

ЯДЕРНАЯ ИЗОМЕРИЯ

Н. Дмитриев, Ленинград

Изомерами называются ядра, имеющие одинаковый атомный вес и одинаковый заряд, но различные физические свойства. Согласно современным представлениям ядра атомов состоят из нейтронов и протонов. Поэтому изомеры можно определить как ядра, состоящие из одинакового числа нейтронов и протонов, но отличающиеся друг от друга различным распределением связей между этими нейтронами и протонами.

Понятие об изомерии, как известно, возникло в химии. В химии, главным образом органической, мы часто встречаемся с изомерами, но там изомерия — молекулярная в отличие от ядерной. Изомерными молекулами в химии называются такие, которые состоят из одних и тех же атомов, но отличаются друг от друга различным распределением связей между атомами; это последнее различие ведет к различию в физических и химических свойствах молекул. В настоящее время физики располагают экспериментальным методом, позволяющим отличать изомеры одного и того же изотопа друг от друга только в том случае, когда изомеры являются радиоактивными ядрами. Это, однако, не доказывает, что не существует изомеров у устойчивых ядер. Как мы увидим дальше, современная теория ядра допускает возможность существования изомеров у таких ядер. Тот факт, что до сих пор на опыте они не были обнаружены, указывает, повидимому, на то, что нужен какой-то новый экспериментальный метод для их обнаружения. Возможно, что в этом отношении мы находимся приблизительно в том же положении, в каком лет 25—30 назад находились физики по отношению к изотопам, когда о последних ничего не было известно, пока создание Астоном масспектрографа не дало возможности обнаружить изотопы на опыте.

Что касается изомеров радиоактивных элементов, то они в настоящее время легко могут быть обнаружены благодаря тому, что обладают различными периодами полураспада. В некоторых случаях и сорт частиц, испускаемых при распаде изомеров одного и того же изотопа, может быть различным. Так например, было обнаружено, что у серебра один радиоактивный изомер испускает электроны, а другой — позитроны. Радиоактивные изомеры в боль-

шинстве своем проявляются в явлениях искусственной радиоактивности в результате бомбардировки элементов какими-либо ядерными частицами: нейтронами, протонами, дейтронами и т. д. Однако один пример ядерной изомерии известен и из области естественной радиоактивности (UX_2 и UZ — см. ниже).

Явление изомерии в области искусственной радиоактивности впервые было обнаружено благодаря работе по искусственной радиоактивности брома, проделанной в Радиевом институте Академии наук СССР¹. До этой работы Амальди и другие² обнаружили у брома после облучения его нейтронами два радиоактивных периода: 18 мин. и 4,2 часа. Оба эти периода сопровождалась испусканием электронов. Химическим путем было установлено, что активными являются атомы брома. Так как бром имеет два устойчивых изотопа: Br_{35}^{79} и Br_{35}^{81} , то два наблюдаемых периода у брома были приписаны радиоактивным изотопам Br_{35}^{80} и Br_{35}^{82} . Эти радиоактивные изотопы образуются в результате реакции простого захвата



В результате электронного распада Br^{80} и Br^{82} образуются устойчивые изотопы криптона



Таким образом число радиоактивных периодов брома было равно числу устойчивых изотопов, и казалось бы, что нет никакого основания ожидать наличия еще каких-нибудь периодов у радиоброма, потому что у таких тяжелых элементов, как бром, обычной являлась только реакция захвата.

Поэтому в работе, проделанной в Радиевом институте Академии наук СССР Б. В. Курчатовым, И. В. Курчатовым, Л. В. Мысовским и Л. И. Русиновым, исходя из приведенных выше соображений, отнюдь не ставилась задача поисков новых периодов у брома. Совершенно неожиданно в этой работе у радиоброма был обнаружен третий период. Обнаружен он был случайно во время изучения γ -лучей, сопровождавших известные два периода брома. Производя в Радиевом институте наблюдение интенсивности этих γ -лучей по комптоновским электронам в камере Вильсона, один из участников этой работы, Л. В. Мысовский, заметил, что старый препарат, после получения которого прошло более суток, давал γ -лучи весьма большой интенсивности. Когда был получен новый препарат радиоброма, была измерена тем же путем интенсивность γ -лучей от нового препарата. При сравнении оказалось, что старый препарат давал лучи почти такой же интенсивности, что и новый. Это можно было объяснить только тем, что большая

часть γ -излучения обязана своим появлением не известным уже периодам в 18 мин. и 4,2 часа, а новому, более длинному периоду. С целью проверки этого предположения было решено произвести изучение старого препарата на счетчике Гейгера-Мюллера: обычно такие старые препараты выбрасывались в предположении их негодности. Проверка на счетчике и сравнение активности старого препарата с активностью нового показала, что у брома действительно существует длинный период, равный 36 час. Впоследствии этот период был наблюден целым рядом исследователей: А. И. Алихановым и его сотрудниками, С. З. Рогинским, Джонсоном и Хемблином, Флейшманном, Снеллом и другими. Факт обнаружения третьего периода у брома вызвал чрезвычайно большой интерес у физиков, работавших в области атомного ядра. Этот факт был настолько неожиданный, что некоторые исследователи сначала даже не поверили в существование 36-часового периода, пока сами на опыте не получили этот период. Таким образом существование 36-часового периода у брома в настоящее время не подлежит никакому сомнению.

Энергия γ -лучей 36-часового периода была измерена по поглощению их в свинце и железе, а также по энергии комптоновских электронов (в камере Вильсона с магнитным полем). γ -лучи оказались довольно мягкими, их энергия равна $0,65 \text{ MeV}^1$. В работе Л. В. Мысовского, И. В. Курчатова, Р. А. Эйхельбергера и Г. Д. Латышева³ был подробно изучен β -спектр 36-часового периода радиоброма. Измерение производилось по отклонению электронов в камере Вильсона с магнитным полем. На основании данных этой работы граница β -спектра 36-часового периода оказалась равной $820 - 890 \text{ kV}$, что находится в хорошем согласии с величиной, которая была получена Алихановым, Алиханьяном и Джелеповым с помощью счетчиков.

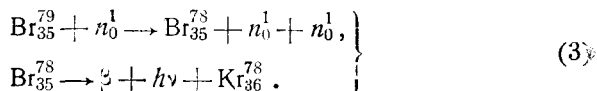
Для объяснения существования третьего периода у брома были возможны три различные гипотезы:

1. Существует третий, неизвестный до сих пор, устойчивый изотоп брома. Из этого изотопа по обычной реакции простого захвата образуется новый радиоактивный изотоп брома с периодом 36 час.

2. Новый радиоактивный изотоп с периодом 36 час. образовался из одного из уже известных двух устойчивых изотопов брома, но не по реакции захвата, а по реакции какого-либо другого типа.

Наконец, третья и последняя гипотеза состоит в том, что новый 36-часовой период принадлежит одному из уже известных радиоактивных изотопов брома, т. е. Br^{80} или Br^{82} . Иначе говоря, согласно этой гипотезе получалось, что один из этих радиоактивных изотопов обладает двумя различными периодами полураспада, т. е. что он существует в двух изомерных формах. До тех пор в явлениях искусственной радиоактивности ядерные изомеры не были известны.

Ввиду того что не было также никаких данных о существовании третьего устойчивого изотопа у брома, первоначально была принята вторая гипотеза. Было предположено, что при ударе нейтрона о ядро брома нейтрон выбивает из ядра другой нейтрон, и при этом сам не остается в ядре. Из двух известных устойчивых изотопов брома эту реакцию мог дать только Br^{79} , так как из Br^{81} по такой реакции получился бы известный радиоактивный изотоп Br^{80} . Реакция может быть написана так:



Если произвести расчет энергетического баланса этой реакции, то оказывается, что ее могут вызывать только быстрые нейтроны, энергия которых больше чем 6,5 MeV.

Однако в дальнейшем различными экспериментаторами было установлено, что активность всех трех радиоактивных периодов брома (18 мин., 4,2 часа и 36 час.) усиливается, если замедлять нейтроны. Единственной известной в настоящее время реакцией, выход которой усиливается при замедлении нейтронов, является реакция простого захвата нейтрона ядром. Поэтому на основании экспериментальных данных об обогащении реакции медленными нейтронами был сделан вывод, что все три радиоактивных периода

брома образуются в результате реакции простого захвата. Таким образом вторая из указанных выше гипотез не могла быть принята.

Для того чтобы сделать выбор между первой и третьей гипотезами, Блеветт⁴ произвел тщательное масспектографическое изучение изотопического состава брома. В результате его работы оказалось, что не существует в заметном количестве третьего устойчивого изотопа брома, а известные уже изотопы Br^{79} и Br^{81} содержатся в одинаковом количестве. В табл. 1 приведены результаты работы Блеветта.

Наиболее вероятно было бы ожидать существование у брома изотопов с массой 77 и 83. Однако, как видно из табл. 1, если эти изотопы и существуют, то в количествах, меньших чем 3000. Чтобы объяснить величину наблюдавшейся активности образованием из этих изотопов нового радиоактивного изотопа брома,

ТАБЛИЦА 1

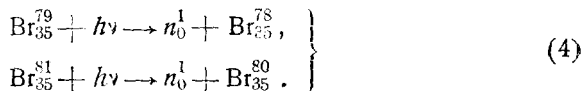
Масса изотопа брома	Изотоп брома существует в количестве меньшем чем 1 часть в
73	24 000
74	12 000
75	8 000
76	6 000
77	3 000
78	400
80	2 000
82	400
83	3 000
84	8 000
85	8 000
86	12 000
87	24 000

пришлось бы предположить невероятно большие эффективные сечения реакции, настолько большие, что они являются совершенно неприемлемыми. Таким образом на основании результатов работы Блеветта мы должны отказаться от первой гипотезы о происхождении 36-часового периода.

Следовательно, остается только одна возможность для объяснения существования 36-часового периода. Она изложена в третьей гипотезе и состоит в том, что один из двух радиоактивных изотопов брома — Br^{80} или Br^{82} — может распадаться с двумя различными периодами, т. е. этот изотоп существует в виде двух изомеров. Таким образом твердо установленный на опыте факт существования 36-часового периода у брома привел нас к необходимости предположения о существовании изомеров.

Если сравнить результаты опытов Боте и Гентнера⁵ по фотоэлектрическому расщеплению брома γ -лучами с результатами, получающимися при действии медленных нейтронов на бром, то можно совершенно точно установить, который из двух изотопов радиоброма — Br^{80} или Br^{82} — обладает изомерами.

При бомбардировке лития протонами возникают γ -лучи очень большой энергии (около 17 MeV). При действии этих лучей на бром происходит фотоэлектрическое расщепление ядер брома, сопровождающееся вылетом из ядра нейтрона и образованием радиоактивных ядер брома



Боте и Гентнер обнаружили после облучения брома γ -лучами ($h\nu \sim 17 \text{ MeV}$) три радиоактивных электронных периода: 5 мин., 16 мин. и 4,5 часа. В пределах погрешности эксперимента период 16 мин. совпадает с периодом в 18 мин., наблюдаемым при действии медленных нейтронов, так же как период 4,5 часа может быть отождествлен с периодом 4,2 часа, наблюдаемым при действии медленных нейтронов. Таким образом два периода — 18 мин. и 4,2 часа — возникают как при действии γ -лучей, так и при действии медленных нейтронов. Если мы сравним реакции (1) с (4), то увидим, что только один радиоактивный изотоп возникает в обоих случаях — это Br^{80} . Следовательно, периоды 18 мин. и 4,2 часа принадлежат изотопу Br^{80} . Иначе говоря, Br^{80} существует в виде двух изомеров. Теперь легко приписать и остальные периоды брома определенным изотопам. Как видно из (4), период 5 мин., наблюдавшийся только при действии γ -лучей, принадлежит Br^{78} . С другой стороны, из (1) видно, что период 36 час., образующийся только при действии медленных нейтронов, принадлежит изотопу Br^{82} .

Величина верхней границы β -спектра для изомерных периодов брома (18 мин. и 4,2 часа) была определена А. И. Алихановым и сотрудниками⁶, а также в последнее время Снеллом⁷. По данным

А. И. Алиханова и сотрудников верхняя граница β -спектра для периода 18 мин. равна $2,00 \pm 0,10$ MeV, а для периода 4,2 часа она составляет величину $2,05 \pm 0,10$ MeV. Как видно из этих данных, верхние границы β -спектра у обоих изомерных периодов очень близки друг к другу. Однако совпадают ли они друг с другом, в точности сказать на основании этих данных нельзя потому, что погрешность эксперимента в два раза больше наблюдаемой разности значений. По данным Снелла верхняя граница β -спектра для периода 18 мин. равна 2,2 MeV, а для периода 4,2 часа она имеет величину 2,0 MeV. Однако Снелл не дает погрешности эксперимента, и поэтому делать какие-либо суждения о равенстве или неравенстве границ β -спектра на основании его данных нельзя. Таким образом вопрос о том, совпадают ли в точности границы β -спектра у изомеров брома или они различны, остается открытым.

γ -лучи от изомерных периодов брома изучены еще недостаточно хорошо. По данным того же Снелла 18-минутный период сопровождается мягкими γ -лучами, энергия которых, повидимому, меньше чем 0,5 MeV, а период 4,2 часа не сопровождается γ -лучами.

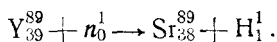
Что касается относительных активностей обоих изомерных периодов, то активности их согласно измерениям многих авторов практически одинаковы.

После открытия изомерии у брома, изомеры, испускающие при распаде легкие частицы (электроны и позитроны), были найдены у целого ряда „полутяжелых“ (атомный вес около 100) и тяжелых (атомный вес около 200) элементов. Из полутяжелых элементов изомерия была обнаружена у стронция ($Z = 38$), серебра ($Z = 47$) и индия ($Z = 48$). При этом у индия и серебра найдено даже по две пары изомеров. Из тяжелых элементов изомеры были открыты у благородных металлов: золота, платины и иридия, а также у самого тяжелого элемента — урана. Многие из этих изомеров были обнаружены в результате бомбардировки элементов очень быстрыми нейтронами (с энергией до 20 MeV). Такие быстрые нейтроны получались при бомбардировке лития дейтонами, ускоренными в циклотроне до энергии в 6,3 MeV.

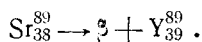
Рассмотрим теперь вкратце, как были обнаружены изомеры у каждого из перечисленных выше элементов (кроме случая брома, который был подробно рассмотрен ранее).

При бомбардировке стронция Sr_{38} дейтонами Стюарт, Лоусон и Корк⁸ обнаружили у этого элемента два периода: $3,0 \pm 0,1$ часа и 55 ± 5 дней. Оказалось, что оба периода сопровождаются выбрасыванием электронов. Химическое выделение активного элемента показало, что активным элементом является стронций. Ввиду того что стронций имеет 4 устойчивых изотопа с массой: 84 (0,5%), 86 (9,6%), 87 (7,5%) и 88 (82,4%), трудно было установить массу активных ядер. Однако оказалось, что если подвергнуть следующий за стронцием в таблице Менделеева элемент иттрий Y_{39}

бомбардировке очень быстрыми нейтронами (с энергией около 20 MeV), то у него можно обнаружить те же 2 периода, что и у стронция в результате бомбардировки последнего дейтонами. Так как иттрий имеет всего только один устойчивый изотоп Y_{89}^{89} , то единственной реакцией из реакций известных типов, которая может привести к образованию радиостронция, является следующая:

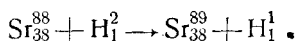


Таким образом радиоактивным изотопом стронция является Sr_{38}^{89} , распадающийся в дальнейшем с двумя указанными выше периодами по реакции



Следовательно, Sr_{38}^{89} существует в виде двух изомерных форм, одна из которых распадается с периодом в 3 часа, а другая — с периодом 55 дней.

Реакция образования радиостронция при облучении устойчивого стронция дейтонами может быть написана теперь в виде



Распад изомера с периодом 3 часа сопровождается γ -лучами, энергия которых пока не измерена. Распад изомера с периодом 55 дней не сопровождается γ -лучами. Что касается максимальной энергии электронов, то для 3-часового периода она равна 0,61 MeV, а для 55-дневного она равна 1,9 MeV.

Рассмотрим изомерию у индия. Индий имеет два устойчивых изотопа: In_{49}^{113} (4,5%) и In_{49}^{115} (95,5%). Еще Амальди и др.² при облучении индия медленными нейтронами наблюдали три радиоактивных периода: 13 сек., 54 мин. и несколько часов. Эти 3 периода были получены в результате простого захвата медленных нейтронов и принадлежат, следовательно, двум радиоактивным изотопам индия: In^{114} и In^{116} . Уже факт существования трех периодов указывал на то, что один из этих радиоактивных изотопов существует в двух изомерных формах. В последнее время Лоусон и Корк³ применили для облучения индия как медленные, так и очень быстрые нейтроны с энергией около 20 MeV. При бомбардировке индия медленными нейтронами они также нашли три периода: 13 сек., 54 мин. и 4,1 часа. При бомбардировке индия очень быстрыми нейтронами были получены еще два новых периода: 72 сек. и 45 дней. Все эти 5 периодов индия сопровождаются вылетом электронов. Оказалось, что период 4,1 часа имеет большую активность при быстрых нейтронах и очень малую — при действии медленных нейтронов. Как было сказано выше, при действии очень быстрых нейтронов имеют большую вероятность реакции с вылетом двух нейтронов. Поэтому период 4,1 часа может быть приписан радиоактивному изотопу In^{112} или In^{114} , образовавшимся из In^{113} или In^{115} в результате реакции с вылетом двух

нейтронов. Из сравнения соотношения активностей при быстрых и при медленных нейтронах с соотношением количеств устойчивых изотопов авторы делают вывод, что период 4,1 часа должен принадлежать изотопу In^{114} , а не In^{112} . Период 72 сек. появляется только при быстрых нейтронах, и поэтому авторы приписывают его изотопу In^{112} (реакция с вылетом двух нейтронов).

Определение интенсивности различных периодов показало, что интенсивности периодов 13 сек. и 54 мин., полученные в результате действия как быстрых, так и медленных нейтронов, находятся в одном и том же отношении друг к другу. На этом основании Лоусон и Корк заключали, что оба эти периода принадлежат одному и тому же изомерному изотопу. Этот изотоп должен иметь массу 114 или 116. Так как эти периоды активизируются лучше медленными нейтронами, чем быстрыми, авторы считают, что оба эти периода принадлежат изотопу In^{116} . Иначе говоря, этот изотоп существует в виде двух изомеров. Период 45 дней был наблюден только в результате действия быстрых нейтронов, и поэтому он может принадлежать изотопу In^{112} или In^{114} (реакция с вылетом двух нейтронов). Авторы пробно приписывают его In^{114} . Следовательно, согласно этим исследователям пять наблюденных ими периодов распределяются следующим образом между радиоактивными изотопами индия:

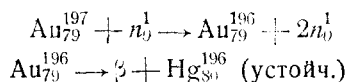
In_{48}^{112}	In_{48}^{114}	In_{48}^{116}
72 сек.	4,1 часа	13 сек.
	45 дней	54 мин.

Таким образом индий имеет две пары радиоактивных изомеров: In_{48}^{114} и In_{48}^{116} . Максимальная энергия электронов периодов 13 сек. и 54 мин. была определена Митчеллом и Ленджером¹⁰ и равна соответственно 3,1 и 1,4 MeV. Максимальная энергия электронов других периодов индия пока на опыте не была измерена.

Как было сказано выше, электронно-распадающиеся изомеры были найдены и у самых тяжелых элементов ($A \sim 200$). Из тяжелых элементов изомеры были найдены у благородных металлов: золота, платины и иридия. Все эти изомеры были найдены Мак-Милленом, Кеменом и Рубеном¹¹.

Остановимся сначала на изомерах у золота. Как известно, золото имеет всего только один устойчивый изотоп Au_{79}^{197} . Кроме периода 2,7 дня, найденного после нейтронной бомбардировки у золота еще Ферми и его сотрудниками, Мак-Миллен и другие нашли при облучении золота очень быстрыми нейтронами (с энергией около 20 MeV) еще два периода: 13 час. и 4—5 дней. Оба эти периода сопровождаются электронным распадом. Химическое выделение показало, что оба радиоактивных элемента суть изотопы золота. Так как при облучении такими быстрыми нейтронами возможны реакции с вылетом двух нейтронов, то авторы считают,

что оба новых периода у золота созданы именно в результате такой реакции:

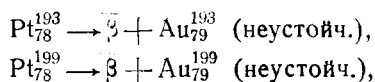


Таким образом радиозолото существует в виде двух изомерных форм ядра Au_{79}^{196} .

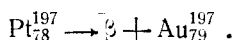
У платины Мак-Миллен и его сотрудники также обнаружили существование электронно распадающихся изомеров. Платина имеет 5 устойчивых изотопов:

Масса изотопа	% содержания
192	0,8
194	30,2
195	35,3
196	26,6
198	7,2

После облучения платины медленными нейтронами авторы наблюдали три периода: 31 мин., 18 час. и 3,3 дня. Эти три периода могут принадлежать изотопам Pt^{193} , Pt^{197} и Pt^{199} . Но Pt^{193} и Pt^{199} при β -распаде должны давать неустойчивые изотопы золота



и только Pt^{197} дает устойчивый изотоп золота



Следовательно, химическое выделение золота из облученной платины должно было бы дать два периода. На самом деле выделение дало только один период — 31 мин. Отсюда авторы заключают, что периоды 18 час. и 3,3 дня принадлежат двум изомерам ядра Pt_{78}^{197} .

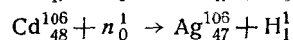
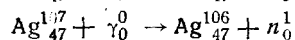
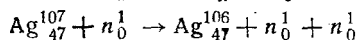
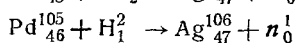
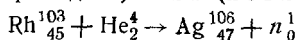
Эти же авторы наблюдали изомерию у иридия. Иридий имеет два устойчивых изотопа; Ir_{77}^{191} (38,5%) и Ir_{77}^{193} (61,5%). После облучения медленными нейтронами иридий давал 3 периода: 19 час., 2 мес. и 1,5 мин. с интенсивностями насыщения соответственно: 120, 280 и 28 отбросов в 1 сек. Третий период, до тех пор неизвестный, был наблюден в трех различных образцах иридия, один из которых был очень большой чистоты, так что авторы считают, что он не мог быть вызван загрязнениями. По аналогии с другими элементами в этом случае при облучении медленными нейтронами должны были бы образоваться изотопы Ir^{192} и Ir^{194} . Таким образом один из этих изотопов должен обладать двумя электронными

периодами, т. е. должен иметь две изомерных формы. При действии быстрых нейтронов с энергией до 20 MeV на иридий были получены те же периоды, что и при действии медленных нейтронов, но соотношение интенсивностей насыщения было иное. При этом интенсивности периодов 1,5 мин. и 19 час. по отношению к интенсивности периода 2 мес. гораздо меньше, чем в случае медленных нейтронов. Отсюда авторы заключают, что, по видимому, период в 2 мес. принадлежит Ir^{192} , а периоды 1,5 мин и 19 час. — изотопу Ir^{194}_{77} , который, таким образом, существует в виде двух изомеров.

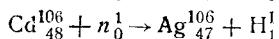
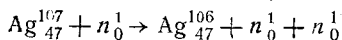
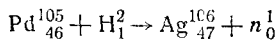
До сих пор речь шла о существовании двух таких изомерных радиоактивных форм одного и того же изотопа, каждая из которых испускает электроны. Однако имеются экспериментальные данные, указывающие на то, что одна изомерная форма может при распаде испускать электроны, а другая — позитроны, т. е. тоже легкие частицы, но с другим знаком заряда. Такой вид изомерии был впервые наблюден у серебра Пулом, Корком и Торнтоном¹² и более детально впоследствии изучен Пулом¹³, Пулом и Кемпбелом¹⁴. Серебро имеет два устойчивых изотопа: Ag^{107}_{47} (52%) и Ag^{107}_{47} (48%). После облучения медленными нейтронами серебро дает два хорошо известных периода: 20 сек. и 2 мин. После облучения серебра нейтронами очень большой энергии (до 20 MeV) указанные выше авторы наблюдали еще два новых периода: 24,5 мин. и 8,2 дня. Эти периоды были получены авторами также в результате бомбардировки родия α -частицами с энергией в 11 MeV, палладия — дейтонами с энергией в 6,3 MeV и кадмия — быстрыми нейтронами с энергией до 20 MeV и, наконец, действием на серебро γ -лучей с энергией в 17 MeV. γ -лучи такой большой энергии исследователи получали в результате бомбардировки лития протонами с энергией 3,2 MeV. α -частицы, протоны и дейтоны ускорялись с помощью циклотрона. Если мы сопоставим атомные веса устойчивых изотопов всех перечисленных элементов с тем фактом, что во всех указанных случаях получается радиосеребро, то мы неизбежно приходим к выводу, что оба новых периода у серебра принадлежат радиоактивному изотопу Ag^{106} . Иначе говоря, Ag^{106} существует в виде двух изомерных форм.

При этом оказалось, что период 24,5 мин. сопровождается испусканием позитронов, а период 8,2 дня — испусканием электронов, γ -лучей и небольшого количества позитронов. Ядерные реакции, приводящие к образованию Ag^{106} , мы здесь приводим:

Период 24,5 мин. (позитроны)



Период 8,2 дня (электроны, γ -лучи, позитроны)



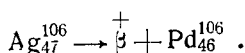
Лучше всего оба периода получаются бомбардировкой Ag^{107} быстрыми нейтронами.

На одну β -частицу периода 8,2 дня приходится 35 γ -квантов. Обычно γ -лучи, сопровождающие распад, возникают следующим образом. После испускания β -частицы ядро остается в возбужденном состоянии. Возвращаясь с этого возбужденного уровня в основном, ядро испускает γ -квант. Если между этим возбужденным уровнем и основным находятся промежуточные уровни, то при этом может быть испущено несколько γ -квантов. Однако возникновение такого большого количества γ -квантов, приходящихся на 1 β -частицу, у периода 8,2 дня объяснить этим нельзя, потому что на опыте найдены только три группы γ -лучей. Для объяснения происхождения этих γ -лучей можно воспользоваться тем, что согласно теории β -распада Ферми ядро вместо испускания β -частицы может поглотить электрон из K -слоя атома, и этот процесс сопровождается испусканием γ -лучей. При этом вероятность этого процесса для тяжелых элементов может быть гораздо больше, чем вероятность испускания β -частицы. Захват K -электронов ядром был наблюден экспериментально Альварецом у ядра V^{48} . Пул и Кемпбелл предполагают, что часть γ -квантов, сопровождающих период 8,2 дня у Ag^{106} , возникает именно в результате захвата K -электронов ядром Ag^{106} .

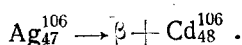
Были найдены три группы γ -лучей у периода 8,2 дня, а именно: 0,3, 0,7 и 1,0 MeV. У периода 24,5 мин. γ -лучей не было найдено, исключая тех, которые могли быть вызваны аннигиляцией позитронов, сопровождающих этот период. Интенсивность активности периода 8,2 дня оказалась в 20 раз больше, чем интенсивность активности периода 24,5 мин. Верхняя граница β -спектра имеет следующую величину: для электронов периода 8,2 дня она равна 1,3 MeV, для позитронов этого же периода она имеет значение 0,41 MeV и для позитронов периода 24,5 мин. верхняя граница имеет величину 1,9 MeV. На основании приведенных выше экспериментальных данных для периода 8,2 дня отношение вероятности захвата K -электрона: вероятность испускания электрона: вероятность испускания позитрона равно 640:40:1. Уленбек и Квипер рассчитали кривые зависимости отношения вероятности захвата K -электрона к вероятности испускания позитрона от энергии W_0 , необходимой для перехода, и от атомного номера. Принимая это отношение равным 640:1, можно из этих кривых найти соответствующее W_0 . Величина W_0 оказалась равной $2,2 mc^2$, что дает для верхней границы позитронного спектра величину 0,6 MeV.

Пул и Кемпбелл считают, что более правильным является это последнее значение, а не то, которое ими было получено на опыте и равное 0,41 MeV. Величина 0,41 MeV была ими получена в результате измерения отклонения путей позитронов в камере Вильсона с магнитным полем. Однако было промерено только 15 путей позитронов; авторы считают, что вследствие такого малого количества промеренных путей наиболее быстрых позитронов с энергией в 0,6 MeV им промерить не удалось.

На основании приведенных выше экспериментальных данных и их трактовки можно построить схему энергетических уровней изомерного ядра Ag^{106} . В результате испускания ядром Ag^{106} позитрона или захвата K-электрона оболочки образуется устойчивое ядро Pd_{46}^{106} по реакции



В результате же испускания электрона образуется устойчивое ядро Cd_{48}^{106}



Для построения схемы уровней ядра Ag_{47}^{106} примем условно энергию устойчивого ядра Pd_{46}^{106} за нуль и от нее будем отсчи-

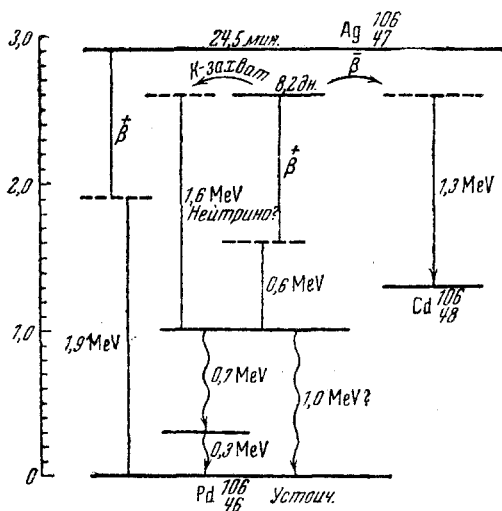


Рис. 1.

тывать все энергии (рис. 1). Найдем местоположение уровня ядра Ag^{106} , соответствующего периоду 24,5 мин. При испускании позитрона масса атома уменьшается на удвоенную массу электрона

(~ 1 MeV), так как из оболочки уходит один электрон. Таким образом при распаде Ad^{106} с периодом 24,5 мин. теряется, во-первых, 1 MeV (2 электронных массы) и, во-вторых, энергия, равная верхней границе позитронного спектра, т. е. 1,9 MeV (γ -лучей нет). Поэтому, отложив от нулевого уровня величину 1,9 MeV и затем 1 MeV, мы получаем положение уровня Ag^{106} (период 24,5 мин.) по отношению к уровню устойчивого Pd_{46}^{106} . Положение уровня Ag^{106} для периода 8,2 дня можно определить следующим путем: отложим от нулевого уровня уровни 0,3, 0,7 и 1 MeV, соответствующие наблюдаемым линиям γ -лучей. Прибавив, далее, к 1 MeV величину верхней границы спектра позитронов периода 8,2 дня, равную 0,6 MeV, и энергию в 1 MeV, соответствующую удвоенной массе электрона, мы получим положение уровня Ag^{106} для периода 8,2 дня. Как видно из схемы, уровень периода 24,5 мин. оказался лежащим выше уровня периода 8,2 дня на 0,3 MeV. Теперь можно изобразить на схеме переходы, соответствующие захвату K -электрона и испусканию электрона. После испускания электрона ядром масса атома не изменится, так как оболочкой атома захватывается новый электрон (происходит перестройка оболочки соответственно строению атома нового элемента, образовавшегося после испускания электрона). При захвате K -электрона, естественно, масса атома также не меняется.

Поэтому, отложив вниз от уровня Ag^{106} (с периодом 8,2 дня) энергию 1,3 MeV, равную верхней границе электронного спектра, мы получим положение устойчивого уровня Cd_{48}^{106} (в предположении отсутствия γ -лучей). Наконец, для того чтобы объяснить переход к устойчивому Pd^{106} после захвата K -электрона, Пулу и Кемпбелу пришлось, как это видно из схемы, предположить, что после этого захвата ядро испускает нейтрино, которое уносит с собой 1,6 MeV. Ввиду неточности экспериментальных данных, в частности ввиду отсутствия каких-либо данных о наличии этого нейтрино, приведенная схема, возможно, не является еще окончательной и бесспорной. Дальнейшее изучение изомеров радиосеребра дает возможность проверить и уточнить эту схему, и, таким образом будет построена совершенно точная картина уровней ядра изомера Ag^{106} .

В заключение вопроса об изомерии у серебра отметим, что в последнее время у нас, в СССР, и за границей появились данные, указывающие на то, что у серебра существуют еще изомеры. Так, в результате продолжительного (несколько месяцев) облучения серебра медленными нейтронами у серебра обнаружен новый, очень длинный период с величиной около 2 лет. Период сопровождается вылетом электронов. Ввиду того что этот длинный период образуется в результате действия медленных нейтронов, наиболее вероятной реакцией, приводящей к его образованию, является реакция простого захвата нейтрона. Однако хорошо известно, что

в результате реакции простого захвата из устойчивого изотопа Ag^{107} образуется радиоактивный Ag^{108} с периодом 2,3 мин., а из устойчивого Ag^{106} образуется Ag^{110} с периодом 22 сек. Так как серебро имеет только два устойчивых изотопа, то, следовательно, вновь открытый период в 2 года принадлежит изомеру ядра Ag^{108} или Ag^{110} .

Мы видим, что этот случай аналогичен случаю брома (2 устойчивых изотопа и 3 периода для реакции захвата).

Интересно отметить, что у серебра соотношение периодов двух изомеров очень велико (2 года и 2 мин. или даже 2 года и 2 сек.), в то время как у изомеров других элементов оно значительно меньше: у стронция — 55 дней и 3 часа, у иридия — 19 час. и 1,5 мин. и т. д.

Остановимся еще вкратце на изомерии самого тяжелого элемента — урана. В работах О. Гана и Л. Мейтнер и других исследователей имеются данные, указывающие на то, что при облучении урана U_{92}^{238} медленными нейтронами в результате реакции простого захвата образуются два изомера ядра U_{92}^{239} : один изотоп распадается с периодом 10 сек., а другой — с периодом 40 сек. Оба периода сопровождаются испусканием электронов¹⁾.

Кроме описанных видов изомерии, существует, повидимому, еще изомерия, связанная с вылетом тяжелых частиц. Вопрос о том, что, например, „сложное“ ядро Al_{13}^{28} может находиться в метастабильном состоянии, был поднят в работе Н. Н. Дмитриева¹⁵.

Укажем, наконец, на один давно известный нам случай изомерии в области естественной радиоактивности.

Радиоэлементы UX_2 и UZ , образующиеся из U_I , распадаются двумя различными путями с испусканием электронов и образуют U_{II} . Таким образом UX_2 и UZ суть два изомера изотопа протактиния.

Вейцекер¹⁶ дал теоретическое объяснение явления изомерии в согласии с теорией ядра Н. Бора и при участии самого Бора. Радиоактивное ядро, образовавшееся в результате ядерной реакции, обычно находится на одном из своих возбужденных уровней. Затем оно переходит на свой основной уровень, испуская при этом γ -лучи. Так как вероятность испускания γ -лучей обычно во много раз больше вероятности испускания корпускул, то прежде чем ядро испустит ча-

¹⁾ Кроме описанных выше изомеров, в самое последнее время Пулом и Квиллом¹⁹ были обнаружены еще два новых изомера, оба у редкоземельных элементов. Один из этих изомеров был найден у гадолиния, — это Gd_{64}^{159} , распадающийся с двумя периодами: 3,5 мин. и 17 час. Оба периода сопровождаются испусканием электронов. Другой изотоп был найден у иттербия, — это Yb_{70}^{175} , который распадается с периодами 2,1 часа и 41 час. Оба эти периода также сопровождаются испусканием электронов.

стицу, оно испустит γ -квант и при этом перейдет на свой основной уровень. Иначе говоря, распад ядра с испусканием частиц возможен только с основного уровня. Теперь предположим, что среди возбужденных уровней ядра имеются такие, переход с которых является настолько сильно запрещенным, что вероятность этого перехода с уровня на нижележащие меньше, чем вероятность испускания с этого уровня частицы. В этом случае ядро испустит частицу, прежде чем оно перейдет в основное состояние. Иначе говоря, в этом случае распад возможен не только с основного уровня. Уровни с таким большим запрещением перехода называются метастабильными. Таким образом в случае наличия в ядре метастабильного уровня, распад ядра возможен двумя различными путями (рис. 2): 1) с метастабильного уровня и 2) с основного уровня. При этом, вообще говоря, периоды полураспада с

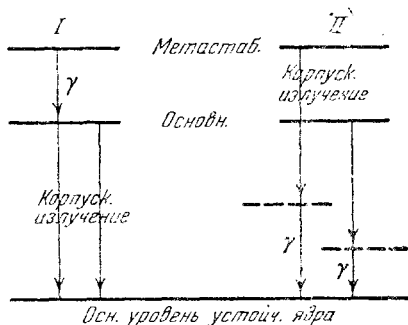


Рис. 2.

обоих уровней будут различны. Род частиц, испускаемых с этих уровней, может быть также различным. Мы видим, что предположением о существовании метастабильных уровней можно объяснить как электронную изомерию, так и электронно-позитронную (γ Ag¹⁰³), так и все другие виды изомерии. Предположение о существовании в ядре метастабильных уровней не требует обязательно какой-то конкретной модели ядра или каких-либо аналогий — это предположение может быть введено просто из рассмотрения ядра как некоторой сложной излучающей квантово-механической системы.

Продолжительность жизни τ возбужденного состояния по отношению к испусканию γ -лучей выражается следующей формулой ¹⁷:

$$\tau = 5 \cdot 10^{-21} (\Delta I)!^2 \left(\frac{20}{\Delta E} \right)^{2(\Delta I) + 1}. \quad (5)$$

Здесь ΔI есть изменение механического момента (спина) ядра при переходе из возбужденного состояния в основное, а ΔE , выражаемое в этой формуле в MeV, есть разность энергии между основным состоянием и возбужденным. Как видно из этой формулы, продолжительность жизни будет большой при большом ΔI и при малом ΔE . Это значит, что метастабильный уровень должен лежать близко от основного (малое ΔE) и разность механических моментов метастабильного уровня и основного должна быть большой.

В тяжелых ядрах минимальное значение ΔE , представляющее собой энергию возбуждения первого возбужденного состояния, имеет величину около 200 кВ, часто бывает $\Delta E = 50$ и иногда даже $\Delta E = 10$ кВ. Механический момент ядра вряд ли изменяется больше чем на 4—5 единиц. Значения τ для этих значений ΔE и ΔI , вычисленные по формуле (5), приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

Энергия возбуждения в кВ	Изменение ΔI спина при переходе к основному состоянию			
	$\Delta I = 2$ (квад-руп.)	$\Delta I = 3$ (ок-туп.)	$\Delta I = 4$	$\Delta I = 5$
10	$6 \cdot 10^{-4}$ сек.	7 час.	$5 \cdot 10^4$ лет	$5 \cdot 10^{12}$ лет
50	$2 \cdot 10^{-7}$ сек.	0,3 сек.	10 дней	10^5 лет
200	$2 \cdot 10^{-10}$ сек.	$2 \cdot 10^{-5}$ сек.	3 сек.	10 дней

Из табл. 2 мы видим, что метастабильные состояния ядра могут существовать в течение многих дней и даже лет. В частности, если метастабильное состояние будет существовать очень много лет (например $\sim 10^{10}$ лет), то практически это состояние является устойчивым. Иначе говоря, согласно этой теории могут существовать изомеры у устойчивых ядер. Эти изомеры являются также устойчивыми ядрами и отличаются от ядер в основном состоянии только на малую величину внутренней энергии ΔE и на большую величину спина ΔI .

Применим изложенную выше теорию изомерии к схеме уровней изомерного ядра Ag^{106} (рис. 1). Из этой схемы мы видим, что уровень ядра Ag^{106} , соответствующий периоду 24,5 мин., лежит выше уровня, соответствующего периоду 8,2 дня, на 0,3 MeV. Один из этих уровней является с точки зрения Вейцекера метастабильным, а другой — основным. Поскольку метастабильный уровень лежит выше основного, мы должны считать уровень ядра Ag^{106} для периода 24,5 мин. метастабильным, а уровень периода 8,2 дня — основным. Разность энергии между основным уровнем и метастабильным в данном случае равна 0,3 MeV. Средняя продолжительность жизни τ равна

$$\tau = \frac{T}{0,693},$$

где T — период полураспада. В данном случае для метастабильного состояния $T = 24,5$ мин. Следовательно, средняя продолжительность жизни метастабильного состояния τ будет равна

$$\tau = \frac{24,5}{0,693} = 35,4 \text{ мин.}$$

Пользуясь этим значением τ и принимая $\Delta E = 0,3$ MeV, мы можем определить с помощью приведенной выше формулы для τ (формула 5), каково должно быть изменение механического момента ΔI при переходе из метастабильного состояния в основное.

Подставим в эту формулу $\tau = 35,4$ мин. $= 2120$ сек. и $\Delta E = 0,3$ MeV. Тогда получим

$$2120 = 5 \cdot 10^{-21} (\Delta I)!^2 \left(\frac{20}{0,3} \right)^{2(\Delta I) + 1}.$$

Отсюда $\Delta I = 5$. Таким образом, при переходе от уровня Ag^{106} для периода 24,5 мин. к уровню Ag^{106} (периода 8,2 дня) механический момент ядра I изменяется на 5 единиц. Такое большое изменение момента не выглядит неприемлемым, если вспомнить, что некоторые ядра в основном состоянии имеют $I = \frac{9}{2}$.

Остановимся еще на возможных схемах распада изомеров. Здесь возможны две основные схемы¹⁷ (рис. 2):

1. Переход с метастабильного уровня на основной сопровождается испусканием γ -лучей, а распад с основного уровня идет с испусканием частиц. Однако здесь мы будем иметь два различных периода; величина периода, соответствующего распаду с метастабильного уровня, будет определяться, как легко понять, вероятностью запрещенного перехода. Верхние границы спектра у обоих периодов в этом случае будут одинаковы. При такой схеме переходов оба периода экспериментально могут быть замечены только в том случае, когда более длинный период принадлежит метастабильному уровню.

2. Переходу с метастабильного уровня на основной предшествует испускание частицы. В этом случае верхние границы корпускулярного спектра будут различны, причем по крайней мере один из периодов будет сопровождаться γ -лучами. Период полураспада с метастабильного уровня может быть при этой схеме и больше и меньше периода полураспада с основного уровня.

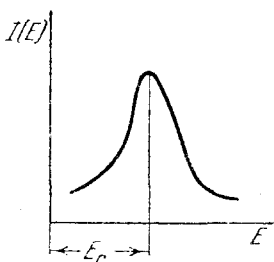


Рис. 3.

Отметим также, что возможен и такой случай, когда переход одного изомера в другой не будет сопровождаться никаким корпускулярным излучением, а только лишь испусканием мягких γ -лучей; экспериментально заметить такие γ -лучи весьма трудно.

В заключение коснемся вопроса о происхождении изомеров. Так как с точки зрения приведенной здесь теории изомеры являются двумя различными состояниями одного и того же ядра, процесс их образования должен быть один и тот же. Флейшманн¹⁸ экспериментально изучил процесс образования изомеров брома. Эти изомеры образуются в результате резонансного захвата медленных нейтронов. Если процесс образования изомеров одинаков, то резо-

нансная энергия E_r для обоих периодов (18 мин. и 4,2 часа) должна была бы быть одинаковой. Измеряя резонансную энергию по поглощению в боре, Флейшманн нашел: для периода 18 мин. $E_r = 52,2 \text{ eV} \pm 5,7\%$, для периода 4,2 часа $E_r = 53,2 \text{ eV} \pm 4,6\%$. Следовательно, в пределах погрешности эксперимента резонансная энергия для обоих изомерных периодов Br^{80} оказалась одинаковой. Кроме этого, было произведено сравнение формы резонансной кривой (рис. 3) для обоих периодов. Оказалось, что форма этой кривой для обоих периодов одинакова, т. е. кривые при наложении друг на друга просто совпадают. Таким образом было показано, что процесс образования изомеров брома один и тот же, что находится в согласии с изложенной выше теорией.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. Kurtschatow, I. Kurtschatow, L. Myssowsky, L. Rusinow, C. R., **200**, 1201, 1935.
2. Amaldi и др., Proc. Roy. Soc., **149**, 522, 1935.
3. Л. В. Мысовский, И. В. Курчатов, Р. А. Эйхельбергер и Г. Д. Латышев. Академия наук СССР. Сборник „Академику В. И. Вернадскому“, 1936 г.
4. J. Blewett, Phys. Rev., **49**, 900, 1936.
5. Bothe u. Gentner, Naturwiss., **25**, 90, 191, 1937.
6. A. Alichanian, A. Alichanow a. B. Dzelepaw, Phys. Z. Sowjetunion, **10**, 78, 1936.
7. A. Snell, Phys. Rev., **52**, 1007, 1937.
8. D. Stewart, J. Lawson a. J. Cork, Phys. Rev., **52**, 901, 1937.
9. J. Lawson a. J. Cork, Phys. Rev., **52**, 531, 1937.
10. A. Mitchell a. L. Langer, Phys. Rev., **53**, 505, 1938.
11. E. Mc Millan, M. Kamen, S. Ruben, Phys. Rev., **52**, 375, 1937.
12. M. Pool, J. Cork a. L. Thornton, Phys. Rev., **52**, 239, 1937.
13. M. Pool, Phys. Rev., **53**, 116, 1938.
14. M. Pool a. E. Campbell, Phys. Rev., **53**, 272, 1938.
15. Н. Н. Дмитриев, Доклады Всесоюзной конференций по атомному ядру, сентябрь 1937 г. Известия ОМАН Акад. наук СССР, 1938 г.
16. C. Weizsäcker, Naturwiss., **24**, 812, 1936.
17. H. Bethe, Rev. Mod. Phys. **9**, 225, 1937.
18. K. Fleischmann, Z. Physik, **107**, 205, 1937.
19. M. L. Pool a. L. L. Quill, Phys. Rev., **53**, 437, 1938.