

Изучение свойств нейтронодефицитных изотопов с использованием синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований

К. Я. ГРОМОВ, Б. С. ДЖЕЛЕПОВ

УДК 621.039.8.002:621.039.6

В течение последних 12 лет в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в Дубне изучались свойства нейтронодефицитных ядер, которые получаются при бомбардировке различных мишеней быстрыми протонами. В настоящей статье дается краткий обзор этих работ, подводятся некоторые итоги и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Введение

Разнообразие атомных ядер очень велико, гораздо больше разнообразия атомов: мы знаем сейчас 104 сорта атомов, но более 1600 сортов атомных ядер. Изучение свойств всех этих ядер — огромная работа, и только небольшая доля ее сделана. Однако уже и теперь накопленная информация занимает тысячи страниц справочников. Между тем физики радуются, когда удается открыть новый изотоп. Почему это так? Почему открытие нового изотопа или обнаружение какого-нибудь нового ядерного перехода, незначительно увеличивающие общий объем информации, вызывают часто бурный интерес? Попытаемся объяснить.

Большинство атомных ядер — сложные системы многих нуклонов, не поддающиеся детальному расчету; в этих условиях основным источником информации являются экспериментальные исследования. Непосредственно получаемая информация имеет табличный характер и не приводит к пониманию структуры, пока не найдены какие-нибудь закономерности в свойствах. Обычно, когда закономерность найдена, для нее находится подходящее объяснение. Так было при открытии Периодической системы элементов Менделеева (закономерности в валентных оболочках атомов) или при открытии закона Мозли для внутренних оболочек атома (рентгеновские серии). Этот процесс выявления закономерностей происходит сейчас в области атомных ядер. Здесь и возникает трудность: ядра оказываются очень непохожими друг на друга. Если такие глобальные характеристики ядер, как масса, плотность, размеры и т. д., изменяются плавно при переходе от ядра к ядру, то наиболее интересные характеристики, связанные со структурой ядра,

оказываются очень непохожими. Для того чтобы сравнение было плодотворным, приходится разделять ядра на группы по четности и величинам N и Z , по величинам I^π (спин и четность волновой функции) для основных состояний, по принадлежности ядра к круглым и деформированным ядрам и т. д. Но и после такого разделения ядра одной группы сильно отличаются по свойствам, так как одночастичные или многочастичные возбужденные состояния сильно смещаются относительно друг друга в соседних ядрах.

В результате этого дробления на группы оказывается, что в каждой группе находится только несколько ядер. Устанавливать закономерности при столь малом числе точек непросто. Новая точка может оказать решающее влияние на достоверность намечавшейся закономерности: подтвердить предсказания той или иной ядерной модели или вызвать ее «кризис».

Приведем пример. Предположим, что нас интересуют свойства основного состояния ядра ${}_{70}\text{Yb}^{171}$, и мы хотим сопоставить свойства этого ядра и соседних, которые могут быть похожи на него. Однако известно только три ядра с нечетным A и 101-м нейтроном: ${}_{66}\text{Dy}^{167}$, ${}_{68}\text{Er}^{169}$ и ${}_{72}\text{Hf}^{173}$, но о Dy^{167} почти ничего не известно, у Er^{169} $I^\pi = 5/2^-$ и только у Hf^{173} основное состояние того же типа, как у Yb^{171} ($I^\pi = 1/2^-$). Эти состояния действительно во многом похожи, но по двум точкам закономерности устанавливать опасно и приходится ждать, когда будет открыто и изучено ядро ${}_{74}\text{W}^{175}$.

Получение нейтронодефицитных изотопов

К началу 50-х годов способы изготовления радиоактивных изотопов ограничивались реакциями, вызываемыми ядерными частицами малых энергий (n , p , d , α — до 20 Мэв), и фото-ядерными реакциями (γp , γn и т. д.). При этом, как правило, получались изотопы, лежащие недалеко от линии стабильности (обычно отличающиеся на 1—4 нуклона от стабильных), и только в процессе деления получались ядра с большим избытком нейтронов — две относительно небольшие области ядер.

В 50-х годах появились ускорители с интенсивными пучками быстрых частиц (с энергией в несколько сот мегаэлектронвольт), а в 60-х годах — ускорители тяжелых ионов. Создание этих ускорителей открыло возможности для получения таких изотопов, изготовить которые раньше было нельзя.

Одним из таких ускорителей оказался синхротрон Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. При помощи этого ускорителя можно получать протоны с энергией до 680 Мэв. Большая интенсивность пучка и хорошая стабильность ускорителя создали особенно благоприятные условия для изучения реакций глубокого расщепления ядер — (*p*, *np*, *xn*), в которых в результате взаимодействия из ядра вылетает *y* протонов и *x* нейтронов. Уже в 1950 г. Б. В. Курчатов, А. Н. Мулин, А. К. Лаврушина и др. изучали на синхротроне ЛЯП механизм этих реакций [1].

В реакции глубокого расщепления можно различить две стадии. На первой стадии быстрая частица сталкивается с ядерными нуклонами и передает некоторым из них значительную энергию. Эти вторичные частицы могут либо вылетать из ядра, либо передать энергию другим нуклонам. Возникает ядерный каскад или ливень, в результате которого из ядра вылетит некоторое число быстрых нуклонов, а ядро останется сильно возбужденным («нагретым»).

На второй стадии это нагретое ядро испаряет нуклоны — тем медленнее, чем меньше энергия возбуждения ядра; процесс прекращается, когда энергия возбуждения такова, что ядро не может уже испустить ни нейтрон, ни протон. В этот момент мы имеем радиоактивное ядро — продукт, дальнейшее «успокоение» которого происходит в основном благодаря β - и γ -процессам.

На первой стадии при вылете быстрых частиц вероятности вылета для протона и нейтрона почти одинаковы, и эти частицы вылетают в том же численном соотношении, в каком находились в исходном ядре; поэтому ядро только смещается вдоль линии стабильности. На второй стадии, когда испаряются медленные частицы, нейтроны имеют преимущество перед протонами из-за кулоновского барьера и вылетают в значительно большем количестве. В результате получаются ядра со значительным избытком нейтронов по сравнению со стабильными — нейтронодефицитные ядра.

Однако вероятность образования изотопов, как правило, быстро убывает по мере удаления

от линии стабильности. В результате на опыте наблюдаются не все изотопы, образование которых возможно в данной реакции, но все же многие. Так, например, при реакции $Ta + p$ (660 Мэв) наблюдалось более 100 различных изотопов и среди них имевшие дефицит в 12 нейтронов.

Изотопы с дефицитом в 5—10 нейтронов стали основным объектом изучения в 60-х годах. Исследования проводились широким фронтом. В них приняли участие, кроме ОИЯИ, Ленинградский и Московский университеты, Институт геохимии и аналитической химии (Москва), Радиевый институт и Институт метрологии (Ленинград), Политехнический институт в Ташкенте.

В настоящее время исследования изотопов, полученных на циклотроне ЛЯП, проводятся в Ленинграде, Москве, Киеве, Риге, Тбилиси, Алма-Ате и Ташкенте, в Праге, Варшаве, Люблине, Братове, Будапеште, Дебрецене, Софии, Бухаресте, Копенгагене и Гётеборге.

Успеху этих работ в большой мере способствовало повышение интенсивности пучка протонов синхротрона ЛЯП с 0,3 мк (1956 г.) до 2,3 мк (1961 г.). Другим важным условием успешного проведения ядерноспектроскопических исследований явилось обеспечение радиохимического выделения радиоактивных изотопов из облученных мишеней. При этом должны выполняться очень жесткие требования: быстрое выделение, чтобы можно было изучать короткоживущие изотопы; большие полные и удельные активностиготавливаемых источников; малая толщина источников для β -спектроскопии и др. Вследствие высокой активности облученных мишеней (до 2—3 г. экв Ra) разработка методов выделения изотопов является сложной технической задачей, требующей применения радиохимических боксов с тяжелой защитой и манипуляторами. В то же время следует помнить, что нужно выделить из мишени без существенных потерь 10^{-10} г радиоактивного вещества.

В радиохимической группе ЛЯП разработаны методы выделения изотопов из облученных мишеней Ta, Er, Gd, Au. В других группах освоено выделение препаратов из облученных Sr, Y, Ag, Cd, Ge, Th, Bi, Cu, Hf, Pr.

Быстрое выделение (~ 2 ч) позволяет изучать свойства изотопов с периодами полураспада до 0,5 ч. Хорошие качества источников: малая толщина, высокая радиохимическая чистота и большая активность (до нескольких десятков милликюри) дают возможность проводить исследе-

дования с помощью современных альфа- и бета-спектрометров.

Реакции с тяжелыми ионами также приводят к образованию нейтронодефицитных изотопов. Интенсивности ионных пучков ускорителей тяжелых ионов недостаточны для получения препаратов большой активности, необходимых для ядерной спектроскопии (см. ниже). Но для открытия новых изотопов интенсивности достаточны, и ряд изотопов был открыт при помощи ускорителей тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и в американских лабораториях.

Сравнение различных методов получения нейтронодефицитных изотопов

Основное достоинство того или иного способа получения радиоактивных изотопов — возможность изготовления их в количестве, достаточном для исследования свойств этих изотопов. Прецизионные спектрометры обычно обладают малой светосилой и требуют использования источников высокой активности. Мы воспользуемся методом сравнения разных способов получения изотопов, предложенным недавно Рудстамом [2].

Вводится величина F — скорость образования ядер данного изотопа:

$$F = \int_0^d I(x) \sigma(x) \rho dx.$$

Здесь $I(x)$ — поток частиц, падающих на мишень; $\sigma(x)$ — сечение реакции; учитывается изменение $I(x)$ и $\sigma(x)$ с энергией (по глубине x внутрь мишени); ρ — плотность вещества мишени; d — ее толщина.

Чтобы рассчитать F , нужно знать сечения $\sigma(x)$ и использовать соответствующие величины для $I(x)$, ρ и d .

Величины $\sigma(x)$ Рудстам определял, используя частично экспериментальные данные, частично полуэмпирические формулы и теорию ядерных реакций. При небольших энергиях протонов наиболее существенны реакции типа (p, xn) ; для больших x сечения этих реакций измерены, но для $x > 3$ их приходится экстраполировать, пользуясь теорией ядерных реакций. При больших энергиях протонов идут разнообразные реакции глубокого расщепления (p, yp, xn) . Рудстам выбрал в качестве примера реакции $(p, 2p, xn)$; экспериментальных данных для реакции с $x \geq 3$ мало, поэтому неизбежно применение полуэмпирических формул для сечений [3].

В качестве примера реакций с тяжелыми ионами Рудстам выбрал реакцию (N^{14}, xn) .

Значения начальной интенсивности пучка I_0 были приняты равными интенсивностям в лучших современных ускорителях. Мы использовали для интенсивности пучка протонов в синхроциклотроне значение $2,5$ мка — ток на внутреннюю мишень на синхроциклотроне ОИЯИ; для интенсивности пучка тяжелых ионов — 10 мка ($6 \cdot 10^{13}$ ионов/сек) — среднее значение для ускорителя тяжелых ионов У-300 в ОИЯИ; для интенсивности пучка заряженных частиц на циклотронах средних энергий — 100 мка — средняя величина тока в современных циклотронах, используемая для производства изотопов.

Толщина мишени d в расчетах Рудстама была принята равной 1 ммоль/см² (для мишени из тантала это соответствует ~ 170 мг/см²); мы увеличили ее для синхроциклотронов до 18 г/см², так как при касательном прохождении пучок протонов пронизывает мишень на глубину ~ 1 см. Для тяжелых ионов толщина мишени принята равной 10 мг/см², так как они не проходят на большую глубину.

Основные характеристики методов приготовления нейтронодефицитных изотопов Таблица 1

| Источники частиц | Поток частиц | Энергия | Толщина мишени |
|--------------------------|----------------------------------|------------|------------------------|
| Циклотроны | 100 мка; p, d, α -частицы | 50 Мэв | 170 мг/см ² |
| Синхроциклотроны | 2,4 мка; p | 600 Мэв | 18 г/см ² |
| Ускорители тяжелых ионов | 10 мка; тяжелые ионы | Переменная | 10 мг/см ² |

На рис. 1 представлены результаты расчетов для производства изотопов тербия ($Z = 65$). По оси абсцисс отложен недостаток нейтронов в изотопе по сравнению с изотопом, для которого $N - Z = 40 \frac{(0,01 A)^{2*}}{2 + 0,01 A}$; по оси ординат — максимальные скорости образования ядер $F_{\text{макс}}$.

Линии объединяют точки, относящиеся к разным мишеням и реакциям. Так, например, крайняя левая точка для линии (p, xn) относится к образованию Tb^{156} , который может быть получен в реакциях ${}_{64}\text{Gd}^{155}(p, \gamma){}_{65}\text{Tb}^{156}$, ${}_{64}\text{Gd}^{156}(p, n){}_{65}\text{Tb}^{156}$, ${}_{64}\text{Gd}^{157}(p, 2n){}_{65}\text{Tb}^{156}$ и т. д. Из всех этих реакций наибольшее сечение $\sigma_{\text{макс}}$ имеет при соответствующем подборе энергии

* Эмпирически найденное выражение для линии стабильности в таблице изотопов.

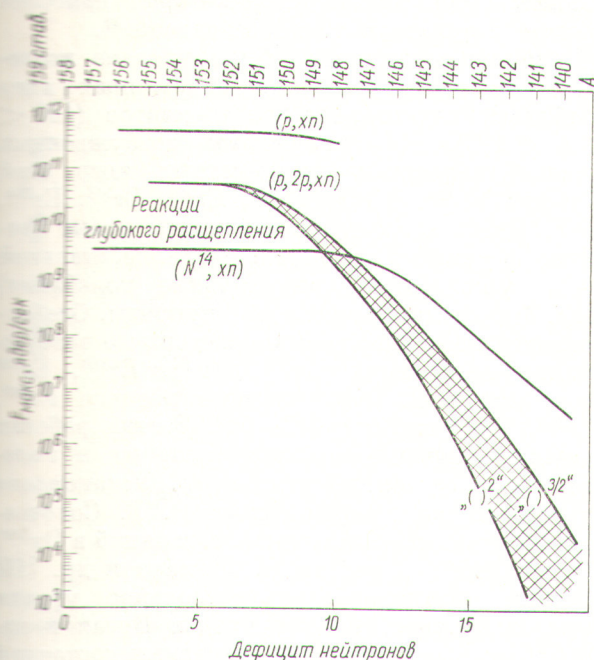


Рис. 1. Сравнение методов получения нейтрондефицитных изотопов тербия ($Z = 65$) (см. табл. 1).

протонов реакция (p, n) , поэтому использовано именно это сечение (то же сделано для Tb^{155} , Tb^{154} , Tb^{153} и Tb^{152}). Для Tb^{151} реакция (p, n) уже непригодна, так как нет стабильного Gd^{151} , поэтому использована реакция $\text{Gd}^{152}(p, 2n)\text{Tb}^{151}$; для Tb^{150} — это реакция $\text{Gd}^{152}(p, 3n)$, а для крайней правой точки кривой (p, xn) — реакция $\text{Gd}^{152}(p, 5n)\text{Tb}^{148}$.

В реакциях глубокого расщепления выбор мишеней и реакций еще больше. Но, как указывал Рудстам, выбрав реакции типа $(p, 2p, xn)$ [реакции типа (p, p, xn) имеют близкое сечение, но не допускают химического выделения радиоактивного изотопа].

Крайняя левая точка кривой $(p, 2p, xn)$ на рис. 1 соответствует образованию ${}_{65}\text{Tb}^{153}$ в реакции ${}_{66}\text{Dy}^{156}(p, 2p)\text{Tb}^{153}$; этот же изотоп может быть получен в реакциях $\text{Dy}^{158}(p, 2p, 2n)\text{Tb}^{153}$, $\text{Tb}^{157}(p, 5p, 10n)$, $\text{Ta}^{181}(p, 9p, 19n)$ и т. д., но сечения для них меньше. Крайняя правая точка на кривой глубокого расщепления относится к реакции $\text{Dy}^{156}(p, 2p, 16n)\text{Tb}^{139}$. Изотопов тербия с $A < 149$ и реакций $(p, 2p, 16n)$ никто не наблюдал, поэтому эта часть кривой основана на экстраполяции по формулам Рудстама. Они не однозначны и, следовательно, экстраполяция может быть различна, поэтому кривые

глубокого расщепления несколько расходятся в области больших x .

Из рис. 1 следует, что для получения изотопов с недостатком в 1—5 нейтронов можно с наибольшим успехом пользоваться ядерными реакциями с частицами средних энергий, выбирая подходящие мишени и энергию частиц. Однако при недостатке в 5—7 нейтронов необходимо использовать для мишени самые легкие и, как правило, наименее распространенные стабильные изотопы соседнего элемента. Это значительно затрудняет постановку опытов.

Изотопы с недостатком в 8—15 нейтронов лучше всего получать по реакции глубокого расщепления.

При большом недостатке нейтронов реакции глубокого расщепления и реакции с тяжелыми ионами имеют сопоставимые сечения.

Из рис. 1 следует также, что при переходе от изотопов с дефицитом в несколько нейтронов к изотопам с дефицитом в 15 нейтронов скорость образования в реакциях глубокого расщепления уменьшается на 3—4 порядка. Следовательно, для того чтобы проводить исследования изотопов с большим дефицитом нейтронов на современном уровне, нужно либо существенно изменять измерительную аппаратуру, либо ориентироваться на значительное повышение тока в ускорителях («мезонные фабрики» и т. п.).

Аппаратура, применяющаяся для ядерноспектроскопических исследований

Для исследований спектров излучения в ОИЯИ применяются:

1. Бета-спектрометры с двойной двукратной фокусировкой пучка электронов. Их разрешающая способность $R = 0,2\%$, светосила $\Omega = 0,15\%$ от 4π . Достоинство приборов этого типа — очень низкий фон регистрирующей системы (менее одного импульса в сутки).

2. Бета-спектрографы с постоянным однородным магнитным полем с разрешающей способностью до $0,02\%$.

3. Большой магнитный альфа-спектрограф: разрешающая способность 3—4 *кэв*, светосила $\Omega = 0,04\%$ от 4π , радиус равновесной орбиты $\sim 1,5 \text{ м}$ (рис. 2).

4. Приборы для исследования γ -спектров, спектров $\gamma - \gamma$ и электрон — γ -совпадений на базе сцинтилляционных и магнитных спектрометров.

5. Германий-литиевые детекторы γ -излучения с разрешающей способностью 3—8 *кэв* и эффективным объемом до 10 см^3 .

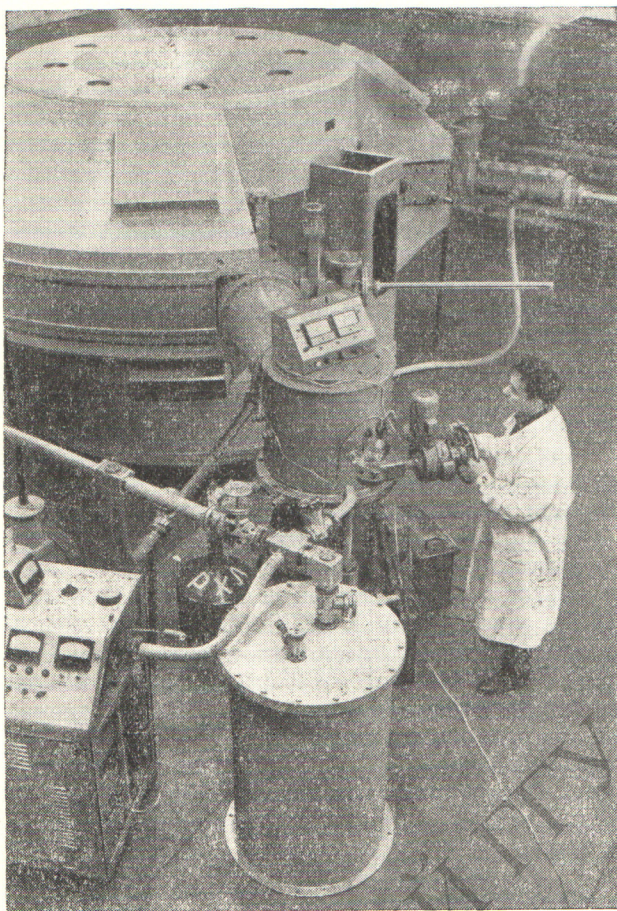


Рис. 2. Большой магнитный альфа-спектрограф Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ:
 $R = 3-4$ кэв, $\Omega = 0,04\%$ от 4л. радиус равновесной орбиты $\sim 1,5$ м, вес электромагнита 90 т.

Некоторые результаты исследований

Возможности, которые появляются при использовании синхроциклотрона ОИЯИ для получения изотопов, по-видимому, нагляднее всего можно проиллюстрировать тем фактом, что в течение 1951—1967 гг. при облучении мишеней протонами на синхроциклотроне в Дубне было открыто более 60 изотопов (табл. 2). Это более трех процентов всех известных сейчас изотопов. Как нетрудно убедиться, большинство изотопов, перечисленных в таблице, нейтронодефицитные с недостатком нейтронов от 5 до 12. Систематические исследования свойств изготовленных в Дубне изотопов позволили также получить большое число новых важных экспериментальных данных о структуре ядра.

Укажем здесь только на некоторые наиболее важные результаты этих исследований.

Наибольшее внимание было уделено исследованиям структуры деформированных ядер в области редкоземельных элементов ($150 < A < 190$). Изучены схемы возбужденных уровней некоторых четно-четных ядер этой области: Yb^{174} , Yb^{172} , Yb^{170} , Er^{168} , Er^{166} , Er^{164} , Er^{162} , Dy^{160} , Dy^{158} и др. Получены новые сведения об уровнях вращательной, колебательной (β - и γ -колебания, октупольные колебания) (рис. 3) и двухквaziчастичной природы. Особенно интересные и подробные сведения о возбужденных состояниях Dy^{160} , Er^{164} , Er^{166} , Er^{168} были получены при изучении распада Er^{160} , Tm^{164} , Tm^{166} и Tm^{168} [17—21]. В этих работах детально изучены свойства основных и колебательных состояний этих ядер. Установлено существование предсказанных В. Г. Соловьевым [22] двухквaziчастичных состояний в Dy^{160} , Er^{166} и Er^{168} . В работе Я. Жилича и др. [19] впервые установлено существование уровня чetyрехквaziчастичной природы. Врал и др. [23] обнаружили ряд коллективных состояний типа 0^+ в Er^{164} . Б. С. Джелепов и др. [24] показали, что при β -распаде Lu^{170} в основное состояние Yb^{170} (переход $+0 \rightarrow +0$) запрет по изотопическому спину приводит к существенной задержке скорости β -распада.

Много новых сведений получено при исследовании структуры уровней нечетных деформированных ядер. Идентифицирован ряд новых одноквaziчастичных уровней в ядрах Dy^{159} , Ho^{159} , Ho^{161} , Er^{161} , Er^{163} , Er^{165} , Er^{167} , Tm^{167} , Yb^{167} , Yb^{171} , Yb^{173} . Полученные результаты показывают, что нижние возбужденные и основные состояния нечетных ядер в основном правильно описываются на основе представлений обобщенной модели ядра Бора и Моттельсона (одночастичные уровни схемы Нильсона). Однако были обнаружены также состояния, которые нельзя объяснить как одночастичные. Так, в работе К. Я. Громова и др. [25] при исследовании распада Tm^{167} был идентифицирован уровень γ -вибрационного типа в Er^{167} ($E = 532$ кэв; $3/2^+$). Это один из первых уровней такого типа, наблюдавшихся в ядрах с нечетным A . При изучении распада Tb^{155} в ядре Gd^{155} М. Фингер и др. [26] обнаружили уровень β -колебательной природы. В работах [27—29] установлено существование уровня трехквaziчастичного типа в ядрах Er^{165} (1428 кэв, $3/2^+$) и в Er^{163} ($3/2^+$, 1540 кэв и $1/2^+$, 1804 кэв).

В обзорах Б. С. Джелепова [30], К. Я. Громова [31] и Жилича и др. [32] систематизиро-

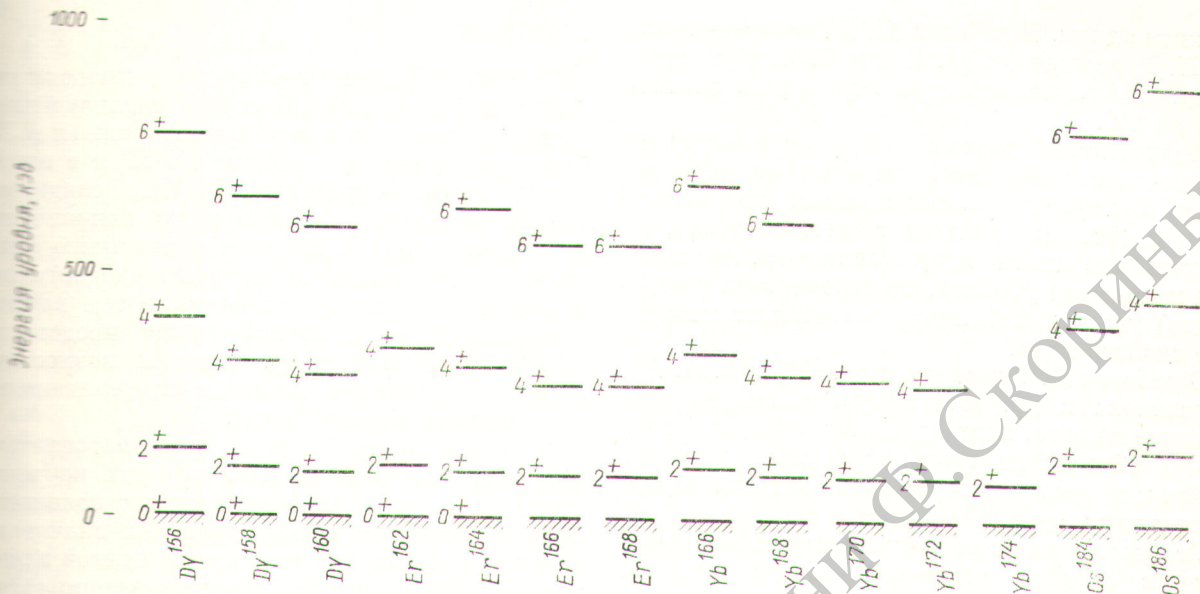


Рис. 3. Уровни вращательных полос основного состояния четно-четных деформированных ядер, открытые и исследованные в реферируемых в этой статье работах.

Изотопы, впервые идентифицированные при исследовании продуктов облучения мишеней протонами на синхротронном ОИЯИ

Таблица 2

| Изотоп | Период полураспада | Литература | Изотоп | Период полураспада | Литература | Изотоп | Период полураспада | Литература |
|--------|--------------------|------------|--------------------|--------------------|------------|--------------------|--------------------|------------|
| | 8 дней | [4] | Pm ^{140m} | (6±1) мин | [10] | Er ¹⁵⁹ | 1 ч | [7] |
| | 3—5 мин | [5] | Pm ¹⁴⁰ | ≤ 15 мин | [14] | Tm ¹⁶² | 21,5 мин | [16] |
| | 20—30 мин | [5] | Sm ¹⁴⁰ | (13,7±0,8) мин | [14] | Yb ¹⁶² | 26 мин | [16] |
| | 7—15 мин | [6] | Pm ^{141m} | (21±1) мин | [10] | Yb ¹⁶³ | ~ 13 мин | [16] |
| | (10±3) мин | [6] | Sm ¹⁴¹ | (22,5±1,4) мин | [14] | Tm ¹⁶⁴ | 2 мин | [10] |
| | 6,5—10 мин | [6] | Gd ¹⁴⁶ | 45 дней | [7] | Yb ¹⁶⁴ | 75 мин | [7] |
| | 1,4 дня | [4] | Eu ¹⁴⁶ | 4,4 дня | [7] | Yb ^{166m} | 18 мин | [10] |
| | (16±4) мин | [6] | Gd ¹⁴⁷ | (35±1) ч | [7] | Lu ¹⁶⁶ | (3,3±0,2) мин | [10] |
| | (15±4) мин | [6] | Tb ¹⁵⁰ | 3,5 ч | [7] | Hf ¹⁶⁶ | (5,3±0,7) мин | [10] |
| | 6,4 ч | [4] | Tb ¹⁵³ | 3 дня | [7] | Hf ¹⁶⁷ | (1,9±0,2) мин | [10] |
| | 2,5 ч | [7] | Dy ¹⁵³ | (7±3) ч | [7] | Lu ¹⁶⁷ | (55±3) мин | [7] |
| | 10 мин | [8] | Dy ¹⁵⁵ | 10 ч | [7] | Lu ¹⁶⁹ | 1,5 дня | [7] |
| | 6,3 ч | [9] | Ho ¹⁵⁵ | (46±3) мин | [7] | Hf ¹⁷¹ | 13 ч | [7] |
| | 4,2 ч | [9] | Sm ¹⁵⁶ | 10 ч | [7] | W ¹⁷⁶ | (2,5±0,4) ч | [7] |
| | 1 ч | [7] | Er ¹⁵⁶ | 12 мин | [15] | Os ¹⁸¹ | (2,5±0,4) ч | [7] |
| | 55 мин | [10] | Ho ¹⁵⁷ | 18 мин | [15] | Ir ¹⁸³ | (60±6) мин | [7] |
| | 55 мин | [11] | Er ¹⁵⁷ | 24 мин | [15] | Ir ¹⁸⁴ | (3,1±0,3) ч | [7] |
| | (22±2) мин | [10] | Ho ¹⁵⁸ | 27 мин | [7] | Pt ¹⁸⁴ | (2,6±0,6) ч | [7] |
| | (1,5±0,15) мин | [12] | Er ¹⁵⁸ | 2,5 ч | [7] | Pt ¹⁸⁵ | 0,5—1,8 ч | [7] |
| | 5,5 ч | [13] | | | | | | |

Экспериментальные данные о свойствах деформированных ядер. Они хорошо подтверждают выводы обобщенной модели Бора — Моттсвольда и сверхтекучей модели Соловьева о свойствах этих ядер.

В настоящее время проявляется большой интерес к изучению ядер переходных областей. Интересно, например, получить экспериментальные сведения о том, насколько резко происходит переход от сферических к деформиро-

ванными ядрами. В работах Ж. Желева и др. [33], Е. П. Григорьева и др. [34] и В. В. Кузнецова и др. [35] изучались ядра переходной области с $A \approx 150$.

Полученные данные позволяют сделать заключение, что, хотя переход от сферических к деформированным ядрам по некоторым свойствам происходит весьма резко, по другим свойствам ядер (например, по энергии некоторых уровней, по вероятности γ -переходов) удается наблюдать постепенное изменение свойств ядра.

В работах И. Ржезанки и др. [36] и А. А. Абдуразакова и др. [37] получены экспериментальные данные, подтверждающие вывод о том, что в области нейтронодефицитных изотопов бария и цезия существует новая область деформированных ядер.

Несколько работ посвящено изучению α -распада в области редкоземельных элементов. Альфа-распад в этой области значительно менее вероятен, чем в области тяжелых элементов, и поэтому эти экспериментальные исследования связаны с значительными трудностями. Высокая активность получаемых источников позволила В. Г. Чумину и др. [38] впервые применить для исследований α -распада изотопов редкоземельных элементов прецизионный магнитный альфа-спектрограф. Благодаря этому были уточнены имевшиеся сведения об α -распаде изотопов в этой области.

Наиболее интересным результатом этих исследований является обнаружение тонкой структуры α -спектров Tb^{149} , Tb^{151} и Dy^{153} (обнаружение α -распада на возбужденные состояния дочерних ядер). Это явление для изотопов редкоземельных элементов ранее не наблюдалось.

В последние годы проявляется большой интерес к изучению свойств изотопов, удаленных от линии стабильности. Эти исследования позволяют продвинуться ближе к границе устойчивости ядерного вещества. Изотопы, удаленные от линии стабильности, обладают очень малыми периодами полураспада, и поэтому для их исследований требуется специальная быстродействующая аппаратура. Такие исследования начаты в Лаборатории ядерных проблем (Г. Музиоль и др.).

В течение 1966—1967 гг. открыто семь новых изотопов и изомеров ($T_{1/2} \leq 20$ мин), изучены некоторые их свойства. Начаты работы по сооружению масс-сепаратора, который будет установлен непосредственно на пучке протонов синхроциклотрона ЛЯП.

Заключение

Таким образом, результаты многолетних работ по получению новых или малоизученных радиоактивных изотопов, проводившихся в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и в институтах стран — участниц ОИЯИ, свидетельствуют о перспективности этого направления исследований. Они привели к открытию большого числа изотопов в ранее недоступной области, позволили установить новые важные закономерности, обогатили наши представления о свойствах ядер, сделали возможным широкое сравнение опыта с предсказаниями современных моделей ядра.

Но несравненно более широкие перспективы для развития этой важной области изучения атомного ядра возникают в связи с появившимися в последнее время проектами значительного увеличения интенсивностей пучков протонов путем создания на основе синхроциклотронов фазотронов с вариацией магнитного поля (токи ~ 50 мка) либо сооружения «мезонных фабрик» (токи 200—1000 мка). Это создает возможности для изучения нейтронодефицитных изотопов, сильно удаленных от линии стабильности, для проведения прецизионных исследований обнаруженных ранее β - и α -радиоактивных ядер и изучения различных тонких эффектов.

В заключение считаем своим приятным долгом выразить от имени всех участников исследований, о которых шла речь в этой статье, глубокую благодарность директору Лаборатории ядерных проблем члену корреспонденту АН СССР В. П. Джелепову за большую и постоянную поддержку в работе по исследованию свойств нейтронодефицитных изотопов, получаемых на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ.

Поступила в Редакцию 29/VII 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Перфилов, О. В. Ложкин, В. Н. Остроумов. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1962.
2. G. Rudstam. Доклад на симпозиуме: «Почему и как следует изучать ядра, удаленные от линии стабильности». Лизекиль, Швеция, август 1966 г.
3. G. Rudstam. Z. Naturforsch., **212**, 1027 (1966).
4. Б. В. Курчатова и др. Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии (заседания отд. хим. наук). М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 120.
5. Н. Г. Зайцева и др. Препринт ОИЯИ 2412. Дубна, 1965, стр. 50.

6. Н. Г. Зайцева и др. Препринт ОИЯИ Р-1724, 1964.
7. Б. С. Дзелепов, Л. К. Пе кер, В. О. Сергеев. Схемы распада радиоактивных ядер. $A \geq 100$. М.—Л. Изд-во АН СССР, 1963.
8. Н. Г. Зайцева и др. «Радиохимия», 2, 451 (1960).
9. И. Ржезаянка и др. Препринт Института ядерных исследований в Праге, 1967.
10. Препринт ОИЯИ-6-3699, 1967.
11. Ж. Желев и др. Препринт ОИЯИ Р-1857, 1964.
12. В. Калининков и др. Препринт ОИЯИ Р-2570, 1966; Nucl. Phys., 88, 225 (1966).
13. К. Я. Громов и др. ЖЭТФ, 47, 1644 (1964).
14. Э. Херрман, Г. Пфреппер, Д. Христов. Препринт ОИЯИ Р-2647, 1966.
15. Ж. Т. Желев и др. Препринт ОИЯИ Р-2196, 1966.
16. А. А. Abdumalikov et al. Physics Letters, 5, 359 (1963).
17. М. П. Авотина и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 30, 530 (1966).
18. К. Я. Громов, Б. С. Дзелепов, В. Н. Покровский. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 23, 821 (1969).
19. Z. Preibisz, J. Zylicz. Phys. Rev. Letters, 9, 258 (1964).
20. J. Zylicz et al. Nucl. Phys., 81, 88 (1966).
21. J. Jursik, V. Zvolzka. Nucl. Phys., 86, 485 (1966).
22. В. Г. Соловьев. В кн. «Структура сложных ядер». М., Атомиздат, 1966.
23. Я. Врзал и др. Препринт ОИЯИ Р-2820, 1966; «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 31, № 10 (1967).
24. Б. С. Дзелепов и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 30, 554 (1966).
25. К. Я. Громов и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 26, 1019 (1962).
26. M. Finger et al. Preprint IINR E-2908, Dubna, 1966.
27. Z. Preibisz, J. Zylicz. Phys. Rev. Letters, 14, 206 (1965).
28. N. A. Vonch-Osmolovskaya, K. Ja. Gromov, Wang Chang Chu. Nucl. Phys., 81, 225 (1966).
29. В. Гнатович и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 31, 587 (1967).
30. Б. С. Дзелепов. В кн. «Структура сложных ядер», М., Атомиздат, 1966, стр. 189.
31. К. Я. Громов. В кн. «Структура сложных ядер», М., Атомиздат, 1966, стр. 299.
32. J. Zylicz et al. Ark. Fys., 36, 643 (1967).
33. И. Адам и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 31, 122 (1967).
34. М. П. Авотина и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 30, 1292 (1966).
35. К. Вильский и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 31, 154 (1967).
36. И. Ржезаянка и др. Препринт Института ядерных исследований в Праге, 1966.
37. А. А. Абдумаликов, Т. А. Исламов, А. А. Абдуразаков. Доклад на IX рабочем совещании по нейтронодефицитным изотопам и теории ядра. Дубна, июль 1966 г.
38. В. Р. Чуми и др. Препринт ОИЯИ Е-2721, 1966.