осуще-

*) И. В. Курчатов был заведующим лабораторией атомного ядра в Ленинградском физико-техническом институте, Л. И. Русинов — сотрудником этой лаборатории. Химик Б. В. Курчатов был сотрудником того же института. Л. В. Мысовский заведовал физическим отделом Государственного радиевого института в Ленинграде.

**) О возможности реакции ($n, 2n$) было сказано уже в ранних работах группы Ферми — см., например,¹⁹, с. 497. Однако на опыте такая реакция в то время не была обнаружена.

ствления реакции (n , $2n$) нужны нейтроны с высокой энергией — около 10 МэВ.

В соответствии с намеченной в¹⁸ программой Л. И. Русинов приступил к измерению выхода Вг (36 ч) при облучении брома нейтронами, испускаемыми различными источниками: ($Rn + Be$), ($Rn + B$), ($Rn + Li$) и др.²⁰ Эти эксперименты ясно показали, что реакция образования Вг (36 ч) не имеет энергетического порога и что наблюдается большой «коэффициент чувствительности к воде». Стало ясно, что и третий радиобром образуется в реакции (n , γ).

К этому же выводу независимо пришла группа Ферми. Ознакомившись с работой¹⁸ ленинградских физиков, эта группа немедленно поставила соответствующие опыты²¹. Было подтверждено образование Вг (36 ч) и установлено, что все три радиоброма имеют высокий «коэффициент чувствительности к воде». Поэтому не может быть принята гипотеза о реакции (n , $2n$). Авторы отмечают, что задача о природе третьего радиоброма очень интересна; возможно, она подобна той, которая возникла в случае индия¹⁵. Однако никакого решения этой задачи авторы не предлагают.

В статье И. В. Курчатова и его сотрудников «Исследование искусственной радиоактивности при облучении нейтронами. Сообщение I»²², сданной в набор в конце 1935 г., приводится четкая формулировка сущности задачи об «избыточном числе периодов». Авторы пишут: «Детальное исследование искусственной радиоактивности еще только начинается, и можно указать ряд невыясненных вопросов, представляющих большой интерес. К числу таких вопросов относится, например, ... вопрос о природе радиоизотопов у элементов, для которых число наблюдаемых периодов полураспада больше, чем число изотопов, и у которых, как показывает химический анализ, радиоактивные ядра являются изотопами облученного элемента». В качестве примера приводится, в частности, случай брома.

Прежде чем вернуться к дальнейшему ходу исследования радиоброма, рассмотрим еще один ранний случай «избыточного числа периодов». При облучении родия медленными нейтронами образуются два радионуклида — изотопы родия, с периодами ~ 50 с и ~ 5 мин¹⁹ (позже эти периоды были измерены точнее, они равны 44 с и 4,7 мин). Для обоих изотопов было показано наличие большого «коэффициента чувствительности к воде»¹⁶. К этому времени уже было твердо установлено, что в природе существует только один стабильный изотоп родия — ^{103}Rh . Таким образом, случай родия — это наиболее ясный и очевидный случай «избыточного числа периодов»: оба периода приходится приписать одному и тому же ядру ^{104}Rh , образующемуся в реакции (n , γ). Тем не менее, никаких комментариев по поводу этого случая или замечания, что для него надо найти объяснение, в работах¹⁶,¹⁹ не было. Напротив, в работе²² группы Курчатова было отмечено, что случаи родия и брома в известном смысле подобны. Позже, в одной из обзорных работ группы Ферми²³ (конец 1936 г.) также было указано, что в трех случаях — Rh, In и Вг — наблюдается необъяснимое избыточное число периодов.

В настоящее время известно, что Rh (44 с) — это ^{104}Rh , а Rh (4,7 мин) — это ^{104m}Rh (причем этот метастабильный уровень — не первый, а третий возбужденный уровень ядра ^{104}Rh). Кроме того, при облучении родия незамедленными нейтронами получается еще один радиоизотоп родия — ^{103m}Rh (57 мин), в реакции $^{103}Rh(n, n')$. В работе²³ его не обнаружили.

Имея в своем распоряжении новые данные, свидетельствующие о том, что Вг (36 ч) образуется в реакции (n , γ), И. В. Курчатов к концу того же

1935 г. вернулся к откинутой им в начале года гипотезе о ядерной изомерии²⁴. Наиболее полно он изложил существо проблемы радиоброма и логические доводы, исключаяющие ряд гипотез, в двух своих выступлениях: в лекции, прочитанной в Университете физико-химии и энергетики им. акад. Н. Д. Зелинского²⁵ (вероятно, в конце 1935 г. или в начале 1936 г.), и в уже упомянутом сообщении на мартовской сессии АН СССР в 1936 г.²⁶, в прениях по докладу И. Е. Тамма. После критического разбора ряда гипотез И. В. Курчатов отметил: «остается допустить, что массовое число и порядковый номер элемента еще не определяют всех свойств ядра... Следует, по-видимому, допустить существование ядер-изомеров; это два изотопа с одним и тем же массовым числом, но разной структуры» (разрядка И. В. Курчатова)²⁵. На мартовской сессии АН СССР И. В. Курчатов также сказал, что наблюдаемые факты можно объяснить, допустив существование ядер-изомеров. Он добавил: «Говоря об изомерии ядра, я не хочу трактовать ее в том узком смысле, который был указан Гамовым». (Далее повторяется, как следует понимать термин «ядра-изомеры».) Как мы видим, здесь И. В. Курчатов как бы исправляет логическую неточность, из-за которой он в статье¹⁸ считал неприемлемой гипотезу об изомерии в качестве решения загадки радиоброма. Всесторонне обдумав экспериментальные данные, он понял, что отказ от признания ядерной изомерии по Гамову был правомерным, но при этом не обязательно отказываться от самого понятия ядерной изомерии (по Содди).

Два вопроса — элементарных, еще не связанных с попыткой раскрыть природу ядерной изомерии, — оставались открытыми. Какое ядро брома существует в двух изомерных формах? Какие именно два периода из трех принадлежат изомерной паре? Ответ был получен позже.

В связи с загадкой третьего радиоброма Дж. Блюитт предпринял тщательное исследование изотопного состава брома²⁷. Он подтвердил с большей точностью полученный до него результат: в природе существует только два стабильных изотопа брома ($A = 79$ и 81). Для гипотетического третьего стабильного изотопа брома ($A = 77$ или 83) определена верхняя граница: его содержание в бrome не превышает $1 : 3000$. Поэтому, если предположить, что этот редчайший изотоп в результате реакции (n, γ) превращается в один из трех радиоактивных изотопов брома, то получится, что сечение этой реакции примерно в 500 раз больше, чем для любого из двух остальных изотопов брома. Очевидно, что такое объяснение загадки радиоброма следовало откинуть.

В настоящее время известно, что при облучении брома незамедленными нейтронами получается еще один радиоизотоп брома — ^{79m}Br ($\sim 4,9$ с), в реакции $^{79}\text{Br}(n, n')$. Как и в других аналогичных случаях, то обстоятельство, что в работах 1935—1936 гг. этот радионуклид остался незамеченным, сыграло благоприятную роль, так как иначе решение задачи идентификации всех периодов брома оказалось бы еще более трудным.

Конец 1936 г. ознаменовался важным событием в истории изучения ядерной изомерии. Была опубликована статья К. Вейцеккера «Мета-стабильные состояния атомных ядер»²⁸, над которой он начал работать находясь в институте Н. Бора в Копенгагене. В этой статье была наконец предложена удовлетворительная теория, или, точнее, гипотеза, объясняющая причину ядерной изомерии. Как видно из соответствующих дат, автор не был знаком с выступлением И. В. Курчатова на мартовской сессии АН СССР. По-видимому, на несколько случаев в области искусственной радиоактивности, в которых, возможно, проявляется ядерная изомерия, его внимание обратила Л. Мейтнер; летом 1936 г., выступая на семинаре в Цюрихе, она отметила²⁹, что ряд непонятных случаев —

Br, In, Rh и U — можно было бы объяснить, допустив (хотя и неохотно) существование ядер-изомеров. Вейцзеккер ссылается на работу ²⁹ и в конце статьи благодарит Л. Мейтнер за дискуссии *).

На работы Гамова Вейцзеккер не ссылается. Однако он повторяет в точности те же положения: один из членов изомерной пары должен быть метастабильным возбужденным состоянием ядра, тогда как второй член этой пары — ядро того же состава, но находящееся в основном состоянии. Далее выдвигается новая, основная мысль этой работы: причиной метастабильности является сильный квантово-механический запрет, существенно уменьшающий вероятность γ -перехода возбужденного состояния в основное, т. е. приводящий к большому времени жизни ядра в метастабильном состоянии. Этот запрет связан с двумя обстоятельствами — относительно малой энергией возбуждения метастабильного уровня и относительно большой разницей угловых моментов (спинов) метастабильного и основного состояний. От этой разницы спинов ΔI зависит порядок мультипольности γ -излучения. Если испускается дипольное излучение ($\Delta I = 1$), вероятность перехода очень велика; при квадрупольном излучении ($\Delta I = 2$) она много меньше, и т. д. Автор приводит сугубо ориентировочную формулу для

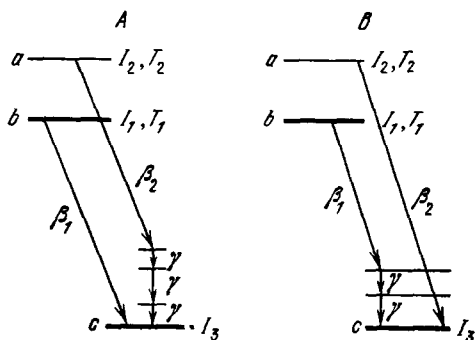


Рис. 1. Схема распада изомерного ядра (по Вейцзеккеру).

a — метастабильный уровень, b — основной уровень изомерного ядра (наряду с этим вариантом терминологии существует и другой: состояния a и b называются ядрами-изомерами или изомерной парой ядер). $|I_2 - I_1| \geq 2$. В общем случае периоды для β -распадов, T_1 и T_2 , будут неодинаковыми: это и наблюдается при ядерной изомерии.

оценки нижней границы величины времени жизни τ_γ возбужденного ядерного уровня по отношению к γ -переходу на основной уровень. Из этой формулы следует, что, например, для ядра с $Z = 27$ при энергии возбуждения уровня, равной 50 кэВ, и $\Delta I = 4$ время жизни такого уровня будет $\tau_\gamma \geq 100$ с.

Отмечается, что в общем случае переход с возбужденного уровня на основной происходит не только путем γ -эмиссии, но одновременно и путем испускания электронов внутренней конверсии. Далее, указано, что Н. Бор обратил внимание автора на некоторые общие свойства движения ядерного вещества, в силу которых реальное время жизни метастабильного состояния относительно мультипольного γ -перехода может оказаться еще гораздо большим, чем по простой оценочной формуле.

Было известно, что ядро, находящееся в обычном возбужденном состоянии, не распадается путем испускания β -частиц, так как существует гораздо более вероятный, быстрый процесс разрядки возбуждения — γ -переход. Однако в случае метастабильного уровня положение изменяется, и, как полагал Вейцзеккер, ядро с такого уровня будет распадаться путем β -перехода. Представления Вейцзеккера можно изобразить следующими схемами, на которых приведены простейшие возможные варианты переходов (рис. 1); число γ -переходов, разумеется, показано на схемах условно. Для простоты не изображен еще один возможный вариант схе-

*) Представляется вполне возможным, что термин «изомерные ядра», а, может быть, и мысль о привлечении гипотезы об изомерии для объяснения непонятных фактов, Мейтнер почерпнула из статьи И. В. Курчатова и др. ¹⁸.

мы, при котором ни один из β -переходов не идет на основной уровень c . Случай прямого β -перехода с уровня a на уровень c в варианте A или с уровня b на уровень c в варианте B следует считать очень маловероятным, так как и для β -переходов большая разность спинов между исходным и конечным состояниями означает крайне малую вероятность перехода.

В работе ²⁸ рассмотрен еще один важный вопрос — о способе образования изомерных ядер. Изложим точку зрения Вейцеккера на примере родия. В результате реакции $^{103}\text{Rh}(n, \gamma)$ образуется составное ядро $^{104}\text{Rh}^*$ в высоковозбужденном состоянии (~ 7 МэВ). Это ядро теряет энергию возбуждения путем последовательного испускания серии квантов γ -излучения (дипольного или квадрупольного), причем эти γ -каскады в разных случаях идут по разным путям — через разные уровни: для какой-то доли всех ядер $^{104}\text{Rh}^*$ γ -каскад заканчивается на основном состоянии ядра ^{104}Rh — получается «нижний изомер»; для остальных ядер $^{104}\text{Rh}^*$ γ -каскад заканчивается на метастабильном уровне — получается «верхний изомер», ^{104m}Rh .

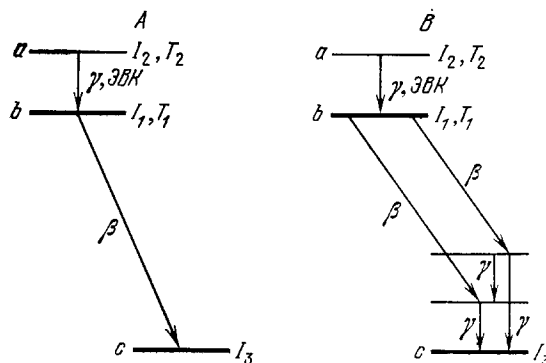


Рис. 2. Схема распада изомерного ядра (по Бете).
Обозначения те же, что на рис. 1.

1937—1941 гг. В апреле 1937 г. была опубликована вторая часть большого обзора — сводки накопленных сведений по ядерной физике. Автор второй части Г. Бете ³⁰ посвятил отдельный параграф ядерной изомерии. Важным дополнением к работе Вейцеккера было указание на то, что большое время жизни метастабильного уровня не обязательно означает, что будет происходить β -распад ядра с этого уровня: возможно, что разрядка возбуждения этого уровня все-таки будет происходить путем γ -перехода (сопровожаемого внутренней конверсией) на основное состояние того же ядра, т. е. превращения «верхнего изомера» в «нижний» (такое превращение теперь называют изомерным переходом). Сказанное можно изобразить схемой — рис. 2.

Легко показать, что если при помощи β -детектора снимается кривая изменения интенсивности β -излучения данного нуклида (N_β) и если $T_2 > T_1$, в кривой $N_\beta(t)$ будут обнаружены два компонента, с периодами T_1 и T_2 *). Таким образом, необходимость приписать одному нуклиду два разных периода β -распада не вызывает недоумений ни в случае схемы параллельного распада изомеров (рис. 1), ни в случае схемы последовательного распада (рис. 2). Об этом и было сказано (в двух словах) в заметке Гамова ¹¹.

Заметим, что возможен и третий, смешанный вариант, о котором Бете не упомянул, — может происходить *разветвленный* распад с уровня a : часть ядер данного нуклида распадается путем изомерного перехода, а остальные — путем β -распада.

Поскольку система возбужденных уровней имеется у каждого ядра, из гипотезы Вейцеккера следовало с очевидностью, что возможны и та-

*) Для этих двух компонентов форма (и граница) β -спектра строго одинакова, поскольку речь идет об одном и том же β -переходе.

кие случаи изомерии, когда метастабильный уровень принадлежит стабильному ядру. В этом случае изомерная пара ядер такова: «нижний изомер» — нерадиоактивное ядро, «верхний изомер» испускает γ -лучи и конверсионные электроны, или β -частицы. Такой изомерной паре соответствуют не два, а лишь один период полураспада. На это следствие из работы Вейцзеккера указали независимо Бете³⁰ и Понтекорво³¹. Ранние экспериментальные данные о таких изомерах можно найти в обзоре³².

Вернемся к ходу дальнейшего изучения изомерии брома. В 1937 г. были опубликованы две работы, каждой из которых было бы достаточно для достоверного приписания массового числа изомерному ядру радиоброма. В. Бете и В. Гентнер предприняли исследование фотоядерных реакций, пользуясь очень жесткими γ -лучами (~ 17 МэВ), возникающими при облучении лития протонами³³. Было установлено, что во всех случаях идет реакция (γ, n). При облучении брома этими γ -лучами были получены три радиоактивных изотопа брома, с периодами $5 \pm 0,5$ мин, $16 \pm 0,9$ мин и $4,5 \pm 0,1$ ч. Сопоставление этих результатов с полученными ранее в реакциях (n, γ) позволило с полной достоверностью установить, что периоды 18 мин и 4,5 ч относятся к ^{80}Br , период 5 мин — к ^{78}Br , а период 36 ч — к ^{82}Br .

Несколько позже была опубликована работа А. Снелла³⁴, специально посвященная проблеме изомерии брома. В этой работе был также использован, в другом варианте, метод «перекрестных ядерных реакций». Бром и соседние с ним элементы (As, Se, Kr, Rb) бомбардировались дейтронами и α -частицами, ускоренными в циклотроне, и нейтронами, полученными в реакции ($d + \text{Be}$). Было установлено однозначно, что активности с периодами $18,5 \pm 0,5$ мин и $4,54 \pm 0,10$ ч следует приписать изомерному ядру ^{80}Br , а активность с периодом $33,9 \pm 0,3$ ч — ядру ^{82}Br .

С того момента, как было установлено, что одному определенному ядру радиоброма — бром-80 — необходимо приписать два периода, гипотезу И. В. Курчатова о ядерной изомерии брома следовало считать подтвержденной на опыте.

При дальнейшем изучении ядерной изомерии предстояло, прежде всего, показать экспериментально, что общие представления о природе этого явления, развитые Гамовым и Вейцзеккером, правильны. Для этого, если говорить, в частности, о случае брома, надо было ответить по меньшей мере на три вопроса: 1) Какая из двух разновидностей брома-80 представляет собой возбужденный изомер? 2) Какова энергия возбуждения метастабильного уровня? 3) Какова схема распада этих изомеров — параллельная она или последовательная?

Первая попытка решить эти вопросы была неудачной³¹ — выводы автора были построены на неубедительных аргументах и оказались ошибочными. Полную ясность в перечисленные вопросы удалось внести группе, работавшей под общим руководством И. В. Курчатова. «Бригадиром» в этой группе был Л. И. Русинов. В хорошо продуманной последовательности работ было показано, что метастабильным является ^{80}Br (4,5 ч) и что имеет место схема последовательного распада, подобная показанной на рис. 2, причем она несколько сложнее, чем предполагалось в теоретических представлениях Вейцзеккера²⁸ и Бете³⁰: метастабильным оказался не первый, а второй возбужденный уровень ядра ^{80}Br , с энергией возбуждения ~ 86 кэВ. (В дальнейшем было найдено много случаев каскадного изомерного перехода.)

Перечислим названия этих работ и дадим их аннотации.

«Мягкое излучение брома»³⁵. Речь идет об электронах с энергией ~ 30 кэВ, которые были обнаружены среди излучений ^{80}Br (4,5 ч) и кото-

рые, по предположению И. В. Курчатова, можно было считать конверсионными электронами.

«Испускание рентгеновских лучей изомерами радиоактивного брома»³⁶. Здесь было установлено, что радиобром испускает рентгеновские лучи с периодом 4,5 ч и что это — характеристические лучи брома, а не криптона. Это говорит в пользу гипотезы о конверсионном происхождении мягкого электронного излучения радиоброма и свидетельствует о схеме последовательного распада в этом случае изомерии.

«Определение энергии конверсионных электронов изомеров брома»³⁷. Энергия определялась с помощью магнитного спектрометра. В спектре есть К-и L-электроны; исходя из их энергии, можно определить, что энергия соответствующего перехода составляет ~ 49 кэВ.

«Структура нижних возбужденных уровней ядра ^{80}Br »³⁸. Было найдено мягкое γ -излучение с периодом 4,5 ч, с энергией ~ 37 кэВ, что заставило предположить наличие двухступенного каскадного перехода с метастабильного уровня ^{80m}Br на основное состояние этого ядра.

Это подробное и систематическое изучение изомерии брома представляло собой существенный шаг вперед не только в решении частных вопросов, но и вообще в понимании деталей радиоактивных превращений изомерных ядер. Большое значение имело и то обстоятельство, что все полученные результаты качественно подтвердили теоретические представления о природе ядерной изомерии.

С 1937 г. работы по ядерной изомерии проводились во многих лабораториях разных стран. Как это часто бывало и в других областях науки, многие идеи, касающиеся постановки экспериментов или толкования их результатов, возникали независимо и почти одновременно в разных лабораториях. Так, конверсионное излучение при распаде метастабильного уровня наблюдалось группой И. В. Курчатова в случае брома и Б. Понтекорво — в случае родия^{39, 40}. В работе⁴⁰ высказана мысль о том, что доказать конверсионную природу электронного излучения можно путем наблюдения характеристического рентгеновского спектра. Такие исследования были независимо выполнены Л. И. Русиновым и А. А. Юзефовичем³⁶ и П. Абелсоном⁴¹. Измерение спектра конверсионных электронов брома-80 было выполнено независимо в двух работах^{37, 42}. Тот факт, что в случае изомеров брома осуществляется изомерный переход (рис. 2), был независимо от работ ленинградской группы подтвержден при помощи нового изящного метода «химического разделения ядерных изомеров»⁴³.

Одной из главных целей дальнейшего изучения ядерной изомерии являлось экспериментальное доказательство гипотезы Вейцзеккера о причине метастабильности возбужденного уровня. Прямое доказательство состоит в измерении спинов I_2 и I_1 метастабильного и основного уровней ядра с помощью одного из известных методов (атомные пучки, оптическая спектроскопия и т. д.). Такие измерения требуют специального сложного оборудования и накопления достаточно большого количества радиоактивного вещества. Поэтому исследователи пошли по пути использования косвенных методов измерения величины ΔI ^{44, 45}. Такие методы состоят в сопоставлении теоретических расчетов с экспериментальными данными для величин, более или менее резко зависящих от ΔI : 1) время жизни уровня; 2) коэффициент внутренней конверсии α_K ; 3) относительные коэффициенты внутренней конверсии α_K/α_L , $\alpha_{L_1}/\alpha_{L_2}$ и т. д.

Данные, полученные с помощью этих методов, подтверждают гипотезу Вейцзеккера. Что касается прямого измерения спинов, то для изомеров брома оно было проведено только в 1959 г.⁴⁶ Было показано, что для уровня Br (4,5 ч) $I = 5$, а для уровня Br (18 мин) $I = 1$. На рис. 3 показана схема уровней и переходов для ядра ^{80}Br по современным

данным ⁴⁷. На рис. 4 показано, как выглядит в настоящее время ⁴⁸ схема уровней и переходов (в основных чертах) для ²³⁴Pa — того ядра, которое открыло собой список ядер-изомеров.

В результате работ многих лабораторий уже в первые годы исследований ядер-изомеров выяснилось, что явление ядерной изомерии встречается отнюдь не редко. Уже к концу 1940 г. было известно 33 случая ядерной изомерии ⁴⁴. В связи с непрерывным совершенствованием техники ядерного эксперимента становилось возможным отыскание и исследование

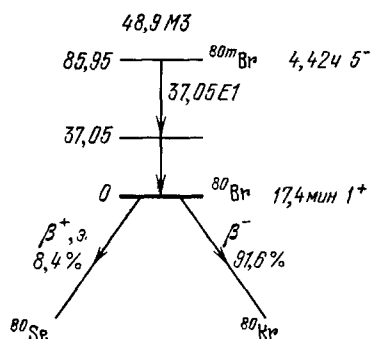


Рис. 3. Схема изомерного перехода для ядра ⁸⁰Br.
(α — электронный захват).

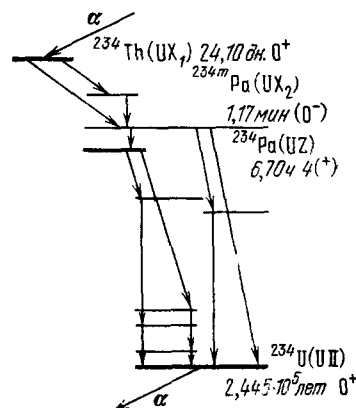


Рис. 4. Упрощенная схема уровней и переходов для ядер ²³⁴Th → ²³⁴Pa → ²³⁴U.

В β-спектре ²³⁴Th, состоящем из 4-х парциальных спектров, основной парциальный спектр (72,5%) соответствует переходу на уровень ^{234m}Pa. β-спектр ²³⁴Pa состоит из 20 (22?) парциальных спектров. β-спектр ^{234m}Pa состоит из 20 (21?) парциальных спектров; 98%, 6 всех β-распадов соответствуют переходу на основной уровень ядра ²³⁴U. Энергия возбуждения уровня ^{234m}Pa составляет ~ 74 кэВ.

все более короткоживущих изомеров. Например, было найдено много изомеров в миллисекундной области. В настоящее время практически невозможно подсчитать общее число известных изомеров, если не задаться некоторой произвольно выбранной границей. Дело в том, что имеет место парадоксальная ситуация: хотя термином «метастабильный уровень» широко пользуются уже десятки лет, до сих пор нет соглашения о том, какие уровни следует относить к метастабильным, т. е. больше какой величины должно быть время жизни такого уровня. Для очень многих ядерных уровней измерены времена жизни в микросекундной и наносекундной областях, например для первого возбужденного уровня ядра ⁶⁵Zn — 1,65 нс (переход типа E2, ΔE = 54 кэВ). Вряд ли такой уровень можно отнести к изомерным.

Изучение ядерной изомерии уже в ранние годы принесло богатый экспериментальный материал о свойствах ядерных уровней и характере переходов, и этими данными широко пользовались при создании и проверке различных моделей в теории ядра. Перечисленные выше экспериментальные методы определения типа и порядка мультипольности γ-излучения, разработанные в трудах по ядерной изомерии, стали классическими; они вошли в арсенал средств, широко используемых в современной ядерной спектроскопии.

Позже, на основе еще более обширных экспериментальных данных были открыты интересные закономерности — существование «островков

изомерии», хорошо объясняемое моделью ядерных оболочек, новые типы изомерии — «изомерия формы», «иристые ловушки» и др. Изучение ядерной изомерии продолжается.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Soddy F.— *Nature*, 1917, v. 99, p. 414.— Текст доклада несколько позже был опубликован повторно: *Proc. Roy. Institution*, 1917, v. 22, pt. 1, p. 117.
2. Meyer S., Schweidler E. R. *Radioaktivität* — Lpz.; Berl.: Teubner, 1916.
3. Soddy F.— *J. Chem. Soc.*, 1919, v. 115, p. 1.
4. Meyer S.— *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien. Math.-Naturwiss. Kl., Abt. II. a*, 1918, Bd. 127, S. 1283.
5. Meyer S., Schweidler E.— *Phys. Zs.*, 1918, Bd. 19, S. 30.
6. Meyer S.— *Zs. Phys. Chem.*, 1920, Bd. 95, S. 407.
7. Hahn O.— *Naturwissenschaften*, 1921, Bd. 9, S. 84.
8. Hahn O.— *Ber. deutsch. chem. Ges.*, 1921, Jg. 54, S. 1131.
9. Neuburger M. C.— *Zs. phys. Chem.*, 1921, Bd. 99, S. 454.
10. Hahn O.— *Ibid.*, 1923, Bd. 103, S. 461.
11. Gamow G.— *Phys. Rev.*, 1934, v. 45, p. 728.
12. Тамм И. Е.— *Изв. АН СССР. ОМОН, сер. физ.*, 1936, № 1/2, с. 301.
13. Gamow G.— *Nature*, 1934, v. 133, p. 833.
14. Gamow G.— *Nature*, 1935, v. 135, p. 858.
15. Szilard L., Chalmers T. A.— *Ibid.*, p. 98.
16. Amaldi E., D'Agostino O., Fermi E., Pontecorvo B., Rasetti E., Segrè E.— *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 1935, v. 149, p. 522.
17. Lawson J. L., Cork J. M.— *Phys. Rev.*, 1940, v. 57, p. 982.
18. Kourtchatow, B., Kourtchatow I., Myssowsky L., Rous-sinow L.— *C.R. Ac. Sci.*, 1935, t. 200, p. 1201.
19. Fermi E., Amaldi E., D'Agostino O., Rasetti F., Segrè E.— *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 1934, v. 146, p. 483.
20. Русинов Л. И. Исследование изомерии атомных ядер: Докторская диссертация.— Свердловск, 1944.— См. *УФН*, 1961, т. 73, с. 183.
21. Amaldi E., D'Agostino O., Fermi E., Pontecorvo B., Segrè E.— *Ric. Scient.*, 1935, v. VI-1, p. 581.
22. Курчатов И. В., Неменов Л. М., Селинов И. П.— *Вестн. рентгенологии и радиологии*, 1935, т. 15, с. 432.
23. Amaldi E., Fermi E.— *Phys. Rev.*, 1936, v. 50, p. 599; перевод: Амаль-ди Э., Ферми Э.— *УФН*, 1937, т. 17, с. 343.
24. Работы в области ядерной химии: (Лаборатория И. В. Курчатова).— В кн. Материалы к докладу акад. А. Ф. Иоффе на сессии Академии наук СССР.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936.— С. 61.
25. Курчатов И. В.— *Расщепление ядер нейтронами: (Университет физико-химии и энергетики им. акад. Н. Д. Зелинского при Всесоюзном совете научн. инж.-техн. обществ. Физ.-хим. факультет)*.— М., 1936.— 27 с.— Лекция перепечатана в кн.: Курчатов И. В.— *Ядерную энергию — на благо человечества*.— М.: Атомиздат, 1978.— С. 209.
26. Курчатов И. В.— *Изв. АН СССР. ОМОН, сер. физ.*, 1936, № 1/2, с. 339.
27. Blewett J. P.— *Phys. Rev.*, 1936, v. 49, p. 900.
28. Weizsäcker C. F. v.— *Naturwissenschaften*, 1936, Bd. 24, S. 813.
29. Meitner L. *Künstliche Umwandlungsprozesse beim Uran*.— In: *Kernphysikalische Vorträge gehalten am Physikalischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich im Sommer 1936 (30 Juni — 4 Juli)*.— Berl.: Springer, 1936.— S. 24.
30. Bethe H. A.— *Rev. Mod. Phys.*, 1937, v. 9, p. 69.
31. Pontecorvo B.— In: *Congrès du Palais de la découverte. Paris, Octobre 1937. II: Physique nucléaire*.— Paris: Hermann, 1938.— P. 118.
32. Гринберг А. П.— *УФН*, 1940, т. 23, с. 358.
33. Bothe W., Gentner W.— *Naturwissenschaften*, 1937, Bd. 25, S. 284; *Zs. Phys.* 1937, Bd. 106, S. 236.
34. Snell A.— *Phys. Rev.*, 1937, v. 52, p. 1007.
35. Русинов Л. И., Юзефович А. А.— *ДАН СССР*, 1938, т. 20, с. 647.
36. Русинов Л. И., Юзефович А. А.— *Ibid.*, 1939, т. 22, с. 580.
37. Русинов Л. И., Юзефович А. А.— *Ibid.*, 1939, т. 24, с. 128.

38. Гринберг А. П., Русинов Л. И.— Ibid., 1940, т. 27, с. 649; ЖЭТФ 1940, т. 10, с. 1018; Phys. Rev., 1940, v. 58, p. 181.
39. Pontecorvo B.— C.R. Ac. Sci., 1938, t. 207, p. 230.
40. Pontecorvo B.— Phys. Rev., 1938, v. 54, p. 542.
41. Abelson P. H.— Ibid., 1939, v. 55, p. 424 (A. 18); v. 56, p. 753.
42. Valley G. E., McCreary R. L.— Ibid., 1939, v. 55, p. 666; v. 56, p. 863.
43. Segrè E., Halford R. S., Seaborg G. T.— Ibid., 1939, v. 55, p. 321.
44. Русинов Л. И.— УФН, 1941, т. 25, с. 144.— Доклад на 5-м Всесоюзном совещании по атомному ядру. Москва, 20—26 ноября 1940 г.
45. Helmholtz A. C.— Phys. Rev., 1941, v. 60, p. 415.
46. Lipworth E., Garvin H. L., Green T. M.— Bull. Am. Phys. Soc., 1959, v. 4, p. 11 (CA4).
47. Greenwood L. R.— Nucl. Data Sheets, 1975, v. 15, p. 289.
48. Ellis Y. A.— Ibid., 1977, v. 21, p. 493.