

Б-734

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7 - 10354

БОГДАНОВ
Дмитрий Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
С ПОМОЩЬЮ МАСС-СЕПАРАТОРОВ БЭМС И БЭМС-2
НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1976

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук В.А.КАРНАУХОВ,

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук В.И.МАНЬКО,

доктор физико-математических наук Ю.П.ПОПОВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Ленинградский институт ядерной физики имени Б.П.Константинова (г.Гатчина).

Защита диссертации состоится " " 1977 года
в " " часов на заседании специализированного Ученого совета Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Отзывы и замечания отправлять по адресу: г.Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований,
Ученому секретарю специализированного Ученого совета Д.047.01.05.

Автореферат разослан " " 1977 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

кандидат физико-математических наук

Ю.В.ТАРАН.

Изучение свойств ядер, удаленных от долины стабильности, является важнейшей задачей современного этапа исследования радиоактивности. Прогресс в сторону границ ядерной стабильности существенно расширяет систематику свойств ядер, а также открывает возможности получения информации о ядре, недоступные ранее. Это исследование новых областей деформации, β -распада с большой энергией, новых видов радиоактивного распада и т.д. Одним из таких новых видов распада является распад с испусканием протонов - процесс, характерный для нейтронодефицитных изотопов практически всех элементов с $Z < 83$. За последние десять лет этот вид распада ядер стал предметом широкого экспериментального исследования и средством получения интересной информации о ядре. Исследования свойств излучателей запаздывающих протонов среди изотопов Ba и Cs, а также эксперименты по поиску протонного распада из основного состояния являются темой настоящей диссертации.

В методическом плане при исследовании свойств изотопов, удаленных от линии β -стабильности, важны две характерные их особенности. Во-первых, по мере удаления от линии β -стабильности выходы резко падают, во-вторых, уменьшаются периоды полураспада. Эти особенности определяют требования к экспериментальной аппаратуре: быстротечность, высокая эффективность, необходимость разделения продуктов реакций. Наиболее полно таким требованиям удовлетворяют масс-сепараторы, работающие на линии с ускорителем. Основными элементами методик, использовавшихся в вошедших в диссертацию работах, являлись масс-сепараторы БЭС и БЭС-2, работающие на линии с циклотроном У-300. Их основные характеристики приведены в таблице I, а исследования некоторых аспектов их работы вошли в диссертацию.

Первая глава диссертации посвящена эмиссии запаздывающих протонов и носит обзорный характер. Эмиссия запаздывающих протонов из возбужденных состояний дочернего ядра, заселяемых в результате позитронного распада или К-захвата, - сложный двухступенчатый процесс, качественно аналогичный испусканию запаздывающих нейтронов. Первые излучатели запаздывающих протонов были открыты в Дубне в 1962 году. К настоящему времени список только достоверно идентифицированных излучателей содержит свыше 30 изотопов различных элементов от углерода до ртути и процол-

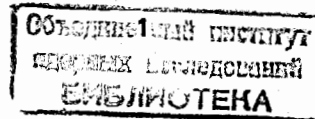


Таблица I

	БЭМС	БЭМС-2
Магнит		СП-57А
Радиус основной частицы		80 см
Угол поворота		60°
Углы захвата спектрометра		
по горизонтали		±5°30
по вертикали		±2°20
Дисперсия		39 мм / % Вр
Тип источника	нет	поверхностная ионизация, W. T = 2700°C
Давление в сепараторе	0,1-10 тор	10 ⁻⁵ тор
Время сепарации	10 ⁻⁶ с	1 с для Cs 5-10 с для Ba и P.3.
Эффективность	20%	80% для Cs (20-40)% для Ba и P.3.
Разрешение	< 30	> 670
Область использования	A < 170	элементы I, II групп, P.3.

жают непрерывно расти. Широкая распространенность излучателей запаздывающих протонов и сравнительная простота их синтеза привели к разработке ряда подходов для извлечения ядерно-физической информации из протонных спектров. Основное внимание в обзоре уделено подходам, использующимся при исследовании "тяжелых" излучателей ($Z > 30$), в которых из-за большой плотности возбужденных состояний отдельные парциальные переходы не выделяются и протонный спектр которых имеет непрерывный характер. Это анализ gross-структуры протонных спектров на основе статистической модели испускания запаздывающих протонов; флуктуационный анализ, позволяющий определять среднюю плотность возбужденных состояний; использование запаздывающих протонов для измерения массовых характеристик в области, далекой от линии β -стабильности.

II

Во второй главе приведены результаты исследования излучателей запаздывающих протонов $^{119}, ^{121}\text{Ba}$ и ^{116}Cs . Эксперименты проводились с помощью масс-сепаратора БЭМС-2. В БЭМС-2 используется закрытый высокотемпературный источник с поверхностной ионизацией и внешней мишенью. В конструкцию источника был внесен ряд существенных изменений (по сравнению с первым вариантом), позволивших увеличить его эффективную температуру до 2700°C, сохранив высокую степень надежности в работе. Исследования, проведенные с модернизированным источником, показали, что источник данного типа может успешно использоваться для эффективного (20%) и быстрого (~5 с.) разделения изотопов Ba и P.3. элементов в режиме *on line* /1/.

Излучатели запаздывающих протонов ^{116}Cs , $^{119}, ^{121}\text{Ba}$ наблюдались и были идентифицированы ранее.

Целью настоящих экспериментов было измерение их массовых характеристик и анализ формы протонных спектров /2/.

Для определения полной энергии β^+ -распада использовался метод измерения протон-позитронных совпадений. Отношение интенсивности запаздывающих протонов, испускаемых после позитронного распада, к полной интенсивности протонов, можно представить в виде

$$R(E_p) = \sum_f \alpha_f(E_p) [1 + W_e(Q) / W_\beta(Q)]^{-1}$$

где α_f - доля протонов с энергией E_p , соответствующая распаду в f -ое состояние внучатого ядра; W_e/W_b - отношение вероятностей электронного захвата и позитронного распада. Для разрешенных переходов W_e/W_b точно рассчитывается и является функцией энергии частичного β -перехода и Z . Коэффициенты α_f легко вычислить, если известны значения энергий и спинов низлежащих состояний внучатого ядра и спин начального ядра. Сравнивая экспериментальное значение R с расчетным, полученным усреднением R по протонному спектру, мы получим значение полной энергии β^+ -распада: $Q_0 - V_p$.

Для регистрации позитронов использовался пластмассовый сцинтиллятор толщиной 1мм и полной эффективностью (42±2)%. Электронная аппаратура работала по схеме быстро-медленных совпадений. Вклад p - γ совпадений определялся из экспериментов с утолщенным до 17 мм сцинтиллятором.

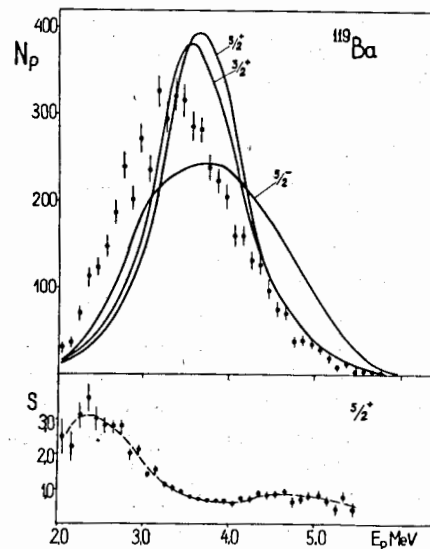
Полученные значения $Q_0 - V_p$ приведены в таблице 2. Величины ошибок в основном связаны с неопределенностью спинов изотопов. Несколько большая ошибка для ^{116}Cs следует из неопределенности схемы уровней конечного ядра. Сравнение результатов с предсказаниями массовых формул показывает, что, как и в районе Te , наиболее реалистичными оказываются массовые формулы Гарви-Кельсона и Зельдеса.

Экспериментальные значения $Q_0 - V_p$ были использованы при анализе формы протонных спектров по статистической модели испускания запаздывающих протонов. Для вычисления протонных ширин, плотностей уровней, радиационных ширин применялся набор формул, хорошо зарекомендовавших себя при описании спектров изотопов Te и Xe . Значения энергий связи протонов V_p брались из таблиц Гарви.

На рисунке показано сравнение спектра протонов для ^{119}Ba с рассчитанным по статистической модели в предположении постоянства S_p для следующих значений спинов: $3/2^+$, $5/2^+$. Отметим, что расчет качественно воспроизводит gross-структуру протонного спектра, однако количественное согласие отсутствует. Для энергий $E_p < 3,0$ МэВ интенсивность в протонном спектре превышает расчетную при всех возможных значениях спина ^{119}Ba . В нижней части рис. I приведено отношение интенсивностей экспериментального и расчетного (для спина $5/2^+$) спектров. Аналогичный результат получается и при сравнении с расчетом спектра ^{121}Ba .

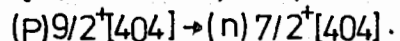
Таблица 2.

Изотоп	$Q_0 - V_p$, МэВ					
	эксперимент	Расчет по массовым формулам				
		G-K'	Z	M-S	S	T-C
^{116}Cs	$6,4 \pm 0,4$	6,6	6,8	7,6	7,5	7,8
^{119}Ba	$6,2 \pm 0,2$	6,1	6,5	6,9	6,8	7,18
^{121}Ba	$4,2 \pm 0,3$	4,2	4,4	4,75	4,6	5,35



Сравнение спектра запаздывающих протонов для ^{119}Ba с расчетами по статистической модели.

Для объяснения противоречия между расчетом и экспериментом представляется разумным допустить, что предположение о постоянстве силовой функции β -перехода является некорректным. Разногласие между расчетом и экспериментом может быть вызвано тем, что силовая функция β -распада имеет локальный резонанс при энергии возбуждения около 5,0 МэВ, связанный с переходом



Такая интерпретация представляется наиболее вероятной, хотя нельзя исключить, что отклонение спектра, рассчитанного по статистической модели, от экспериментального может быть связано с аномалией в приведенной протонной ширине, поскольку это отклонение наблюдается в области, где $\Gamma_p < \Gamma_\gamma$.

III

Специфика реакций с тяжелыми ионами – большой импульс отдачи, узкое угловое распределение продуктов – позволяет уменьшить время разделения до 10^{-6} с, используя газонаполненный сепаратор. В сепараторе этого типа отсутствует источник, а фокусировка ядер отдачи, вылетающих из мишени, по ионному заряду и скорости осуществляется за счет перезарядочных соударений в газе, заполняющем область магнитного поля. Газонаполненный сепаратор БЭМС ^{13,4/}, исследованию характеристик которого посвящена третья глава, является первым в мире сепаратором такого типа на пучке тяжелых ионов. Изучение характеристик проводилось с использованием продуктов реакций с ионами Ne, S, Ar и пучков ускоренных ионов Xe и Kr.

Было показано, что, применяя в качестве газонаполнителей воздух, He, смесь He + воздух при давлениях 0,1 – 10 Тор, и мишени с толщинами (1,0 – 2,0) мг/см², можно получить разделение продуктов реакций с разрешением (3–5)% по V_p и эффективностью сепарации 20% при $A \sim 100$. Полученное значение эффективности практически полностью обусловлено угловым распределением продуктов реакций и углами захвата спектрометра. При переходе к $A \sim 150$ эффективность снижается до 10% за счет уменьшения энергии отдачи и, следовательно, увеличения многократного рассеяния продуктов в мишени и газе.

Отсутствие данных о средних зарядах ионов с $Z > 20$ в газовых средах и большие расхождения в теоретических

предсказаниях заставили провести серию специальных экспериментов по измерению средней магнитной жесткости в He и воздухе для ядер с $36 < Z < 73$. В диапазоне Kr – Xe зависимость средних зарядов от Z оказалась близкой к зависимости $\bar{q} \sim Z^{0,5}$, предсказанной Дмитриевым и др. Однако при переходе к Р.З. элементам средний заряд как в воздухе, так и в He перестает расти и даже проявляет тенденцию к уменьшению ^{15/}. Можно предполагать, что обнаруженная аномалия связана с малым сечением потери электронов $4f$ -оболочки при скоростях (3–4) V/V_0 ..

IV

Высокая эффективность и быстродействие БЭМС позволили провести поисковые эксперименты по синтезу и наблюдению изотопов, испытывающих протонный распад из основного состояния. Эксперименты проводились в области $Z > 50$, т.к. здесь можно ожидать больших выходов и измеримых времен жизни. Для регистрации низкоэнергичных протонов ($E_p < 1,2$ МэВ) была сконструирована и изготовлена низкофоновая детектирующая система ^{16/}, состоящая из камеры торможения ядер отдачи, расположенной внутри телескопа из трех цилиндрических пропорциональных счетчиков. Система счетчиков обеспечивала одновременную регистрацию удельной ионизации, энергии короткопробежных частиц и отделение длиннопробежной компоненты. Эффективность детектирующего устройства составляла 12% от 4π .

Были проведены облучения мишеней из легких изотопов Ru, Pd, Cd, и Sn ионами ³²S и ³⁵Cl ^{17/}. Результаты приведены в таблице III, в которой указаны энергии ионов, поток ионов, выходы "мягких" и запаздывающих протонов при V_p , верхняя граница сечения образования протонно-активных ядер.

Наблюдаемые эффекты соответствуют выходу (1–2) р / час при доступных интенсивностях пучка шестизарядной серы. Это резко ограничивает возможности эксперимента. Поэтому более детальное исследование природы "мягких" протонов проводилось только для комбинации ⁹⁶Ru + ³²S (240 МэВ) ^{18,9/}. Было установлено, что в низкоэнергичной части спектра имеются две группы протонов: с энергиями (1,2 \pm 0,1) МэВ, (0,7–0,8) МэВ и периодами полураспада (2,1 \pm 0,6) с и (0,6 \pm 0,3) с соответственно. Данные активности не

Таблица III

Реакция	Е иона, МэВ	NI x 10 ¹⁵	np 10 ¹⁵ NI	Np 10 ¹⁵ NI	$\bar{\sigma}$ мкб
⁹⁶ Ru + ³⁵ Cl	215	2,5	3	230	0,3
¹⁰² Pd + ³² S	210	6	0	-	0,02
⁹⁶ Ru + ³² S	210	6	1	500	0,1
	190	22	3	320	0,3
¹⁰⁶ Cd + ³² S	240	19	0,5	-	0,05
	210	2	2	-	0,2
	190	1	0	-	0,1
¹¹² Sn + ³² S	250	1	0	10	0,1
	225	8	0,5	25	0,05
	200	7	1	50	0,1
¹¹² Sn + ³⁵ Cl	230	2,5	2	110	0,2
	210	1	1	75	0,1
	170	0,6	0	20	0,2

связаны с аппаратным "замыванием" запаздывающих протонов в мягкую область, а также не наблюдаются при облучении **Al** и **Nb** ионами серы. Собственное время жизни протонов с энергией 0,8 МэВ для $Z = 57$ составляет $10^{-(1+I)} c$, и поэтому полностью исключается возможность связать их с запаздывающими протонами. Результаты не противоречат предположению, что протоны с энергией (0,7 - 0,8) МэВ появляются при распаде из основного состояния легкого изотопа **La** или **Pr**. К сожалению, у нас нет экспериментальных аргументов, исключающих возможность, что данный излучатель является протонным изомером.

Основные результаты диссертации можно сформулировать следующим образом:

1. Исследованы основные характеристики высокотемпературного источника с поверхностной ионизацией для редких земель в режиме на линии. Показана возможность эффективного использования источника для разделения изотопов с $T_{1/2} > 1,0 c$.

2. С помощью масс-сепаратора БЭМС-2 проведены измерения β^+ -р совпадений для излучателей запаздывающих протонов ¹¹⁶Cs, ¹¹⁹I, ¹²¹Ba и получены значения полной энергии β^+ -р распадов этих изотопов.

3. На основе статистической модели испускания запаздывающих протонов проведен анализ формы спектров, который указывает на возможное существование локального резонанса в силовой функции β -распада при энергиях возбуждения дочерних ядер около 5 МэВ.

4. Впервые экспериментально исследованы возможности использования газонаполненного масс-сепаратора для быстрого разделения продуктов реакций, вызываемых многозарядными ионами. Изучены характеристики и калибровочные закономерности газонаполненного сепаратора БЭМС для ядер отдачи в диапазоне $80 < A < 170$ при гелиевом и воздушном заполнении.

5. Разработана и создана низкофоновая детектирующая система, которая в сочетании с сепаратором БЭМС позволяет эффективно исследовать короткоживущие изотопы, распадающиеся с испусканием низкоэнергичных протонов. Проведен цикл экспериментов по поиску протонного распада из основного состояния ядер с $50 < Z < 66$. Установлено, что при облучении ⁹⁶Ru ионами ³²S образуется протонный излучатель с энергией (0,7 - 0,8) МэВ и $T_{1/2} = 0,6 \pm 0,3 c$. Высказано предположение, что эта группа протонов возникает при распаде легкого изотопа **Pr** или **La** из основного состояния.

Работы, вошедшие в диссертацию

1. Д.Д.Богданов, И.Воборжил, В.А.Карнаухов, А.В.Демьянов, Л.А.Петров. Сообщение ОИЯИ РГЗ-896I, Дубна, 1975.
2. Д.Д.Богданов, И.Воборжил, В.А.Карнаухов, А.В.Демьянов, О.К.Нефедьев, Л.А.Петров. ЯФ 24, в.1, 9 (1976).
3. И.Бачо, Д.Д.Богданов, Ш.Дароци, В.А.Карнаухов, Л.А.Петров, Г.М.Тер-Акопьян. Сообщение ОИЯИ РГЗ-4453, Дубна, 1969.
4. И.Бачо, Д.Д.Богданов, Ш.Дароци, В.А.Карнаухов, Л.А.Петров, Г.М.Тер-Акопьян. ПТЭ, 2, 43 (1970).
5. Л.А.Петров, Д.Д.Богданов, В.А.Карнаухов. ЖЭТФ, 59, 1926 (1970).
6. Д.Д.Богданов, В.А.Карнаухов, Л.А.Петров. Тезисы XIII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Киев, 1972г., стр.228. Наука, Ленинград.

7. D.D. Bogdanov, V.A. Karnaukhov, L.A. Petrov. Proc. of the Int. Conf. on the Prop. Nucl. far from the Reg., v1, 457 (1970).
8. Д.Д. Богданов, В.А. Карнауков, Л.А. Петров, В.П. Бочин. Труды Межд. конф. по физике тяжелых ионов, Дубна, ОИЯИ Д7-5769, стр. 299 (1971).
9. Д.Д. Богданов, В.А. Карнауков, Л.А. Петров, В.П. Бочин. ЯФ, 16, 890 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел
31 декабря 1976 года