

МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ЯДЕР

А. П. Гринберг, Ленинград

Существование явления ядерной изомерии впервые было с несомненностью установлено в начале 1937 г. для случая радиоброма¹⁾. Исследования в области искусственной радиоактивности в последующие годы дали много дальнейших примеров этого интересного явления, и к настоящему времени можно насчитать несколько десятков известных изомерных пар. Во всех этих случаях изомерия наблюдалась у нестабильных изотопов различных элементов, и поэтому на опыте она проявлялась прежде всего в том, что у данного изотопа оказывалось два периода β -распада. Один из них связан с распадом из основного состояния нестабильного изотопа, другой получается за счет разрядки возбужденного метастабильного состояния этого же изотопа, причем теория предсказывает два возможных способа, две схемы этой разрядки: она может происходить либо путем замедленного γ -перехода возбужденного состояния в основное, либо путем испускания β -частицы возбужденным ядром¹⁾.

Еще в самом начале исследований, касавшихся ядерной изомерии, Бете, а также Понтекорво указали на то обстоятельство, что метастабильные состояния, очевидно, могут встречаться не только у β -активных, но и у стабильных ядер. В последнем случае существование метастабильного уровня труднее обнаружить на опыте, так как его разрядка, вероятно, в большинстве случаев должна сопровождаться лишь мягким γ -излучением и мягким электронным излучением конверсионного происхождения (а также, соответственно, характеристическим рентгеновским излучением, сопровождающим конверсию). С другой стороны, отсутствие β -лучей и жестких γ -лучей являлось бы весьма благоприятным обстоятельством для экспериментатора, позволяя изучать метастабильное состояние в чистых условиях.

Нетрудно предвидеть возможные пути образования возбужденных ядерных состояний рассматриваемого типа. Можно утверждать, что такие состояния должны образовываться в результате тех же процессов, что и возбужденные состояния обычного типа (у которых

¹⁾ Обзор работ по ядерной изомерии см. Н. Дмитриев, Ядерная изомерия, Успехи физич. наук, **19**, 355, 1938; **21**, 60, 1939.

разрядка возбуждения путем γ -испускания происходит за время порядка 10^{-13} сек.). Это утверждение вытекает уже из того обстоятельства, что, прежде чем получить метастабильное возбужденное состояние, необходимо сначала создать обычное возбужденное состояние ядра. Действительно, поскольку переход с метастабильного уровня на основной, по определению, сильно запрещен, постольку и переходы ядра из основного состояния непосредственно в метастабильное очень маловероятны; таким образом, ядро должно быть возбуждено до некоторого более высокого „активационного“ уровня, разрядка которого может частично приводить к образованию метастабильного состояния.

Методы получения возбужденных состояний ядра хорошо известны. Энергия возбуждения может быть сообщена ядру: γ -квантами, протонами, дейтронами, нейтронами, α -частицами и, наконец, электронами; кроме того, возбужденное состояние ядра может образоваться после β -распада соседнего ядра. Несколько забегая вперед, можно отметить, что все эти методы действительно оказались пригодными и для создания изомерных состояний стабильных ядер.

Всего до настоящего времени открыто существование метастабильного состояния у следующих девяти стабильных ядер:

Kr^{83} , Sr^{87} , Ma , Ag , Cd , In^{113} , In^{115} , Gd и Pb .

Первую попытку доказать существование изомерного состояния стабильного ядра сделали Боте и Майер-Лейбниц², которые предположили наличие метастабильного уровня ядра Cl^{35} для объяснения энергетических особенностей реакции $\text{B}^{10}(\alpha, p)\text{Cl}^{35}$; их эксперименты не дали, однако, решающего подтверждения этой точки зрения.

Впервые наличие такого состояния было установлено у In^{115} в результате исследований, проведенных Голдгабэром, Хиллом и Сидлардом³. Оказалось, что активность индия с периодом около четырех часов, приписывавшаяся ранее изотопам In^{112} и $\text{In}^{114(1)}$, должна быть приписана In^{115*} — метастабильному состоянию устойчивого изотопа In^{115} .

Авторы получили активность In (4,1 часа) при облучении индия быстрыми нейтронами от источника $\text{Rn-}\alpha + \text{Be}$, а также от источника $\text{Rn-}\alpha + \text{B}$, спектр которого не содержит столь жестких нейтронов, как спектр первого. Эта же активность In (4,1 часа) была ими получена при облучении индия нейтронами от источника $d + d$, энергия которых не превышает $\sim 2,5$ MeV.

Далее, было показано, что бомбардировка индия от очень сильного источника $\text{Ra-}\gamma + \text{Be}$ фотонейтронами, обладающими энергией в несколько сотен KeV, не приводит к образованию четырехчасового периода индия, хотя интенсивность других периодов, например, In (54 мин.), получается значительной. Таким образом, реакция образования активности In (4,1 часа) имеет энергетический порог, ниже которого она не протекает, причем этот порог лежит между 200—

¹⁾ Принадлежность ее изотопу индия была установлена химическим методом.

300 KeV и 2,5 MeV. Это показывает, что активность In (4,1 часа) не образуется из устойчивых изотопов индия (In^{113} и In^{115}) по реакции ($n, 2n$), так как такую реакцию могут дать лишь нейтроны с энергией около 8 MeV; следовательно, эта активность не связана с изотопом In^{112} или In^{114} . Носителем этой активности не может быть также изотоп In^{116} , так как предположение об образовании последнего из In^{115} , в результате захвата быстрого нейтрона, не согласуется с тем фактом, что фотонейтроны не возбуждают этой активности. По этой же причине исключается и предположение о том, что эта активность принадлежит изотопу In^{114} , образовавшемуся из малораспространенного In^{113} по реакции (n, γ); кроме того, в этом случае пришлось бы приписать изотопу In^{113} ненормально большое сечение захвата для быстрых нейтронов по сравнению с соседними элементами.

Для объяснения всех полученных результатов Голдгабер предположил, что активность In (4,1 часа) образуется в результате реакции $\text{In}^{115} (n, n) \text{In}^{115*}$, т. е. что она принадлежит изомеру стабильного ядра In^{115} . По Голдгаберу не всякое столкновение нейтрона с ядром индия приводит к образованию нестабильного изотопа этого элемента; часть нейтронов испытывает неупругие столкновения с ядрами индия, в результате чего образуется возбужденное состояние стабильного ядра, и часть таких ядер, теряя некоторую долю энергии возбуждения, попадает в метастабильное состояние.

Предположенное Голдгабером существование изомера In^{115*} с периодом полураспада $T=4,1$ часа полностью подтверждается дальнейшими экспериментальными данными. С точки зрения его гипотезы можно, как уже указывалось, ожидать получения активности In (4,1 часа) при помощи других возможных методов возбуждения ядра. Действительно, было найдено³, что эта активность индия образуется и в результате β -распада радиоактивного Cd^{115} , полученного по реакциям $\text{Cd}^{116} (n, 2n)$ и $\text{Cd}^{114} (n, \gamma)$. Этот изотоп кадмия, распадаясь с периодом $T=2,5$ дня и испуская β -частицы, превращается в новое радиоактивное ядро с периодом $T=4,1$ часа, очевидно, в In^{115*} и, может быть, частично также в стабильный In^{115} . Было показано химическим методом, что носителем последней активности в этом цепном распаде является изотоп индия.

Изомер In^{115*} был затем получен при помощи бомбардировки индия протонами с энергией 6,7 MeV⁴. И в этом случае принадлежность полученной активности с периодом $T=4,1$ часа изотопу индия была подтверждена химическим методом. Здесь, таким образом, также констатируется реакция нового типа: $\text{In}^{115} (p, p) \text{In}^{115*}$, в результате которой образуется радиоактивный изотоп облучаемого элемента, — чего не могло быть в известных ранее реакциях с протонами. Авторы поставили остроумный контрольный опыт, чтобы убедиться в том, что активность In (4,1 часа) возникает под действием протонов, а не рассеянных нейтронов, сильным источником которых является камера циклотрона, когда в ней создаются быстрые протоны. Для этой цели в вакуумном приемнике циклотрона экспонировались два листка индиевой фольги, разделенные листком свин-

цовой фольги. На передний, обращенный к пучку листок индиевой фольги падали протоны и рассеянные нейтроны; на второй листок падали нейтроны в том же количестве, но не попадали протоны. Активность In (4,1 часа) была обнаружена после облучения только в переднем листке индиевой фольги.

Величина сечения для реакции возбуждения изотопа In^{115} протонами, которая ведет к образованию In^{115*} , оценивается цифрой $\sigma \approx 10^{-29} \text{ см}^2$ для протонов с энергией 5,8 MeV. Это сечение значительно меньше, чем сечения процессов (p, n) в этой области периодической системы. Например, для реакций $\text{Cd}(p, n)\text{In}$ и $\text{Sn}(p, n)\text{Sb}$ сечение $\sigma \approx 10^{-26} \text{ см}^2$.

Далее следует отметить интересные опыты Понтекорво и Лазара⁵, которые получили возбуждение ядер индия при помощи жестких рентгеновских лучей с непрерывным спектром. Эти лучи возбуждались электронами, ускоренными в импульсном генераторе с пиковым напряжением в 1,85 MV. Облученный индий дал активность с периодом $3,9 \pm 0,5$ часа, т. е. здесь образуется In^{115*} .

Аналогичные результаты были получены другими исследователями, использовавшими для ускорения электронов электростатический генератор с постоянным напряжением в 1,73 MV⁶. Ими был определен также порог реакции $\text{In}^{115}(\gamma, \gamma)$; он соответствует напряжению на трубке $1,35 \pm 0,1$ MV. Из сделанных выше замечаний ясно, что эта величина характеризует энергию активационного уровня ядра In^{115} , но не энергию его метастабильного уровня.

Измерив активность In (4,1 часа) в функции от энергии электронов, возбуждавших использованные для получения этой активности рентгеновские лучи, Вальдман и др.⁷ приходят к выводу, что у In^{115} существуют два активационных уровня, с энергиями $1,2 \pm 0,1$ MeV и $1,55 \pm 0,1$ MeV. Величина сечения для процесса $\text{In}^{115}(\gamma, \gamma)$ не может быть точно указана, пока нет определенных данных о том, какие именно рентгеновские кванты являются эффективными в этом процессе. Во всяком случае необходимо подчеркнуть, что этот эффект является весьма тонким и трудно наблюдаемым. Достаточно указать, что после облучения индия в течение 30 мин. при энергии электронов 1,73 MeV и токе 10 μA была получена начальная интенсивность на счетчике Гейгера-Мюллера — 45 импульсов в 1 мин. Зато, с другой стороны, использование рентгеновских лучей для создания изомерных состояний стабильных ядер является наиболее благоприятным методом в смысле чистоты условий наблюдения такого изомера, так как энергия рентгеновских квантов, способных возбудить ядро, еще недостаточна для его расщепления, так что никакие явления искусственной радиоактивности не усложняют исследования.

Изомер In^{115*} получен и при бомбардировке индия α -частицами с энергией 16 MeV⁸. Следует заметить, что попытка получения этой активности с помощью α -частиц с энергией 8,5 MeV дала отрицательный результат⁴.

Недавно было показано, что порог реакции $\text{In}^{115}(\alpha, \alpha)\text{In}^{115*}$ лежит около 11 MeV^{8b}. Сечение этой реакции при $E_\alpha = 16$ MeV — порядка $3 \cdot 10^{-28} \text{ см}^2$.

Наконец, бомбардировка индия электронами с энергией 1,3 MeV также приводит к образованию In^{115*9} . Рядом контрольных опытов показано, что при этом лишь часть образующейся активности обусловлена действием рентгеновских лучей (возникающих в самой мишени при торможении в ней быстрых электронов), тогда как большая часть ядер In^{115*} образуется в результате возбуждения ядер индия электронами. Сечение этого процесса оценивается цифрами $\sigma \approx 10^{-32} - 10^{-33} \text{ см}^2$.

Большой интерес для понимания природы ядерной изомерии представляет излучение, испускаемое In^{115*} . Предварительные данные о составе излучения этого изотопа^{10a} говорят о том, что In^{115*} испускает γ -лучи, состоящие из жесткой компоненты $E_\gamma = 320 \pm 50 \text{ KeV}$ и мягкой компоненты (вероятно, K -излучение индия), а также электроны с $E_m = 550 \pm 50 \text{ KeV}$. Последняя цифра, полученная из кривой поглощения электронов в Al, вероятно ошибочна, так как проведенные впоследствии измерения с помощью магнитного спектрографа^{10b} показали, что электронное излучение In^{115*} состоит из двух отдельных групп с энергиями ~ 308 и 332 KeV , что соответствует электронам внутренней конверсии с K - и L -оболочек атома индия при $E_\gamma = 336 \pm 1 \text{ KeV}$. Интенсивность γ -лучей сравнительно мала, так что коэффициент внутренней конверсии здесь, повидимому, очень высок. Найдено также, что нет указаний на наличие непрерывного β -спектра, связанного с активностью In (4,1 часа). Таким образом, предположение о том, что In^{115*} частично распадается путем β -испускания, превращаясь в свой стабильный изобар Sn^{115} , не подтверждается.

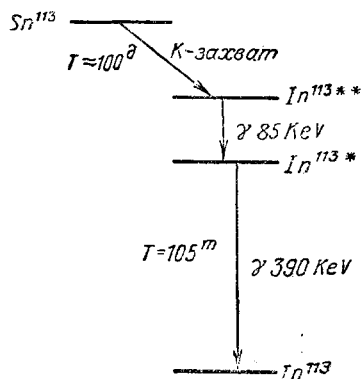
Второй из двух стабильных изотопов индия — In^{113} , как оказалось, также может быть приведен в возбужденное метастабильное состояние¹¹. При облучении индия протонами с энергией 7,2 MeV наблюдаются две активности: одна соответствует In^{115*} (4,1 часа), другая — Sn^{113} (~ 100 дней). Радиоактивное олово распадается, испуская рентгеновские K_α -лучи индия (идентификация их произведена с помощью дифференциальных фильтров) и две слабые группы мягких электронов, соответствующие K - и L -конверсии γ -лучей с энергией 85 KeV. После распада этого изотопа олова получается снова активное вещество с периодом $T = 105 \pm 10 \text{ мин.}$, испускающее γ -лучи с энергией 390 KeV и мягкие электроны в виде двух групп, соответствующих K - и L -конверсии этих γ -лучей в атоме индия. Это вещество было также получено как в осадке индия, отделенном химическим путем от старого активированного образца олова, так и при бомбардировке протонами кадмия.

Вся совокупность экспериментальных данных интерпретируется следующим образом. Sn^{113} захватывает K -электрон (при этом испускаются K_α -лучи индия) и превращается в In^{113} в возбужденном состоянии; последнее переходит в метастабильное состояние In^{113*} путем испускания γ -лучей с энергией $E_\gamma = 85 \text{ KeV}$; это метастабильное состояние разряжается с периодом $T = 105 \text{ мин.}$, превращаясь в In^{113} , причем испускаются γ -лучи с энергией $E_\gamma = 390 \text{ KeV}$ и соответствующие группы конверсионных электронов. Коэффициент

внутренней конверсии для этих γ -лучей оценивается величиной $\alpha = 70 \pm 10\%$. Сечение реакции $\text{In}^{113} (p, n) \text{Sn}^{113} \rightarrow \text{In}^{113*}$ равно примерно $2 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$.

Ниже приводим предполагаемую схему превращений.

Изотопия рассматриваемого типа предполагается также у мазурия¹². При облучении молибдена ($Z=42$) дейтронами или медленными нейтронами получается β -активный изотоп молибдена с периодом в 67 час., после распада которого получается опять активное вещество — очевидно, изотоп мазурия ($Z=43$) (это было подтверждено и химическим путем). Оказалось, что этот изотоп Ма, распадающийся с периодом в 6,6 часа, испускает сравнительно медленные электроны. Спектр электронов, снятый при помощи магнитного спектрографа, оказался состоящим из двух линий с энергиями в 116 и 133 KeV, что соответствует конверсии γ -лучей с энергией $E_\gamma = 136 \text{ KeV}$ на K - и L -оболочках атома Ma_{43} . Кроме того, с тем же периодом 6,6 часа испускаются γ -лучи (энергия которых была приблизительно измерена и результат можно считать совпадающим с цифрой 136 KeV), а также рентгеновские лучи, идентификация которых по методу дифференциальных фильтров и при помощи спектрографа с изогнутым кристаллом показала, что это — K_α -лучи мазурия. Все эти факты интерпретируются следующим образом. Исходный активный изотоп молибдена, испуская β -частицы, превращается частично в стабильные ядра мазурия, частично — в ядра мазурия в возбужденном метастабильном состоянии,



с избытком энергии в 136 KeV. Эта энергия затем испускается в виде γ -излучения, испытывающего в значительной степени внутреннюю конверсию (оценка коэффициента внутренней конверсии дала цифру порядка 50%).

Возможно, однако, что случай мазурия является примером изомерии обычного типа, так как не исключена возможность, что ядра мазурия, находящиеся в основном состоянии, не стабильны, а распадаются с очень большим периодом или с испусканием крайне мягких электронов¹².

Далее можно отметить случай радиокадмия с периодом 50 мин., получающегося при облучении кадмия быстрыми нейтронами¹³. Он дает мягкое электронное излучение. Химически показана принадлежность этой активности изотопу кадмия, но она не может быть результатом ни реакции (n, γ) , — так как отсутствует парафиновый эффект, — ни реакции $(n, 2n)$, так как активность слишком велика; кроме того, период ее не совпадает с известными периодами радиокадмия, полученного по этим реакциям. Таким образом, приходится

приписать наблюдаемую активность конверсионным переходам метастабильного возбужденного состояния ядра кадмия в основное состояние. Сечения реакций возбуждения ядра без захвата быстрого нейтрона, т. е. реакций (n, n) , в особенности для тяжелых элементов, имеют довольно высокое значение ($\sigma \approx 10^{-24}$ см²); повидимому, часть возбуждаемых таким путем ядер кадмия при разрядке попадает в метастабильное состояние.

Мягкое электронное излучение кадмия наблюдалось также рядом других исследователей¹⁴.

Кроме указанной выше активности с периодом 50 мин. у кадмия найдена еще аналогичная активность с большим периодом¹⁵. В результате облучения серебра протонами получается активный изотоп кадмия с периодом 6,7 часа, излучение которого состоит, главным образом, из мягких электронов с $E \approx 90$ KeV и из рентгеновских лучей.

Дальнейшее изучение этого радиокадмия показало, однако, что мягкое электронное излучение, а также значительная часть рентгеновского, принадлежит не кадмию, а продукту его распада — изотопу серебра, который образуется из Cd (6,7 часа) в результате K -захвата и затем распадается с периодом 40 сек.¹⁶. Таким образом, один из двух стабильных изотопов серебра — Ag^{107} или Ag^{109} — существует в изомерной форме.

Наблюдения, аналогичные случаю Cd (50 мин.), сделаны для гадолиния, у которого найдено мягкое электронное излучение при бомбардировке его медленными нейтронами¹⁷. Предполагается, что сильно поглощающий медленные нейтроны изотоп гадолиния, не дающий при этом искусственной радиоактивности, обладает метастабильным состоянием, которое разряжается путем внутренней конверсии. Показано, что время жизни этого состояния меньше, чем 10^{-3} сек.¹⁸.

Сравнительно недавно получены данные, свидетельствующие о том, что имеется изотоп Sr^{87*} ¹⁹.

При облучении стронция дейтронами или протонами получается наряду с другими активностью с периодом $T = 2,7 \pm 0,2$ часа, носителем которой является изотоп стронция. В указанных реакциях $\text{Sr} + d$ и $\text{Sr} + p$ получается радиоактивный иттрий, Y^{87} (85 час.). В результате K -захвата он превращается в Sr^{87*} , переходящий затем в Sr^{87} с испусканием γ -лучей, с энергией в 370 KeV, а также конверсионных K - и L -электронов соответствующей энергии. Коэффициент внутренней конверсии этих γ -лучей приблизительно равен 15%.

Изотоп Sr (2,7 часа) испускает также рентгеновские лучи, повидимому, $\text{Sr} K_{\alpha}$; указания на это получены методом дифференциальных фильтров.

Известны и другие пути возбуждения ядра Sr^{87} . Та же активность с периодом в 2,7 часа получается в реакциях $\text{Rb}^{87} (p, n)^1$ и $\text{Sr}^{87} (n, n)$.

¹⁾ Авторы отмечают, что при распаде естественно радиоактивного Rb^{87} метастабильный Sr^{87*} , повидимому, не образуется.

Приписание периода Sr (2,7 часа) изомерному Sr^{87*} окончательно подтверждено при помощи облучения нейтронами чистого изотопа Sr^{87} , добытого из канадской слюды^{19b}. Одновременно показано, что изомерный стронций образуется и в реакции $\text{Sr}^{86} (n, \gamma) \text{Sr}^{87*}$, и сечение для этой реакции не меньше, чем для реакции $\text{Sr}^{87} (n, n) \text{Sr}^{87*}$. Наконец, в самое последнее время найдены изомеры Kr^{83*} и Pb^* .

Метастабильное состояние криптона получается в результате β -распада радиоброма Br^{83} , который в свою очередь является продуктом β -распада селена²⁰. Se^{83} образуется при облучении селена дейтронами и медленными нейтронами. Кроме того, Br^{83} и, следовательно, Kr^{83*} появляются в радиоактивных продуктах деления урана и тория при облучении последних нейтронами. Вероятно, и в этих случаях начальным звеном цепочки последовательных β -распадов является Se^{83} , но экспериментально это еще не установлено.

Kr^{83*} распадается с периодом в 113 мин., испуская крайне мягкие конверсионные электроны с энергией $\sim 35 \text{ KeV}$, чему соответствует $E_\gamma = 49 \text{ KeV}$; обнаружены также характеристические рентгеновские лучи криптона, испускаемые этим изомером.

Метастабильное состояние свинца получено при помощи возбуждения ядер свинца жесткими рентгеновскими лучами, для получения которых использованы электроны с энергией $1,5 \text{ MeV}$ ²¹. Облученный свинец дает активность с периодом $1,6 \pm 0,2$ мин., причем излучение его состоит, повидимому, главным образом, из электронов внутренней конверсии с энергией $\sim 200 \text{ KeV}$.

Минимальная энергия электронов, при которой получающиеся рентгеновские лучи еще способны возбудить эту активность, равна $0,65 \pm 0,02 \text{ MeV}$; такова, следовательно, энергия низшего активационного уровня ядра данного изотопа свинца.

Все указанные экспериментальные данные ниже сведены в таблицу (период полураспада для In^{115}_{49} вместо величины T 4,1 часа указан в соответствии с последними данными^{23,24}).

Эта сводка экспериментальных данных позволяет считать, что в настоящее время с достоверностью установлено существование метастабильных возбужденных уровней стабильных ядер. Нет сомнения в том, что, как это было и при изучении изомерии обычного типа, это явление окажется весьма распространенным среди элементов периодической системы, и будут найдены многие новые его образцы.

Для всех известных пока случаев такой изомерии характерны следующие общие черты.

1. Метастабильное состояние может быть получено либо 1) непосредственно путем возбуждения стабильного ядра до некоторого активационного уровня — при помощи процессов неупругого рассеяния активирующих частиц или через воздействие их электрических полей на ядра [реакции типа (n, n) , (p, p) и т. д.], либо 2) в результате ядерной реакции [примеры: реакции $\text{Rb}^{87} (p, n) \text{Sr}^{87*}$, $\text{Cd}^{112} (d, n) \text{In}^{113*}$, $\text{Gd} (n, \gamma) \text{Gd}^*$], либо, наконец, 3) в результате радиоактивного распада материнского вещества.

Ядро	Период полураспада	Энергия воз- буждения, KeV	Коэффициент внутренней конверсии, α/β	Реакции образования	Ссылка на литератур- ный источ- ник
Kr_{36}^{83}	113 мин.	49		$\text{Se}^{82} (d, p) \text{Se}^{83} \rightarrow \text{Br}^{83} \rightarrow \text{Kr}^{83}$ $\text{Se}^{82} (n, \gamma) \text{Se}^{83} \rightarrow \text{Br}^{83} \rightarrow \text{Kr}^{83}$ $(\text{U} + n) \rightarrow (\text{Se}^{83} ?) \rightarrow \text{Br}^{83} \rightarrow \dots$ $(\text{Th} + n) \rightarrow (\text{Se}^{83} ?) \rightarrow \text{Br}^{83} \rightarrow \dots$	20
Sr_{38}^{87}	2,7 часа	370	~ 15	$\text{Sr}^{86} (d, n) \text{Y}^{87} \rightarrow \text{Sr}^{87*}$ $\text{Sr}^{87} (p, n) \text{Y}^{87} \rightarrow \text{Sr}^{87*}$ $\text{Rb}^{87} (p, n) \text{Sr}^{87*}$ $\text{Sr}^{87} (n, n) \text{Sr}^{87*}$ $\text{Sr}^{86} (n, \gamma) \text{Sr}^{87*}$ $\text{Sr}^{86} (d, p) \text{Sr}^{87*} (?)$	19, a 19, b 19, c
$\text{Ma}_{43}^{(99,101)}$	6,6 часа	136	~ 50	$\text{Mo} (d, p) \text{Mo} \rightarrow \text{Ma}^*$ $\text{Mo} (n, \gamma) \text{Mo} \rightarrow \text{Ma}^*$	12
$\text{Ag}_{47}^{(107,109)}$	40 сек.	~ 93	98	$\text{Ag} (p, n) \text{Cd} \rightarrow \text{Ag}^*$ $\text{Ag} (d, 2n) \text{Cd} \rightarrow \text{Ag}^*$ $\text{Ag} (n, n) \text{Ag}^*$	15 16, a 16, b, c
Cd_{48}	50 мин.			$\text{Cd} (n, n) \text{Cd}^*$	13
In_{49}^{113}	105 мин.	390	70	$\text{In}^{113} (p, n) \text{Sn}^{113} \rightarrow \text{In}^{113*}$ $\text{Cd}^{113} (p, n) \text{In}^{113*}$ $\text{Sn}^{112} (d, p) \text{Sn}^{113} \rightarrow \text{In}^{113*}$ $\text{Cd}^{110} (\alpha, n) \text{Sn}^{113} \rightarrow \text{In}^{113*}$ $\text{Cd}^{112} (d, n) \text{In}^{113*}$ $\text{In}^{113} (d, d) \text{In}^{113*}$ или	11 11 11, 22 22 23, 24
In^{115}	4,5 часа	336	> 50	$\text{In}^{115} (n, n) \text{In}^{115*}$ $\text{In}^{115} (p, p) \text{In}^{115*}$ $\text{In}^{115} (d, d) \text{In}^{115*}$ $\text{In}^{115} (\gamma, \gamma) \text{In}^{115*}$ $\text{In}^{115} (\alpha, \alpha) \text{In}^{115*}$ $\text{In}^{115} (e, \gamma) \text{In}^{115*}$ $\text{Cd}^{116} (n, 2n) \text{Cd}^{115} \rightarrow \text{In}^{115*}$ $\text{Cd}^{114} (n, \gamma) \text{Cd}^{115} \rightarrow \text{In}^{115*}$ $\text{Cd}^{114} (d, p) \text{Cd}^{115} \rightarrow \text{In}^{115*}$	3, 25 4 25 5, 6, 7 8 9 3 3 23
Gd_{64}	$< 10^{-3}$ с.	~ 100		$\text{Gd} (n, \gamma) \text{Gd}^*$	17, 18
Pb_{82}	1,6 мин.	~ 200		$\text{Pb} (\gamma, \gamma) \text{Pb}^*$	21

2. Процесс разрядки возбуждения метастабильного состояния вполне аналогичен случаям изомерии обычного типа: излишек энергии уносится γ -лучами и конверсионными электронами, причем коэффициент внутренней конверсии достигает высоких значений, в качественном соответствии с выводами теории конверсии мультипольного излучения.

Необходимо подчеркнуть, что хотя β -испускание, как способ разрядки возбуждения метастабильного состояния, теоретически является столь же вероятным, как и испускание γ -лучей¹, до сих пор нельзя указать ни одного достоверно установленного случая, где имело бы место испускание β -частиц возбужденным метастабильным ядром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bethe, Rev. Mod. Phys., **9**, 225, 1937; Гринберг, ЖЭТФ, **10**, 380, 1940.
2. Bothe u. Maier-Leibnitz, Z. Physik, **107**, 513, 1937.
3. Goldhaber, Hill and Szilard, Phys. Rev., **55**, 47, 1939.
4. Barnes and Aradine, Phys. Rev., **55**, 50, 1939.
5. Pontecorvo et Lazard, C. R., **208**, 99, 1939.
6. Collins, Waldman, Stubblefield, Goldhaber, Phys. Rev., **55**, 507, 1939.
7. Waldman, Collins, Stubblefield, Phys. Rev., **55**, 1129, 1939.
8. Lark-Horovitz, Risser, Smith, a) Phys. Rev., **55**, 878, 1939; b) Phys. Rev., **57**, 355, 1940.
9. Collins and Waldman, Bull. Am. Phys. Soc., **15**, 41, 1940.
10. a) Обзор, Nature, **142**, 520, 1938; b) Lawson, Phys. Rev., **56**, 131, 1939.
11. Barnes, Phys. Rev., **56**, 414, 1939.
12. Seaborg and Segré, Phys. Rev., **55**, 808, 1939.
13. Dode et Pontecorvo, C. R., **207**, 287, 1938.
14. Hoffman and Bacher, Phys. Rev., **54**, 644, 1938.
15. a) Delsasso, Ridenour, Sherr, White, Phys. Rev., **55**, 113, 1939; b) Valley and McCreary, Phys. Rev., **56**, 863, 1939.
16. a) Alvarez, Helmholtz, Nelson, Phys. Rev., **57**, 660, 1940; b) Bjerger and Westcott, Nature, **134**, 177, 1934; c) Gueben, Nature, **138**, 1095, 1936.
17. Алхазов, Гуревич, Курчатов, Рукавишников, ДАН СССР, **25**, 112, 1939.
18. Amaldi, Rasetti, Ric. Sci., **10**, 115, 1939.
19. a) Du Bridge and Marshall, Phys. Rev., **56**, 706, 1939; **57**, 348, 1940; b) Reddemann, Naturwiss., **28**, 110, 1940; c) Stewart, Lawson and Cork, Phys. Rev., **52**, 901, 1937.
20. Langsdorf and Segré, Phys. Rev., **57**, 105, 1940.
21. Waldman and Collins, Phys. Rev., **57**, 338, 1940.
22. Livingood and Seaborg, Phys. Rev., **55**, 667, 1939.
23. Cork and Lawson, Phys. Rev., **56**, 291, 1939.
24. Lawson and Cork, Phys. Rev., **57**, 356, 1940.
25. Lawson and Cork, Phys. Rev., **52**, 531, 1937.