

ИЗОМЕРИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР¹⁾*Л. И. Русинов, Ленинград*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в результате ряда исследований было показано, что наряду с изотопами и изобарами существуют ядра-изомеры, т. е. ядра, имеющие одинаковые атомные номера и массовые числа, но обладающие некоторым различием физических свойств.

Интересно отметить, что Содди¹ еще в 1917 г., разрабатывая вопрос об изотопическом составе элементов, указал на возможность существования такого рода ядер. В последующие годы Мейер² пытался экспериментально обнаружить представителей «изотопии высшего порядка» в продуктах распада естественно-радиоактивных элементов, но не пришел ни к каким определенным выводам.

Только в 1921 г. исследования Гана³ впервые показали наличие изотопов высшего порядка, или, как их стали называть впоследствии, изомеров, в ряду радиоактивных превращений урана (UX_2 и UZ). Так называемая «урановая вилка» в течение многих лет представляла собой единственный известный пример явления ядерной изомерии.

В 1935 г. Курчатовым, Русиновым и др.⁴ был открыт новый период искусственно-радиоактивного брома. В дальнейшем результат этого исследования послужил основанием для установления ядерной изомерии у одного из изотопов данного элемента. Открытие изомерии брома явилось толчком к поискам других примеров ядерной изомерии среди искусственно-радиоактивных ядер.

Значительное увеличение числа случаев ядерной изомерии стало возможным благодаря замечательным опытам Голдгабера, Хилла и Сциларда⁵, которые в 1938 г. впервые показали (на примере индия), что ядерная изомерия может существовать также и у стабильных ядер.

Наличие ядерной изомерии у сравнительно большого числа искусственно-радиоактивных элементов дало экспериментаторам новые объекты исследования и открыло широкие возможности для изучения этого нового явления.

К настоящему времени накопился большой экспериментальный материал по ядерной изомерии и созданы также определенные тео-

¹⁾ Доклад на Совещании по атомному ядру 1940 г., см. в этом выпуске стр. 241.

ретические представления об ее физической природе. Поэтому представляет интерес дать обзор современного состояния вопроса об изомерии атомных ядер.

1. МЕТОДЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ИЗОМЕРИИ

Обычно явление ядерной изомерии устанавливается по различию радиоактивных свойств изомерных ядер. Как известно, период распада данного радиоактивного ядра является его характерной индивидуальной константой. Однако, среди ядерных реакций встречаются такие случаи, когда два разных периода приходится приписать одному и тому же нестабильному изотопу, и в этом случае констатируется явление ядерной изомерии.

Изомерия у стабильных ядер устанавливается по тому факту, что радиоактивные свойства приходится приписать ядру, имеющему тот же состав, что и один из стабильных изотопов данного элемента.

Первым указанием на наличие ядерной изомерии чаще всего является то обстоятельство, что число радиоактивных периодов у того или иного элемента превышает число возможных радиоактивных его изотопов. Этот метод констатации ядерной изомерии особенно пригоден для элементов с нечетным атомным номером, которые обладают малым числом устойчивых изотопов. Очевидно, что таким образом можно устанавливать только факт существования ядерной изомерии у данного элемента, но нет возможности определить, у какого именно изотопа имеет место изомерное состояние.

Для приписания определенного массового числа данной изомерной паре применяется так называемый метод перекрестных ядерных реакций. Он заключается в том, что один и тот же радиоактивный период пытаются получить в результате разных ядерных реакций при облучении различного рода активирующими частицами исследуемого элемента и соседних с ним. (Примеры даны в последней графе табл. 1.) Необходимо отметить, что даже при использовании этого метода, вследствие наличия большого числа соседних изотопов и по другим причинам, нередко возникают большие трудности в вопросе как установления самого факта ядерной изомерии, так и приписания массового числа изомерам. До сих пор существует ряд случаев изомерии, когда не удалось еще окончательно установить массовое число изомерной пары, например, Ag_{47}^{107} или Ag_{47}^{109} , Ma_{43}^{99} или Ma_{43}^{101} и др.

В последнее время достигнуты большие успехи в области разделения изотопов. Работа с разделенными изотопами должна представить большие удобства для изучения многих ядерных превращений и, в частности, для исследования в чистых условиях вопросов ядерной изомерии. Опыты, выполненные Реддеманном⁶ с разделенным в естественных условиях изотопом стронция, уже дали возможность получить ряд новых сведений об изомере Sr_{38}^{87} .

Метод установления изомерии атомных ядер по радиоактивным свойствам — весьма чувствительный, но не единственно возможный.

Согласно существующим представлениям о природе ядерной изомерии (которые будут рассмотрены ниже) одно из двух изомерных ядер находится в возбужденном состоянии. Поэтому два изомерных ядра при равных атомных номерах и массовых числах все же несколько отличаются своими атомными весами; они должны также отличаться по своим механическим и магнитным моментам и т. п. Однако, в настоящее время у нас нет еще экспериментальных возможностей, чтобы по различиям такого рода устанавливать факт ядерной изомерии.

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ИЗОМЕРИИ СРЕДИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В табл. 1 представлены все известные до настоящего времени более или менее достоверно установленные случаи ядерной изомерии.

Изомерное состояние ядер встречается на протяжении всей периодической системы элементов — от ядер с атомным номером 20 до ядер с атомным номером 91. Среди известных случаев изомерии периоды распада возбужденного ядра варьируют от нескольких десятков секунд (40 сек. для $\text{Ag}_{47}^{107, 109}$) до нескольких месяцев (90 дней для Te_{52}^{127}). Энергии возбуждения изомерных ядер имеют значения от ~ 50 KeV (в случаях брома и криптона) до ~ 500 KeV (в случаях стронция и цинка).

В связи с этим следует отметить, что число открытых в настоящее время ядерных изомеров является до известной степени случайным по сравнению с действительным распространением этого явления. В первую очередь, естественно, удалось обнаружить те случаи ядерной изомерии, в которых оказались удобными для экспериментального наблюдения величины периодов распада и величины энергий возбуждения. Приведенная таблица изомеров в процессе дальнейшего исследования ядерной изомерии непрерывно расширяется и пополняется новыми примерами.

Можно предположить существование в природе и таких изомерных ядер, которые являются практически устойчивыми. Если энергия возбуждения такого ядра составляет несколько киловольт (процессы внутренней конверсии на K - и L -оболочках в этом случае не могут происходить), то, при наличии даже не очень большой разности угловых моментов между возбужденным и основным состоянием, это ядро будет иметь очень большое время жизни, например, порядка 10^{10} лет. Экспериментально обнаружить такого рода изомеры весьма трудно и возможно только по мало интенсивному γ -излучению или по тому факту, что у данного стабильного ядра будут установлены два разных механических момента или окажутся несколько отличными атомные веса.

Многочисленность уже известных в настоящее время случаев ядерной изомерии определенно показывает, что ядерная изомерия не есть редкое исключение, а, напротив, представляет собою весьма характерное для атомных ядер явление.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИРОДЕ ЯДЕРНОЙ ИЗОМЕРИИ

Первая попытка теоретического объяснения ядерной изомерии принадлежит Гамову. В 1934 г. Гамов⁷ выдвинул идею, объяснявшую известные в то время случаи изомерии протактиния и предполагавшейся изомерии Pb_{82}^{210} наличием метастабильного возбужденного состояния ядер этих элементов. Причина метастабильности, по Гамову, заключалась в существовании в некоторых ядрах гипотетических частиц — антипротонов.

В 1936 г. Вейцекер⁸, развивая идеи Бора, предложил новую, оказавшуюся весьма плодотворной, теорию ядерной изомерии. Согласно этой теории изомерия также объясняется существованием метастабильного возбужденного состояния ядер. Причина же метастабильности заключается в большой разности угловых моментов, соответствующих возбужденному и основному состояниям данного ядра. Поэтому, в силу квантовомеханических законов запрета, делается маловероятным радиационный переход одного изомера в другой.

Произведенный Вейцекером расчет, рассматривающий излучающую систему — ядро — согласно «одночастичной модели», показал, что вероятность перехода маловозбужденного состояния ядра в основное путем γ -испускания будет весьма малой при большой разности угловых моментов, соответствующих этим состояниям.

В дальнейшем Бете⁹ произвел аналогичный расчет, рассматривая излучение ядра в более общем виде, и получил результаты, качественно совпадающие с вейцекеровскими.

Получающиеся согласно этим расчетам времена жизни ядер могут иметь тот же порядок величины, что и наблюдаемые на опыте периоды распада изомеров.

Недавно, в 1940 г., Заксом¹⁰ была предложена новая гипотеза, которая, возможно, в ряде случаев могла бы объяснить явление ядерной изомерии. По Заксу, одно из изомерных ядер также находится в метастабильном состоянии, но причина метастабильности заключается в том, что два изомерных ядра имеют нулевой угловой момент и противоположную четность. В этом случае будет запрещен γ -переход, а также обычный конверсионный переход. Разрядка метастабильного ядра при этом возможна только путем одновременного испускания двух фотонов или двух конверсионных электронов. Этот процесс будет иметь малую вероятность и, как показывают подсчеты Закса, также может объяснить наблюдаемые на опыте времена жизни изомерных ядер.

Различие между гипотезами Вейцекера и Закса на опыте скажется в энергетическом распределении испускаемых при изомерном переходе γ -квантов или конверсионных электронов. Согласно первой теории спектр фотонов или конверсионных электронов должен быть линейчатым, а по второй — непрерывным.

Механизм ядерной изомерии, предложенный Заксом, не исключает вейцекеровского, и можно предположить, что в некоторых случаях он имеет место.

4. ЯДЕРНАЯ ИЗОМЕРИЯ И ВНУТРЕННЯЯ КОНВЕРСИЯ

Следствием изложенной выше теории Бора — Вейцекера о природе ядерной изомерии должно быть существование нового типа радиоактивного распада — самостоятельной γ -радиоактивности с относительно большим средним временем жизни, связанной с переходом метастабильного ядра в основное состояние.

При изучении ядерной изомерии долгое время не удавалось обнаружить такого рода γ -излучения изомерных ядер.

В 1938 г. Русиновым и Юзефовичем¹¹, в лаборатории проф. И. В. Курчатова, на примере изомерного брома, а также, независимо, Понтекорово¹² на примере родия, было открыто конверсионное излучение изомеров. Эти опыты объяснили причину тех затруднений, с которыми было связано обнаружение γ -радиоактивности при ядерной изомерии. Оказалось, что они обусловлены природой явления, а именно тем, что разрядка метастабильного уровня происходит, главным образом, путем процессов внутренней конверсии.

Результаты этих работ впервые дали в известной степени экспериментальное доказательство справедливости представлений Бора — Вейцекера о природе ядерной изомерии.

Весьма существенным явилось то, что эти данные находились в качественном согласии с появившимися в то время теоретическими подсчетами Гебба и Уленбека¹³, согласно которым разрядка ядра при малых энергиях возбуждения и большой разности угловых моментов происходит преимущественно путем внутренней конверсии.

Конверсионное излучение изомеров оказалось весьма ценным инструментом для выяснения многих деталей изомерных превращений.

Изучение спектра конверсионных электронов дало возможность для большинства изомеров определить величину разности энергий между метастабильным и основным уровнями изомерных ядер. Заметим, что во всех известных до сих пор случаях изомерии наблюдаются конверсионные электроны, имеющие линейчатый спектр, соответствующий конверсии на K -, L -, а также M -оболочках атома. Этот факт указывает, что пока нет примеров ядерной изомерии, согласующихся с теорией Закса.

Далее, изучение убывания интенсивности конверсионного излучения дает возможность определить, какой из двух радиоактивных периодов относится к возбужденному изомеру.

Кроме того, в результате исследования характеристического рентгеновского излучения¹⁴, сопутствующего процессам внутренней конверсии, удастся определить атомный номер метастабильного ядра и выяснить схему изомерных переходов. Для этой цели оказался также весьма ценным предложенный Сегре и др.¹⁵ остроумный метод химического разделения, в котором используется отдача атома, получающаяся при вылете конверсионного электрона. Этот метод в ряде случаев дает возможность доказать, что имеет место схема «последовательного распада» изомеров (см. раздел 6).

Но наиболее существенным результатом исследования конверсионного излучения изомеров является возможность количественного со-

поставления экспериментальных данных о процессах внутренней конверсии с теоретическими подсчетами. Это сопоставление, как будет показано ниже, позволяет определить величину разности угловых моментов между метастабильным и основным состоянием изомерного ядра и тем самым полностью проверить справедливость существующих теоретических представлений о природе ядерной изомерии.

5. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗОМЕРНЫХ ЯДЕР

Все известные ядерные изомеры получаются в результате тех или иных ядерных реакций, т. е. относятся к искусственно-радиоактивным ядрам. Исключением является изомерия протактиния, которая образуется в результате распада естественно-радиоактивного урана.

Рассмотрим несколько случаев образования изомерных ядер.

Компаунд-ядро, получающееся, например, в результате реакции с медленными нейтронами, может «высвечиваться» путем каскадного испускания γ -квантов не только на основное, но и на некоторое метастабильное состояние. В этом случае образуются два изомерных ядра. Относительная вероятность перехода компаунд-ядра на метастабильный или основной уровень определяется расположением промежуточных энергетических уровней, типом радиационных переходов и правилами отбора для этих переходов.

Можно отметить интересный пример выявления этих правил отбора. Метастабильное ядро In^{114}_{49} ($T=50$ дней) легко образуется в реакции (n, γ) ; получить же ядра In^{114}_{49} в основном состоянии ($T=72$ сек.) путем той же реакции не удастся, несмотря на специальные опыты, поставленные для этой цели¹⁶. В данном случае правила отбора приводят к тому, что компаунд-ядро практически всегда высвечивается на метастабильный уровень.

В ядерных реакциях с разного рода быстрыми частицами получающееся компаунд-ядро может иметь различную энергию возбуждения и весьма отличный от исходного ядра угловой момент. При этих реакциях относительная вероятность перехода компаунд-ядра в метастабильное и основное состояния довольно сильно меняется в зависимости от энергии частиц и типа реакций. Например, относительная вероятность ξ образования метастабильного ядра брома при захвате тепловых нейтронов равна $0,5^{17}$, при реакции с фотонами, имеющими энергию 12 MeV , $\xi=0,4$, с фотонами в 17 MeV $\xi=1,0^{18}$, а при воздействии быстрых нейтронов с энергией до 14 MeV $\xi=2,0^{19}$; в случае изомерии родия при реакции с тепловыми нейтронами $\xi=0,1$, а при реакции с быстрыми нейтронами от $(\text{Rn} + \text{Be})$ -источника $\xi=0,2^{20}$.

Изложенные факты вполне согласуются с существующими представлениями статистической ядерной теории Бора.

При образовании изомерного состояния стабильных ядер является особенностью, связанная с тем обстоятельством, что вероятность возбуждения стабильного ядра непосредственно на метастабильный уровень весьма мала. Изомерное состояние стабильного ядра практически всегда получается в результате реакции с соседними элемен-

тами или же путем возбуждения исходного стабильного ядра (при помощи жестких рентгеновских лучей или процессов неупругого рассеяния тяжелых частиц) на более высокий активационный уровень ^{5,21}. Этот уровень затем разряжается путем γ -испускания, и имеется некоторая вероятность того, что часть переходов приведет к образованию метастабильных ядер.

Возбуждая ядро In^{115}_{49} жесткими рентгеновскими квантами, Вальдман и др.²¹, а также Корсунский и др.²² определили энергии активационных уровней для данного элемента.

Возможно, что в ряде случаев изомерное состояние стабильных ядер при бомбардировке заряженными частицами образуется в результате действия электрического поля этих частиц, пролетающих вблизи ядра ²³.

На основе анализа всех известных до сих пор случаев образования ядерных изомеров (данные, приведенные в табл. 1) можно сделать следующее обобщающее заключение. Все типы ядерных реакций, поскольку они приводят к возникновению возбужденных состояний ядра, в тех или иных случаях оказываются пригодными и для образования ядерных изомеров. К этим реакциям следует добавить те случаи, когда возбуждение ядер получается в результате β -распада, K -захвата и деления тяжелых ядер.

Весь экспериментальный материал о механизме образования изомеров качественно хорошо согласуется с представлением, рассматривающим изомерные ядра как два ядра, находящиеся в различных энергетических состояниях, причем одно из них является метастабильным.

Принципиально возможно путем исследования механизма образования изомеров определить разность угловых моментов для ядер, находящихся в метастабильном и основном состояниях. Например, угловой момент компаунд-ядра, образовавшегося в результате реакции (n, γ) , будет на $1/2$ отличаться от момента исходного ядра. Если, далее, удастся выяснить типы каскадных γ -переходов компаунд-ядра, то можно полагать, что в ряде случаев можно будет определить разность ΔI угловых моментов, соответствующих двум изомерным ядрам. Аналогично, изучая процессы возбуждения стабильных ядер γ -квантами на активационный уровень и последующие радиационные переходы ядра на метастабильный уровень, повидимому, также можно будет определить величину ΔI для тех или иных изомеров. Однако, из имеющегося к настоящему времени экспериментального материала о механизме образования изомеров нельзя еще сделать каких-либо количественных заключений по вопросу о величине ΔI .

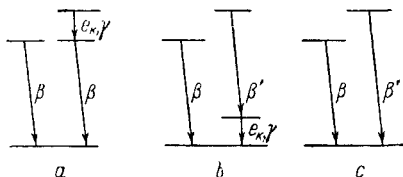
6. СХЕМЫ РАЗРЯДКИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

В предыдущем разделе был рассмотрен вопрос о том, как образуются метастабильные состояния ядер. Теперь мы укажем на те превращения, которые испытывает ядро, находящееся в метастабильном состоянии.

Можно предположить две схемы разрядки ядра с метастабильного уровня: «последовательный» и «независимый» распад. Обе эти схемы встречаются на опыте.

а) Схема последовательного распада

В ряде случаев метастабильное ядро путем γ -испускания или конверсионного излучения переходит в основное состояние, и тогда β -распад происходит только с основного уровня. Один из двух наблюдаемых на опыте периодов β -распада обуславливается тем, что β -излучение следует после изомерного перехода (рис. 1, а): как известно, если период этого перехода будет много больше периода β -излучения, то будут наблюдаться два периода β -распада. Естественно, что границы и формы β -спектров, соответствующих этим периодам, будут одинаковы.



Следует заметить, что в тех случаях, когда период изомерного перехода меньше периода β -распада ядра из основного состояния, установление факта ядерной изомерии по отличию констант β -распадов практически невозможно. Факт изомерии в данном случае может быть установлен путем обнаружения γ - или конверсионного излучения, соответствующих изомерному переходу.

Рис. 1

В большинстве известных примеров ядерной изомерии разрядка метастабильного состояния происходит по схеме последовательного распада (см. изомеры в табл. 1, для которых один из периодов β -распада указан в скобках). В этих случаях, используя спектр конверсионных электронов, удается определить разность энергий для двух изомерных ядер. Период распада возбужденного изомера в основном легко может быть определен из данных об убывании интенсивности конверсионного излучения.

К рассматриваемой группе изомеров относятся и известные случаи изомерии стабильных ядер, в которых разрядка метастабильного уровня также совершается путем γ -испускания или конверсионного перехода (см. в табл. 1 ядра, отмеченные звездочкой).

б) Схема независимого распада

При этом типе переходов разрядка метастабильного ядра происходит путем β -распада на возбужденный уровень соседнего ядра. Известно лишь несколько случаев ядерной изомерии, в которых распад происходит по этой схеме: Mn_{25}^{52} , Ag_{47}^{106} , In_{49}^{116} и, возможно, Ra_{91}^{234} .

Очевидно, что, при схеме независимого распада, формы и границы β -спектров, соответствующих двум изомерным периодам, будут, вообще говоря, различны (рис. 1, б). Этот тип распада изомеров мало изучен. В случае такой схемы не удастся установить, какой из периодов распада относится к метастабильному ядру, а также нельзя пока определить величину энергии возбуждения этого ядра.

Отметим, что указание Пула и др.²⁴ на существование позитронно-электронной изомерии Ag_{47}^{106} является ошибочным. В данном случае,

повидимому, имеет место схема распада с испусканием позитронов обоими изомерными ядрами.

Осуществление в том или ином случае схемы последовательного или независимого распада определяется, очевидно, тем, какой из процессов разрядки метастабильного ядра имеет большую вероятность — переход ли метастабильного ядра путем γ -радиации или конверсионного излучения на основной уровень того же ядра, или переход метастабильного ядра путем β -распада на подходящий уровень соседнего ядра.

Среди известных изомеров не было обнаружено ни одного случая, в котором наблюдался бы β -распад каждого из двух изомерных ядер непосредственно на основной уровень соседнего ядра (рис. 1, с). Этот факт находится в полном согласии с представлениями, связывающими ядерную изомерию с большим различием в угловых моментах между метастабильным и основным состоянием. Действительно, если такая разность имеет место, то распад по схеме рис. 1, с оказался бы связанным с передачей большого момента β -электронам одного из периодов. Вероятность же β -распада с большим изменением углового момента весьма мала.

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЯДЕР

Весь рассмотренный выше экспериментальный материал по вопросу об изомерии атомных ядер показывает, что два изомерных ядра отличаются друг от друга своими энергетическими состояниями, из которых одно является метастабильным.

Для полного доказательства представлений Бора — Вейцекера о природе ядерной изомерии необходимо подтвердить их гипотезу о причине метастабильности ядер, т. е. показать, что малая вероятность перехода ядер из метастабильного состояния в основное обуславливается большой разностью угловых моментов, соответствующих этим состояниям. Этот пункт теории до последнего времени оставался открытым. Он может быть проверен прямыми опытами по изучению сверхтонкой структуры оптических спектров изомеров, непосредственным измерением механических моментов в опытах Штерна — Герлаха и др. Но мы еще не располагаем сейчас достаточно интенсивными радиоактивными источниками для такого рода экспериментов.

Можно, однако, попытаться проверить эту сторону теории, исследуя процессы внутренней конверсии при ядерной изомерии.

Изменение ΔI углового момента при переходе ядра из метастабильного состояния в основное может быть определено по порядку мультипольности излучения, связанного с этим переходом. От порядка же мультипольности излучения, как это следует из теории внутренней конверсии, в большой степени зависят величины коэффициентов внутренней конверсии.

Существенно отметить при этом, что теория дает для вероятности процессов внутренней конверсии значения, не зависящие от конкретной модели ядра. Поэтому определение изменения углового момента

при изомерном переходе с помощью этого метода следует безусловно предпочесть тому, при котором используется теоретически выведенная связь между средним временем жизни метастабильного ядра и величиной ΔI .

Теоретические расчеты, выполненные Геббом и Уленбеком¹³ и Данковым и Моррисоном²⁵, дают возможность в ряде случаев вычислить коэффициенты внутренней конверсии на K -оболочках атомов. Расчеты Завелевича²⁶ позволяют подсчитать и относительные коэффициенты конверсии (отношение конверсии на L - и K -уровнях атома). Результаты подсчетов показывают, что полные и относительные коэффициенты внутренней конверсии, особенно при малых энергиях возбуждения, очень быстро возрастают с увеличением порядка мультипольности излучения. Поскольку имеется подобная резкая зависимость, следует полагать, что в ряде случаев, путем сравнения полученных из расчета коэффициентов внутренней конверсии с опытными данными, можно однозначно определить порядок мультипольности излучения и соответствующее этому излучению изменение углового момента ядра.

Заметим, что при малых энергиях возбуждения (~ 100 KeV) более удобно определять порядок мультипольности излучения по относительному коэффициенту конверсии, так как полный коэффициент уже при первых порядках мультипольности излучения практически достигает единицы. Для более высоких энергий возбуждения изомеров определение порядка мультипольности излучения возможно как по полному, так и по относительному коэффициентам конверсии. Для изомеров с еще большей энергией возбуждения установление порядка мультипольности излучения возможно только по полному коэффициенту конверсии, так как относительный коэффициент в этом случае, повидимому, в малой степени зависит от порядка мультипольности излучения.

Все сказанное выше относится к излучениям электрических мультиполей. Однако, можно предположить, что в ряде случаев излучение ядра имеет магнитный характер. Из теории внутренней конверсии следует, что зависимость полных и относительных коэффициентов конверсии от порядка мультипольности излучения будет различна для магнитных и электрических переходов. Поэтому путем одновременного сравнения полученных на опыте полных и относительных коэффициентов конверсии с теорией можно определить, имеет ли излучение ядра в данном случае магнитный или электрический характер.

В настоящее время мы не располагаем еще расчетами коэффициентов внутренней конверсии для случая магнитных мультиполей и малой энергии возбуждения изомеров, которые необходимы для сравнения с опытом. (Выполненный Данковым и Моррисоном²⁵ релятивистский расчет для магнитных переходов, пренебрегающий связью орбитальных электронов в атоме, применим лишь в случаях очень больших энергий возбуждения, не встречающихся на практике.) Этот пробел в теории конверсии затрудняет установление характера излучения ядра по экспериментальным значениям коэффициентов внутренней конверсии. Существует, однако, ряд общих теоретических соображений²⁵, согласно которым в случае магнитного излучения коэффициенты конверсии на K -оболочке будут малы, в то время как относительные

коэффициенты конверсии будут аномально высоки. Это обстоятельство может дать возможность в ряде случаев указать на характер излучения и определить порядок его мультипольности.

Перейдем к вопросу о теоретическом расчете зависимости между временем жизни изомерного ядра, его энергией возбуждения и величиной разности угловых моментов ядра в возбужденном и основном состояниях. Следует отметить, что этот расчет является только качественным ввиду того, что в настоящее время невозможно точно оценить значения матричных элементов для ядерных переходов.

Предложенная Бете⁹ формула для средней длительности жизни ядра по отношению к γ -испусканию имеет вид:

$$\tau_{\gamma} = 5 \cdot 10^{-21} (\Delta I)^2 \left(\frac{20}{\Delta E} \right)^{2M+1} \text{ сек.}, \quad (1)$$

где ΔI — величина разности угловых моментов для соответствующих состояний ядра, выраженная в единицах $\hbar/2\pi$; ΔE — величина энергии возбуждения ядра в миллионах электрон-вольт.

При сравнении времени жизни, даваемого формулой Бете, с опытом необходимо учитывать дополнительную вероятность распада метастабильного состояния, создаваемую процессами внутренней конверсии.

Формула Вейцекера⁸ для времени жизни основана на весьма приближенном расчете и дает по сравнению с формулой Бете значения для времени жизни в $Z^2 (\Delta I)^2$ раз меньше; таким образом, для ядер со средним атомным номером и при $\Delta I = 4$ вычисленные значения τ расходятся между собой примерно в 10^8 раз.

Проф. Я. И. Френкель в своей недавней работе²⁷ указал на непоследовательность расчета Бете и отметил, что интерпретация метастабильных уровней, даваемая Бете на основе «капельной» модели ядра, должна быть отвергнута.

Во всяком случае можно констатировать, что в настоящее время теория еще не дала обоснованного и более или менее точного расчета для продолжительности жизни метастабильных ядер; другими словами, еще не существует количественной теории ядерной изомерии.

Мы приводим ниже сравнение величины τ , рассчитанной по формуле Бете с учетом конверсии, со временем жизни метастабильного ядра, измеренным на опыте. Это сравнение произведено следующим образом. Как видно из формулы (1), для вычисления среднего времени жизни какого-либо изомера необходимо знать для него величины ΔE и ΔI . Значение ΔE известно для многих изомеров из экспериментальных данных о спектре конверсионных электронов, а величину ΔI мы определяем путем сопоставления измеренных на опыте коэффициентов конверсии с результатами теоретических расчетов.

Перейдем к рассмотрению тех нескольких случаев изомерии, для которых может быть проведено подобное сравнение, так как для них имеются более или менее подробные данные о коэффициентах внутренней конверсии.

Бром 80. Этот элемент был исследован Русиновым, Юзефовичем и Гринбергом²⁸. Согласно данным этих авторов, в ядре Br_{80}^{80} осуществляются два следующих друг за другом перехода. Верхний переход

имеет период распада 4,5 часа. Величина разности энергий для этого перехода составляет 49 KeV, полный коэффициент конверсии равен ~ 1 , а относительный коэффициент конверсии 0,35—0,5.

В данном случае наблюдается большая величина полного коэффициента внутренней конверсии и малое значение относительного коэффициента конверсии. Поэтому можно полагать, что здесь имеет место излучение электрического характера.

Из величины полного коэффициента внутренней конверсии следует, что в случае брома порядок мультипольности излучения составляет больше двух единиц, ибо при $\Delta E = 49$ KeV и $Z = 35$ полный коэффициент конверсии по теории достигает ~ 1 уже при $\Delta I = 2$. Из сравнения расчетов Завелевича, касающихся относительных коэффициентов конверсии с опытными данными, следует, что в случае брома изменение углового момента при изомерном переходе равно трем единицам. Если произвести по формуле Бете (с учетом конверсии) расчет времени жизни метастабильного ядра, подставив значения $\Delta E = 49$ KeV и $\Delta I = 3$, то получим величину τ , в 10^7 меньшую известной из опыта.

Мазурий 99 или 101. Этот элемент был изучен Сегре, Зиборгом и др.²⁹ Энергия возбуждения рассматриваемого изомера составляет 136 KeV, период распада — 6,6 часа. Полный коэффициент конверсии составляет $\sim 0,5$. Относительный коэффициент не был измерен, но авторы отмечают большую конверсию на K -по сравнению с L -оболочкой. Поэтому и в этом случае следует полагать, что излучение имеет электрический характер. Изменение углового момента, определенное по величине полного коэффициента конверсии, равно трем единицам. Время жизни, вычисленное по формуле Бете (с учетом указанной величины коэффициента конверсии), оказывается в 10^8 раз меньше, чем наблюдаемое на опыте.

Серебро 107 или 109. Этот изомер был подробно изучен Альваресом, Нельсоном и др.³⁰

В данном случае $\Delta E = 93,5$ KeV, $T = 40$ сек., полный коэффициент конверсии составляет 0,98, а относительный $1,0 \pm 0,1$. Величина полного коэффициента конверсии свидетельствует о том, что в данном случае также происходит электрический переход и что изменение углового момента составляет больше, чем три единицы. Из данных об относительном коэффициенте конверсии следует, что изменение углового момента равно четырем. (Авторы статьи приводят эту величину ΔI , ссылаясь на неопубликованные теоретические расчеты относительных коэффициентов конверсии.)

Подсчет времени жизни, проведенный аналогично предыдущим случаям, дает значение для τ , совпадающее с наблюдаемым на опыте.

Индий 114. Этот изомер был подробно изучен Лаусоном и Корком¹⁶. Его энергия возбуждения равна 192 KeV. Полный коэффициент конверсии составляет $1,0 \pm 0,15$; относительный коэффициент 1,0; период распада метастабильного уровня — 50 дней. Из величины полного коэффициента конверсии следует, что и здесь имеет место электрическое излучение, и в таком случае изменение углового момента ядра равно или больше пяти. Величина относительного коэффициента конверсии дает $\Delta I = 5$.

Теоретически рассчитанная длительность жизни совпадает с экспериментальной величиной.

Индий 113 и 115¹⁶. Энергия возбуждения у этих изомеров слишком высока (393 и 338 KeV), чтобы можно было применять нерелятивистские формулы, но гораздо ниже предела применимости релятивистских формул.

Пользуясь методом графической интерполяции, можно все же оценить величины коэффициентов внутренней конверсии для электрических мультиполей. Не располагая необходимыми формулами для подсчета коэффициентов конверсии в нерелятивистской области для магнитных мультиполей, мы не можем произвести для них аналогичной интерполяции, хотя подобный расчет представлял бы интерес, так как в рассматриваемом случае у нас нет оснований для выбора характера излучения (магнитное или электрическое).

Заметим, однако, что если теоретический расчет времени жизни даже при предположении электрического излучения дает большие расхождения с опытом (см. табл. 2), то при магнитном излучении это расхождение было бы еще больше, так как наблюдаемая величина коэффициента конверсии соответствовала бы еще большей разности угловых моментов.

Все рассмотренные примеры сведены в табл. 2.

Таблица 2

Ядро	Данные эксперимента				ΔI		$\tau_{\text{эксп}} / \tau_{\text{Бете}}$
	T	ΔE в KeV	Коэффициент внутренней конверсии	Относитель- ный коэффи- циент внутрен- ней конверсии	из коэффи- циента внутренней конверсии	из относитель- ного коэффи- циента внутрен- ней конверсии	
Br ⁸⁰	4,5 часа	49	~ 1	0,4	> 2	3	10^7
Ma(99,101)	6,6 часа	136	0,5	—	> 3	—	$2 \cdot 10^8$
Ag(107,109)	40 сек.	93,5	0,98	1	> 3	4	~ 1
In ¹¹³	1,75 часа	393	0,4	0,18	> 6	—	10^{-3}
In ¹¹⁴	50 дней	192	~ 1	1	≥ 5	5	~ 1
In ¹¹⁵	4,5 часа	338	0,5	0,21	7	—	$5 \cdot 10^{-9}$

Как видно, только для шести случаев из общего числа известных изомерных ядер измерены значения коэффициентов внутренней конверсии, позволяющие произвести такого рода сопоставление опытных данных с теоретическими расчетами.

В ряде случаев — бром, серебро, индий — можно было для определения порядка мультипольности излучения и связанного с ним изменения углового момента использовать и полные и относительные коэффициенты конверсии. В остальных случаях это определение пришлось делать только по значениям полных коэффициентов конверсии.

Весь приведенный материал, касающийся определения величины разности угловых моментов для ряда изомерных ядер из данных о внутренней конверсии, имеет большое значение. Он показывает, что теория Бора — Вейцекера о природе ядерной изомерии подтверждается и в том пункте, который оставался до сих пор открытым, а именно в том, что метастабильность изомерных ядер действительно обуславливается отличием угловых моментов соответствующих состояний. В этом результате заключается большой успех, полученный в последнее время в вопросе изучения ядерной изомерии.

Выполненное нами указанным образом сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными данными о средних временах жизни изомеров показывает, что в ряде случаев имеет место весьма значительное расхождение. Наибольшее расхождение дает формула Вейцекера (до 10^{16} раз), которая, впрочем, ошибочна и с теоретической точки зрения. Заметное несогласие с опытом дает в ряде случаев и формула Бете.

Полученное расхождение может быть связано с тем обстоятельством, что в некоторых из рассмотренных примеров все же имеет место излучение магнитного характера, или же с тем, что в ряде случаев авторами переоценен предел применимости их расчета коэффициентов конверсии. Есть основания полагать, что расхождение при вычислении τ объясняется большой неточностью существующих теоретических формул для времени жизни.

В связи с имеющимся несоответствием экспериментальных и теоретических данных весьма актуальным является дальнейшее экспериментальное изучение полных и относительных коэффициентов конверсии для других ядерных изомеров и выполнение ряда теоретических расчетов коэффициентов внутренней конверсии, в первую очередь — для магнитных переходов при малых энергиях возбуждения.

Эти данные, а возможно и другие методы, о которых упоминалось выше, позволят определить величину разности угловых моментов для значительно большего числа изомеров.

В результате дальнейших исследований будет накоплен более полный материал об угловых моментах, а также о средних временах жизни, характере переходов и энергиях возбуждения метастабильных ядер, который послужит основанием для построения количественной теории ядерной изомерии и даст нам ряд новых и ценных сведений о системе энергетических уровней в атомных ядрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Soddy, Proc. Roy. Inst., **22**, 117, 1917.
2. St. Meyer, Wiener Berichte, **127**, 1283, 1918.
3. O. Hahn, Ber. Deutsch. chem. Ges., **54**, 1131, 1921.
4. Б. Курчатов, И. Курчатов, Л. Мысовский и Л. Русinov, C. R., **200**, 1201, 1935.
5. H. Goldhaber, R. Hill and L. Szilard, Phys. Rev., **55**, 47, 1939.
6. H. Reddemann, Z. Physik, **116**, 137, 1940.
7. G. Gamov, Phys. Rev., **45**, 728, 1934; Nature, **135**, 858, 1935.
8. C. Weizsäcker, Naturwiss., **24**, 813, 1936.
9. H. Bethe, Rev. Mod. Phys., **9**, 225, 1937.

10. R. Sachs, *Phys. Rev.*, **57**, 194, 1940.
 11. Л. Русинов и А. Юзefович, *ДАН СССР*, **20**, 647, 1938.
 12. B. Pontecorvo, *Phys. Rev.*, **54**, 542, 1938.
 13. M. Hebb and G. Uhlenbeck, *Physica*, **5**, 605, 1938.
 14. Л. Русинов и А. Юзefович, *ДАН СССР*, **22**, 580, 1939.
 15. E. Segrè, R. Halford and G. Seaborg, *Phys. Rev.*, **55**, 321, 1939.
 16. J. Lawson and J. Cork, *Phys. Rev.*, **57**, 982, 1940.
 17. R. Fleischmann, *Z. Physik*, **107**, 205, 1937.
 18. W. Bothe u. W. Gentner, *Z. Physik*, **112**, 45, 1939.
 19. A. Soltan and L. Wertenstein, *Nature*, **141**, 76, 1938.
 20. H. Reddemann, *Naturwiss.*, **26**, 125, 1938.
 21. B. Pontecorvo et A. Lazard, *C. R.*, **208**, 99, 1939; B. Waldmann, G. Collins and E. Stubbefield, *Phys. Rev.*, **55**, 1129, 1939.
 22. М. Корсунский, Ф. Ланге и В. Шпинель, *ДАН СССР*, **26**, 145, 1940.
 23. V. Weisskopf, *Phys. Rev.*, **53**, 1018, 1939.
 24. M. Pool and Campbell, *Phys. Rev.*, **53**, 272, 1938.
 25. S. Dancoff and P. Morrison, *Phys. Rev.*, **55**, 122, 1939.
 26. Г. Завелевич (в печати).
 27. Я. Френкель, *ЖЭТФ*, **10**, 361, 1940.
 28. Л. Русинов и А. Юзefович, *J. Physics USSR*, **3**, 281, 1940; А. Гринберг и Л. Русинов, *ЖЭТФ*, **10**, 1018, 1940.
 29. G. Seaborg and E. Segrè, *Phys. Rev.*, **55**, 808, 1939.
 30. L. Alvarez, A. Helmholtz and E. Nelson, *Phys. Rev.*, **57**, 660, 1940.
 31. H. Walke, F. Thompson, J. Holt, *Phys. Rev.*, **57**, 177, 1940.
 32. H. Walke, *Phys. Rev.*, **57**, 163, 1940.
 33. H. Walke, E. Williams and G. Evans, *Proc. Roy. Soc.*, **171**, 360, 1939.
 34. J. Livingood and G. Seaborg, *Phys. Rev.*, **54**, 391, 1938; A. Hemmendinger, *Phys. Rev.*, **55**, 604, 1939.
 35. J. Kennedy, G. Seaborg and E. Segrè, *Phys. Rev.*, **56**, 1095, 1939.
 36. A. Langsdorf and E. Segrè, *Phys. Rev.*, **57**, 105, 1940.
 37. L. Du Bridge and J. Marshall, *Phys. Rev.*, **58**, 7, 1940.
 38. E. Crittenden, *Phys. Rev.*, **56**, 709, 1939.
 39. N. Feather and J. Dunworth, *Proc. Roy. Soc.*, **168**, 566, 1938.
 40. M. Dode et B. Pontecorvo, *C. R.*, **207**, 287, 1938.
 41. S. Barnes, *Phys. Rev.*, **56**, 414, 1939.
 42. G. Seaborg, J. Livingood and J. Kennedy, *Phys. Rev.*, **57**, 363, 1940.
 43. H. Götte, *Naturwiss.*, **28**, 449, 1940.
 44. M. Pool and L. Quill, *Phys. Rev.*, **53**, 437, 1938.
 45. Д. Алхазов, И. Гуревич, И. Курчатов и В. Рукавишников, *ДАН СССР*, **25**, 112, 1939; E. Amaldi, F. Rasetti, *Ric. Sci.*, **10**, 115, 1939.
 46. E. Mc Millan, M. Kamen and S. Ruben, *Phys. Rev.*, **52**, 375, 1937.
 47. B. Waldman and G. Collins, *Phys. Rev.*, **57**, 338, 1940.
 48. M. Feather and E. Bretscher, *Proc. Roy. Soc.*, **165**, 530, 1938.
-