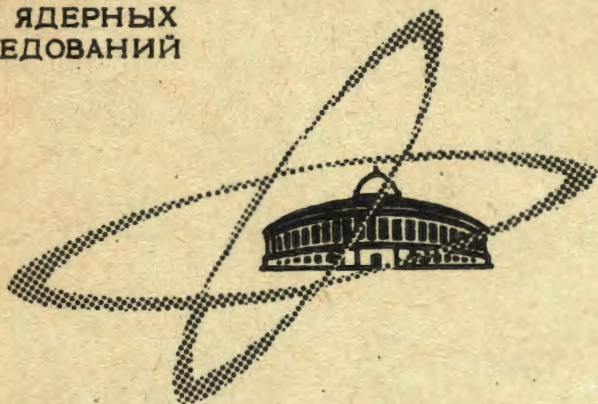


Г 874

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



6 - 3997

К.Я.Громов, Б.С.Джелепов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫХ  
ИЗОТОПОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОЦИКЛОТРОНА  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

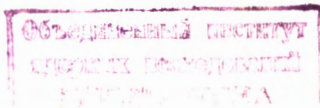
1968

6 - 3997

К.Я.Громов, Б.С.Джелепов

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫХ  
ИЗОТОПОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОЦИКЛОТРОНА  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Направлено в АЭ



7422/3  
49.

В течение последних 12 лет в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований в Дубне изучались свойства нейтронодефицитных ядер, которые получают при бомбардировке различных мишеней быстрыми протонами. В этой статье мы пытаемся дать краткий обзор этих работ, подвести некоторые итоги и обсудить перспективы дальнейших исследований.

## §1. В в е д е н и е

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 открыт новый изотоп. Почему это так? – Почему открытие нового изотопа или обнаружение какого-нибудь нового ядерного перехода, незначительно увеличивающие общий объем информации, вызывают часто очень бурный интерес? Попытаемся объяснить.

Большинство атомных ядер – сложные системы многих нуклонов, не поддающиеся детальному расчёту; 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. И вот тут-то и возникает трудность: ядра оказываются очень непохожими друг на друга. Если такие глобальные характеристики ядер, как масса, плотность, размеры, сжимаемость 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 величине  $N$  и  $Z$ , по величинам  $I^\pi$  (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 даже одной группы сильно отличаются по свойствам, так как одночастичные или многочастичные возбужденные состояния сильно смешаются друг относительно друга в соседних ядрах.

В результате этого дробления на группы оказывается, что в каждой группе находится 2,3 или 4 ядра. Устанавливать закономерности при столь малом числе точек непросто. Новая точка может оказать решающее влияние на достоверность намечавшейся закономерности, иногда подтвердить предсказания той или иной ядерной модели, а иногда вызвать ее "кризис".

Приведем пример. Предположим, что нас интересуют свойства основного состояния ядра  ${}_{70}^{171}\text{Yb}_{101}$  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:  ${}_{66}^{167}\text{Dy}_{101}$ ,  ${}_{68}^{169}\text{Er}_{101}$  и  ${}_{72}^{173}\text{Hf}_{101}$ , но о  ${}_{67}^{167}\text{Dy}$  почти ничего не известно, у  ${}_{69}^{169}\text{Er}$  ( $I^\pi = 5/2^-$ ), и только у  ${}_{73}^{173}\text{Hf}$  основное состояние того же типа, что и у  ${}_{71}^{171}\text{Yb}$  ( $I^\pi = 1/2^-$ ). Эти состояния, действительно, во многом похожи, но по двум точкам закономерности устанавливать опасно, и приходится ждать, когда будет открыто и изучено ядро  ${}_{74}^{175}\text{W}_{101}$ .

## 82. Получение нейтронодефицитных изотопов

Для открытия новых изотопов и для детального изучения их свойств нужны устройства для создания изотопов и для **детектирования их излучения.**

К началу пятидесятых годов способы изготовления радиоактивных изотопов ограничивались реакциями, создаваемыми ядерными частицами малых энергий ( $\alpha$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $a$  - до 20 Мэв), и фотореакциями ( $\gamma p$ ,  $\gamma n$  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 пятидесятых же годах появились ускорители с интенсивными пучками быстрых частиц (с энергией в несколько сот Мэв), а в шестидесятых 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 Объединенного института ядерных исследований (далее мы пишем сокращенно: циклотрон ЛЯП). При помощи этого ускорителя можно получать протоны с энергией до 680 Мэв. Значительная интенсивность пучка и хорошая стабильность ускорителя создали особо благоприятные условия для изучения реакций глубокого расщепления ядер - реакций ( $p, \gamma, n, \alpha$ ), в которых, в результате взаимодействия, из ядра вылетает  $\gamma$  протонов и  $x$  нейтронов. Уже в 1950 году Б.В.Курчатов, А.Н.Мурин, Л.К.Лаврухина и др. изучали на циклотроне ЛЯП механизм этих реакций. Обзор этих работ можно найти в книге Перфилова и др. /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 вылететь 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 останавливается, 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 идет в основном  $\beta$ - и  $\gamma$ - процессами.

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 недостатком нейтронов по сравнению со стабильными – нейтронодефицитные ядра.

Обе стадии – каскадная и испарительная – имеют статистический характер; граница между ними тоже имеет условный характер. Вследствие этого разнообразие изотопов, получающихся в результате реакции глубокого расщепления, очень велико – можно думать, что образуются все ядра, возможные для данной мишени и бомбардирующих частиц.

Однако вероятность образования изотопов, как правило, быстро убывает по мере удаления от линии стабильности. В результате на опыте наблюдаются не все возможные, но все же многие изотопы. 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 и стали основным объектом изучения в 60-х годах. Эти исследования удалось развернуть широким фронтом. В них сразу 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 изотопы, приготовленные на циклотроне ЛЯП, исследуются в Ленинграде, Москве, Киеве, Алма-Ате и Ташкенте, в Праге, Варшаве, Люблине, Кракове, Будапеште, Дебрецене, Софии, Бухаресте, Копенгагене и Гётеборге.

Успеху этих работ в большой мере способствовало повышение интенсивности пучка протонов синхроциклотрона ЛЯП с 0,3 ма (1956 г.) до 1,1 ма (1959 г.) и до 2,3 ма (1961 г.). Другим важным условием успешного проведения ядерноспектрометрических исследований явилось обеспечение радиохимического выделения радиоактивных изотопов из облученных мишеней. При этом должны быть выполнены очень жесткие требования:

быстрое выделение, чтобы можно было изучать короткоживущие изотопы; большие полные и удельные активности приготовляемых источников; малая толщина источников для бетаспектроскопии, и др. Высокая активность облученных мишеней (до 2–3 граммэквивалента радия) превращает разработку методов выделения изотопов в сложную техническую задачу, требующую применения радиохимических боксов с тяжелой защитой, манипуляторами и дистанционным оборудованием. В то же время следует помнить, что нужно выделить из мишени без существенных потерь  $10^{-10}$  гр 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 St, Y, Ag, Cd, Ge, Th, Bi, Cu, Hf, Pt.

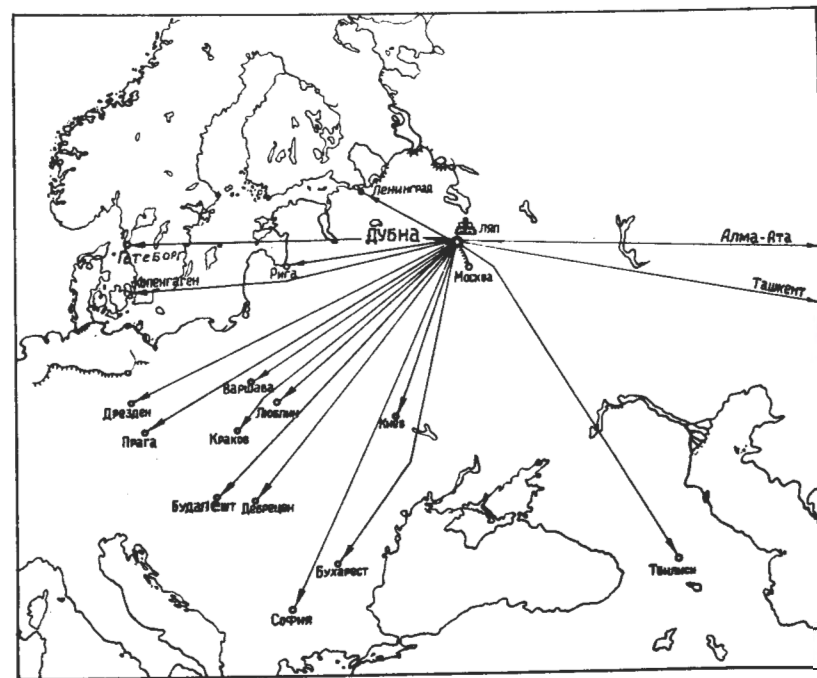


Рис.1. Города, куда поставляются нейтронодефицитные изотопы, получаемые на синхроциклотроне Объединенного института ядерных исследований.

Быстрое выделение ( $\approx 2$  часов) позволяет изучать свойства изотопов с периодами до получаса. Хорошие качества источников: малая толщина, высокая радиохимическая чистота и большая активность (до нескольких десятков милликюри) дают возможность проводить исследования с помощью современных альфа- и бета-спектрометров.

Реакции с тяжелыми ионами также приводят к образованию нейтрондефицитных изотопов. Предположим, что осуществляется реакция  $^{188}_{87}\text{Ho} + ^{16}_8\text{O}$ . При слиянии этих ядер получается изотоп  $^{204}_{95}\text{Re}$ . Устойчивые изотопы Re:  $^{185}\text{Re}$  и  $^{187}\text{Re}$ . Следовательно, все реакции  $^{188}\text{Ho}(^A_Z\text{O}, \text{xn})\text{Re}$  будут давать нейтрондефицитные изотопы. Для осуществления реакций этого типа необходимы тяжелые ионы; надо преодолеть значительный кулоновский барьер; практически необходимы ионы с энергией  $\approx 10$  Мэв/нуклон.

Существующие ускорители тяжелых ионов имеют интенсивности ионных пучков, недостаточные для получения препаратов большой активности, необходимых для ядерной спектроскопии (см. §3.). 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.

### §3. Сравнение различных методов получения нейтрондефицитных изотопов

Основным достоинством того или иного способа получения радиоактивных изотопов является возможность приготовления их в количестве, достаточном для исследования свойств этих изотопов. Прецизионные спектрометры обычно обладают малой светосилой и требуют использования источников высокой активности. Чтобы сравнить разные способы получения изотопов, мы воспользуемся методом сравнения, предложенным недавно Рудстамом [2].

Вводятся 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  $x$  внутри мишени);  $\rho$  – плотность вещества мишени;  $d$  – ее толщина.

Один и тот же радиоактивный изотоп может быть получен из химически разных мишеней при соответственно разных реакциях; могут меняться частицы разной энергии и мишени разной толщины. Экспериментатора интересует вопрос: как получить максимальную скорость образования ядер данного изотопа? Допустим, что он может менять по своему усмотрению мишени (лишь бы это были мишени из стабильных изотопов) и выбирать ускорители – циклотроны и синхроциклотроны обычных типов. Что следует предпочесть, какова максимальная величина  $F_{\max}$  в каждом конкретном случае?

Для того, чтобы рассчитать  $F$ , скорости образования радиоактивных ядер, нужно знать сечения  $\sigma(x)$  и использовать соответствующие величины для  $I(x)$ ,  $\rho$  и  $d$ .

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

Таблица 1

Основные характеристики методов приготовления нейтрондефицитных изотопов (к рис. 2)

Источники частиц	Поток частиц	Энергия	Толщина мишени
Циклотроны	100 $\mu$ А; p, d, $\alpha$	50 Мэв	170 мг/см <sup>2</sup>
Синхроциклотроны	2,5 $\mu$ А; p	600 Мэв	18 г/см <sup>2</sup>
Ускорители тяжелых ионов	10 $\mu$ А, тяжелые ионы	Переменная	10 мг/см <sup>2</sup>

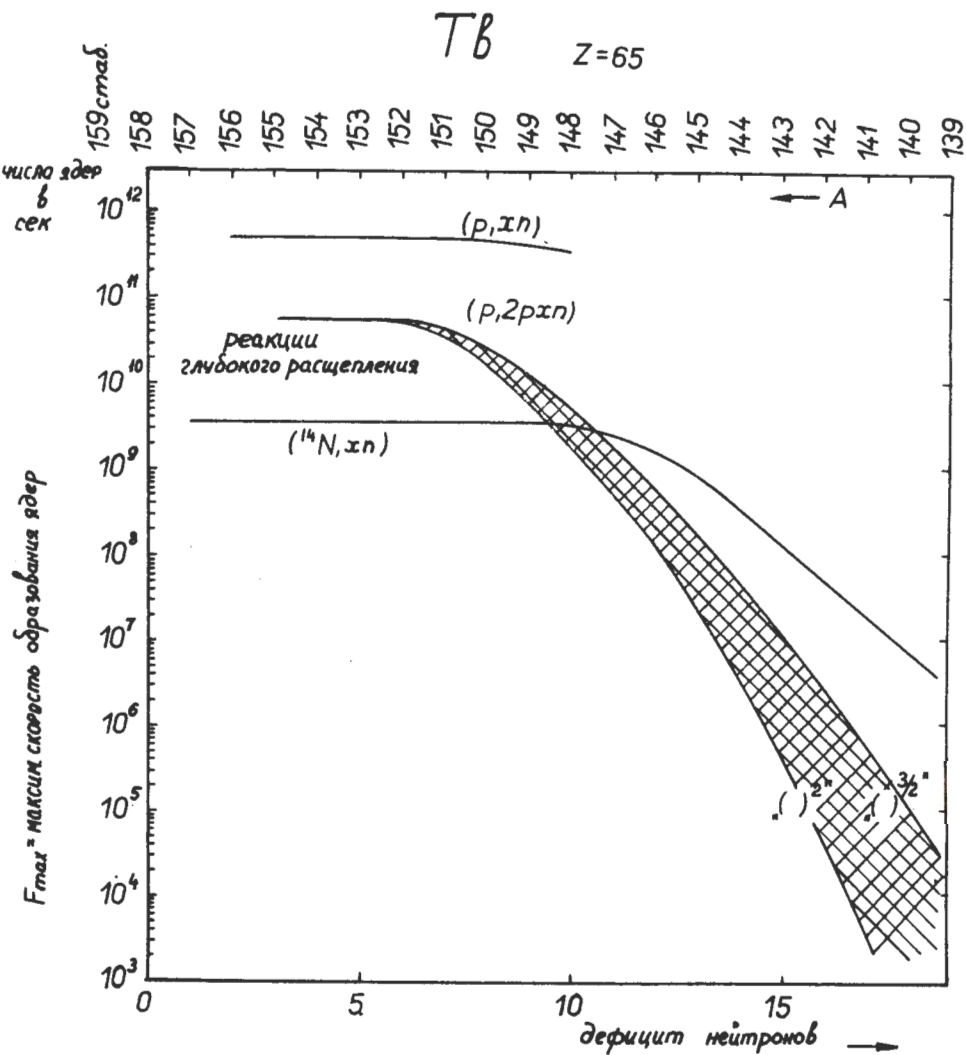


Рис.2. Сравнение методов получения нейтронодефицитных изотопов Tb ( $Z=65$ ) (объяснения в тексте).

В качестве представителя реакции с тяжелыми ионами Рудстам выбрал реакцию ( $^{14}N, xn$ ).

Для  $J(0)$ , начальной интенсивности пучка, выбраны значения для лучших из существующих мишеней. Мы использовали для интенсивности пучка протонов в синхроциклотроне значение  $2,5 \mu A$  (ток на внутреннюю мишень на синхроциклотроне ОИЯИ); для интенсивности пучка тяжелых ионов — значение  $10 \mu A$  ( $6 \cdot 10^{13}$  ионов/сек) — это среднее значение для ускорителя тяжелых ионов У-300 в ОИЯИ; и для интенсивности пучка заряженных частиц на циклотронах средних энергий — значение  $100 \mu A$  — это средняя реально используемая для производства изотопов величина тока в современных циклотронах.

Толщина мишени  $d$  в расчетах Рудстама была принята равной 1 миллимоль/см<sup>2</sup> (для мишени из Та это соответствует  $\approx 170$  мг/см<sup>2</sup>); мы увеличили ее для синхроциклотронов до 18 г/см<sup>2</sup>, так как при касательном прохождении пучка протонов они пронизывают около 1 см мишени. Для тяжелых ионов толщина мишени принята равной 10 мг/см<sup>2</sup>, так как все равно тяжелые ионы не проходят на большую глубину.

На рис. 2 представлены результаты расчетов для производства изотопов Tb ( $Z=65$ ). По оси абсцисс отложен недостаток нейтронов в изотопе по сравнению с изотопом, для которого  $N - Z = 40 \frac{(0,01 A)^2 x}{2 + 0,01 A}$ ; по оси ординат отложены  $F_{max}$  — максимальные скорости образования в ат/сек.

Линии объединяют точки, относящиеся к разным мишеням и реакциям. Так, например, крайняя левая точка для линии  $(p, xn)$  относится к образованию  $^{156}Tb$ , который может быть получен по реакциям  $^{155}_{64}Gd(p, \gamma) ^{156}_{65}Tb$ ,  $^{156}_{64}Gd(p, n) ^{156}_{65}Tb$ ,  $^{157}_{64}Gd(p, 2n) ^{156}_{65}Tb$  и т.д.

Среди всех этих реакций наибольшее сечение  $\sigma_{max}$  может быть получено, при соответствующем подборе энергии протонов, для реакции  $(p, n)$ ; поэтому использовано именно это  $\sigma_{max}$  (то же сделано для  $^{155}Tb$ ,  $^{154}Tb$ ,  $^{153}Tb$  и  $^{152}Tb$ ). Для  $^{151}Tb$  реакция  $(p, n)$  уже непригодна, так

x/ Эмпирически найденное выражение для линии стабильности в таблице изотопов.

как нет стабильного  $^{151}\text{Gd}$ . Поэтому использована реакция  $^{152}\text{Gd}(\text{p}, 2\text{n})^{151}\text{Tb}$ ; для  $^{150}\text{Tb}$  это уже реакция  $^{152}\text{Gd}(\text{p}, 3\text{n})$ ,  $^{151}\text{Tb}$ , для крайней правой точки линии  $(\text{p}, \text{xn})$ -реакция  $^{152}\text{Gd}(\text{p}, 5\text{n})^{148}\text{Tb}$ .

В реакциях глубокого расщепления выбор мишеней и реакций еще больше. Но, как указано, Рудстам выбрал реакции типа  $(\text{p}, 2\text{pxn})$  (реакции типа  $(\text{p}, \text{pxn})$  имеют близкое сечение, но не допускают химического выделения радиоактивного изотопа).

Крайняя левая точка кривой  $(\text{p}, 2\text{pxn})$  на рис.2 соответствует образованию  $^{155}_{85}\text{Tb}$  по реакции  $^{156}_{86}\text{Dy}(\text{p}, 2\text{p})^{155}\text{Tb}$ ; этот же изотоп может быть получен по реакциям  $^{156}\text{Dy}(\text{p}, 2\text{p}2\text{n})^{155}\text{Tb}$ ,  $^{169}\text{Tm}(\text{p}, 5\text{p}10\text{n})$ ,

$^{181}\text{Ta}(\text{p}, 9\text{p}19\text{n})$  и т.д., но сечения для них меньше. Крайняя правая точка на кривой глубокого расщепления относится к реакции  $^{156}\text{Dy}(\text{p}, 2\text{p}16\text{n})^{159}\text{Tb}$ .

Изотопов Tb с  $A < 149$  и реакций  $(\text{p}, 2\text{p}16\text{n})$  никто не наблюдал, поэтому эта часть кривой основана на экстраполяции по формулам Рудстама. Они не однозначны, и экстраполяция может быть различна - поэтому кривые глубокого расщепления несколько расходятся в области больших  $x$ .

Рис.2 показывает, 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 большем недостатке нейтронов реакции глубокого расщепления и реакции с тяжелыми ионами имеют сопоставимые сечения.

Следует, однако, заметить, что при получении короткоживущих изотопов ( $T_{1/2} \in 1$  мин) использование достаточно толстых мишеней встречает значительные трудности: из них нелегко быстро выделить короткоживущие изотопы. В реакциях с тяжелыми ионами из-за малых пробегов тяжелых ионов используются гораздо более тонкие мишени (меньше 10 10 мг/см<sup>2</sup>). Это обстоятельство позволяет использовать для извлечения изотопов, образовавшихся в реакции, их выбивание из мишени. В связи

с этим реакции с тяжелыми ионами, по-видимому, будут более выгодны при исследовании изотопов и изомерных состояний с очень малыми периодами полураспада.

Рис.2. показывает также, что при переходе от изотопов с дефицитом в несколько нейтронов к изотопам с дефицитом в 15 нейтронов скорость образования в реакциях глубокого расщепления падает на 3-4 порядка. Следовательно, для того, чтобы производить исследования сильно-нейтрондефицитных изотопов на современном уровне, нужно либо существенно изменять измерительную аппаратуру, либо ориентироваться на значительное повышение тока в ускорителях ("мезонные фабрики" и т.п.).

#### §4. Аппаратура, применяющаяся для ядерно-спектро-скопических исследований

Для исследований спектров излучения в Объединенном институте ядерных исследований применяются:

1. Бета-спектрометры с двойной двукратной фокусировкой пучка электронов. Их разрешающая способность  $R=0,2\%$ , светосила  $\Omega=0,15\%$  от  $4\pi$ . Преимуществом приборов этого типа является очень низкий фон регистрирующей системы (менее одного импульса в сутки), что позволяет изучать очень слабые компоненты бета-излучения, возникающего при распаде радиоактивных изотопов.

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

3. Большой магнитный альфа-спектрограф: разрешающая способность 3-4 кэв, светосила  $\Omega=0,04\%$  от  $4\pi$ , радиус равновесной орбиты  $\approx 1,5$  метра (рис.3).

4. Приборы для исследования гамма-спектров, спектров гамма-гамма и электрон-гамма совпадений на базе сцинтилляционных и магнитных спектрометров.

5. Германий-литиевые детекторы гамма-излучения с разрешающей способностью 3-8 кэв и эффективным объемом до 10 см<sup>3</sup>.

Как упоминалось выше, исследования изотопов, приготовленных в Дубне, проводятся также в ряде институтов стран-участниц ОИЯИ с использованием большого арсенала соответствующей аппаратуры.



ТАБЛИЦА 2

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

Изотоп	Период полураспада	Ссылка на лит.	Изотоп	Период полураспада	Ссылка на лит.	Изотоп	Период полураспада	Ссылка на лит.
$\leq 80 \text{ Rb}$	8 дн	(2)	$^{146}\text{Gd}$	45 дн	(I)	$^{169}\text{Lu}$	1,5 дн	(I)
$^{81}\text{Y}$	3-5 мин	(4)	$^{146}\text{Eu}$	4,4 дн	(I)	$^{171}\text{Hf}$	13 час	(I)
$^{81*}\text{Y}$	20-30 мин	(4)	$^{147}\text{Gd}$	(35±1) час	(I)	$^{176}\text{W}$	(2,5±0,4) ч	(I)
$^{81}\text{Zr}$	7-15 мин	(3)	$^{150}\text{Tb}$	3,5 час	(I)	$^{181}\text{Os}$	(2,5±0,4) ч	(I)
$^{82}\text{Zr}$	(10±3) мин	(3)	$^{153}\text{Tb}$	3 дн	(I)	$^{183}\text{Yr}$	(60±6) мин	(I)
$^{83}\text{Zr}$	6,5-10 мин	(3)	$^{153}\text{Dy}$	(7±3) час	(I)	$^{184}\text{Yr}$	(3,1±0,3) ч	(I)
$^{83}\text{Sr}$	1,4 дн	(2)	$^{155}\text{Dy}$	10 час	(I)	$^{184}\text{Pt}$	(2,6±0,6) ч	(I)
$^{84}\text{Zr}$	(16±4) мин	(3)	$^{155}\text{Ho}$	(46±3) мин	(I)	$^{185}\text{Pt}$	0,5-1,8 ч	(I)
$^{85}\text{Zr}$	(15±4) мин	(3)	$^{156}\text{Sm}$	10 час	(I)			
$^{90}\text{Mo}$	6,4 час	(2)	$^{156}\text{Er}$	12 мин	(II)			
$^{116}\text{Te}$	2,5 час	(I)	$^{157}\text{Ho}$	18 мин	(II)			
$^{117}\text{J}$	10 мин	(5)	$^{157}\text{Er}$	24 мин	(II)			
$^{132}\text{Ce}$	6,3 час	(6)	$^{158}\text{Ho}$	27 мин	(I)			
$^{133}\text{Ce}$	4,2 час	(6)	$^{158}\text{Er}$	2,5 час	(I)			
$^{134}\text{Pr}$	1 час	(I)	$^{159}\text{Er}$	1 час	(I)			
$^{136}\text{Nd}$	55 мин	(13)	$^{162}\text{Tm}$	21,5 мин	(I2)			
$^{137m}\text{Nd}$	55 мин	(7)	$^{162}\text{Yb}$	26 мин	(I2)			
$^{137}\text{Nd}$	(22±2) мин	(13)	$^{163}\text{Yb}$	~13 мин	(I3)			
$^{138}\text{Pr}$	(1,5±0,15) мин	(8)	$^{164}\text{Tm}$	2 мин	(I)			
$^{138}\text{Nd}$	5,5 час	(9)	$^{164}\text{Yb}$	75 мин	(I)			
$^{140m}\text{Pm}$	(6±1) мин	(13)	$^{166m}\text{Yb}$	18 мин	(I3)			
$^{140}\text{Pm}$	≤ 15 мин	(10)	$^{166}\text{Lu}$	(3,3±0,2) мин	(I3)			
$^{140}\text{Sm}$	(13,7±0,8) мин	(10)	$^{166}\text{Hf}$	(5,3±0,7) мин	(I3)			
$^{141m}\text{Pm}$	(21±1) мин	(13)	$^{167}\text{Hf}$	(1,9±0,2) мин	(I3)			
$^{141}\text{Sm}$	(22,5±1,4) мин	(10)	$^{167}\text{Lu}$	(55±3) мин	(I)			

14

Литература к таблице 2

1. Б.С.Джелелов, Л.К.Пекар, В.О.Сергеев. Схемы распада радиоактивных ядер.  $A \geq 100$ . Изд. АН СССР М.Л. (1963).
2. Б.В.Курчатов, В.Н.Мехедов, М.Я.Кузнецова, Л.Н.Курчатова. Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии 1-5 июля 1955г. Изд. АН СССР Москва (1955).
3. Н.Г.Зайцева, В.В.Кузнецов, М.Я.Кузнецова, Ма Хо Ик, Г.Музиоль, Хань Шу-жунь, Чжо Мо-лунь, Чумин В.Г. Препринт ОИЯИ Р-1724, Дубна (1964).
4. Н.Г.Зайцева, М.Я.Кузнецова, М.Г.Лошилов, Г.Музиоль. Препринт ОИЯИ 2412 стр. 50, Дубна (1965).
5. Н.Г.Зайцева, М.Я.Кузнецова, И.Ю.Левенберг, В.А.Халкин. Радиохимия т.2 №7, 451 (1960).
6. И.Ржезанка и др. (Ин-т ядерных исследований в Праге) Частное сообщение.
7. Ж.Желев, В.Калинников и др. Препринт ОИЯИ Р-1857 (1964).
8. В.Калинников, И.Деметер, Ким Ен Су и др. Препринт ОИЯИ Р-2570 (1966).
9. К.Громов, А.Данагулян и др. ЖЭТФ 47, выпуск 11 (1964).
10. Э.Херрман, Г.Пфреппер, Д.Христов. Препринт ОИЯИ Р-2647 (1966).
11. Ж.Т.Желев, В.Г.Калинников, А.В.Кудрявцева, Г.Музиоль, Н.А.Лебедев, С.П.Макаров, Э.Херрман. Препринт ОИЯИ Р-2196, (1966).
12. А.Аbdumalikov, А.Аbdurasakov, К.Гromov, Zh.Zhelev, N.Lebedev, В.Дzheleпов, А.Кudrjajtseva. Physics Letters 5,359 (1963).
13. Материалы 10 совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, июнь 1967 г.

§5. 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 годов, при облучении мишеней протонами на синхроциклотроне в Дубне, было открыто около шестидесяти изотопов (табл. 2). Это более трех процентов всех известных сейчас изотопов. Как нетрудно убедиться, большинство изотопов, пе-

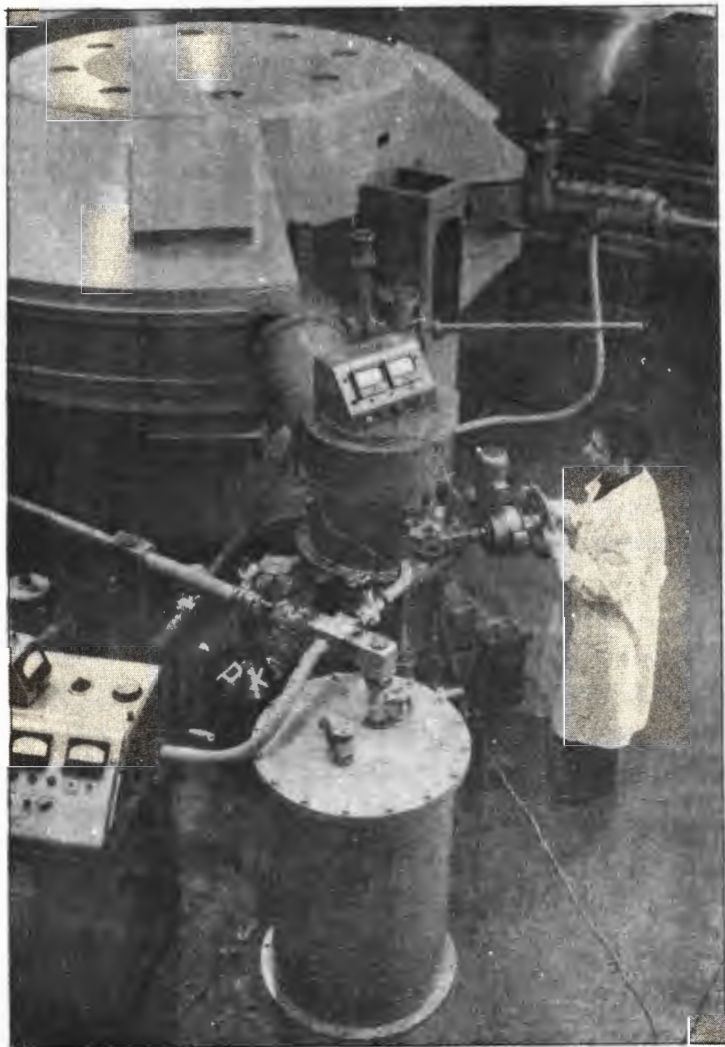


Рис.3. Большой магнитный альфа-спектрограф Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ  $R = 3-4$  кэв,  $\Omega = 0,04\%$  от 4, радиус равновесной орбиты  $\approx 1,5$  метра, вес электромагнита 90 т.

речисленных в таблице 2, являются нейтронодефицитными с недостатком нейтронов от 5 до 12. Систематические исследования свойств изготовленных в Дубне изотопов позволили также получить большое количество 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 ряда четно-четных ядер этой области:  $^{174}\text{Yb}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Yb}$ ,  $^{168}\text{Er}$ ,  $^{166}\text{Er}$ ,  $^{164}\text{Er}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{160}\text{Dy}$ ,  $^{158}\text{Dy}$  и др. Получены новые сведения об уровнях вращательной, колебательной (бета- и гамма-колебания, октапольные колебания (рис.5 и 6) и двухквазичастичной природы. Особенно интересные и полные сведения о возбужденных состояниях  $^{160}\text{Dy}$ ,  $^{164}\text{Er}$ ,  $^{168}\text{Er}$ ,  $^{166}\text{Er}$  были получены при изучении распада  $^{160}\text{Er}$ ,  $^{164}\text{Tm}$ ,  $^{166}\text{Tm}$ , и  $^{168}\text{Tm}$  /4-8/. В этих работах детально изучены свойства основных и колебательных состояний этих ядер. Установлено существование предсказанных Соловьевым /9/ двухквазичастичных состояний в  $^{160}\text{Dy}$ ,  $^{166}\text{Er}$  и  $^{168}\text{Er}$ . В работе Я.Жилича и др. /6/ впервые установлено существование уровня четырехквазичастичной природы. Врзал и др. /10/ обнаружили ряд коллективных состояний типа  $0^+$  в  $^{164}\text{Er}$ . Б.Джелепов, О.Крафт и др. /11/ показали, что при бета-распаде  $^{170}\text{Lu}$  в основное состояние  $^{170}\text{Yb}$  (переход  $^+0 \rightarrow ^+0$ ) запрет по изотопическому спину приводит к существенной задержке скорости бета-распада.

Много новых сведений получено при исследовании структуры уровней нечетных деформированных ядер. Идентифицирован ряд новых одноквазичастичных уровней в ядрах  $^{169}\text{Dy}$ ,  $^{169}\text{Ho}$ ,  $^{161}\text{Ho}$ ,  $^{161}\text{Er}$ ,  $^{163}\text{Er}$ ,  $^{165}\text{Er}$ ,  $^{167}\text{Er}$ ,  $^{167}\text{Tm}$ ,  $^{167}\text{Yb}$ ,  $^{171}\text{Yb}$ ,  $^{173}\text{Yb}$ . 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.Громова и др. /12/ при исследовании распада  $^{167}\text{Tm}$  был идентифицирован уровень гамма-вибрационного типа в

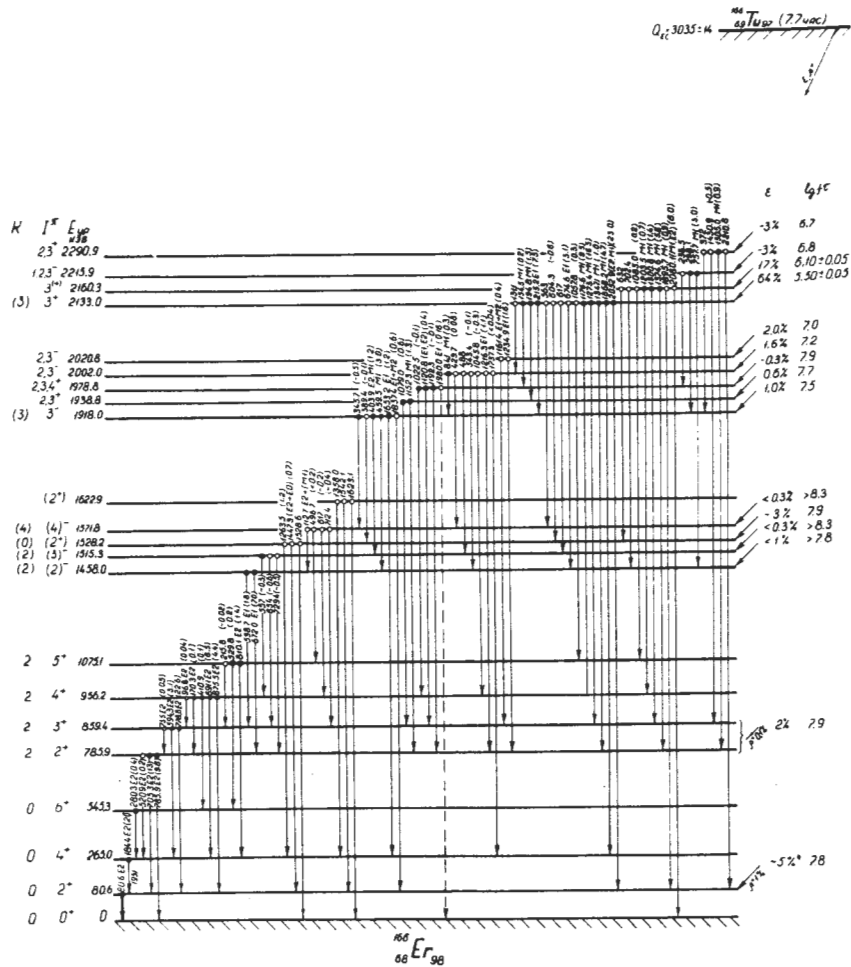


Рис.4. Схема распада  $^{186}\text{Tm}$ . Наблюдались следующие возбужденные состояния ядра  $^{186}\text{Er}$ , ротационные уровни основного состояния (0; 81; 265; 545 кэв). 2) ротационные уровни гамма-вибрационного состояния (787, 860, 857, 1076 кэв); четырехквaziчастичный уровень 2135 кэв и другие уровни коллективной и двухквaziчастичной природы.

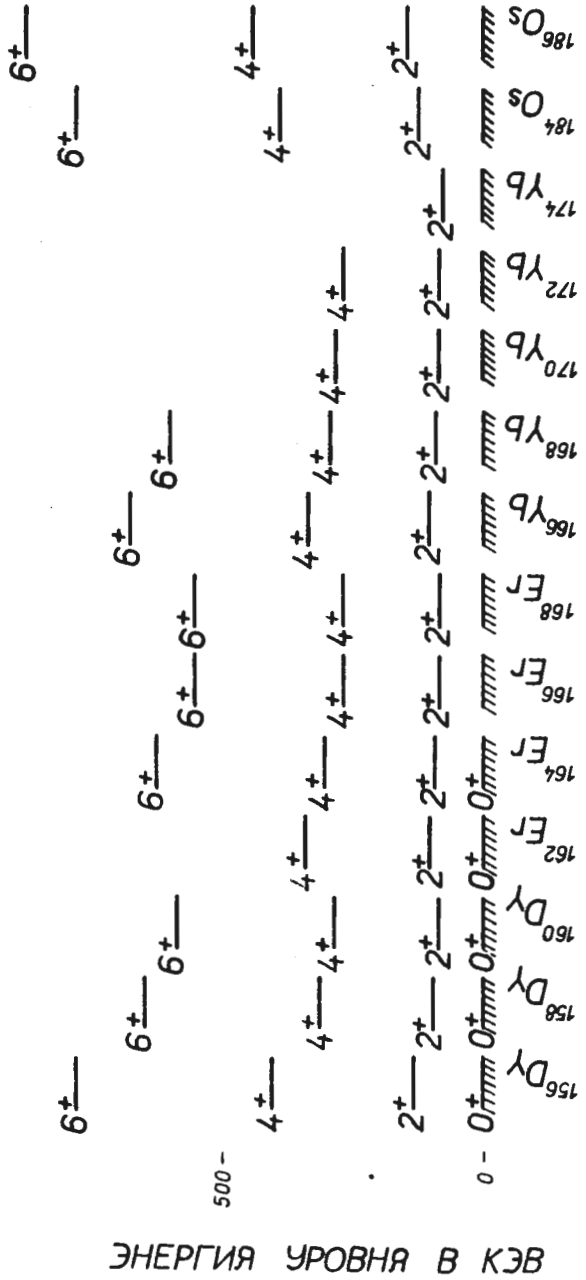
$^{167}\text{Er}$  ( $E = 532$  кэв;  $3/2^+$ ). Это один из первых уровней такого типа, наблюдавшихся в ядрах с нечетным  $A$ . При изучении распада  $^{185}\text{Tb}$  в ядре  $^{185}\text{Gd}$  Фингер и др. /13/ обнаружили уровень бета-колебательной природы. В работах /14-16/ установлено существование уровней трехквaziчастичного типа в ядрах  $^{165}\text{Er}$  (1428 кэв,  $3/2^+$ ) и в  $^{163}\text{Er}$  ( $3/2^+$ , 1540 кэв и  $1/2^+$ , 1804 кэв).

В обзорах Б.Джелепова /17/, К.Громова /18/, Я.Жилича и др. /19/ систематизированы полученные экспериментальные данные о свойствах деформированных ядер. Они хорошо подтверждают выводы обобщенной модели Бора-Моттельсона и сверхтекучей модели Соловьева о свойствах этих ядер. Полученные экспериментальные данные существенно расширяют наши представления о структуре деформированных ядер.

Большой интерес в настоящее время проявляется к изучению ядер переходных областей. Интересно, например, получить экспериментальные сведения о том, насколько резко происходит переход от сферических к деформированным ядрам. В работах Желева и др. /20/, Григорьева и др. /21/ и Кузнецова и др. /22/ изучались ядра переходной области с  $A = 150$ . 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 гамма-переходов) удается наблюдать постепенное изменение свойств ядра.

В работах Ржезанки и др. /23/ и Абдуразакова и др. /24/ получены экспериментальные данные, подтверждающие вывод о том, что в области нейтронодефицитных изотопов бария и цезия существует новая область деформированных ядер.

Ряд исследований посвящен изучению альфа-распада в области редкоземельных элементов. Альфа-распад в этой области значительно менее вероятен, чем в области тяжелых элементов, и поэтому эти экспериментальные исследования связаны со значительными трудностями. Высокая активность получаемых источников позволила Чумину и др. /25/ впервые применить для исследований альфа-распада изотопов редкоземельных элементов прецизионный магнитный альфа-спектрограф. Это позволило значительно уточнить имевшиеся сведения об альфа-распаде изотопов в этой



ЭНЕРГИЯ УРОВНЯ В КЭВ

Рис.5. Уровни вращательных полос основного состояния четночетных деформированных ядер, открытые и исследованные в реферируемых в этой статье работах.

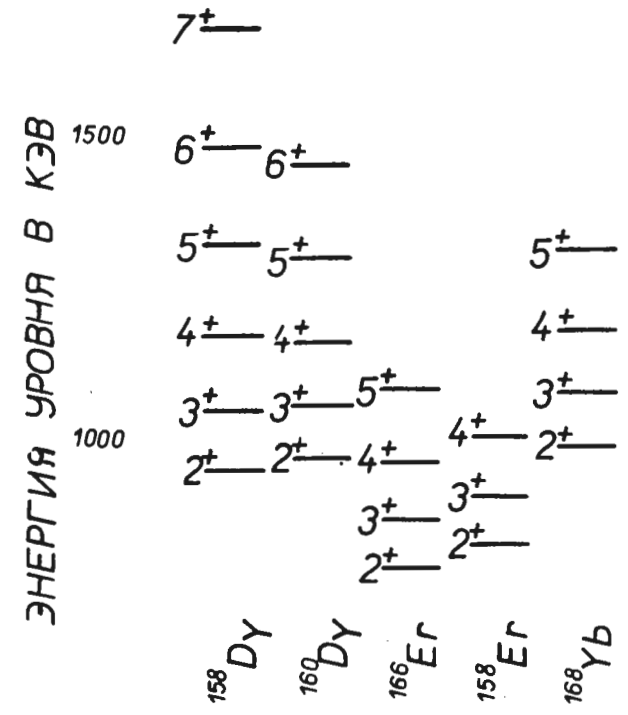


Рис.6. Уровни вращательных полос так называемых гамма-колебательных возбужденных состояний четно-четных деформированных ядер, открытые исследованные в реферируемых в этой статье работах.

области. Наиболее интересным результатом исследований является обнаружение (рис.7) тонкой структуры альфа-спектров  $^{149}\text{Tb}$ ,  $^{151}\text{Tb}$  и  $^{153}\text{Dy}$  (обнаружение альфа-распада на возбужденные состояния дочерних ядер). Это явление для изотопов редкоземельных элементов ранее не наблюдалось.

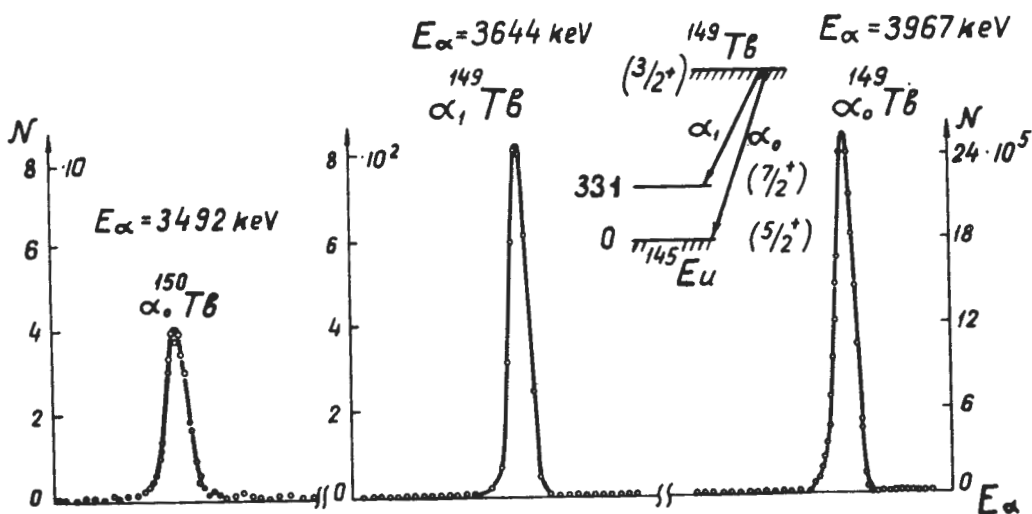


Рис.7. Спектр альфа-частиц, возникающий при распаде изотопов  $^{149}\text{Tb}$  и  $^{150}\text{Tb}$ . Группы альфа-частиц  $\alpha_1$ ,  $^{149}\text{Tb}$  и  $\alpha_0$ ,  $^{150}\text{Tb}$  впервые обнаружены в этих исследованиях. Интенсивность группы  $\alpha_0$ ,  $^{150}\text{Tb}$  в  $6 \cdot 10^4$  раз меньше интенсивности группы  $\alpha_1$ ,  $^{149}\text{Tb}$ . Альфа-частицы  $\alpha_1$ ,  $^{149}\text{Tb}$  представляют один из случаев тонкой структуры альфа-спектров редкоземельных элементов, впервые обнаруженных в этих исследованиях. Фрагмент схемы распада  $^{149}\text{Tb}$ , относящийся к этому случаю, изображен на вставке.

В последние годы проявляется большой интерес к исследованиям 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 исследования требуется специальная быстроредействующая аппаратура. Такие исследования начаты в Лаборатории ядерных проблем (Музиоль и др.). В течение 1966-67 гг. открыто семь новых изотопов и изомеров ( $T_{1/2} \leq 20$  мин), изучены некоторые их свойства. Начаты работы по сооружению масс-сепаратора *on line* на пучке протонов синхроциклотрона ЛЯП.

#### 86. Заключение

Таким образом, результаты многолетних работ по получению новых или мало изученных радиоактивных изотопов, проводившихся в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и большом числе институтов стран-участниц ОИЯИ, свидетельствуют о большой плодотворности 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, и т.д.

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). Эти новые возможности будут особенно важны в связи с тем, что можно будет изучать нейтронодефицитные изотопы, сильно удаленные от линии стабильности, проводить прецизионные исследования обнаруженных ранее бета- и альфа-радиоактивных ядер и изучать различного рода тонкие эффекты.

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 исследований свойств нейтронодефицитных изотопов, получаемых на синхротроне ЛЯП ОИЯИ.

#### Л и т е р а т у р а

1. Н.А.Перфилов, О.В.Ложкин, В.Н.Остроумов. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. Изд. АН СССР М.Л., 1962.
2. G.Rudstam. Production rates of nuclides far off the stability line. Доклад на симпозиуме: "Почему и как следует изучать ядра, удаленные от линии стабильности". Лизекиль, Швеция, август 1966. Представлено в Arkiv for Fysik.
3. G.Rudstam. Zeitschrift für Naturf. 212, 1027 (1966).
4. М.П.Авотина, Е.П.Григорьев, Б.С.Джелепов, А.В.Золотавин. Изв. АН СССР, сер. физ., 30, 530 (1966).
5. К.Я.Громов, Б.С.Джелепов, В.Н.Покровский. Изв. АН СССР, сер. физ., 23, 821 (1959).
6. Z.Preibisz, J.Zylicz - Phys. Lett., 9, 258 (1964).
7. J.Zylicz, M.H.Jorgensen, P.B.Nielsen, O.Skilbreit. Nucl. Phys., 81, 88 (1966).
8. J.Jursik, V.Zvolaska. - Nucl. Phys. 86, 405 (1966).
9. В.Г.Соловьев. Лекции в летней школе физиков в Телави. В книге "Структура сложных ядер", Атомиздат, М., 1966г.
10. Я.Врзал, К.Я.Громов, Я.Липтак, Ф.Молнар, В.А.Морозов, Я.Урбанец, В.Г.Чумин. Препринт ОИЯИ Р-2820 (1966). Изв. АН СССР сер. физ. т.31, №10.
11. Б.С.Джелепов, Н.Г.Зайцева, О.Е.Крафт, Ю.В.Наумов, В.М.Сигалов. Изв. АН СССР, сер. физ. 30, 554 (1966).
12. К.Я.Громов, Б.С.Джелепов, В.Звольска, И.Звольски, Н.А.Лебедев, Я.Урбанец. Изв. АН СССР, сер. физ., 26, 1019 (1962).
13. M.Finger, P.Galan, M.Kuznetsova, J.Liptak, J.Urbanec, J.Vrsal. Preprint JINR, P-2762, Dubna (1966).

14. Z.Preibisz, J.Zylicz. - Phys. Lett., 14, 206 (1965).
15. N.A.Bonch-Osmolovskaja, K.Ja. Gromov, Wang Chang Chu. Nucl. Phys. 81, 225 (1966).
16. В.Гнатович, К.Я.Громов, М.Фингер, Я.Врзал, Я.Липтак, Я.Урбанец. Изв. АН СССР, сер. физ., т. 31, №4, 587 (1967).
17. Б.С.Джелепов. Лекции в летней школе физиков в Телави. В книге "Структура сложных ядер", Атомиздат, М., 1966.
18. К.Я.Громов. Лекции в летней школе физиков в Телави. В книге "Структура сложных ядер", Атомиздат, М., 1966.
19. J.Zylicz, P.G.Hansen, N.L.Nielsen, K.Wilsky. Arkiv for Fysik, (в печати).
20. И.Адам, И.Вильский, Ж.Желев, М.Йоргенсен, М.Кривоустов, В.Кузнецов, О.Б.Нильсен, М.Фингер. Изв. АН СССР, сер. физ., т.31, №1 (1967).
21. М.П.Авотина, Е.П.Григорьев, А.В.Золотавин, В.О.Сергеев, В.Е.Тернерсеянц, Я.Врзал, Н.А.Лебедев, Я.Липтак, Я.Урбанец. Изв. АН СССР, сер. физ., т.30, 1292 (1966).
22. К.Вильский, К.Громов, М.Йоргенсен, В.Кузнецов, М.Кузнецова, О.Б.Нильсен, О.Скилбрайт, Я.Урбанец, М.Фингер. Изв. АН СССР, сер. физ., т.31, №1 (1967).
23. И.Ржезанка и др. Препринт Института ядерных исследований в Праге, 1966.
24. А.А.Абдумаликов, Т.Исламов, А.Абдуразаков. Доклад на девятом рабочем совещании по нейтронодефицитным изотопам и теории ядра. Дубна, июль 1966 г.
25. V.G.Chumin, K.Ja.Gromov, V.Makhmudov, Zh.T.Zhelev. Препринт ОИЯИ Е-2721 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 июля 1968 года.