

УДК 539.16

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗОТОПОВ, УДАЛЕННЫХ ОТ ПОЛОСЫ β -СТАБИЛЬНОСТИ

Итоги работ по программе ЯСНАПП в ЛЯП ОИЯИ

Часть I

*Р. Арльт, К. Я. Громов,
Н. Г. Зайцева, В. Г. Калинин,
Б. Крауцк, Г. Му-
зиоль, В. И. Райко, Т. Фенеш*

Подводятся итоги исследований изотопов, удаленных от полосы β -стабильности, которые были проведены в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1967—1973 гг. по программе ЯСНАПП. Дается краткое описание методов получения и исследования изотопов, изложены результаты и их анализ для сферических и переходных ядер: $Z \sim 40$ и $N \sim 50$; $Z > 50$ и $N \leq 82$; $Z = 81$ и $N \leq 116$; $Z = 84-87$ и $N \leq 126$.

Researched carried out at the Laboratory of Nuclear Problems of Joint Institute for Nuclear Research of the isotopes, far from β -stability region, are summed up at the years 1967—1973 by programme IASNAPP. We give a short description of methods of obtained and investigation of isotopes, present results and their analysis for spherical and transition nuclei: $Z \sim 40$ and $N \sim 50$; $Z > 50$ and $N \leq 82$; $Z = 81$ and $N \leq 116$; $Z = 84-87$ and $N \leq 126$.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большой интерес проявляется к исследованиям свойств атомных ядер, удаленных от полосы β -стабильности. Задачи, методы и результаты таких исследований, широко проводимых в ряде научных центров мира, обсуждались в последнее время неоднократно на международных конференциях [1, 2]. Важность этих исследований часто иллюстрируется тем фактом, что по теоретическим оценкам в природе может существовать около 5000 различных ядер, стабильных по отношению к мгновенному испусканию нуклонов (рис. 1). Обнаружено экспериментально и в той или иной мере изучено лишь немногим более 1500 ядер. Как правило, эти ядра расположены у полосы β -стабильности и обладают относительно большими периодами полураспада. Ясно, что задача создания теории ядра, как и многие другие актуальные научные проблемы, требует исследования всего многообразия

ядер, которые могут существовать в природе. Для получения изотопов, удаленных от линии β -стабильности, сейчас используются три основных метода: реакции деления на нейтронах, реакции с многозарядными ионами и реакции с протонами, ускоренными до энергий в несколько сот мегаэлектронвольт.

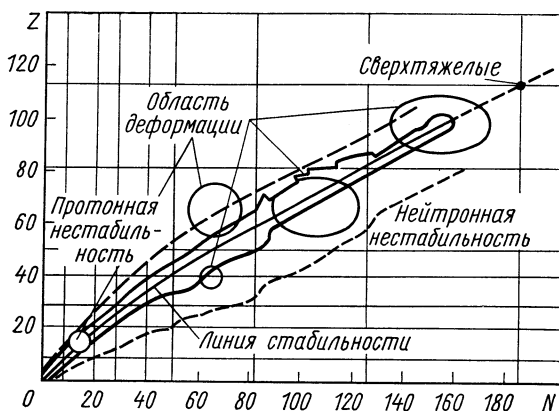


Рис. 1. Нейтрон-протонная диаграмма атомных ядер.

Уже с 1955 г. в Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) Объединенного института ядерных исследований в Дубне реакции с протонами ($E_p = 660 - 680 \text{ Мэв}$) служили для получения изотопов с большим недостатком нейтронов. В этих работах впервые было показано, что реакции глубокого расщепления (spallation) создают уникальные возможности для изучения структуры ядер с большим дефицитом нейтронов. В начале этих исследований (1955—1960 гг.) были получены и исследованы изотопы редкоземельных элементов (РЗЭ) с недостатком в шесть — восемь нейтронов по сравнению со стабильными изотопами. Оказалось, что получаемых изотопов вполне достаточно для выполнения прецизионных ядерноспектроскопических исследований (например, с помощью бета-спектрометров с высоким разрешением).

В исследованиях, проведенных в ЛЯП и некоторых институтах стран-участниц ОИЯИ с использованием этого метода получения изотопов, было открыто более 80 новых изотопов, получена многочисленная информация о структуре нейтронодефицитных ядер. Обзор этих исследований дан в работе К. Я. Громова и Б. С. Дзелепова [3]. В них применялась классическая «of-line» методика и изучались ядра с периодами полураспада около 1 ч и более.

Новый этап в исследованиях короткоживущих, удаленных от полосы β -стабильности изотопов начался в середине шестиде-

сятых годов. К этому времени были разработаны совершенные полупроводниковые детекторы ядерного излучения, позволяющие быстро, в многоканальном режиме, с высоким разрешением изучать сложные спектры γ -квантов, конверсионных электронов и др. Существенный прогресс был достигнут и в технике электромагнитной сепарации изотопов. Именно в этот период были

Таблица 1

Новые изотопы, открытые в Лаборатории ядерных проблем в течение 1967—1973 гг.

Изотоп	$T_{1/2}$, мин	Литература	Изотоп	$T_{1/2}$, мин	Литература
77Rb	3,9	[17]	156Er	19,5	[163]
78gRb	19	[55]	159Tm	11±3	[164]
78mRb	6	[55, 56]	161Yb	3,0	[165]
86Nb	1,4±0,2	[67]	163Yb	13±3	[164]
87gNb	2,6	[67]	165Lu	10	[166]
87mNb	3,8	[67]	166Lu	3,3±0,2	[167]
88mNb	7,3±0,4	[12]	166Hf	6,0±0,5	[167]
92Ru	3,16±0,33	[22, 72]	167Hf	1,9±0,2	[167]
128Ce	3,5±1,0	[104]	169Hf	3,2±0,1	[167]
129Ce	5,5±1,0	[104]	167Ta	2,9	[168]
132Pr	1,6	[103]	168Ta	2,5	[168]
133Pr	7±3	[97]	169Ta	5,0	[168]
134mPr	11	[101]	170Ta	7,0	[168]
134Nd	8	[97]	171Ta	25	[168]
135Nd	5,5; 15	[97]	172W	6±2	[169]
136Nd	55	[95]	176Os	3,0	[170]
144Sm	11±1	[77]	177Os	3,5	[170]
141mSm	22,5±0,5	[75]	178Ir	0,5±0,3	[23]
144Gd	4,9±0,4	[74]	180Ir	1,5±0,1	[23]
147mTb	1,8	[157]	181Ir	5,0±0,3	[23]
148mTb	2,1±0,1	[158]	188Tl	1,5	[24]
150mTb	6,0±0,1	[158]	189Tl	1,4±0,4	[25]
148Dy	3,5	[159]	190Tl	3,5±0,4	[24, 130]
153Ho	2,0	[162]	191Tl	5,2±0,4	[130]

предложены некоторые программы исследований короткоживущих, удаленных от полосы β -стабильности изотопов. Программа таких исследований в ЛЯП ОИЯИ называется: ядерная спектроскопия на пучке протонов (ЯСНАПП). Исследования по этой программе начались в 1966—1967 гг. и продолжаются в настоящее время. Работы за период 1967—1973 гг. дали обширную информацию о ядерных свойствах вновь открытых и уже известных изотопов. В табл. 1 приводятся открытые нами за это время изотопы в основном и изомерном состояниях.

Здесь будут освещены некоторые итоги этих исследований. В первой части обзора рассматриваются методические вопросы

и результаты, полученные при изучении сферических ядер; во второй части будут освещены результаты исследований в области деформированных ядер редкоземельных элементов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Радиоактивные ядра были получены в реакциях глубокого расщепления при облучении различных мишеней протонами с энергией 660 Мэв, ускоренными на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ. Чтобы выделить образовавшиеся ядра из облученных мишеней, необходимо, как правило, использовать радиохимические методы, а затем в некоторых случаях требовалось проводить их изотоп-

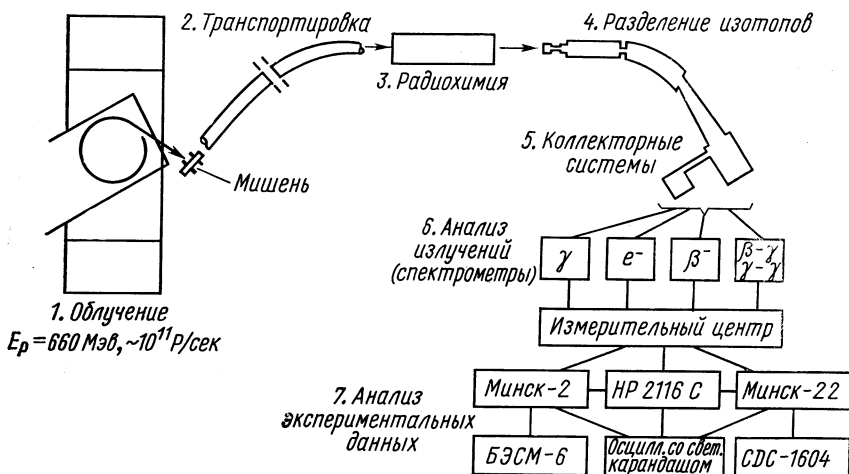


Рис. 2. Структурная схема установки ЯСНАПП-1.

ное разделение. С этой целью в конце 1969 г. был создан комплекс аппаратуры (установка ЯСНАПП-1) «он-лайн» с ускорителем [4, 5]. На установке можно получать и исследовать радиоактивные ядра с периодами полураспада около 1 мин и более. Этот предел обусловлен сравнительно большим расстоянием установки ЯСНАПП-1 от ускорителя, что заставляет проводить транспортировку мишеней к ускорителю и обратно с помощью пневмопочты. Осуществление «он-лайн» экспериментов с использованием реакций глубокого расщепления, когда оказалось бы возможным получать и исследовать изотопы с периодами полураспада до 0,1 сек (установка ЯСНАПП-2), планируется после реконструкции синхроциклотрона [4, 5]. Установка ЯСНАПП-1 (рис. 2) состоит

из следующих главных узлов, разработанных в основном в ЛЯП ОИЯИ:

1. Системы для облучения мишеней на выведенном пучке протонов (660 Мэв , $\sim 10^{11} \text{ р/сек}$) с дистанционным управлением и поиском максимальной плотности пучка;
2. Пневмопочты для транспортировки мишеней для облучения к ускорителю и обратно в химическую лабораторию (расстояние около 70 м , скорость доставки около 10 м/сек);
3. Аппаратуры для экспрессной химической обработки облученных мишеней;
4. Электромагнитного масс-сепаратора с различными по типу ионными источниками;
5. Коллекторных систем для приема, транспортировки и извлечения разделенных в масс-сепараторе радиоактивных изотопов;
6. Аппаратуры для спектрометрии радиоактивных излучений;
7. Аппаратуры и программ для обработки экспериментальных данных.

Экспрессные химические методы выделения радиоактивных изотопов

Чтобы изучить короткоживущие изотопы по программе ЯСНАПП, необходимо быстро получать препараты с максимальной возможной активностью и чистотой, в химической форме, пригодной для последующего разделения изотопов в масс-сепараторе. С этой целью модифицировались и совершенствовались уже имевшиеся методы [6] и создавались новые (табл. 2).

Как показали проведенные исследования, большое значение имеет выбор мишени: необходимо принимать во внимание ее химический состав, агрегатное состояние и другие физико-химические характеристики. Например, выбор в качестве мишеней солей комплексов РЗЭ типа $(\text{NH}_4)_2\text{Ln}$ (ДТПА), где ДТПА — диэтилентриаминпентауксусная кислота, привел к значительному ускорению процесса разделения микроколичеств, получаемых в ядерных реакциях РЗЭ, от макроколичеств вещества мишени на основе метода Сциларда — Чалмерса [7]. Этот этап в сочетании с последующим усовершенствованием хроматографического разделения РЗЭ по фракциям (смола Дауэкс-50 заменялась на Аминекс-5, размеры колонки уменьшались до $2 \times 60 \text{ мм}$), а также с улучшенным вариантом электролитического приготовления препарата для введения в ионный источник [8] привел к значительному сокращению времени, необходимого для проведения всей процедуры, которая при этих условиях занимает теперь не более 20 мин .

Для быстрого выделения радиоактивных изотопов весьма перспективен метод газовой термохроматографии (ГТХ), основанный

Таблица 2

Методы выделения радиоактивных изотопов, используемые в программе ЯСНАПП

Метод	Элемент	Реакция получения	Мишень	Условия выделения	Время химического выделения, мин	Масс-сепарация, ванне	Изученные изотопы	Литература
Модифицированные методы «мокрой» химии (селективное осаждение, сорбция на пористых, ионообменная хроматография, экстракция)	Rb	Sr (<i>p</i> , 2 <i>pxn</i>) Rb Y (<i>p</i> , 3 <i>pxn</i>) Rb	SrCl ₂ Y(NO ₃) ₃	Осаждение тетрафенилбората Rb при pH = 3 ÷ 5	4	Нет		[19]
	Sr	Rb (<i>p</i> , <i>xn</i>) Sr	RbNO ₃	Осаждение SrCO ₃ при pH > 7	4	Нет		[19]
	Y	Реакции глубокого расщепления: 1) Nb + <i>p</i> 2) Sr (<i>p</i> , <i>xn</i>) Y	Nb _{мет} SrCl ₂	Отделение фторида, сорбция в колонке на смоле Дауэкс-50×8 Экстракция диэтилгексилортофосфорной кислотой	≥ 30 10	Нет	84Y	[58]
	Nb	Mo (<i>p</i> , 2 <i>pxn</i>) Nb	H ₂ MoO ₄ Mo _{мет}	Сорбция Nb на стеклянном фильтре из аммиачного раствора	7	Нет	90Nb	[19, 71]
	Ba	Ce (<i>p</i> , 3 <i>pxn</i>) Ba	CeO ₂	Сбор ядер отдачи в растворе 0,1M HCl. Разделение на колонке с Дауэкс-50×8	10	Да	124-127Ba	[107, 108, 111, 112]

Продолжение табл. 2

Метод	Элемент	Реакция получения	Мишень	Условия выделения	Время химического выделения, мин	Массо-сепарирование	Изученные изотопы	Литература
	Re	1) W (<i>p, xn</i>) Re 2) Re (<i>p, rxn</i>) Re 3) Os (<i>p, 2pxn</i>) Re	W _{мет} NH ₄ ReO ₄ Os _{мет}	Удочивание Re* при сжигании W (<i>t</i> = 1160° C) в токе влажного кислорода (<i>P</i> _{H₂O} = 430 мм рт. ст.). Осаждение в ТХ-колонке. Термическое разложение NH ₄ ReO ₄ при <i>t</i> = 600–800° C. Осаждение Re* в ТХ-колонке. Сжигание Os (<i>t</i> = 850° C) в токе кислорода. Осаждение Re* в ТХ-колонке	~ 10 3 3	Нет Нет Нет	 179Re [10, 173] [10]	[172]
	Re Os Ir Hg	Реакции глубокого расщепления Au + p	Au _{мет}	Из расплава при <i>t</i> = 1160° C в токе газа-носителя (O ₂); селективное осаждение в ТХ-колонке по зонам	3	Нет	178, 180–182Ir	[14, 23]
	Tl	Pb (<i>p, 2pxn</i>) Tl	PbF ₂	Из кристаллического порошка при <i>t</i> = 650° C в токе газа-носителя (N ₂); осаждение в ТХ-	3	Да	188–197Tl	[11, 24, 25]

Эманирование	Kr	Sr (<i>p</i> , 3 <i>pxn</i>) Kr	SrO	Эманирование из кристаллического порошка при $t = 400^\circ \text{C}$, $p = 10^{-2}$ мм рт. ст., поглощение в ловушке с активированным углем при t° жидкого азота	2	Да	$79m\text{Kr}$	[15]
	Rn	Th (<i>p</i> , 5 <i>pxn</i>) Rn	ThO ₂	То же		Да	205–207Rn	[16, 148–150]
Реакции в ионном источнике	Rb Sr	Zr (Nb) + <i>p</i>	Zr (Nb) _{мет}	Испарение при t° ионного источника; химическое разделение изобар после масс-спектрирования; осаждение RbClO ₄ , SrSO ₄	Без химического выделения до масс-спектрирования	Да	77, 78Rb	[17, 55, 56]
	PЗЭ	Реакции глубокого расщепления Ta + <i>p</i>	Ta _{мет}	Испарение при t° ионного источника; химическое разделение изобар после масс-спектрирования на колонке с Аминекс А-5	Без химического выделения до масс-спектрирования	Да	от La до Lu ($T_{1/2} \geq 1$ мин)	[18, 159–162]

на выносе образующихся в определенных условиях летучих соединений газом-носителем из зоны нагрева в трубку с заданным температурным градиентом, на стенках которой по мере прохождения газового потока происходит сорбция летучих соединений в различных температурных зонах [9, 10]. Этот метод позволяет осуществлять химическое отделение необходимых изотопов от вещества мишени и их очистку непосредственно в процессе облучения

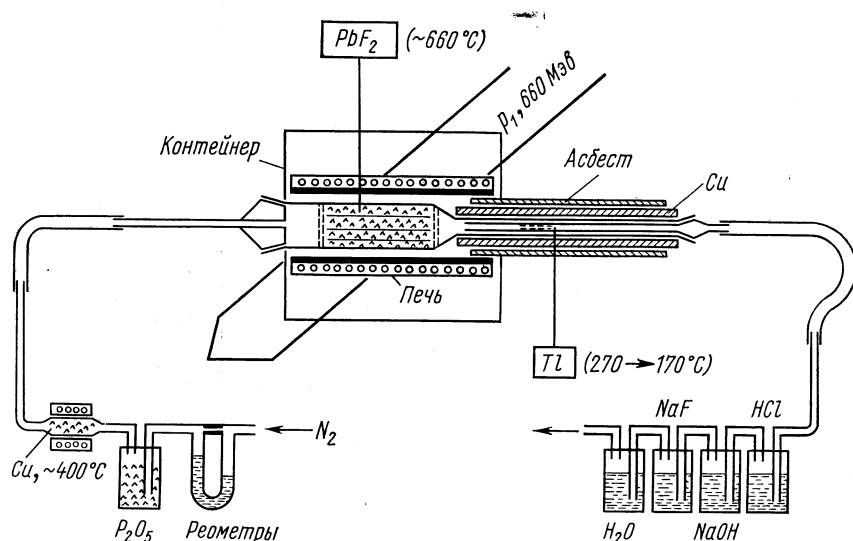


Рис. 3. Схема установки для получения и газотермохроматографического выделения изотопов Tl из вещества мишени в процессе облучения.

(«он-лайн»), что позволило изучать изотопы с периодом полураспада порядка 1 мин. На рис. 3 представлена схема химической установки в эксперименте такого типа.

В методах ГТХ для выделения радиоактивных изотопов использовалась летучесть фторидов Tl [11], хлоридов Mo [12], оксихлоридов Zr и Nb [13], оксидов Ir, Os, Re, Hg [14], гидроокисей W и Re [171, 172].

Свойство эманирования благородных газов было использовано для выделения Kr и Rn из оксидов SrO и ThO_2 соответственно [15, 16].

В некоторых работах осуществлялись приемы, позволяющие исключить химическое выделение элемента из сложной смеси продуктов облучения. Это было возможно в случае испарения сравнительно легколетучих примесей из тугоплавких мишеней непосредственно в ионном источнике масс-сепаратора. Изотопы

испаряемых при высокой температуре элементов собирались на коллекторной ленте. При необходимости одна-две химические операции позволяли провести разделение полученных изобар, как это было сделано, например, в случае рубидия и стронция [17] и для РЗЭ [18].

Масс-сепараторы и ионные источники

Электромагнитный сепаратор в системе «он-лайн» скандинавского типа [28] обеспечивает дисперсию 15 мм при $\Delta m/m = 1/100$ и позволяет одновременно разделять изотопы до $M = 250$ в диапазоне $\pm 15\%$ средней массы в фокальной плоскости. Разрешение массовых линий до 2000. Однако разрешение, эффективность и быстродействие масс-сепаратора зависят в основном от конструкции и режима работы ионного источника и параметров его ионно-оптической системы. В результате проведенных экспериментов [29] была осуществлена оптимизация этих параметров, что позволило достичь предельного разрешения и существенно увеличить эффективность разделения.

Для разделения изотопов различных элементов были разработаны и изучены три типа ионных источников:

1. Плазменный, магнетронного типа, с автоматическим вводом пробы — для разделения изотопов элементов с температурой кипения до 1000°C [30]. В частности, этот источник использовался для разделения радиоактивных изотопов Tl с эффективностью до 12%.

2. Уникальный высокотемпературный трубчатый, с поверхностной ионизацией [31]. Он обеспечивает эффективность разделения ультрамалых количеств радиоактивных изотопов до 100% при потенциале ионизации радиоактивных атомов $V_i \leq 5$ эв. С ростом значения V_i эффективность падает и при $V_i = 7$ эв составляет 1%. Это означает, что можно проводить разделение изотопов около 50 элементов, в том числе лантаноидов и актиноидов [32]. Источник использовался для разделения изотопов Nd, Pr, Yb, Tm, Ho, Dy, Ba, Rb и др. Экспериментальные значения эффективности разделения изотопов некоторых элементов даются на рис. 4. Данный ионный источник отличается также быстродействием (рис. 5). Время пребывания продуктов реакций в источнике около 10 мсек, время разогрева до рабочей температуры около 1 мин. Следует отметить также, что высокая температура внутри ионного источника (около 3000°C) позволяет исключить в некоторых случаях радиохимическую обработку облученных мишеней, которая требует определенного времени (для РЗЭ, например, около 20 мин). Оказалось возможным загружать облученные тугоплавкие мишени (Ta, Zr, Nb и др.) непосредственно в ионный

источник. В этом случае радиоактивные атомы быстро покидают материал мишени в результате термодиффузии, ионизируясь затем на раскаленной вольфрамовой поверхности источника. Этот метод успешно использовался для получения короткоживущих изобар щелочноземельных и редкоземельных элементов [17, 18]. Проведенные исследования механизма диффузии и ионизации атомов в такой системе показывают, что способ изобарического разделения может оказаться особенно удобным в будущих «он-лайн» экспериментах.

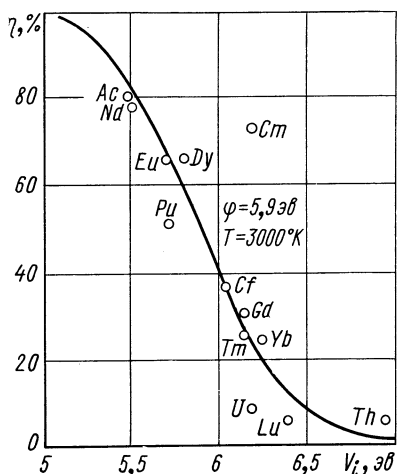


Рис. 4. Зависимость экспериментальных значений эффективности разделения изотопов при использовании источника с поверхностной ионизацией на W от потенциала ионизации.

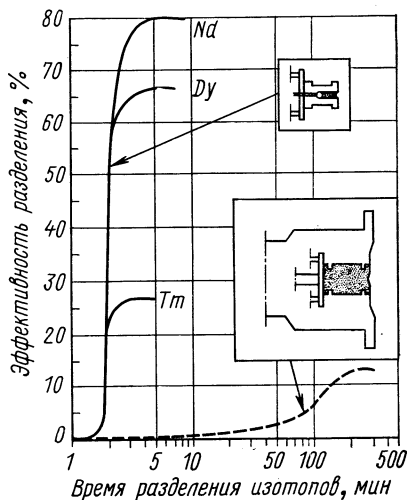


Рис. 5. Зависимость эффективности разделения изотопов при использовании источника с поверхностной ионизацией и стандартного газоразрядного источника (пунктирная кривая) от времени разделения.

3. С поверхностной ионизацией и газовым разрядом, с полым катодом — для разделения изотопов тугоплавких (Zr, Hf, Nb) и других трудноионизируемых элементов [33]. Использование кроме поверхностной ионизации ионизации атомов в газовом разряде позволяет расширить область изучаемых ядер и охватить практически всю периодическую таблицу элементов.

Электромагнитный масс-сепаратор для «офф-лайн» экспериментов был создан в 1968 г. [34]. С помощью этого прибора впервые в СССР проводилось разделение больших количеств радиоактивных изотопов ($T_{1/2} \geq 10 \text{ мин}$) с использованием ионных источников разного типа [17, 35].

Спектрометрическая аппаратура и обработка результатов измерений

Для исследования излучений короткоживущих ядер были разработаны соответствующая измерительная аппаратура и методы управления экспериментом и обработки данных на ЭВМ.

Как следует из свойств ядер, доступных в настоящее время для исследований на установке ЯСНАПП-1, основными источниками информации являются позитронные, γ - и рентгеновские излучения и конверсионные электроны. Спектры их излучений (энергии и интенсивности переходов), а также временные и угловые корреляции между ними необходимо измерять возможно скорее после разделения продуктов ядерных реакций по массам. Соответственно определяются основные требования к спектрометрической аппаратуре, аппаратуре для управления и контролю за ходом эксперимента и методике обработки результатов [36]. Необходимо обеспечить быструю транспортировку атомов радиоактивных ядер из фокальной плоскости масс-сепаратора к детекторам и использовать: 1) детекторы излучения с высоким разрешением и эффективностью, связанные с многоканальными анализирующими приборами; 2) многомерный анализ; 3) экспрессную обработку результатов в ходе эксперимента для контроля за ходом эксперимента с помощью промежуточных данных; 4) систему программ для окончательной обработки результатов на базовых ЭВМ ОИЯИ.

Транспортировка радиоактивных ядер из фокальной плоскости масс-сепаратора к детекторам осуществлялась таким образом: ленточной системой атомы одного выбранного изотопа транспортировались за 2—3 сек после масс-сепарации к детекторам [37], а остальные изотопы собирались на фольге, извлекаемой из масс-сепаратора через шлюз примерно за 30 сек.

Основными приборами для измерения характеристик излучений стали различные полупроводниковые детекторы (ППД). Для прецизионных измерений были разработаны различные спектрометрические электронные блоки: предусилители [38], усилитель, кодирующее устройство со схемой стабилизации, система для временных измерений с ППД [39]. Применение концепции униполярных спектрометрических импульсов позволило повысить скорость счета в экспериментах с Ge(Li)-детекторами до нескольких десятков тысяч за 1 сек без существенного ухудшения разрешения (не более чем на 10% при скоростях счета до 40 000 *имп/сек*). Разработка системы для получения «быстрых» временных сигналов от «медленных» ППД компенсаций фронта и изменением времени нарастания импульсов позволила найти хорошее временное разрешение при работе с ППД в широком динамическом диапазоне и при высоких загрузках [39]. Многомерный анализ (16 окон \times

$\times 256$ каналов, 8×512 и 4×1024) осуществлялся с помощью анализатора АИ-4096 и системы дигитальных окон [40].

Кроме того, проводились измерения двумерных совпадений на основе ЭВМ НР-2116 и анализатора АИ-4096. Информация в этом случае записывалась на магнитной ленте, окна устанавливались после эксперимента программой по положениям двумерного 4096 + 4096-канального поля памяти [41].

Для экспрессной обработки данных существует связь измерительного центра с ЭВМ «Минск-2», «Минск-22» и НР-2116 [40—42], при этом используется метод светового карандаша (см. рис. 2). Программа ЭПОС-1 позволяет в течение короткого времени эксперимента за несколько десятков секунд с достаточной точностью провести определение энергий и интенсивностей переходов, что существенно облегчает управление экспериментом [41, 43]. Для дальнейшей обработки могут служить программы ЭПОС-2 [43, 44] или КАТОК [45]. Окончательная обработка спектров производится с помощью программ СИМП-3 и ГАММА на ЭВМ СДС 1604А [46, 47] и с помощью программы ГАММА на ЭВМ БЭСМ-6 [46].

Использование ППД с высокой разрешающей способностью и применение модифицированной программы ГАММА позволяют определить энергии γ -квантов короткоживущих изотопов с погрешностью в несколько десятков электронвольт [48]. Программы, которые использовались для обработки спектров позитронов и конверсионных электронов, описаны в работе [46].

Классическая «of-line» методика спектрометрических исследований радиоактивных изотопов, применявшаяся в ЛЯП ОИЯИ с 1958 г., позволила накопить большой опыт при работе в созданной специально для этих исследований ядерно-спектроскопической и радиохимической лаборатории [3]. Поэтому при разработке программы исследований короткоживущих изотопов прежде всего оценивалась возможность использования имеющегося оборудования. Было признано целесообразным эти приборы и оборудование применять для изучения короткоживущих изотопов. Так, на большом магнитном альфа-спектрографе [49] проведены исследования короткоживущих изотопов Rn (до ^{206}Rn с $T_{1/2} = 6$ мин), на магнитных бета-спектрографах изучены спектры конверсионных электронов ^{165}Yb ($T_{1/2} = 10$ мин) и ^{160}Tm ($T_{1/2} = 9$ мин).

Для исследования короткоживущих изотопов применялись полупроводниковые гамма-, рентген- и бета-спектрометры, установки для измерения $\gamma - \gamma$ -совпадений, угловых корреляций и др. [42, 50, 51]. В 1972 г. был введен в эксплуатацию безжелезный тороидальный бета-спектрометр (типа «Апельсин») с уникальными характеристиками: разрешение — 1%, светосила — 20% или разрешение — 0,4%, светосила — 7% [52]. Использование этого прибора создает большие возможности в исследовании короткоживущих изотопов.

Специально был разработан и создан микрофотометр для автоматической обработки информации, получаемой на фотопластинках, экспонированных в бета-спектрографах [53]: разрабатывается автомат для просмотра фотопластинок от альфа-спектрографа, предусматривающий обработку полученной информации с помощью ЭВМ.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ И ПЕРЕХОДНЫХ ЯДЕР

Область ядер с $Z \approx 40$ и $N \approx 50$

В этой области был исследован распад следующих изотопов и изомеров: ^{77}Rb , $^{78g}, m\text{Rb}$, ^{85m}Sr , $^{83g}, m\text{Y}$, ^{84}Y , $^{85g}, m\text{Y}$, ^{86}Y , $^{87g}, m\text{Y}$, $^{87g}, m\text{Zr}$, $^{89g}, m\text{Zr}$, ^{96}Nb , $^{87g}, m\text{Nb}$, $^{88g}, m\text{Nb}$, $^{89g}, m\text{Nb}$, ^{90}Nb , ^{92}Ru (рис. 6). Все эти нуклиды получены при облучении соответствующими

Z	N							
	49	48	47	46	45	44	41	40
^{44}Ru		92 (3,16 мин)						
^{41}Nb	90 14,6 ч	89 1,18 ч* 1,9 ч	88 7,3 мин 14 мин	87 3,8 мин 2,6 мин	86 (1,4 мин)			
^{40}Zr	89 4,18 мин* 78,4 ч		87 14 сек* 94 мин					
^{39}Y		87 14 ч* 80 ч	86 14,6 ч	85 2,68 ч* 5 ч	84 39 мин	83 7,4 мин* 2,6 мин		
^{38}Zr			85 70 мин* 64 дн.					
^{37}Rb							78 6 мин* 19 мин	77 (3,9 мин)

Рис. 6. Диаграмма нуклидов с $Z \approx 40$ и $N \approx 50$.

щих мишеней (SrCl_2 , Y_2O_3 , $\text{Zr}_{\text{мет}}$, $\text{Nb}_{\text{мет}}$, $\text{Mo}_{\text{мет}}$, AgCl) высокоэнергетическими протонами. Во всех случаях, кроме Rb, разделение изотопов по массам не проводилось.

Для химически выделенных препаратов радиоактивных изотопов проводилось измерение γ -спектров, в некоторых случаях изме-

рялись спектры γ — γ -совпадений и спектр конверсионных электронов. Принадлежность γ -переходов к определенным изотопам определялась по скорости убывания их интенсивности и по генетической связи с материнскими и дочерними изотопами.

Результаты экспериментов. ^{77}Rb . Этот изотоп был открыт в 1972 г. Определены его период полураспада и полная энергия распада, обнаружено восемь γ -переходов, предложена схема распада [17, 54].

$^{78g}, ^m\text{Rb}$. Проведена идентификация основного и изомерного состояний [55], обнаружен изомерный переход [56].

$^{83g}, ^m\text{Y}$. Распад изомеров ^{83g}Y и ^{83m}Y изучен впервые. Найдено девять γ -переходов, следующих за распадом основного состояния, и три γ -перехода, возникающих при распаде изомерного состояния. Построена схема распада изомеров ^{83}Y : введено восемь возбужденных состояний ^{83}Sr , определены их спины и четности [57].

^{84}Y . Обнаружено 24 γ -перехода, из них 14 — впервые. Дополнена и уточнена схема распада, для большинства уровней предложены квантовые характеристики [58].

$^{85g}, ^m\text{Y}$, ^{85m}Sr . В γ -спектре изомера ^{85}Y с $T_{1/2} = 5$ ч, принятого за ^{85g}Y , найдено 30 γ -переходов, из них девять — впервые. При распаде ^{85m}Y обнаружено три γ -перехода. Построены схемы распада изомеров. Определены спины и четности возбужденных состояний ^{85m}Sr . Определено соотношение интенсивностей β -распада и изомерного перехода для ^{85m}Sr [59—61].

^{86}Y . Обнаружено более 80 γ -переходов, из них 50 — впервые. Построена схема распада. Предложены спины и четности возбужденных состояний ^{86}Y [62, 63].

$^{87g}, ^m\text{Y}$. Подтверждена и уточнена схема распада. Показано, что β -переход $^{87g}\text{Y} (1/2^-) \rightarrow ^{87m}\text{Sr} (1/2^-)$ имеет аномальное значение $\lg ft$ [64].

^{87}Zr . В спектре ^{87}Zr наблюдалось пятнадцать γ -переходов, большинство из них — впервые. Построена схема распада, определены спины и четности уровней ^{87}Y [65, 66].

^{89}Zr . Найдено шесть γ -переходов, предложена схема распада [66].

^{86}Nb . Этот изотоп открыт в 1973 г. Определен период полураспада, обнаружены два γ -перехода, предложена схема распада [62].

$^{87g}, ^m\text{Nb}$. Обнаружено несколько новых γ -переходов, предложена схема распада, определены спины и четности уровней [67].

$^{88g}, ^m\text{Nb}$. В γ -спектре ^{88}Nb наблюдалось 95 переходов, из них свыше 80 — впервые. Изучен распад основного состояния ^{88g}Nb . Построена схема распада его изомеров. Определены квантовые характеристики возбужденных состояний ^{88}Zr [12, 68].

$^{89g}, ^m\text{Nb}$. Найдено 75 γ -переходов, из них 30 — впервые. Определена граничная энергия позитронного спектра. Построена

схема распада изомеров ^{89}Nb . Определены спины и четности предложенных уровней [60, 61, 69, 70].

^{90}Nb . Уточнена и дополнена схема распада. Определены спины и четности уровней ^{90}Zr [60, 61, 71].

^{92}Ru . Этот изотоп был открыт в 1971 г. Определен его период полураспада, найдено три γ -перехода. Предложена схема распада, определены спины и четности уровней дочернего ^{92}Tc [22, 72].

Выводы. На основе полученных результатов, а также используя данные других авторов, касающиеся преимущественно спектрометрических исследований ядерных реакций, можно сделать некоторые общие заключения. Прежде всего следует заметить, что все рассмотренные ядра являются сферическими, следовательно, многие уровни их должны неплохо описываться моделью оболочек. Числа протонов и нейтронов во всех этих ядрах расположены между магическими — 28 и 50.

Изотопы с нечетным A. Свойства низких уровней в этих ядрах определяются положением нечетного нуклона (или дырки) на подоболочках $1g_{9/2}$, $2p_{1/2}$, $1f_{5/2}$ и $2p_{3/2}$ (рис. 7). Таким образом, возникают одночастичные уровни со спином и четностью $9/2^+$, $1/2^-$, $5/2^-$, $3/2^-$ [73] (рис. 8—10). Видно, что энергетическое расстояние между уровнями с $I^\pi = -1/2^-$ и $9/2^+$ для всех изотопов уменьшается с падением Z , а для изотопов с $N = 47$ и 45 оно становится даже отрицательным при $Z = 34$. Это связано с тем, что отношение энергий связи нейтрона на орбитах $g_{9/2}$ и $p_{1/2}$ возрастает с уменьшением Z . Расстояние между уровнями $3/2^-$ и $1/2^-$, наоборот, для всех изотопов и изотопов практически постоянное. Расстояние между уровнями $5/2^-$ и $1/2^-$ приблизительно постоянно для ядер с одинаковым числом нейтронов, но уменьшается с падением N при постоянном Z . Для $N = 45$ уровни $5/2^-$ лежат ниже уровней $3/2^-$ (рис. 11).

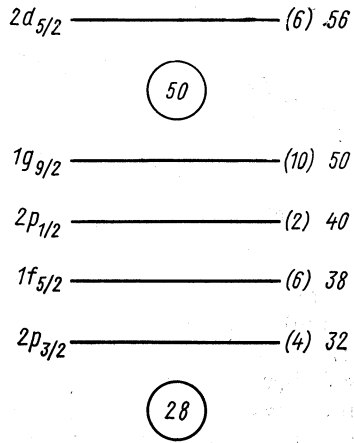
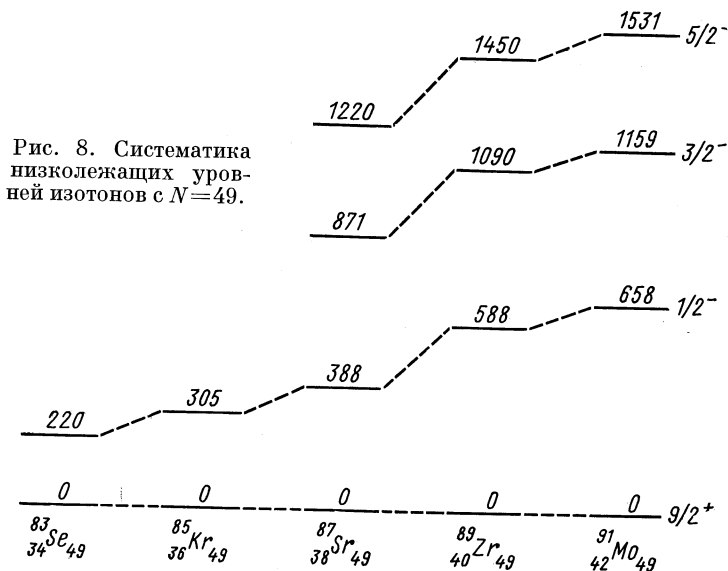


Рис. 7. Фрагмент схемы оболочек.

У изотопов с $N = 47$ появляется «аномальный» уровень с $I^\pi = 7/2^+$, который у изотопов с $N = 45$ становится основным состоянием. Его обычно интерпретируют как конфигурационное состояние типа $(g_{9/2})^2_{7/2^+}$ для $N = 47$ и $(g_{9/2})^2_{7/2^+}$ для $N = 45$ с сеньорити $\nu = 3$ и 5 . Не исключено, однако, что здесь имеется более сложное взаимодействие частиц (дырок) с фононами.

У ^{85}Sr и у изотонов с $N = 45$ появляется второй уровень с $I^\pi = 3/2^-$. Можно предположить, что доминирующая часть нейтронной конфигурации этих уровней имеет вид $(p_{3/2})^{-1} (p_{1/2})^{-2} (g_{9/2})^{10}$ для ^{85}Sr , $(p_{3/2})^{-1} (p_{1/2})^{-2} (g_{9/2})^8$ для $N = 45$.

Что касается более высоких уровней, то их интерпретация не так ясна и, по-видимому, не так проста. Некоторые состояния



можно объяснить на основе взаимодействия нечетного нейтрона (дырки) с возбужденным остовом (например, $2^+ (g_{9/2})^{2n+1}$). У ядер с $N = 47$ и 45 могут проявляться состояния с конфигурацией $(g_{9/2})^{-3} (\nu = 3)$ и $(g_{9/2})^5 (\nu = 5)$ соответственно. Некоторые состояния, отличающиеся от других низким значением $\lg ft$, можно интерпретировать как трехчастичные типа $\pi (g_{9/2})^{2n+1} \pi (p_{3/2})^{-1} \nu \times (p_{1/2})^{+1}$ или $\pi (p_{3/2})^{-1} \nu (p_{1/2})^{+1} \nu (g_{9/2})^{2n+1}$. Однако у некоторых ядер, например ^{89}Zr , было найдено столько уровней, что их все нельзя объяснить на основе указанных представлений.

Четно-четные ядра. Нижние уровни дважды магического ядра $^{90}\text{Zr}_{50}$ можно объяснить на основе модели оболочек как протонные двухчастичные с конфигурациями, указанными на рис. 12. Можно ожидать, что среди более высокоэнергетических уровней при распаде $^{90}\text{Nb}_{49}$ заселяются четырехчастичные состояния типа $\pi (g_{9/2})^1 \pi (p_{3/2})^{-1} \nu (g_{9/2})^{-1} \nu (p_{1/2})^{-1} \nu (d_{5/2})^2$ [71].

Представляет интерес сравнение схем возбужденных уровней $^{90}\text{Zr}_{50}$ и $^{88}\text{Zr}_{48}$. Так как оба ядра имеют одинаковое число протонов, можно было бы ожидать появление в ядре ^{88}Zr тех же

протонных состояний, что и в ^{90}Zr . Кроме того, вследствие наличия двух дырок в нейтронной оболочке $g_{9/2}$ можно ожидать аналогичную систему уровней нейтронной природы. Действительно, в ^{88}Zr , как и в ^{90}Zr , наблюдается полоса состояний с $I^\pi = 0^+, 2^+$,

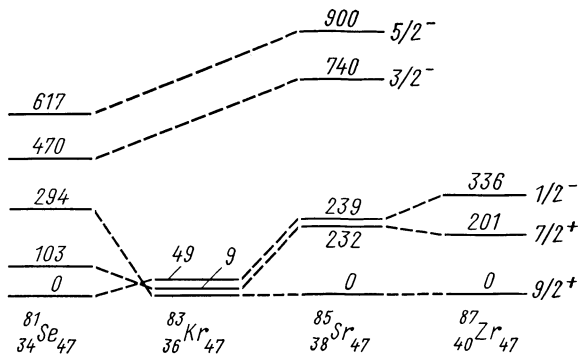


Рис. 9. Систематика низколежащих уровней изотонов с $N=47$.

4^+ , 6^+ и 8^+ . Однако эти уровни хорошо возбуждаются в (p, t) -реакции и также отчетливо проявляются у изотопа $^{88}\text{Sr}_{48}$, где должны возникать прежде всего нейтронные состояния. Поэтому их необходимо интерпретировать как нейтронные двухдырочные.

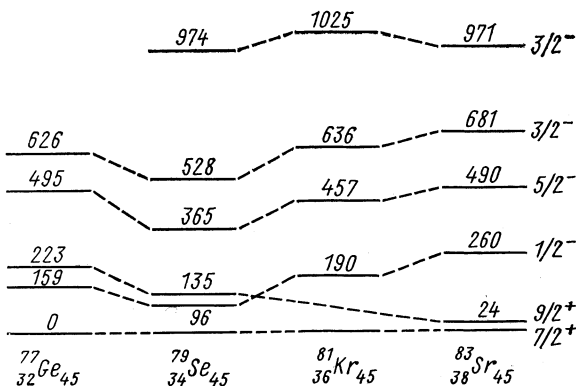


Рис. 10. Систематика низколежащих уровней изотонов с $N=45$.

Правда, у ^{88}Zr наблюдается еще второй уровень с $I^\pi = 2^+$ (1818 кэв) и $I^\pi = 8^+, 9^+$ (3390 кэв), но члены с $I^\pi = 4^+, 6^+$ возможной полосы отсутствуют. Кроме того, разрядка уровня 2^+ происходит, как обычно для вибрационных двухфононных состояний сферических ядер. Поэтому можно сделать заключение, что у ^{88}Zr или не существует полоса протонных состояний, наблюдаемая в ядре ^{90}Zr , или вероятность ее возбуждения при распаде ^{88}Nb много меньше.

В ядре ^{88}Zr наблюдаются также два состояния с $I^\pi = 3^-$ (2456 и 3032 кэВ). Состояние 3_1^- , вероятно коллективное, окту-

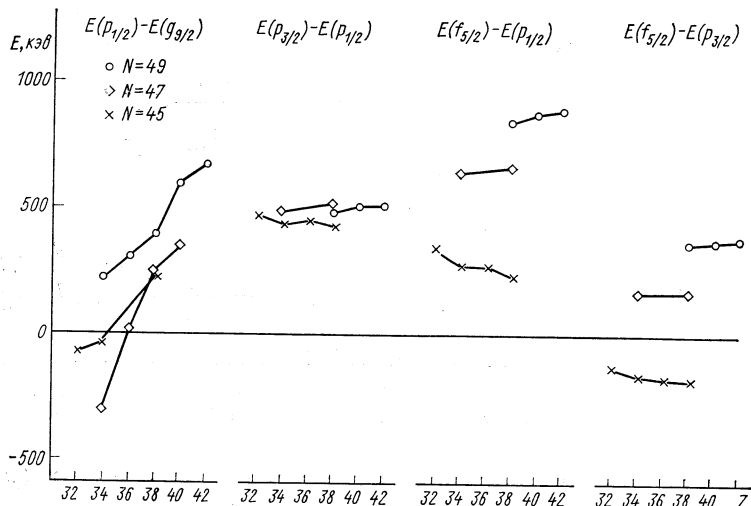


Рис. 11. Энергетические расстояния некоторых состояний изотопов с $N = 49, 47$ и 45 .

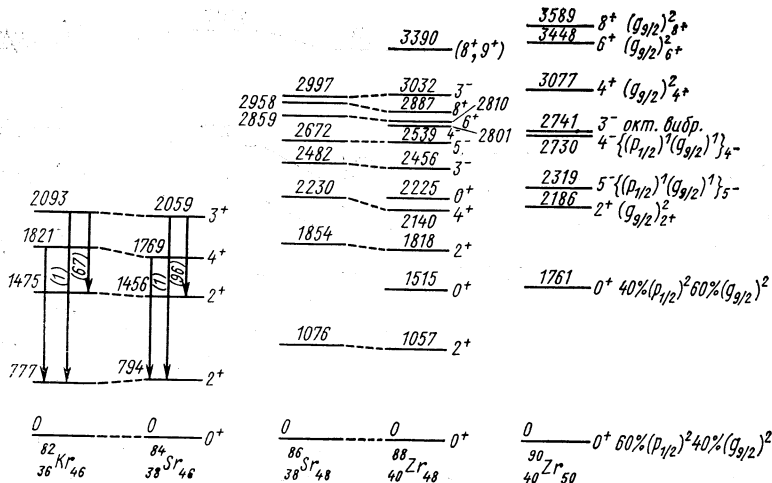


Рис. 12. Низколежащие уровни некоторых четно-четных ядер.

польно-вибрационное, его распад идет преимущественно на ви-
брационный уровень 2_2^+ , состояние 3_2^- — частичное, оно рас-
дается на нейтронный уровень 2_1^+ .

У ядра ${}_{38}^{84}\text{Sr}$ также наблюдается полоса нейтронных уровней с $I^\pi = 2^+, 4^+, 6^+, 8^+$ (на рис. 12 показаны лишь уровни 2^+ и 4^+). Существует уровень 2_2^+ (1456 кэв) с признаками двухфоонных вибрационных состояний. Наблюдается, как и у изотона ${}_{36}^{82}\text{Kr}_{46}$, уровень 3^+ , который распадается преимущественно на уровень 2_2^+ (в скобках у переходов указаны вероятности распада). Такой способ распада находится в согласии с предположением, что уровень 3^+ принадлежит к квазивращательной полосе, основанной на уровне 2_2^+ . Все эти факты позволяют сделать общий вывод, что при уменьшении числа нейтронов от магического $N = 50$ (или подоболочки $g_{9/2}$) возрастает роль коллективных эффектов.

Нечетно-нечетные ядра. Исследование нечетно-нечетных ядер важно с точки зрения изучения остаточного взаимодействия протон — нейтрон, так как большая часть уровней здесь возникает вследствие взаимодействия нечетного протона с нечетным нейтроном.

${}_{43}^{93}\text{Tc}_{49}$. Изучены уровни этого ядра, возбуждающиеся при распаде открытого нами изотопа ${}^{92}\text{Ru}$. Выявляется аналогия с изотопом ${}_{41}^{90}\text{Nb}_{49}$.

${}_{39}^{86}\text{Y}_{47}$, ${}_{39}^{84}\text{Y}_{45}$. Основной 4^- и изомерный уровни ядра ${}^{86}\text{Y}$ возникают при взаимодействии нейтрона $g_{9/2}$ с протоном, расположенным на орбите $p_{1/2}$ и $g_{9/2}$ соответственно. В соседних нечетных

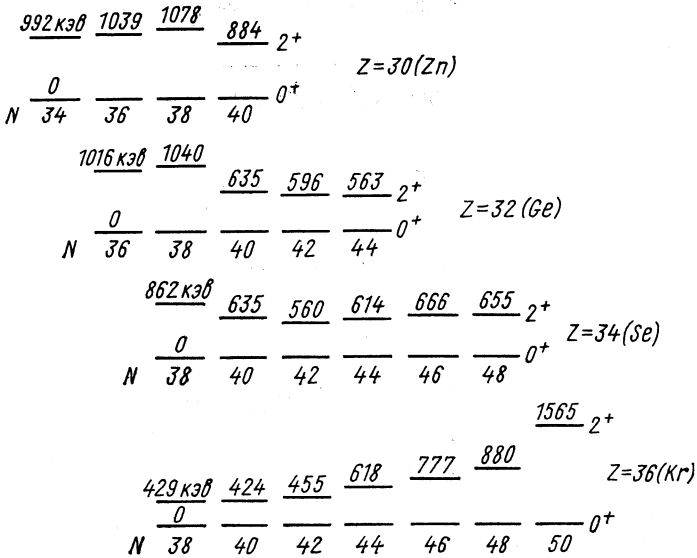


Рис. 13. Зависимость положения уровней 2_1^+ от N для $Z = 30 \div 36$.

изотопах $^{85}_{39}\text{Y}_{46}$ и $^{87}_{38}\text{Y}_{48}$ основное состояние также определяется расположением протона на орбите $p_{1/2}$, а изомерное — на орби-

$$\begin{array}{cccccc} \underline{614\text{кэВ}} & \underline{666} & \underline{777} & \underline{795} & \underline{751} & 2^+ \\ \underline{0} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & 0^+ \\ {}_{32}\text{Ge} & {}_{34}\text{Se} & {}_{36}\text{Kr} & {}_{38}\text{Sr} & {}_{40}\text{Zr} & \end{array} \quad N=46$$

$$\begin{array}{cccccc} \underline{655\text{кэВ}} & \underline{880} & \underline{1078} & \underline{1056} & \underline{948} & 2^+ \\ \underline{0} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & 0^+ \\ {}_{34}\text{Se} & {}_{36}\text{Kr} & {}_{38}\text{Sr} & {}_{40}\text{Zr} & {}_{42}\text{Mo} & \end{array} \quad N=48$$

$$\begin{array}{cccccc} & & \underline{1836} & \underline{2180} & & \\ \underline{1665\text{кэВ}} & & & & \underline{1540} & \underline{1428} & 2^+ \end{array}$$

$$\begin{array}{cccccc} \underline{0} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & 0^+ \\ {}_{36}\text{Kr} & {}_{38}\text{Sr} & {}_{40}\text{Zr} & {}_{42}\text{Mo} & {}_{44}\text{Ru} & \end{array} \quad N=50$$

$$\begin{array}{cccccc} \underline{831\text{кэВ}} & \underline{934} & \underline{871} & \underline{833} & & 2^+ \\ \underline{0} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & 0^+ \\ {}_{38}\text{Sr} & {}_{40}\text{Zr} & {}_{42}\text{Mo} & {}_{44}\text{Ru} & & \end{array} \quad N=52$$

$$\begin{array}{cccccc} \underline{815\text{кэВ}} & \underline{920} & \underline{778} & \underline{660} & & 2^+ \\ \underline{0} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & 0^+ \\ {}_{38}\text{Sr} & {}_{40}\text{Zr} & {}_{42}\text{Mo} & {}_{44}\text{Ru} & & \end{array} \quad N=54$$

$$\begin{array}{cccccc} & & \underline{1730} & & & \\ \underline{835\text{кэВ}} & & & \underline{787} & \underline{540} & \underline{558} & 2^+ \\ \underline{0} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & 0^+ \\ {}_{38}\text{Sr} & {}_{40}\text{Zr} & {}_{42}\text{Mo} & {}_{44}\text{Ru} & {}_{46}\text{Pd} & & N=56 \end{array}$$

Рис. 14. Зависимость положения уровней 2^+_{11} от Z для $N = 46 \div 56$.

те $g_{9/2}$. В ядре $^{83}_{39}\text{Y}_{44}$ эта последовательность, по-видимому, нарушается (см. рис. 9). Кроме того, основные состояния ядер с $N = 45$

и четным Z имеют $I^\pi = 7/2^+$. Таким образом, для ${}^{84}_{39}\text{Y}_{45}$ в основном состоянии следует ожидать по правилам Бреннана-Бернштейна, обобщенным Л. К. Пекером, значение $I^\pi = 7^+$. Это согласуется с тем, что при распаде ${}^{84}\text{Y}$ заселяется уровень 6^+ (2808 кэв) в ${}^{84}\text{Sr}$.

О магичности числа $Z = 40$. Установление магичности какого-либо числа нейтронов или протонов имеет большое значение. В таком случае более высокие орбиты отделены большой энергетической щелью. Вследствие этого волновые функции сравнительно чисты и примесями высших орбит можно в первом приближении пренебречь. Такие ядра вместе с соседними, отличающимися одним нуклоном, хорошо поддаются теоретическому анализу. Представляет интерес рассмотреть вопрос о магичности числа 40, т. е. числа частиц, когда заполнены все подоболочки, включая $2p_{1/2}$.

Из нескольких признаков проявления магичности проанализируем один — положение уровня 2^+_1 в четно-четных ядрах. Известно, что у магических ядер уровень 2^+_1 находится значительно выше, чем у соседних ядер.

Из проведенной систематики (рис. 13) вытекает, что $N = 40$ не является магическим. Что касается $Z = 40$, то оно явно магическое для $N = 50$ (${}^{90}_{40}\text{Zr}_{50}$) и также для $N = 56$ (${}^{96}_{40}\text{Zr}_{56}$), но не для других N (рис. 14). Иными словами — его магичность является функцией от N . Оно становится магическим, когда нейтроны полностью заполняют оболочку и даже подоболочку, но когда нейтронная оболочка (подоболочка) заполнена неполностью, его магичность исчезает. Можно ожидать поэтому, что $Z = 40$ будет магическим также для $N = 40$ (${}^{80}_{40}\text{Zr}_{40}$).

Результаты исследований в области нейтронодефицитных изотопов с $Z > 50$, $N \leq 82$

Исследование свойств ядер, близких к магическим с $N = 82$, представляет специальный интерес, во-первых, с точки зрения обнаружения у них уровней коллективной природы и, во-вторых, с точки зрения экспериментальной проверки некоторых следствий «полумикроскопического» описания свойств таких ядер, которые удается провести в силу замкнутости их нейтронной системы.

Особый интерес к сильно нейтронодефицитным ядрам Ва, Сs, La, Pr возник благодаря экспериментам, открывшим существование «новой» области деформации в районе $Z \sim 56$, $N \sim 70$. В теоретических расчетах многих групп это обстоятельство качественно подтвердилось, хотя количественное объяснение свойств таких ядер пока неудовлетворительное. Поэтому нами проводились эксперименты по изучению β -распада короткоживущих ядер Ва, Pr и Nd для дополнения экспериментального материала, полу-

ченного в основном методом «in beam» спектроскопии на пучках тяжелых ионов. Наши исследования проводились в три этапа: первый заключается в идентификации новых короткоживущих нуклидов; второй — в измерении их характеристик для разработки предварительной схемы распада; третий — в детальном исследовании структуры возбужденных состояний на основе разработанной схемы.

Экспериментальные результаты (рис. 15). Распад $^{145}\text{Gd} \rightarrow ^{145}\text{Eu}$. Показано [74], что квантовые характеристики состояния ^{145}Gd с $T_{1/2} = 23 \pm 1$ мин есть $1/2^+$ ($s_{1/2}$), а не $3/2^+$ ($d_{3/2}$), как считалось ранее. Предлагается схема возбужденных уровней полумагического ядра $^{145}\text{Eu}_{82}$. Среди них наиболее сильно заселяются состояния с энергией 1758 и 1881 кэв с $I^\pi = 1/2^+$ или $3/2^+$ ($lg ft = 5,7$).

Распад $^{144}\text{Gd} \rightarrow ^{144}\text{Eu}$. Идентифицирован новый изотоп ^{144}Gd ($4,9 \pm 0,4$ мин) [74]. Определена полная энергия распада $Q_\beta = 4320 \pm 400$ кэв. Интенсивных γ -переходов, сопровождающих распад ^{144}Gd , не обнаружено.

Распад $^{142}\text{Pm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$. Существенно уточнен период полураспада ^{142}Pm ($40,5 \pm 0,5$ сек) [75], предлагается его схема распада. Некоторым уровням полумагического ядра $^{142}\text{Nd}_{82}$ впервые приспаны квантовые характеристики. В частности, по аналогии с ядром ^{140}Ce [81, 82] можно предполагать в ^{142}Nd второй возбужденный уровень 0^+ при энергии 2921 кэв [76].

Распад $^{141g, m}\text{Sm} \rightarrow ^{141}\text{Pm}$. Нуклид ^{141}Sm (21 ± 2 мин) был открыт в 1966 г. [77]. Показано, что период $22,5 \pm 0,5$ мин относится к изомеру ^{141m}Sm с $I^\pi = 11/2^-$, основное же состояние с $I^\pi = 3/2^+$ имеет период 11 ± 1 мин [75]. Предложена схема распада. Кроме состояний с $I^\pi = 5/2^+$ ($d_{5/2}$), $7/2^+$ ($g_{7/2}$), $11/2^-$ в $^{141}\text{Pm}_{80}$ заметно возбуждается трехквaziчастичный уровень из мультиплета $p(d_{5/2})^{-1}n_1(d_{3/2})^{-1}n_2(h_{11/2})^{-1}$. Такой же уровень известен и в ядре — изотоне $^{139}\text{Pr}_{80}$ [84]. Дальнейшие наши исследования уровней ^{141}Pm методом задержанных совпадений и угловых γ — γ -корреляций [78] позволили проанализировать природу некоторых из них. Обнаружен изомерный характер состояния 629 кэв ($11/2^-$). Свойства перехода 196,5 кэв характерны для переходов типа $g_{7/2} \rightleftharpoons d_{5/2}$.

Распад $^{140}\text{Sm} \rightarrow ^{140}\text{Pm} \rightarrow ^{140}\text{Nd}$. Нуклид ^{140}Sm открыт в 1966 г. [77]. Его период полураспада по более поздним данным равен $14,0 \pm 0,5$ мин [75]. Показано, что при распаде ^{140}Sm преимущественно заселяется основное состояние ^{140}Pm с $I^\pi = 1^+$, $T_{1/2} = 9,2$ сек. Изомеру ^{140}Pm с $T_{1/2} = 5,8$ мин приспаны характеристики 8⁻. Установлена энергия распада ^{140g}Pm : $Q_\beta = 5900 \pm 400$ кэв.

Распад $^{141g, m}\text{Nd} \rightarrow ^{141}\text{Pr}$, всесторонне изучен в работе [79]. Введены в схему распада новые уровни 1434,7 и 1456,1 кэв. Установление мультипольностей у ряда γ -переходов позволило опреде-

N	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67
64Gd				145 23 мин	144 6,9 мин													
63Eu			145 5,9 дн 10 сек															
62Sm						141 140 142,5 мин 140 мин	140 140 мин											
61Pm				142 40,5 сек	141 22 мин	140 8 мин*												
60Nd			142 Стаб.	141 63 сек*	140 3,37 дн.	139 5,53 дн	138 5,24 дн	137 7,36 дн	136 5,50 мин	135 5,50 мин	134 5,50 мин							
59Pr			141 Стаб.	140 3,39 мин	139 4,42 дн	138 2,18 дн*	137 76,8 мин	136 12,9 мин	135 27 мин	134 11 мин	133 5,50 мин	132 1,6 мин						
58Ce			140 Стаб.	139 140 дн	138 Стаб.	137 34,44*	136 Стаб.	135 17,24 дн	134 724 дн	133 6,34 дн	132 4,24 дн			129 5,50 мин	128 5,50 мин			
57La			139 Стаб.		137 6-10 лет								129 10 мин	128 4,4 мин				
56Ba	140 12,8 дн											129 2,64 дн	128 2,4 дн	127 13 мин	126 9,7 мин	125 6 мин	124 12 мин	123 2,7 мин
55Cs											129 324 дн	128 3,8 мин	127 6,24 дн	126 1,6 мин	125 45 мин	124 26,5 сек	123 8 мин	
54Xe											128 Стаб.		126 Стаб.		124 Стаб.			

Рис. 15. Диаграмма нуклидов: Z = 54 ÷ 64, N = 70 ÷ 83.

лить квантовые характеристики уровней 1126,9, $3/2^+$; 1292,6, $5/2^+$; 1298,6 *кэв*, $1/2^+$. Состояниям 1434,7, 1451 и 1456,1 *кэв* приписаны характеристики $I^\pi = 3/2^+$, $7/2^+$ и $5/2^+$ соответственно.

Цепочка распада $^{140}\text{Nd} \rightarrow ^{140}\text{Pr} \rightarrow ^{140}\text{Ce} \leftarrow ^{140}\text{La} \leftarrow ^{140}\text{Ba}$. Определена энергия распада ^{140}Nd [80]. Предложена схема уровней полумагического ядра $^{140}_{58}\text{Ce}_{82}$, возбуждаемых при распаде ^{140}Pr и ^{140}La [81, 82]. В схему впервые введены уровни 2108,10, 6^+ ; 2533,4, 1^+ или 2^+ ; 3016,9 *кэв* (0^+). Уточнены квантовые характеристики некоторых состояний. Внесены уточнения в схему распада $^{140}\text{Ba} \rightarrow ^{140}\text{La}$ [82, 83].

Распад $^{139g, m}\text{Nd} \rightarrow ^{139}\text{Pr} \rightarrow ^{139}\text{Ce} \rightarrow ^{139}\text{La}$. Определена энергия распада $^{139}\text{Nd} \rightarrow ^{139}\text{Pr}$ [84]. Впервые установлены типы мультипольностей многих γ -переходов ^{139}Nd , что позволило надежно установить квантовые характеристики ряда уровней ^{139}Pr . Показано, что изомер ^{139m}Nd лишь в 14,7% случаев распадается $M4$ -переходом, а в остальных 85,3% — $\varepsilon + \beta^+$ -распадом. Уточнена энергия распада $^{139}\text{Pr} \rightarrow ^{139}\text{Ce}$ [85]. Установлены интенсивности γ -квантов в % на распад, что позволило с большой точностью выполнить баланс интенсивностей переходов ^{139}Pr и сделать заключения о квантовых характеристиках уровней ^{139}Ce . Уточнена энергия распада $^{139}\text{Ce} \rightarrow ^{139}\text{La}$ [85].

Цепочка распада $^{138}\text{Nd} \rightarrow ^{138g, m}\text{Pr} \rightarrow ^{138}\text{Ce}$. Нуклиды ^{138}Nd и ^{138}Pr ($T_{1/2} = 1,5$ мин) были открыты ранее [86, 87]. Впервые предложена схема распада $^{138}\text{Nd} \rightarrow ^{138}\text{Pr}$ [88]. Показано, что при распаде ^{138}Nd имеет место возбуждение нескольких уровней с $I^\pi = 1^+$. Схемы распада $^{138g, m}\text{Pr}$ дополнены многими новыми уровнями ^{138}Ce . Ряду уровней впервые приписаны квантовые характеристики [88, 89].

Распад $^{137}\text{Nd} \rightarrow ^{137}\text{Pr} \rightarrow ^{137}\text{Ce} \rightarrow ^{137}\text{La}$. Нуклид ^{137}Nd был открыт в 1965 г. [90]. Значение его периода полураспада $38,5 \pm \pm 1,5$ мин [91, 92]. Впервые предложена схема распада $^{137}\text{Nd} \rightarrow ^{137}\text{Pr}$, в которую введено 37 новых уровней. Измерены времена жизни состояний $75,4$ ($T_{1/2} = 0,38 \pm 0,03$ нсек) и $306,4$ *кэв* ($0,5 \pm 0,2$ нсек). Существенно дополнена схема распада $^{137}\text{Pr} \rightarrow ^{137}\text{Ce}$ [93], установлены типы мультипольностей ряда γ -переходов. В схему уровней ^{137}Ce введено десять ранее неизвестных состояний. Измерено время жизни состояния $160,3$ *кэв* ($T_{1/2} = 0,79 \pm 0,14$ нсек). Показано, что при распаде ^{137}Ce ($Q_\beta = 1455 \pm 30$ *кэв*, $I^\pi = 11/2^-$) β -переход на уровень $11/2^-$, 1004 *кэв* ^{137}La сильно заторможен ($\lg ft = 7,3$) [94].

Цепочка распада $^{136}\text{Nd} \rightarrow ^{136}\text{Pr} \rightarrow ^{136}\text{Ce}$. Нуклид ^{136}Nd ($T_{1/2} = 55$ мин) открыт нами в 1968 г. [95]. Последующие исследования γ -квантов, электронов внутренней конверсии и позитронного распада привели к установлению его схемы распада [96]. Как и в случае ^{138}Nd , при распаде ^{136}Nd возбуждается ряд уровней с $I^\pi = 1^+$. Установлены квантовые характеристики

$I^\pi = 2^+$ у состояния ^{136}Pr с $T_{1/2} = 13$ мин. Показано, что в реакциях глубокого расщепления Ta, Er и Gd, а также в реакциях с тяжелыми ионами не возбуждается изомер ^{136}Pr с $T_{1/2} \approx 1$ ч [129], если он существует. Схема распада $^{136}\text{Pr} \rightarrow ^{136}\text{Ce}$ была дополнена рядом новых уровней. В частности, впервые были введены в рассмотрение полоса основного состояния $0, 0^+, 552 2^+, 1313 4^+$ и полоса $1092 2^+, 1553$ кэв 3^+ .

Цепочка распада $^{135}\text{Nd} \rightarrow ^{135}\text{Pr} \rightarrow ^{135}\text{Ce}$. Нуклид ^{135}Nd был идентифицирован вначале радиохимическим путем по генетической связи изобаров [97]. Исследования с масс-сепарированными источниками дали значение $T_{1/2} = 15$ мин. Обнаружено более 40 γ -переходов. Была построена его схема распада. Из сравнения с результатами, полученными в работах [98, 99], можно сделать вывод о том, что наблюдаемый β -распад происходит из состояния ^{135}Nd с $I^\pi = 9/2^-$. Распад $^{135}\text{Pr} \rightarrow ^{135}\text{Ce}$ исследован детально. В частности, были измерены времена жизни некоторых возбужденных состояний. Предложена схема распада [100].

Цепочка распада $^{134}\text{Nd} \rightarrow ^{134}\text{Pr} \rightarrow ^{134}\text{Ce}$. Нуклид ^{134}Nd ($T_{1/2} = 8,5$ мин) был открыт в работе [97]. Значение периода полураспада было подтверждено в более поздних измерениях масс-сепарированных источников. Результаты измерения γ -спектра в настоящее время не позволяют построить схему распада. Распад ^{134m}Pr ($T_{1/2} = 11$ мин) и ^{134g}Pr ($T_{1/2} = 17$ мин) исследовался в работе [101]. Идентифицировано новое изомерное состояние ^{134m}Pr с $T_{1/2} = 11$ мин. На основе измерений γ -спектров и спектров $\gamma - \gamma$ -совпадений была построена схема распада $^{134}\text{Pr} \rightarrow ^{134}\text{Ce}$.

Распад $^{133}\text{Pr} \rightarrow ^{133}\text{Ce}$. Нуклид ^{133}Pr был открыт в работе [97] и более детально исследован в работе [102]. Период полураспада составляет 6,5 мин. Предложена схема распада.

Распад $^{132}\text{Pr} \rightarrow ^{132}\text{Ce}$. Нуклид ^{132}Pr был открыт недавно [103]. Его период полураспада равняется 1,6 мин. Детальные исследования не проводились.

Распад ^{129}Ce и ^{128}Ce . Эти нуклиды были открыты в 1969 г. [104]. Их периоды полураспада составляют 3,5 и 5,5 мин соответственно. Идентификация проводилась радиохимическим методом по генетической связи изобаров. Детальные исследования пока не проводились.

Распад $^{129}\text{Ba} \rightarrow ^{129}\text{Cs}$ изучался с целью дополнения систематики вероятностей переходов типа $5/2^+ \rightleftharpoons 1/2^+$ в нечетных изотопах Cs (рис. 16). Измерено время жизни первого возбужденного состояния в ядре ^{129}Cs $E_{\text{ур}} = 6,545$ кэв, $T_{1/2} = 72$ нсек [105].

Цепочки распада $^{127}\text{Ba} \rightarrow ^{127}\text{Cs}$; $^{125}\text{Ba} \rightarrow ^{125}\text{Cs}$; $^{123}\text{Ba} \rightarrow ^{123}\text{Cs}$. Схемы распада нечетных изотопов Ba были изучены с целью исследования распада изомерных состояний в ядрах ^{127}Ba и ^{125}Ba , которые были обнаружены в работе [121] и интерпретированы ее авторами как состояние с отрицательной деформацией. Кроме

того, проводились систематические исследования вероятностей переходов типа $5/2^+ \rightleftharpoons 1/2^+$ в нечетных ядрах Cs. Результаты работ [106—109] не подтвердили выводов, сделанных в работах [121, 110] (см. обсуждение ниже).

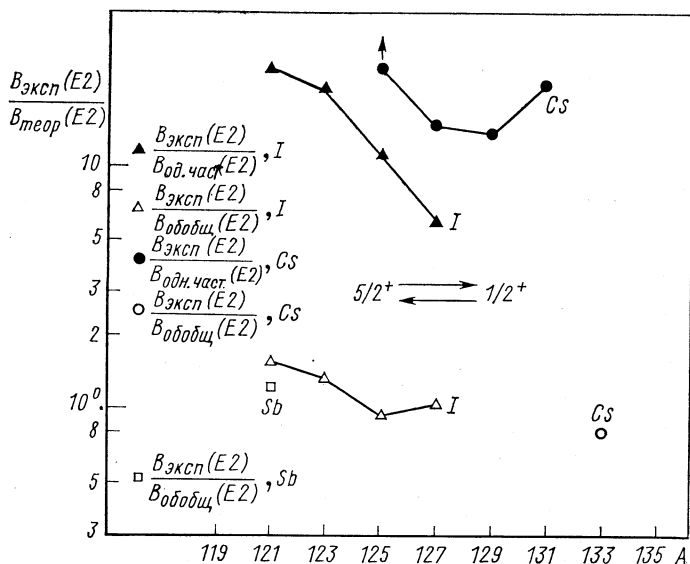


Рис. 16. Сравнение приведенных вероятностей $E2$ -переходов типа $5/2^+ \rightleftharpoons 1/2^+$ в нечетных ядрах Sb, I и Cs с одночастичными оценками и с расчетами на основе модели слабой связи [113].

Распад четных изотопов $^{128}, ^{126}, ^{124}\text{Ba}$. Проводились исследования распада этих изотопов в соответствующие по массам изотопы Cs и Xe [111, 112]. Измерена энергия позитронного распада ^{126}Ba и ^{128}Ba , предложены схемы распада этих изотопов Ba.

Общие выводы и обсуждение. Ядра с нечетным A . Систематика низкоэнергетических состояний ядер с $Z = 51 \div 59$; $N_{\text{четн}} \leq 82$ дана на рис. 17—20. Были учтены как экспериментальные результаты, полученные с помощью установки ЯСНАПП, так и результаты других работ. Анализ свойств ядер в этой области Z и N позволяет сделать следующие общие выводы:

1. Около магического $N = 82$ плотность уровней в диапазоне энергии ≤ 1 Мэв низкая; наблюдаемые квантовые характеристики уровней ($I^\pi = 7/2^+, 5/2^+, 3/2^+, 1/2^+, 11/2^-$) соответствуют состояниям нечетного протона, которые следовало ожидать по схеме Майер для $Z = 50 \div 82$. Наблюдаемые высокие значения спектроскопических факторов в реакциях передачи или подхвата

E, КэВ

1000

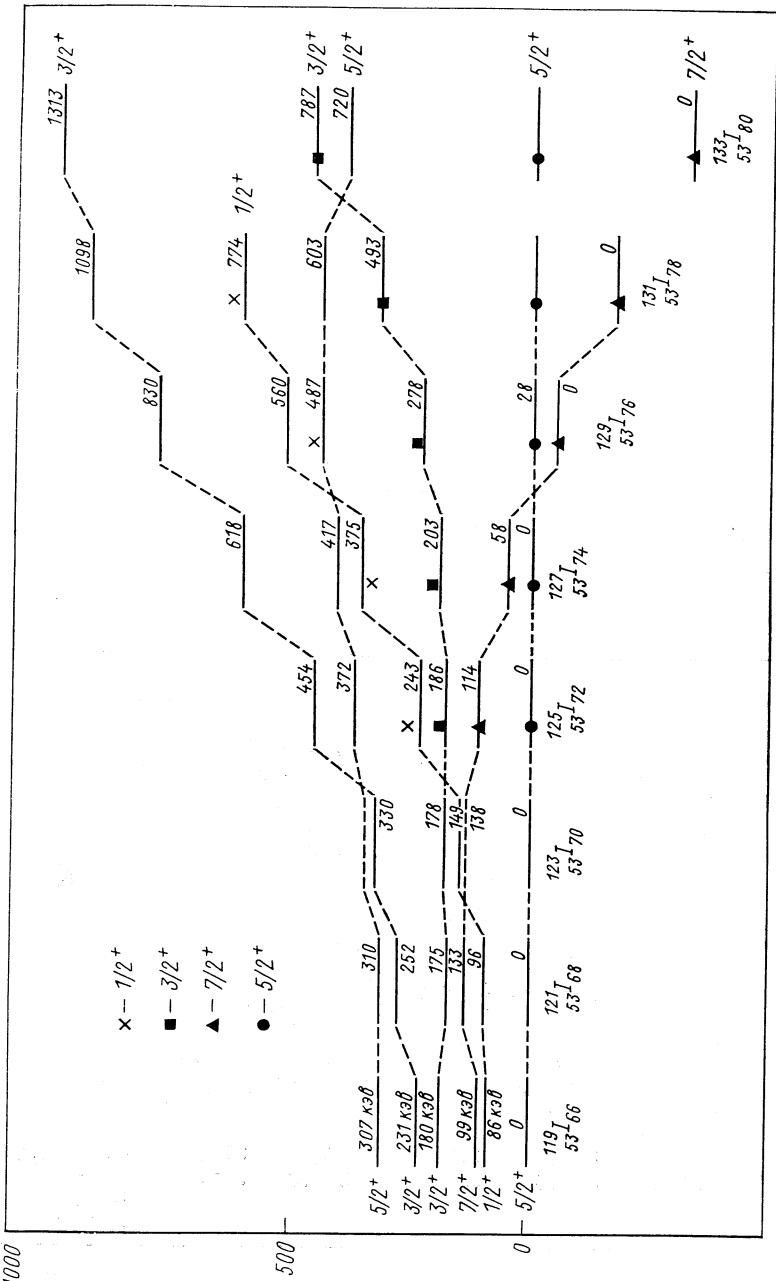


Рис. 17. Систематика низкоэнергетических состояний в четных ядрах йода (кроме экспериментальных уровней показаны также расчетные из работы [114]).

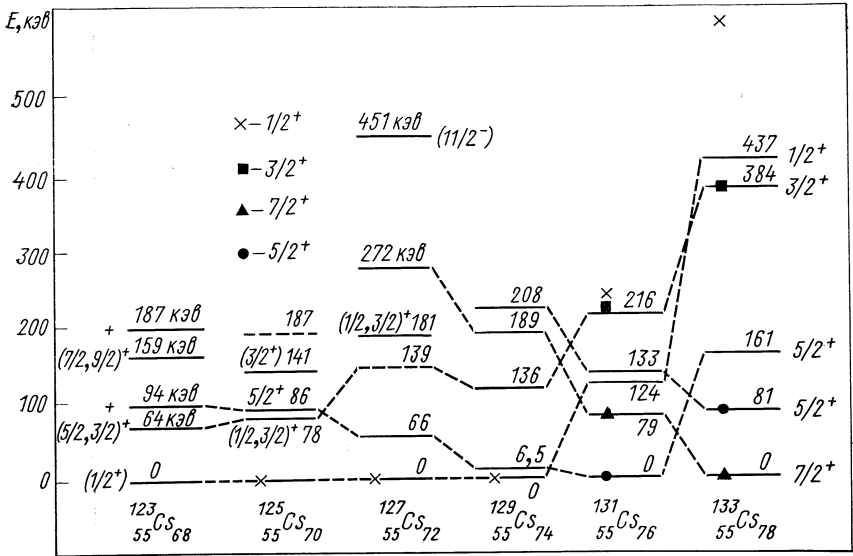


Рис. 18. Систематика низкоэнергетических состояний в нечетных ядрах Cs.

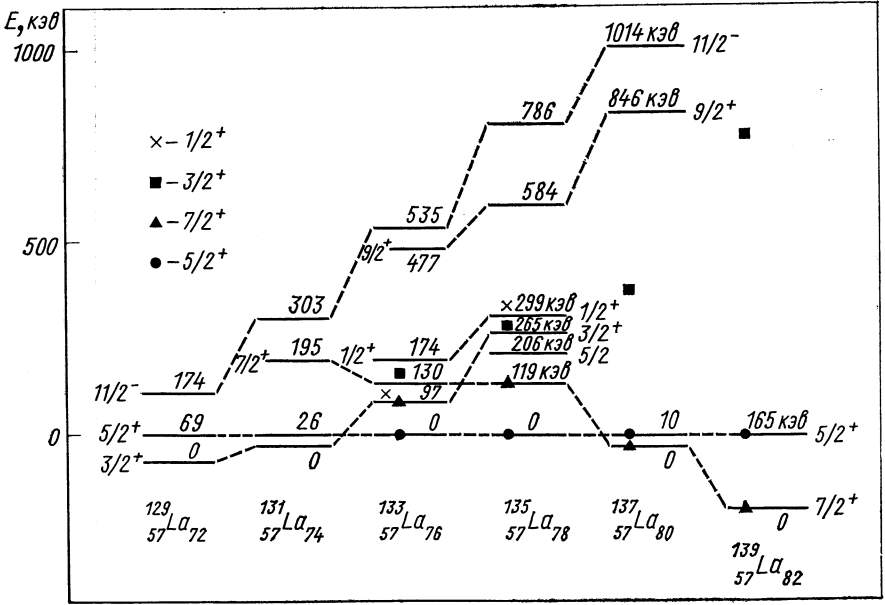


Рис. 19. Систематика низкоэнергетических уровней в нечетных ядрах La.

нуклона и приведенные вероятности γ -переходов между этими состояниями указывают на одночастичную природу отмеченных уровней.

2. По мере удаления от магического числа $N = 82$ наблюдается сильное опускание уровней с $I^\pi = 3/2^+, 1/2^+$ и $11/2^-$, которое особенно характерно в ядрах Pr, La и Cs. В изотопах $^{125-129}\text{Cs}$, $^{129-131}\text{La}$ и ^{135}Pr уровни с $I^\pi = 1/2^+, 3/2^+$ являются основными состояниями.

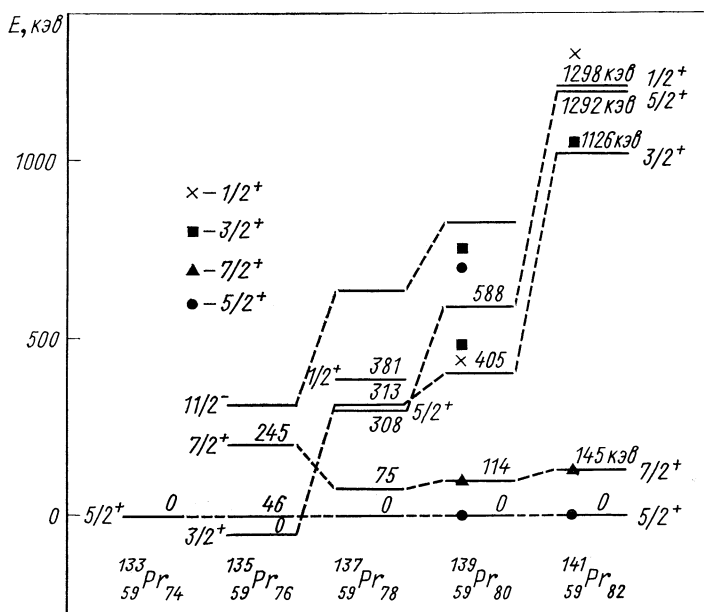


Рис. 20. Систематика низкоэнергетических состояний в нечетных ядрах Pr.

3. В некоторых ядрах Pr, Cs и особенно I систематически появляется второй уровень с $I^\pi = 5/2^+$ при энергии в несколько сот килоэлектронвольт.

4. В некоторых изотопах Sb, I и Cs регулярно наблюдаются ускоренные $E2$ -переходы, например между уровнями с $I^\pi = 5/2^+ \rightleftharpoons 1/2^+$ (см. рис. 16).

5. В изотопах I, La и Pr систематически появляются при энергиях 500—1000 кэВ состояния с большими значениями спина (например, $I^\pi = 9/2^+, 11/2^+$).

Четно-четные ядра. Имеется несколько случаев отступления от предсказаний простой вибрационной модели. Например, при распаде ^{136}Pr (2^+) скорость β -перехода на уровень 2^+_{2} , 1092 кэВ

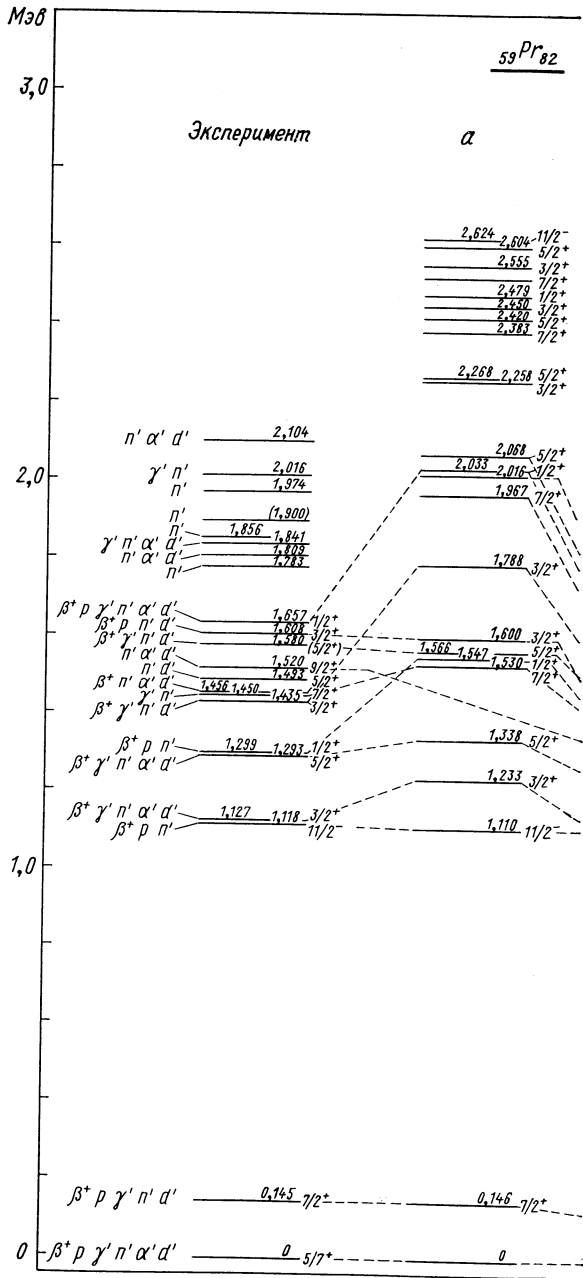
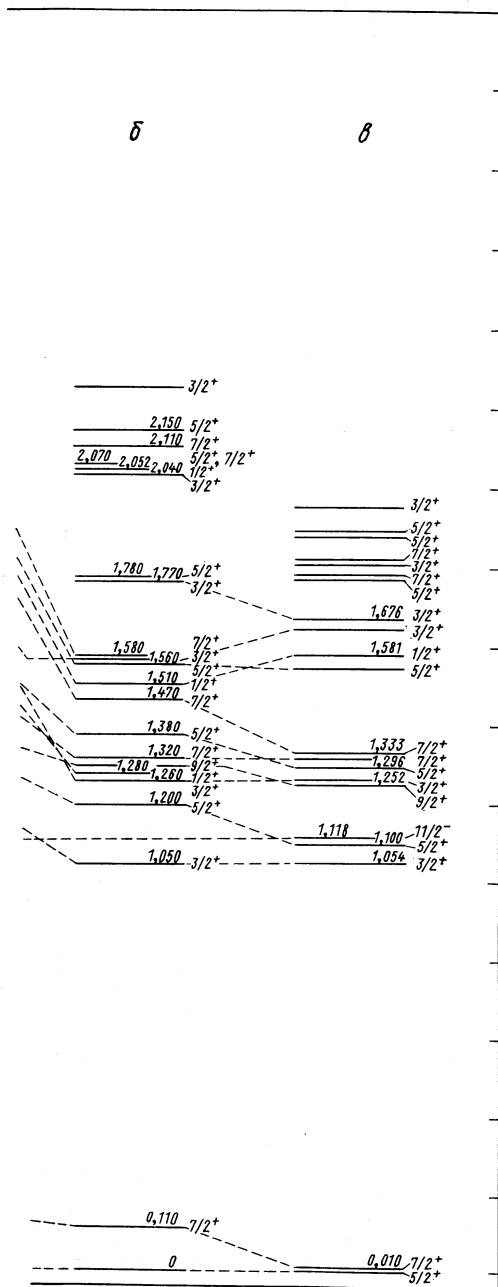


Рис. 21. Сравнение спектра возбуждения ^{141}Pr , наблюдаемого в различных реакциях и при β^+ -распаде, с теоретическими расчетами [113, 123, 124]: для каждого уровня указаны методы его возбуждения: β^+ -распад ^{141}Nd , d' -неупругое рассеяние дейтронов; α' -частиц, n' -нейтронов; γ' -квантов или в реакциях передачи и подхвата протона p ; α — в расчетах Вароке и Хайда [113]; β — Вилденталля [123]; γ — Фрида и Милеса [124]; остаточное взаимодействие выбрано соответственно в виде гауссиана, поверхностных δ -сил и потенциала Эллиота.



($\lg ft = 5,6$) существенно больше, чем на однофоновный уровень 2_1^+ , $552 \text{ кэВ} (\lg ft = 6,8)$.

Нечетно-нечетные ядра. Плотность уровней в диапазоне $\leq 1 \text{ МэВ}$ довольно высокая. Среди них аномально часто встречаются уровни с $J^\pi = 1^+$.

В настоящее время нет модели, описывающей все характерные свойства ядер этой области. Для ядер с замкнутой оболочкой $N = 82$ успешно проводились расчеты в рамках модели, которая учитывает взаимодействия частиц сверх «инертного» остова $Z = 50$, $N = 82$. Используя квазичастичное описание, авторы работ [113, 123—128] выбрали остаточное взаимодействие в виде гауссиана [113, 125, 127], поверхностных δ -сил [123, 126, 128], в виде потенциала Эллиота [124] и т. д. Полученные матрицы взаимодействия «активных» (сверх $Z = 50$) протонов, находящихся на орбиталях $g_{7/2}$, $d_{5/2}$, $d_{3/2}$, $s_{1/2}$, $h_{11/2}$, диагонализировались так, чтобы получить набор

одно- и трехквaziчастичных состояний для ядер с нечетным A и двухквaziчастичных состояний — четно-четных ядер.

На рис. 21 сравниваются экспериментальный и расчетные по моделям [113, 123, 124] спектры возбужденных уровней ^{141}Pr ($E_{\text{возб}} < 2,1 \text{ МэВ}$). Имеется удовлетворительное согласие расче-

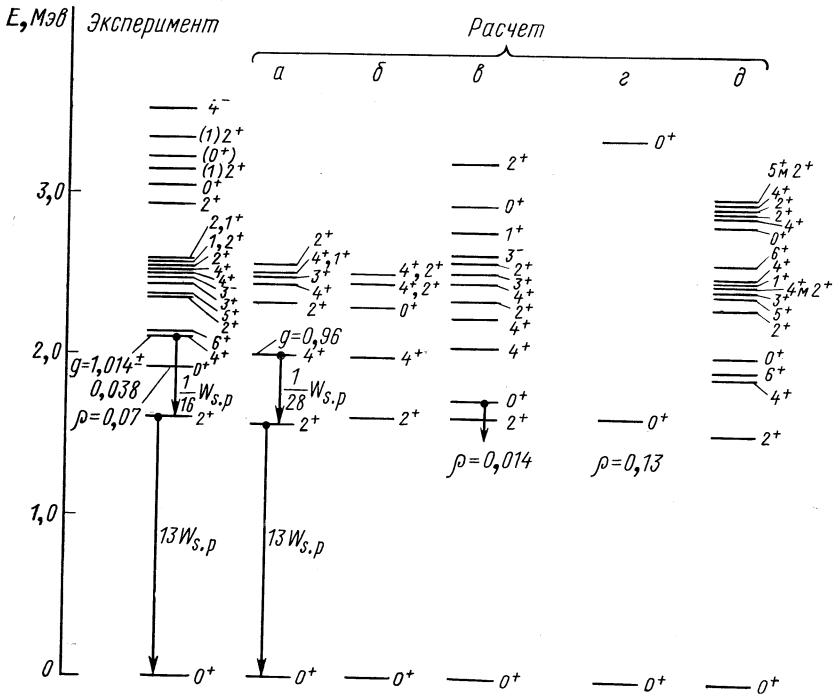


Рис. 22. Сравнение спектра возбужденных уровней ^{140}Se , известных из эксперимента, с расчетным по моделям, приведенным в работах [125—128]:

a — расчеты Ро [125]; $б$ — Пластино и др. [126]; $в$ — Ломбарда [127]; $г$ — Беса, выполненные в рамках модели парных вибраций; $д$ — Виденталя [128]; остаточное взаимодействие выбрано соответственно в виде гауссиана [125, 127] и поверхностных δ -сил [126, 128].

тов и эксперимента в описании энергий, спинов и четностей уровней ^{141}Pr . Также довольно хорошо описываются радиационные характеристики уровней и их спектроскопические факторы, полученные из реакций передачи и подхвата протона.

Сравнение спектра энергетических уровней ^{140}Se , экспериментально установленных в работах [81, 82] и в различных ядерных реакциях, с расчетными спектрами [125—128] приведено на рис. 22. Помимо энергий и последовательности уровней модели достаточно хорошо воспроизводят вероятность γ -перехода $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$, магнит-

ный момент уровня 4_1^+ , приведенный матричный элемент $0^+ \rightarrow 0^+$ -перехода и т. д.

Можно заметить, что расчетные характеристики полумагических ядер весьма чувствительны к выбору типа остаточного взаимодействия и к выбору собственных значений энергий одноквазипротонных орбиталей $g_{7/2}$, $d_{5/2}$, $d_{3/2}$, $s_{1/2}$, $h_{11/2}$. Всестороннее изучение ядер с $N = 82$ различными методами несомненно дает богатый материал для совершенствования модельных представлений.

Следует отметить, что перечисленные под п. 2—5 особенности нельзя объяснить в рамках модели оболочек, прежде всего в связи с фактом сильного ускорения $E2$ -переходов, указывающим на значимость коллективных эффектов в этих ядрах. Например в ядре ^{137}Pr уровень $306,4$ кэв с $I^\pi = 5/2^+$ разряжается в основное состояние ($5/2^+$) и первый возбужденный уровень ($7/2^+$) — сильно ускоренными $E2$ -переходами (соответственно в 25 и 7 раз). Анализ вероятностей $M2$ - и $E3$ -переходов, разряжающих уровень $I^\pi = 11/2^-$ в изотонах $N = 80$ (табл. 3), показывает, что имеет место ускорение и $E3$ -переходов.

Поэтому понятно, что определенный успех при описании ядер рассматриваемой области был достигнут при помощи модельного представления, учитывающего связь между одночастичными состояниями ядер с коллективным возбуждением

Таблица 3

Анализ вероятностей $M2$ - и $E3$ -переходов, разряжающих уровни $I^\pi = 11/2^-$ в изотопах ^{139}Pr и ^{141}Pr ($N = 80$)

Ядро	$^{137}\text{La}_{80}$	$^{139}\text{Pr}_{80}$	$^{141}\text{Pr}_{80}$
$E_{ур}$, кэв	1004	822	628
$T_{1/2}$, сек	$(4,1 \pm 0,7) \cdot 10^{-10}$	$(3,68 \pm 0,20) \cdot 10^{-8}$	$(2,18 \pm 0,09) \cdot 10^{-7}$
$E_{ур}$, кэв	994	708	432
$I_i^\pi \rightarrow I_f^\pi$	$11/2^- \rightarrow 5/2^+$	$11/2^- \rightarrow 7/2^+$	$11/2^- \rightarrow 7/2^+$
α_L	$E3$	$M2$ $E3$	$M2$
δ_2	∞	$0,005 \pm 0,005$	0
$T_{1/2}$ s. p.	$\geq 7,82$	$(2,66 \pm 0,45) \cdot 10^{-2} \ll 22$	$(5,2 \pm 1,6) \cdot 10^{-2}$
$T_{1/2}$ экс	$\geq 0,112$	$4,2 \pm 0,9$	$5,8 \pm 1,8$

четно-четного остова [114—116]. Гамильтониан такой модели состоит из трех частей $H = H_c + H_p + H_{\text{int}}$, учитывающих коллективное возбуждение остова H_c , возбуждение отдельных нуклонов H_p и взаимодействие между ними H_{int} . В расчетах используются три параметра: параметром ξ достигаются правильная очередность уровней и связь между коллективным и одночастичным возбуждениями; $\hbar\omega$, характеризующий возбуждение остова, обычно берется из соседнего четно-четного ядра; E_i — энергия одночастичных состояний.

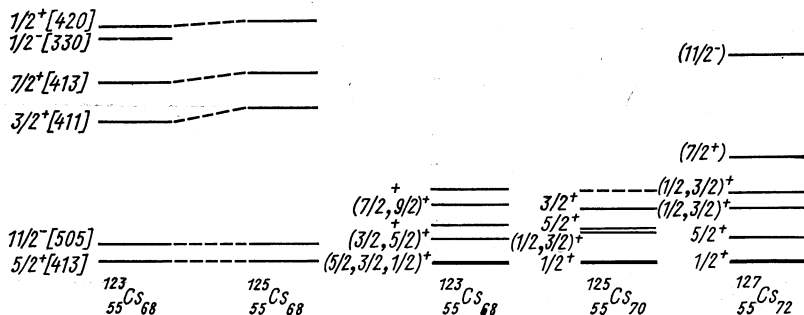


Рис. 23. Сравнение энергий расчетных уровней в нечетных ядрах Cs [117] с экспериментальными значениями.

На рис. 17—20 сопоставлены расчеты на основе такой модели [114] с экспериментальными данными. Как видно, энергию первых состояний с $I^\pi = 5/2^+$, $7/2^+$, $1/2^+$, $3/2^+$ и некоторые другие особенности рассматриваемых ядер (см. п. 2, 4, 5) можно хорошо воспроизвести.

Встречаются и определенные трудности. Вторым уровнем с $I^\pi = 5/2^+$, который проявляется регулярно (п. 3), в расчетах не воспроизводится совсем. Возможно, такое состояние объясняется снятием связи между двумя $g_{7/2}$ протонами остова, что ведет к появлению состояний с $I^\pi = 5/2^+$ ($=J - 1$) при низких энергиях возбуждения [114]. Другое ограничение модели — слабая связь между одночастичным возбуждением и коллективным движением остова — ставит под вопрос применимость такой модели по мере приближения к «новой» области деформации (сильно нейтродефицитные изотопы Cs, La, Pr). Для самых легких изотопов этих элементов более адекватно описание расчетами, выполненными на основе модельных представлений о деформированных ядрах [117—120]. Характерный результат расчетов для сильно нейтродефицитных ядер этой области состоит в появлении состояний с отрицательным значением параметра деформации и с положительным. В связи с этим была выдвинута гипотеза

об изомерии формы в данном районе ядер [119]. Однако в экспериментах по β -распаду короткоживущих изотопов Ва не было найдено указаний на отмеченное явление. В частности, в наших экспериментах не подтвердилось существование изомерных состояний в легких ядрах $^{125}, ^{127}\text{Ba}$, обнаруженных в работе [121]. Они интерпретировались на основе существования состояния $9/2^-$ [505] (состояние Нильсона), находящегося в согласии с расчетом среди состояний с положительной четностью. Не подтвердилось также в наших работах предположение об изомерии формы в ядре ^{127}Cs , которое было высказано в работе [110] в связи с предполагаемой задержкой γ -перехода с энергией 65,9 кэв.

Экспериментальные значения энергий состояний легких нечетных изотопов Cs с расчетными нильсоновскими [117] сравниваются на рис. 23. Интересно, что низкоэнергетическое состояние с $I^\pi = 1/2^+$ расчетами не воспроизводится. Возможно, что наблюдаемое в ядре ^{127}Cs изомерное состояние [110] связано с уровнем $11/2^-$ [505]. Следует отметить, что некоторые характерные свойства ядер с $Z \sim 51-63$ предсказываются расчетами Кисслингера и Соренсена [122] на основе парного и квадрупольного взаимодействий. Снижение энергий состояний с $I^\pi = 1/2^+$ и $3/2^+$ в ядрах Cs, La, Pr и сильное ускорение E2-перехода $5/2^+ \rightarrow 1/2^+$ предсказываются правильно. В рамках модели Кисслингера и Соренсена это связано с фононным характером данных состояний.

Нейтрондефицитные изотопы Tl

Ядерноспектроскопические исследования нейтрондефицитных изотопов Tl (рис. 24) были одной из первых задач, которые решались на установке ЯСНАПП-1 с использованием электромагнитной сепарации изотопов по массам. Для разделения изотопов Tl

N	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117
^{81}Tl	188 1,6 мин	189 1,4 мин	190 3,2 мин 3,5 мин	191 5,2 мин	192 11 мин 11 мин	193 2,1 мин 21 мин		195 3,6 сек 1,2 ч		197 0,5 сек 2,8 ч	
^{80}Hg		188 13,3 мин	189 8,7 мин 7,7 мин	190 120 мин	191 51 мин 49 мин	192 5 ч	193 11 ч 3,5 ч		195 40 ч 9,5 ч		197 24 ч 64 ч

Рис. 24. Диаграмма изотопов Tl и Hg.

в масс-сепараторе применялся ионный источник магнетронного типа [30].

Основные результаты экспериментов. Проведенные исследования привели к обнаружению новых изотопов и изомерных состояний Tl (см. табл. 1 и рис. 24) [24, 25, 130, 131].

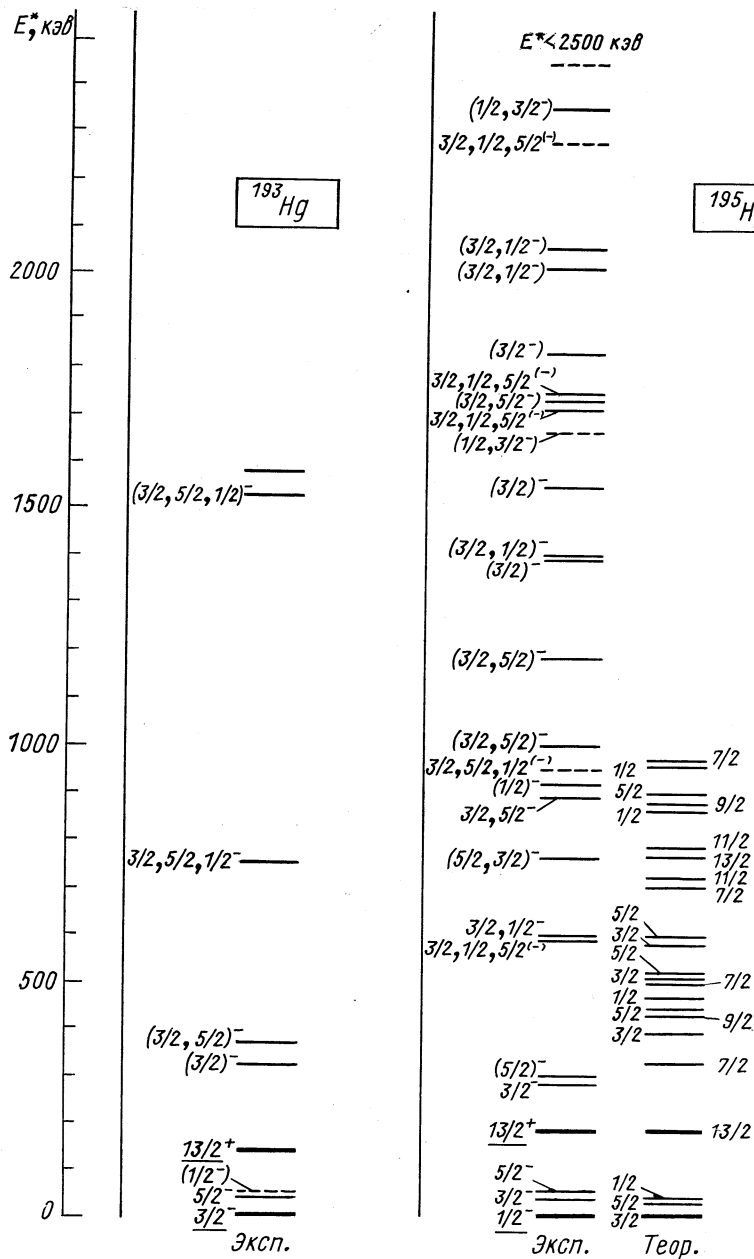
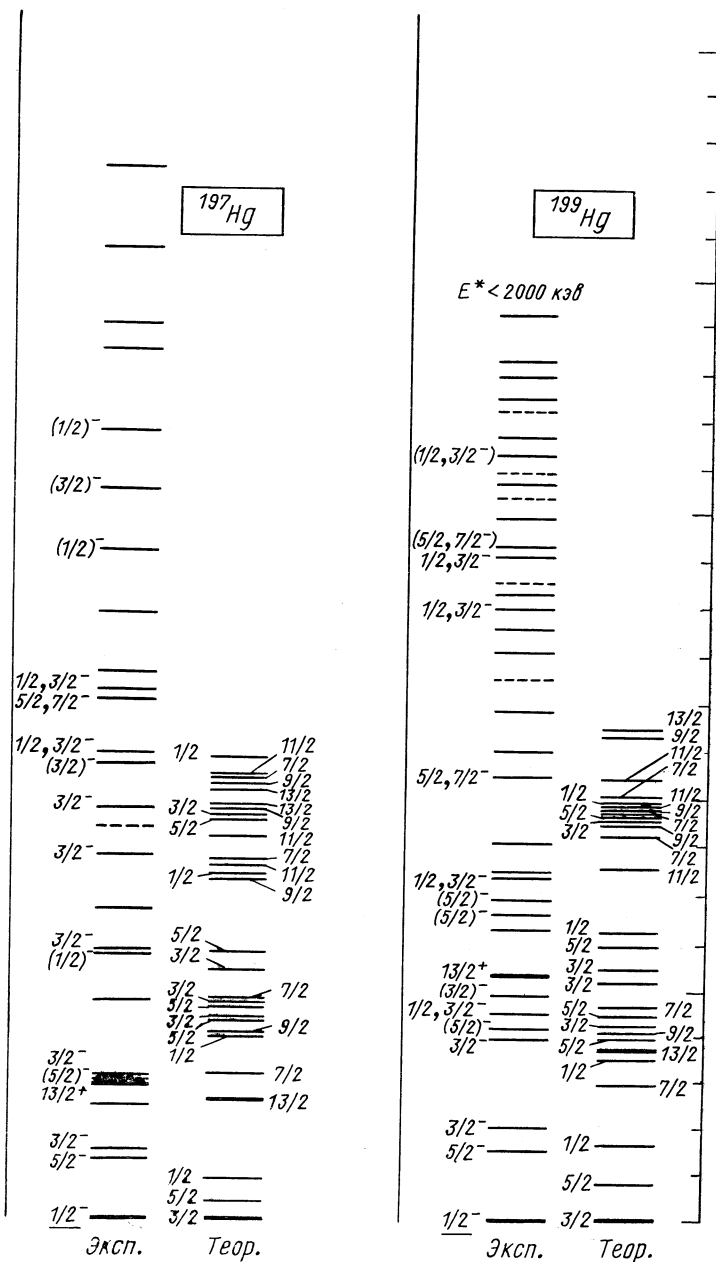


Рис. 25. Систематика энергетических



уровней нечетных изотопов Hg.

При исследовании спектров излучения легких изотопов Tl было обнаружено в общей сумме около 250 γ -переходов, из которых 220 являются новыми. Мультипольности были определены приблизительно для одной трети γ -переходов.

Нечетные изотопы. ^{197}Tl , ^{195}Tl , ^{193}Tl [130, 132—134]. Измеренные периоды полураспада совпадают с ранее известными значениями [129]. Построены схемы распада. На основе отношений интенсивностей рентгеновского и аннигиляционного излучений определены отношения интенсивностей электронного захвата и позитронного распада.

При распаде ^{197}Tl и ^{195}Tl оценены значения $\lg ft$ для многих уровней. Известные спины и четности нескольких низколежащих уровней, мультипольности переходов и величины $\lg ft$ позволили определить спины и четности многих уровней.

^{191}Tl и ^{189}Tl [130, 25]. Определены периоды полураспада ^{191}Tl и ^{189}Tl . На основе исследования γ -спектра ^{191}Hg можно сделать вывод, что в ядре ^{191}Hg кроме известного $13/2^+$ -состояния ($T_{1/2} = 51$ мин) существует и другое, вероятно, $3/2^-$ -основное состояние с $T_{1/2} = 49 \pm 10$ мин.

Полученные результаты о свойствах возбужденных состояний нечетных изотопов Hg сравнивались с расчетами Кисслингера и Соренсена [122] и Джолоса [174]. Как видно из рис. 25, расчеты правильно описывают некоторые свойства системы уровней.

Четные изотопы. ^{192}Tl и ^{190}Tl [131, 135]. Определены периоды полураспада основных (2^-) и изомерных (7^+) состояний ^{192}Tl и ^{190}Tl и построены схемы их распада. Предложенная схема распада ^{192}Tl хорошо согласуется со схемой в работе [136].

^{188}Tl . По наблюдению в γ -спектре изотопов Tl переходов между известными уровнями $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ и $2_1^+ \rightarrow 0_1^-$ в ядре ^{188}Hg , возбужденными тяжелыми ионами [137], нами идентифицирован новый изотоп ^{188}Tl ($T_{1/2} = 1,6 \pm 0,5$ мин).

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов для четных изотопов Hg показывает, что ангармонические колебательные модели Ковелло и Сарториса [138] и Алага и Ялонго [139] правильно описывают многие экспериментальные факты и дают хорошую основу для дальнейших исследований.

Исследования распада ядер в области $Z = 84 \div 87$ и $N \leq 126$

Экспериментальные исследования спектров излучения, возникающих при радиоактивном распаде нейтронодефицитных изотопов Po, At, Rn, и Fr, были начаты в 1967 г. Радиоактивные изотопы этих элементов получались при расщеплении тория протонами с энергией 660 Мэв как на внутреннем ($I_p = 2$ мка), так и на внешнем ($I_p = 0,3$ мка) пучке синхротронного ОИЯИ. Разделение

Результаты исследований спектров α -частиц изотопов At и Rn

Изотоп, $T_{1/2}$, α , % на распад	$E_{\alpha} + \Delta E_{\alpha}$, кэв	E уровня дочернего ядра, кэв	$I_{\alpha} \pm \Delta I_{\alpha}$	Изотоп, $T_{1/2}$, α , % на распад	$E_{\alpha} + \Delta E_{\alpha}$, кэв	E уровня дочернего ядра, кэв	$I_{\alpha} \pm \Delta I_{\alpha}$
208At (1,8±0,3) ч ~ 0,5%	5640±3	0	100*	209Rn (28,5±1,0) мин (17±2)%	6039±3	0	100*
	5626±3	45	2,2		5898±3	144	(0,14±0,02)
	5586±3	56	0,9		5887±3	155	(0,22±0,02)
	5507±3	136	0,2		5660±3	386	(2,4±0,2)·10 ⁻²
209At (5,3±0,3) ч (4,1±0,5)%	5647±2	0	100*	210Rn (2,4±0,1) ч (96±1)%	6038±3	0	100*
					5351±3	700	(5,6±0,3)·10 ⁻²
210At (7,9±0,5) ч (0,18±0,02)%	5524±1,5	0	100*	211Rn (15±0,5) ч (26±1)%	5850±2	0	100*
	5465±1,5	59,9	26±2		5783±2	68,3	186±3*
	5442±1,5	82,9	95±6*		5616±3	238,5	0,79±0,07*
	5386±1	140	14±2		5466±3	391,4	(4,1±0,3)·10 ⁻²
	5361±1	167	83±6*		5276±3	585	(4,4±0,3)·10 ⁻²
	5131±2	398,3	1,2±0,4		5179±3	684	(7,6±0,7)·10 ⁻³
211At (7,1±0,2) ч (41±1)%	5866±2	0	100*	212Rn (22±1) мин 100%	6262±3	0	100*
	5210±1,5	669,5	(1,3±0,2)·10 ⁻²		5588±3	687	(5,0±0,5)·10 ⁻²
	5141±2	742,5	(4±2)·10 ⁻³				
206Rn ~ 6 мин	6260±3	0	100*	212Fr	6405±3	0	100*
	~ 6600	~ 680 (2 ⁺)	< 0,1		6383±3	23,5	107*
207Rn (10±1) мин (23±7)%	6126±3	0	100*	20,6±0,03) мин 43±3)%	6342±3	63,6	14
	6068±3	59	(0,66±0,02)		6335±3	71,7	46*
	5995±4	133	0,10±0,03		6262±3	147,7	170
208Rn (23,5±0,5) мин (67±3)%	6139±3	0	100*	6183±3	6183±3	227	5,9*
	5470±4	682	(4,7±0,4)·10 ⁻³		6173±3	237	5,0
				6127±3	284	5,4*	
				6076±3	336	1,9*	
				5983±4	431	0,3*	

Примечание. Звездочками отмечены группы α -частиц, известные до настоящих исследований.

изотопов по массам проводилось для относительно долгоживущих изотопов ($T_{1/2} = 20$ мин и больше) в режиме «офф-лайн» [34]. Исследования короткоживущих изотопов ($T_{1/2} \leq 20$ мин) проводились на установке ЯСНАПП-1.

Исследования спектров γ -квантов и электронов внутренней конверсии проводились с помощью приборов и аппаратуры, описанных выше, а исследования α -частиц — с помощью большого магнитного альфа-спектрографа [49]. Высокая разрешающая способность (до 2 кэВ) этого прибора при низком фоне и отно-

N	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
${}_{87}\text{Fr}$											212 20,6мин	
${}_{86}\text{Rn}$					205 2,8мин	206 5,7мин	207 10мин	208 23мин	209 28мин	210 2,4ч	211 15ч	212 22мин
${}_{85}\text{At}$				203 7,4мин	204 5,0мин	205 26мин	206 32мин	207	208 1,3ч	209 5,3ч	210 7,9ч	211 7,1ч
${}_{84}\text{Po}$	199 9,3мин		201 16мин	202 15мин	203 42мин	204 3,3ч						Стаб.
${}_{83}\text{Bi}$												Стаб.
${}_{82}\text{Pb}$								Стаб.		Стаб.	Стаб.	Стаб.

Изучен
 β -распад
A
 $T_{1/2}$
Изучен
 α -распад

Рис. 26. Диаграмма изученных изотопов Po, At, Rn, Fr.

сительно хорошей светосиле ($\sim 0,05\%$ от 4л) позволила обнаружить новые α -переходы на возбужденные состояния дочерних ядер (табл. 4). Часть карты изотопов, включающая рассматриваемые в этом разделе ядра, приведена на рис. 26.

Основные результаты исследований. ${}^{212}\text{Fr}$. При исследовании α -спектра удалось разрешить два дублета, что привело к установлению двух новых уровней в дочернем ядре ${}^{208}\text{At}$. Изучены спектры γ -кванта и конверсионных электронов. Определено отношение интенсивностей электронного захвата и α -распада, равное $1,3 \pm 0,2$, предложена схема распада [140, 141].

${}^{212}\text{Rn}$ — β -стабильный изотоп. При исследовании α -спектра впервые наблюдался α -распад на уровень 687 кэВ, 2^+ ${}^{208}\text{Po}$ с интенсивностью $5 \cdot 10^{-4}$ на один распад ${}^{212}\text{Rn}$ [142].

${}^{211}\text{Rn}$. Кроме трех известных ранее групп [129] обнаружено четыре новых с интенсивностью от 10^{-5} до 10^{-6} на один распад

^{211}Rn . Этим устанавливаются четыре новых уровня: 391,4; 585; 684; 812 *кэв* в ядре ^{207}Po [142].

^{210}Rn . Кроме основного α -перехода наблюдался впервые α -распад на уровень 2^+ , 700 *кэв* ^{206}Po с интенсивностью $5 \cdot 10^{-4}$ на один распад [142]. Изучены спектры конверсионных электронов и γ -квантов, предложена схема распада $^{210}\text{Rn} \rightarrow ^{210}\text{At}$ [143].

^{209}Rn . При исследовании α -распада установлено существование уровней 144, 155, 386 *кэв* в ^{205}Po [142]. Тщательные исследования спектров конверсионных электронов и γ -квантов и спектров совпадений позволили детально разработать схему распада $^{209}\text{Rn} \rightarrow ^{209}\text{At}$ [144, 145].

^{208}Rn . Впервые наблюдался α -распад на уровень 682 *кэв*, 2^+ ^{204}Po [142]. Исследованы γ -кванты и конверсионные электроны, введены нижние возбужденные состояния ^{208}At , возникающие при распаде ^{208}Rn [146, 147].

^{207}Rn . Обнаружен α -распад на возбужденные уровни ^{203}Po с энергиями 59 и 133 *кэв* [142]. Установлено, что при распаде $^{207}\text{Rn} \rightarrow ^{207}\text{At}$ возбуждаются 14 уровней, из них 11 новых [148, 149].

^{206}Rn . При исследовании α -распада ^{206}Rn линий тонкой структуры не было обнаружено. Показано, что интенсивность α -распада на уровень 2^+ , ^{202}Po с энергией примерно 680 *кэв* меньше 10^{-3} интенсивности α -распада в основное состояние. Впервые изучены спектры γ -квантов ^{206}Rn . Предлагается фрагмент схемы распада $^{206}\text{Rn} \rightarrow ^{206}\text{At}$ [150].

^{205}Rn . Изучен спектр γ -квантов, возникающих при распаде ^{205}Rn . Введены возбужденные состояния ^{205}At с энергиями 264,9; 620,0; 729,5 *кэв* [148].

^{211}At . Впервые обнаружен α -распад на известные из исследований β -распада ^{207}Po уровни ^{207}Bi с энергией 670 и 743 *кэв* [151].

^{210}At . Высокая разрешающая способность использованного спектрографа позволила найти три новых линии тонкой структуры (см. табл. 4). Таким образом, наблюдался α -распад на все четыре известных из распада ^{206}Po нижних уровни ^{206}Bi . Наблюдается также распад на уровни 140 и 398 *кэв* [151].

^{209}At . Обнаружен α -распад на возбужденное состояние 541 *кэв* ^{205}Bi [151]. На основе результатов изучения спектров γ -квантов, конверсионных электронов и γ — γ -совпадений построена схема распада $^{209}\text{At} \rightarrow ^{209}\text{Po}$ [152].

^{208}At . В результате исследования спектра α -частиц установлено существование уровней 15, 56 и 136 *кэв* в дочернем ядре ^{204}Bi [153].

Точные измерения полных энергий α -распада короткоживущих изотопов $^{199-209}\text{Po}$ и $^{203-208}\text{At}$ выполнены с помощью большого магнитного альфа-спектрографа (табл. 5). Проведенные исследования α -спектров изотопов Rn и At позволили уверенно

Таблица 5
Точные измерения энергий основных α -групп
изотопов At и Po [151, 154, 156]

Изотоп	$T_{1/2}$, мин	E_{α} , кэв	Изотоп	$T_{1/2}$, мин	E_{α} , кэв
^{207}At	1,8 ч	5759 ± 3	^{206}Po	8,83 дня	$5223 \pm 1,5$
^{206}At	29,5	5703 ± 2	^{204}Po	3,6 ч	$5377 \pm 1,5$
^{205}At	25,0	5903 ± 2	^{203}Po	29	5384 ± 3
^{204}At	7,9	5952 ± 2	^{202}Po	42	5588 ± 2
^{203}At	7,4	6087 ± 2	^{201}Po	15,5	5684 ± 2
^{209}Po	103 года	4883 ± 3	^{201m}Po	9,0	5787 ± 2
^{208}Po	2,93 года	5116 ± 2	^{199}Po	5,0	5952 ± 2
^{207}Po	5,7 ч	$5115 \pm 2,5$	^{199m}Po	4,1	6058 ± 3

установить существование ряда возбужденных уровней в дочерних ядрах (см. табл. 4). Полученные точные данные об энергиях

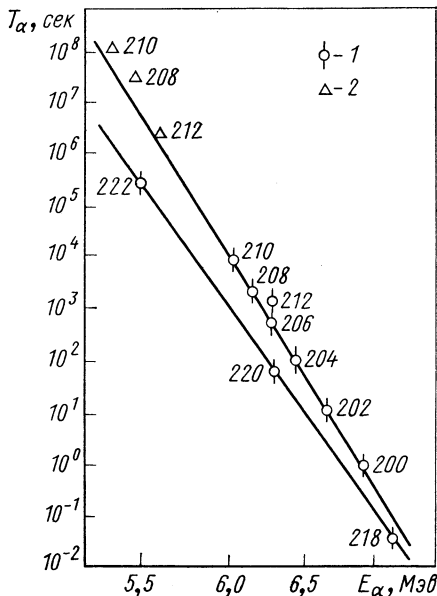


Рис. 27. Зависимость парциальных периодов α -распада четно-четных ядер радона от энергии α -частиц:

масштаб энергии $1/\sqrt{E_{\alpha}}$; 1 — значения парциальных периодов для основных α -переходов; 2 — для α -переходов на первые возбужденные уровни 2^+ дочерних ядер.

и интенсивностях α -распада несомненно будут важны для сравнения их с развиваемыми в настоящее время новыми теоретическими представлениями об α -распаде, а также для систематики экспериментальных данных об этом распаде. В работе [142] указано, что полученные данные об α -распаде четно-четных изотопов Rn позволяют сделать некоторые выводы о зависимости парциальных периодов α -распада четно-четных изотопов Rn. Из рис. 27 видно, что $\lg T_{\alpha}$ пропорционален $1/E_{\alpha}$ для всех четно-четных изотопов Rn, однако прямая для изотопов с числом нейтронов $N > 128$ имеет другой наклон по сравнению с прямой для $N < 128$. В систематику включаются известные случаи α -распада на возбужденные 2^+ состояния дочерних ядер.

В связи с тем, что правила отбора для α -распада по спину и четности не так строги, как для β -распада и γ -излучения, при исследовании α -распада редко

удаётся надёжно установить спины и четности ядерных уровней. Эти задачи лучше решаются при исследовании спектров β - и γ -излучения. Наиболее полно в наших исследованиях был изучен β -распад цепочки $^{209}\text{Rn} \rightarrow ^{209}\text{At} \rightarrow ^{209}\text{Po}$. Исследования β -распада других рассмотренных выше ядер продолжаются. Имеющиеся в настоящее время данные позволяют заключить, что современные оболочечные модели [155] объясняют наблюдаемые свойства возбужденных состояний ядер вплоть до энергий возбуждения $\sim 3,5 \text{ Мэв}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proc. Int. Symp. «Why and How Should We Investigate Nuclides Far Off the Stability Line».—Ark. Fys., 1967, v. 36, p. 1—686.
2. Proc. Int. Conf. «The Properties of Nuclei Far From the Region of Beta-Stability». Preprint CERN 70-30, 1970, vol. 1, 2.
3. Громов К. Я., Джелелов Б. С. «Атомная энергия», 1969, т. 26, с. 362.
4. Музиоль Г., Препринт ОИЯИ Р-3699, 1968.
5. Музиоль Г., Райко В. И., Тыррофф Х. Препринт ОИЯИ Р-4487, 1969.
6. Мольнар Ф. и др. ЭЧАЯ, 1973, т. 4, вып. 4, с. 1077.
7. Beyer G. J. e. a. J. Inorg. Nucl. Chem., 1969, v. 31, p. 2125.
8. Beyer G. J. e. a. Radiochem. Radioanal. Lett. (submit.).
9. Merinis J., Bouissieres G. Anal. Chim. Acta, 1961, v. 25, p. 498.
10. Баяр Б. и др. «Радиохимия», 1973, т. 15, с. 553.
11. Вандлик Я. и др. «Радиохимия», 1973, т. 15, с. 831.
12. Арлт Р. и др. Сообщение ОИЯИ 6-6966, 1973.
13. Баяр Б. и др. Препринт ОИЯИ Р12-7340, 1973.
14. Баяр Б. и др. Препринт ОИЯИ Р12-7164, 1973.
15. Зелински А. и др. Сообщение ОИЯИ 6-6949, 1973.
16. Зелински А. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 145, 149.
17. Arlt R. e. a. Nucl. Instr. Meth., 1972, v. 102, p. 253.
18. Лятушински А. и др. Сообщение ОИЯИ 6-7469, 1973.
19. Зайцева Н. Г. и др. В кн.: «Программа и тезисы докладов XIX Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Ч. 1. Л., «Наука», 1969, с. 267.
20. Малек З., Пфренпер Г. Препринт ОИЯИ 12-4013, 1968.
21. Лебедев Н. А. Автореферат диссертации, ОИЯИ 6-7243, 1973.
22. Arlt. R. e. a. J. Inorg. Nucl. Chem., 1972, v. 34, p. 300.
23. Ахмаджанов А. И. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1972, т. 36, с. 2066.
24. Вандлик Я. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1970, т. 34, с. 1656.
25. Вандлик Т. Б. и др. «Письма ЖЭТФ», 1972, т. 15, с. 386.
26. Бочварова М. и др. «Радиохимия», 1973, т. 15, с. 54.
27. Колачковски А., Норсеев Ю. В. Сообщение ОИЯИ Р6-6927, 1973.
28. The Isolde Isotope Separator On-Line Facility at CERN. Preprint CERN 70-3, 1970.
29. Piotrowski A. e. a. Proc. Conf. on Electromagn. Isotope Sep. Marburg, 1970, p. 440.
30. Пиотровски А., Райко В. И., Тыррофф Х. ПТЭ, 1972, т. 2, с. 23.
31. Beyer G. J. e. a. Nucl. Instr. Meth., 1971, v. 96, p. 437.
32. Beyer G. J. e. a. Radiochem. Radioanal. Lett., 1972, v. 12, p. 259.
33. Bystrov V. A. e. a. Proc. Conf. Ion Sources. Vienna, 1972, p. 850.
34. Афанасьев В. П. и др. Сообщение ОИЯИ 13-4763, 1969.
35. Афанасьев В. П. и др. ПТЭ, 1972, т. 1, с. 45.
36. Арлт Р. и др. Препринт ОИЯИ Р6-3773, 1968.

37. Василенко А. Т. и др. ПТЭ, 1972, т. 2, с. 34.
38. Акимов Ю. К. и др. Сообщение ОИЯИ 13-6236, 1972.
39. Акимов Ю. К. е. а. IEEE NS, 1972, v. 19, p. 404.
40. Медведь С. В. и др. Сообщение ОИЯИ 10-6884, 1973.
41. Арлыт Р. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 488.
42. Аврамов С. и др. Препринт ОИЯИ 10-6467, 1972.
43. Элер Г. и др. Препринт ОИЯИ P10-6817, 1972.
44. Элер Г. и др. Препринт ОИЯИ P10-7366, 1973.
45. Гаджиков В. Препринт ОИЯИ P10-5035, 1970.
46. Арлыт Р. и др. Препринт ОИЯИ P6-6227, 1972.
47. Аврамов С. В. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 175.
48. Арлыт Р. и др. Препринт ОИЯИ P6-5783, 1971.
49. Головкин Н. А. и др. Препринт ОИЯИ P13-3340, 1967.
50. Вылов Ц. и др. Препринт ОИЯИ 13-6440, 1972.
51. Фоминых В. И. Автореферат диссертации, ОИЯИ 13-6354, 1972.
52. Гасиор М. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 167.
53. Вылова Л. А. и др. Препринт ОИЯИ P10-6751, 1972.
54. Липтак Я. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 69.
55. Arlt R. e. a. Radiochem. Radioanal. Lett., 1972, v. 10, p. 173.
56. Зиберт Х. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 70.
57. Абдуразаков А. А. и др. Препринт ОИЯИ P6-6249, 1972.
58. Зайцева Н. Г. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1283.
59. Арлыт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1971, т. 35, с. 48.
60. Arlt R. e. a. Preprint CERN 70-30, v. 2, 1970, p. 1137.
61. Krasik V. e. a. Preprint CERN 70-30, v. 2, 1970, p. 1145.
62. Арлыт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1594.
63. Брода Р. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XX Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Ч. 1. Л., «Наука», 1970, с. 51.
64. Зайцева Н. Г. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XIX Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра», Ч. 1. Л., «Наука», 1969, с. 56.
65. Arlt R. e. a. Preprint JINR D-3893, 1968, p. 10.
66. Арлыт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1971, т. 35, с. 56.
67. Воцилка И. и др. Препринт ОИЯИ 6-7177, 1973.
68. Воцилка И. и др. Препринт ОИЯИ 6-7476, 1973.
69. Арлыт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1971, т. 35, с. 27.
70. Воцилка И. и др. Препринт ОИЯИ 6-7477, 1973.
71. Зайцева Н. Г. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1971, т. 35, с. 35.
72. Арлыт Р. и др. «Письма в ЖЭТФ», 1971, т. 13, с. 556.
73. Крацик Б. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXI Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра», Л., «Наука», 1971, с. 55.
74. Арлыт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1970, т. 34, с. 409.
75. Арлыт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1970, т. 34, с. 754.
76. Арлыт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1460.
77. Херрманн Э., Пфреннер Г., Христов Д. Препринт ОИЯИ P-2647, 1966.
78. Арлыт Р. и др. Сообщение ОИЯИ P6-5517, 1970.
79. Бутцев В. С. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1973, т. 37, с. 1024.
80. Байер Г. Ю. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1972, т. 36, с. 782.
81. Калинин В. Г. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1970, т. 34, с. 916.
82. Бутцев В. С. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 92.
83. Калинин В. Г., Равн Х. Л. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1389.

84. Бутцев В. С. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1971, т. 35, с. 1602.
85. Байер Г. Ю. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 91.
86. Громов К. Я. и др. ЖЭТФ, 1964, т. 47, с. 1644.
87. Gromov K. e. a. Nucl. Phys., 1966, v. 88, p. 225.
88. Афанасьев В. П. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1971, т. 35, с. 1603.
89. Бутцев В. С. и др. Препринт ОИЯИ Р6-7173, 1973.
90. Gromov K. e. a. Nucl. Phys., 1965, v. 73, p. 65.
91. Zhelev Zh. e. a. Preprint JINR D-3893, 1968, p. 22.
92. Бутцев В. С. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1973, т. 37, с. 953.
93. Бутцев В. С. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1973, т. 37, с. 938.
94. Бутцев В. С. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXI Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра», Ч. 1. Л., «Наука», 1974, с. 82.
95. Желев Ж. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1968, т. 32, с. 1610.
96. Бутцев В. С. и др. Препринт ОИЯИ Р6-6876, 1972.
97. Абдуразаков А. А. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1970, т. 34, с. 796.
98. Ekström C. e. a. Nucl. Phys. A, 1972, v. 196, p. 178.
99. Habs D. e. a. Proc. Int. Conf. of Nucl. Phys., Munich, v. 1, 1973, p. 183.
100. Арльт Р. и др. Препринт ОИЯИ Р6-6217, 1972.
101. Arlt R. e. a. Acta Phys. Polonica B, 1973, v. 4, p. 301.
102. Арльт Р. и др. Препринт ОИЯИ Р6-6285, 1972.
103. Арльт Р. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 90.
104. Арльт Р. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XIX Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1969, с. 78.
105. Ортлиш Х. Г. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 86.
106. Arlt R. e. a. Proc. Int. Conf. on Nucl. Phys., Munich, v. 1, 1973, p. 694.
107. Арльт Р. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 98.
108. Арльт Р. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 94.
109. Арльт Р. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 91.
110. Conlon T. W. Nucl. Phys. A, 1971, v. 161, p. 289.
111. Арльт Р. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 92.
112. Арльт Р. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 96.
113. Waroquier M., Heyde K. Nucl. Phys. A, 1970, v. 144, p. 491.
114. De Pinho A. G. e. a. An. Acad. Brasil Ciencia, 1973, v. 43, p. 1.
115. Heyde K., Brusaard P. J. Nucl. Phys. A, 1967, v. 104, p. 81.
116. Van den Berghe G., Heyde K. Nucl. Che Phys. A, 1971, v. 163, p. 478.
117. Arseniev D. A., Sobiczewski A., Soloviev V. G. Nucl. Phys. A, 1969, v. 126, p. 15.
118. Kumar K., Baranger M. Phys. Lett., 1964, v. 12, p. 73.
119. Арсеньев Д. А. и др. «Ядерная физика», 1968, т. 8, с. 883.
120. Ragnarsson I. e. a. Colloqv. on Intermediate Nuclei. Orsay, 1971, IN 2P3, p. 112.
121. D'Auria J. M. e. a. Phys. Rev., 1968, v. 172, p. 1176.
122. Kisslinger L. S. e. a. Rev. Mod. Phys., 1963, v. 35, p. 853.
123. Wildenthal B. H. Phys. Lett. B, 1970, v. 29, p. 274.
124. Freed N. e. a. Nucl. Phys. A, 1970, v. 158, p. 230.
125. Rho M. Nucl. Phys., 1965, v. 65, p. 497.
126. Plastino A. e. a. Phys. Rev., 1966, v. 145, p. 837.
127. Lombard R. J. Nucl. Phys. A, 1968, v. 117, p. 365.
128. Wildenthal B. H. Phys. Rev., 1969, v. 22, p. 1118.
129. Lederer M. M. e. a. Table of Isotopes. Wiley, 1967.

130. Fenyues T. e. a. Preprint CERN 70-30, v. 2, 1970, p. 1081.
131. Вандлик Я. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXII Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1972, с. 156.
132. Вандлик Т. Б. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1973, т. 37, с. 1804.
133. Вандлик Т. Б. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1973, т. 37, с. 1812.
134. Вандлик Я. и др. Препринт ОИЯИ Д6-5783, 1971, с. 164.
135. Вандлик Я. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXII Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1972, с. 158.
136. Petry R. F. e.a. Phys. Rev., 1968, v. 174, p. 1441.
137. Бурде Дж. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1967, т. 31, с. 21.
138. Covello A. e. a. Nucl. Phys. A, 1967, v. 104, p. 189.
139. Alaga G., Ialongo G. Phys. Lett., 1966, v. 22, p. 619.
140. Головков Н. А. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXII Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1972, с. 123.
141. Головков Н. А. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 158.
142. Головков Н. А. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1971, т. 35, с. 2272.
143. Афанасьев В. П. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 156.
144. Вылов Ц. и др. Сообщение ОИЯИ Р6-6767, 1972.
145. Вылов Ц. и др. Препринт ОИЯИ Р6-7583, 1973.
146. Вылов Ц. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 151.
147. Афанасьев В. П. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 153.
148. Зелински А. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 145.
149. Пенев И. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 159.
150. Зелински А. и др. Препринт ОИЯИ Д6-7094, 1973, с. 149.
151. Головков Н. А. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1622.
152. Афанасьев В. П. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1973, т. 37, с. 25.
153. Головков Н. А. и др. Сообщение ОИЯИ Р6-4615, 1969.
154. Головков Н. А. и др. Препринт ОИЯИ Д-3893, 1968, с. 54.
155. Baldrige W. e. a. Phys. Lett. B, 1971, v. 36, p. 179.
156. Афанасьев В. П. и др. Препринт ОИЯИ Р6-4972, 1970.
157. Зубер К. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 97.
158. Арлыт Р. и др. Препринт ОИЯИ Р6-5681, 1971.
159. Громов К. Я. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 101.
160. Зубер К. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 105.
161. Зубер К. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 110.
162. Зубер К. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 111.
163. Александров А. А. и др. Препринт ОИЯИ Р6-8154, 1974.
164. Громов К. Я. и др. Препринт ОИЯИ Р6-3945, 1968.
165. Адам И. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 118.

166. Адам И. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XXIV Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1974, с. 122.
167. Арльт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1218.
168. Арльт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1232.
169. Арльт Р. и др. В кн. «Программа и тезисы докладов XIX Ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра». Л., «Наука», 1969, с. 124.
170. Арльт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1970, т. 34, с. 702.
171. Баяр Б. и др. Препринт ОИЯИ Р12-7230, 1973.
172. Баяр Б. и др. Препринт ОИЯИ Р12-7525, 1973.
173. Арльт Р. и др. «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1973, т. 37, с. 929.
174. Джолос Р. Препринт ОИЯИ Р4-7967, 1974.