

X 98

6-90-292

ХУДАЙБЕРДИЕВ  
Элибой Норбоевич

УДК 539.163

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ПОИСКА  
ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР  
В ON-LINE ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Специальность: 01.04.16 - физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук-

В.А.МОРОЗОВ

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук  
Кандидат физико-математических наук

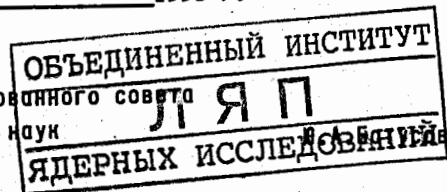
Г.М.Тер-Акопьян  
А.А.Сорокин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Радиовый институт им. Хлопина В.Г., г. Ленинград

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1990 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Специализированного совета  
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного  
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1990 г.



Заведующий:  
Председатель Диссертационного  
совета ЛЯП ОИЯИ  
Русакот Н.А. Русакот

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Настоящая работа выполнена в рамках программы ЯСНАПП-2 (ЯСНАПП - ядерная спектроскопия на пучке протонов) Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и посвящена развитию методики измерений времен жизни возбужденных состояний ядер, удаленных от полосы бета-стабильности.

Исследование таких ядер связано с рядом экспериментальных трудностей, так как эти ядра имеют малые сечения образования в ядерных реакциях и малые периоды полураспада. В связи с этим актуальным является развитие экспериментальной техники, в том числе спектрометров ядерного излучения, работающих в линию (он-лайн) с масс-сепаратором на пучке частиц.

Вероятности электромагнитных переходов или времена жизни возбужденных состояний ядер являются источником детальной информации о структуре ядра и с этим связано требование к достоверности полученных результатов, которая существенным образом зависит от обеспечения корректной обработки результатов измерений времен жизни возбужденных состояний.

Не менее важным аспектом при исследованиях электромагнитных переходов является знание эмпирических закономерностей, которые способствуют целенаправленной постановке экспериментов с учетом возможностей экспериментальной установки и правильной интерпретации результатов измерений.

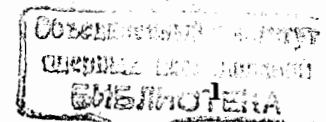
Цель работы. 1. Модернизация магнитно-линзового бета-спектрометра (МЛС) типа Герхольма для он-лайн экспериментов.

2. Создание установки е- $\gamma$  совпадений для он-лайн экспериментов на базе модернизированного МЛС и применение установки в он-лайн измерениях комплекса ЯСНАПП-2.

3. Разработка методики корректной обработки временных спектров, полученных методом задержанных совпадений.

4. Исследование зависимости экспериментальных значений парциальных периодов полураспада  $T_{1/2}$  от энергии и мультипольностей  $\gamma$ -переходов для широкого диапазона ядер.

Метод исследований и научная новизна результатов. Проведен комплекс методических исследований в целях модернизации магнитно-линзового бета-спектрометра с треугольной формой магнитного поля для он-лайн экспериментов:



- детально исследовано распределение магнитного поля в бета-спектрометре;
- исследованы траектории движения электронов в спектрометре;
- разработана и изготовлена система кольцевых и винтовых диафрагм, обеспечивающих сепарацию электронов и позитронов и оптимизацию отношений светосилы и разрешения (по импульсу) спектрометра.

В результате модернизации были улучшены электронно-оптические характеристики бета-спектрометра. Энергетическое разрешение спектрометра:  $\Delta B_p/B_p = 0,4 \div 3\%$  при светосиле  $T = 0,6 \div 5\%$  и 93% трансмиссии частиц одного знака и полного подавления частиц другого знака являются наилучшим результатом, полученным на соленоидальном магнитном бета-спектрометре с треугольной формой магнитного поля.

Создана установка е- $\gamma$  совпадений для он-лайн экспериментов по исследованию короткоживущих ядер на базе модернизированного бета-спектрометра. Временные характеристики установки  $2\tau_0 = 410$  пс при крутизне склона кривой мгновенных совпадений  $S_{T/2} = 50$  пс при регистрации совпадений  $E_\gamma > 900$  кэВ и  $E_\beta = 250$  кэВ на источнике  $^{60}\text{Co}$  не уступают результатам, полученным на известных аналогах спектрометров е- $\gamma$  совпадений.

Проведены он-лайн эксперименты в комплексе ЯСНАПП-2. Исследовались короткоживущие нуклиды  $A=151, 153-160$  с временами жизни вплоть до десятков секунд ( $^{156}\text{Yb}$  ( $T_{1/2} = 26$  с),  $^{155}\text{Tm}$  ( $T_{1/2} = 32$  с)). Были измерены спектры ЭВК и  $\gamma$ -спектры. Измерены времена жизни возбужденных состояний с энергией 39 кэВ, 136 кэВ в  $^{155}\text{Dy}$ , 74,4 кэВ в  $^{158}\text{Tm}$ . Получена оценка времени жизни уровня с энергией 110 кэВ в  $^{155}\text{Ho}$ .

Разработана методика корректной обработки временных спектров, полученных методом задержанных совпадений как в случае распада одного изомерного состояния, так и в случае распада нескольких изомерных состояний.

Проведен систематический анализ экспериментальных значений парциальных периодов полураспада  $T_{1/2}^{\gamma}$  возбужденных состояний ядер, разряжающихся  $\gamma$ -переходами мультипольности  $M1$  ( $\Delta L = 0, 2$ ),  $M2$ ,  $M4$ ,  $E1$ ,  $E3$  в нечетных и  $E2(2_1^+ - 0_1^+)$ ,  $E3(3_1^- - 0_1^+)$  в четно-четных ядрах. Обнаружено существенное отклонение степенной зависимости  $T_{1/2}^{\gamma} A^n = f(E_\gamma^B)$  от одночастичных оценок для переходов типа  $E3(3_1^- - 0_1^+)$  в четно-четных, а также для  $E3$ -переходов в нечетных ядрах. Подтверждается ранее полученная другими авторами зависимость  $T_{1/2}^{\gamma} \sim f(E_\gamma^B)$  для  $E2(2_1^+ - 0_1^+)$  переходов в четно-четных ядрах.

Научная и практическая значимость работы. Созданная установка е- $\gamma$  совпадений на базе модернизированного бета-спектрометра позволяет проводить измерения спектров ЭВК, спектров е- $\gamma$  совпадений, времен жизни возбужденных состояний в диапазоне  $10^{-10} - 10^{-6}$  с короткоживущих ядер, удаленных от полосы бета-стабильности, с периодами полураспада вплоть до секунд. Эти измерения позволяют определять мультипольности  $\gamma$ -переходов, установ-

ливать схему распада радиоактивных нуклидов, определять приведенные вероятности  $\gamma$ -переходов. Установка е- $\gamma$  совпадений используется в комплексе ЯСНАПП-2.

Усовершенствованная методика анализа кривых задержанных совпадений способствует при наличии нескольких изомерных состояний в ядре идентификации ветвей параллельного и последовательного распадов изомеров.

Полученные на основе экспериментальных данных полуэмпирические зависимости парциальных периодов полураспада  $T_{1/2}^{\gamma}$  от энергии и мультипольности  $\gamma$ -переходов являются важными как с точки зрения теории, так и эксперимента, так как они обеспечивают прогнозирование ожидаемого результата и интерпретацию полученных данных.

#### На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Модернизация бета-спектрометра и результаты проведенного комплекса методических исследований при модернизации спектрометра Герхольма для он-лайн экспериментов:

- результаты расчетов распределения магнитного поля в бета-спектрометре и сравнение их с результатами измерений;
- результаты расчетов траекторий движения электронов в реальном магнитном поле бета-спектрометра и проведенных электронно-оптических исследований;
- разработка и создание системы кольцевых и винтовых диафрагм, которые способствовали оптимизации работы бета-спектрометра;

2. Создание установки е- $\gamma$ -совпадений на базе модернизированного бета-спектрометра для он-лайн экспериментов по исследованию короткоживущих нуклидов.

3. Применение установки е- $\gamma$ -совпадений в он-лайн измерениях комплекса ЯСНАПП-2 и результаты он-лайн измерений.

4. Развитие методики анализа временных спектров, способствующих идентификации ветвей параллельного и последовательного распада при наличии нескольких изомеров в ядре и тем самым позволяющих получить достоверную информацию из экспериментальных результатов.

5. Результаты анализа парциальных периодов полураспада  $T_{1/2}^{\gamma}$  возбужденных состояний ядер для широкого диапазона энергий  $\gamma$ -переходов  $E_\gamma$  и массового числа  $A$ .

Апробация работы и публикации по теме диссертации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XXVII сессии Комитета по структуре ядра секции Ученого совета ОИЯИ по физике низких энергий (Дубна, 1986 г.), на первом и втором Рабочих совещаниях по ЯСНАПП-2 (Дубна, 1987 г., 1990 г.), XXXII совещании по ядерной спектроскопии в реакциях с нейтронами (Йрмала, 1987 г.), XXXIII совещании по ядерной спектроскопии

и структуре ядра (Баку, 1988 г.;) XI международном совещании по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Ленинград, 1990 г.), на семинарах по низким и промежуточным энергиям Научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии ЛЯП, кафедры ядерной физики СамГУ, НИИ прикладной физики ТашГУ.

Главные положения диссертации отражены в 5 опубликованных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц и 56 рисунков. Список использованной литературы включает 134 наименования.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во-введении подчеркивается актуальность исследований ядер, удаленных от полосы бета-стабильности. Формулируется цель работы и описывается структура диссертации.

В первой главе проведен обзор методов измерений времен жизни возбужденных состояний и методов обработки спектров задержанных совпадений.

Для измерений времен жизни возбужденных состояний в настоящее время используются более десяти методов, основанных на различных принципах. При исследованиях уровней, заселяемых в результате бета-распада, наиболее удобным методом является метод задержанных совпадений (МЗС). В настоящее время МЗС позволяет определять времена жизни состояний в диапазоне  $10^{-12}$  -  $10^2$  с.

Проведенный анализ методов обработки временных распределений показывает, что наиболее сложной проблемой при обработке результатов измерений времен жизни уровней короткоживущих радиоактивных нуклидов, в которых возможно наличие нескольких изомерных состояний, является выявление наличия примесной компоненты во временных спектрах, т.е. анализ многокомпонентности временного спектра. Корректный анализ временных спектров при наличии примесной компоненты требует применения нескольких методов обработки в комплексе или же введения дополнительных способов обработки.

Вторая глава. В первом разделе кратко рассматриваются примеры применения спектрометров  $e^-j$  совпадений на базе магнитных бета-спектрометров в он-лайн экспериментах. Для измерений времен жизни возбужденных состояний в нано- и субнаносекундной областях наиболее подходящими являются спектрометры  $e^-j$  совпадений на базе бета-спектрометра типа Герхольма, которые отличаются высокой изохронностью траекторий движения электронов при хорошей светосиле и хорошим энергетическим разрешением спектрометра.

Второй раздел посвящен модернизации магнитно-линзового бета-спектрометра (МЛС) типа Герхольма (В.А.Морозов, Т.М.Мунинов, ОИЯИ, Р13-3437, 1967) для он-лайн экспериментов.

Исследования короткоживущих ядер проводятся в режиме "накопление-измерение - удаление" радиоактивного источника для обеспечения нужной активности источника, а также для устранения влияния вклада активности за счет распада дочерних ядер. Для этого используется лентопротяжное устройство (ЛПУ). В связи с этим модернизация МЛС была проведена с целью внесения изменений в конструкцию спектрометра, связанных с использованием ЛПУ. Помимо этого решалась задача сепарации электронов и позитронов путем введения винтовых диафрагм, а также оптимизации электронно-оптических характеристик бета-спектрометра. С этой целью были проведены детальные расчеты и измерения распределения магнитного поля в бета-спектрометре, что позволило изучить влияние формы магнитопровода на электронно-оптические свойства МЛС (рис. 1.)

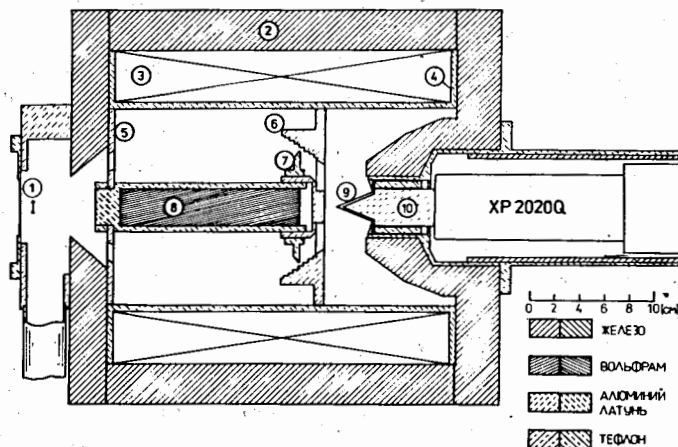


Рис. 1. Сечение  $\beta$ -спектрометра: 1- источник, 2- железный кожух, 3- обмотка, 4- алюминиевый каркас, 5- входная диафрагма, 6 и 7- внешняя и внутренняя выходные диафрагмы, 8- вольфрамовая защита, 9- пластиковый скintиллятор, 10- световод.

Векторный потенциал  $\vec{A}$  постоянного магнитного поля определяется уравнением  $\nabla \left( \frac{1}{r} \nabla \vec{A} \right) = -0,4\pi \vec{j}$ , где  $\mu = \mu(I\vec{B})$  - магнитная проницаемость,  $\vec{j}$  - плотность тока. Для решения этого уравнения для аксиально-симметричного поля использованы программы AXMASH и AXTRI из системы программ TRIMA (Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, ОИЯИ, II-8I-8I8, 198I). На рис. 2 приведены результаты вычисленных и измеренных значений магнитной

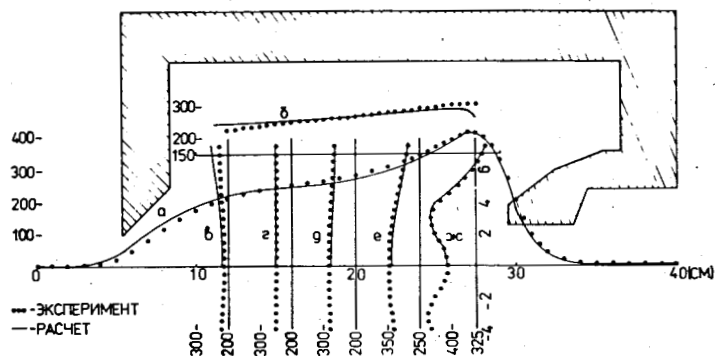


Рис. 2. Экспериментальные и вычисленные значения магнитной индукции в спектрометре при токе  $I = 6,08$  А.

индукции вдоль оси спектрометра и вдоль отрезка, параллельного оси на расстоянии 7 см от нее (кривые а и б), а также вдоль радиуса спектрометра на расстояниях 12, 16, 20, 24, 27,5 см (кривые в, г, д, е, ж). Экспериментальные точки получены с помощью датчика Холла размерами  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup>. Значения магнитной индукции (в Гс) указаны с левой стороны каждой шкалы, показывающей места измерения. В целом, максимальное расхождение экспериментальных и вычисленных значений магнитной индукции не превышает 3-4%, что позволило для расчета траекторий движения электронов использовать аналитически задаваемые значения магнитного поля в различных точках спектрометра.

Для вычислений траекторий электронов была использована программа RTUCDC (В.М.Абазов, О.В.Савченко, ОИЯИ, БИ-13-9782, 1976), с помощью которой решается система уравнений движения  $(m/e)d/dt[\vec{V}] = [\vec{B} \times \vec{V}]$ .

На рис. 3 представлены углы поворота траекторий электронов в магнитном поле спектрометра и расстояния траекторий электронов от его оси, показанные в сечениях на расстоянии 1, 3, 5 см и далее через 1 см вдоль оси до 23 см для электронов, вылетающих из источника в пределах углов от 23° до 37°. Экспериментальная проверка траекторий движения электронов проведена фотографированием изображения К-электронов от перехода  $I_{65}$  кэВ  $^{139}\text{La}$ . Хорошее согласие результатов эксперимента и расчета позволило использовать результаты расчетов для определения профиля винтовых диафрагм (рис. 4), а также расчета формы линии моноэнергетических электронов. Контрольные измерения показали, что винтовая диафрагма пропускает не менее 93% электронов, эмитированных в направлении детектора.

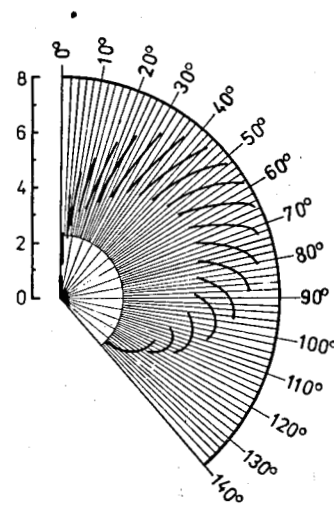


Рис. 3. Вычисленные углы поворота траекторий электронов и расстояния траекторий электронов от оси спектрометра (внешний круг рисунка соответствует диаметру вакуумной камеры спектрометра).

Исследования спектрометрических характеристик бета-спектрометра показывают, что оптимизация положения фокусирующих диафрагм позволила несколько улучшить светосилу МЛС, не ухудшив при этом его разрешения. На МЛС может быть достигнуто разрешение  $\Delta v_p/v_p = 0,4\%$  ( $T = 0,6\%$ ) при источнике  $\phi$  1 мм и величине щели выходной диафрагмы 1,25 мм. При источнике  $\phi$  5 мм и величине щели 5 мм -  $\Delta v_p/v_p = 3\%$  и  $T = 5\%$ . Порог регистрации электронов не превышает 4-6 кэВ.



Рис. 4. Система выделяющих диафрагм.

На рис. 5 приведены значения абсолютной эффективности регистрации электромагнитных переходов с учетом светосилы спектрометров (в данном случае светосила бета-спектрометра  $T = 1\%$  и величина телесного угла для спектрометров  $\text{Ge(Li)}$  также равна  $1\%$ ), абсолютной эффективности регистрации излучения и доли соответствующего излучения (конверсия или лучи) на распад. Интенсивность перехода принята равной  $I$ . Несомненно, что в области энергий меньше 150 кэВ в рассмотренном случае эффективность регистрации переходов по конверсионным электронам более

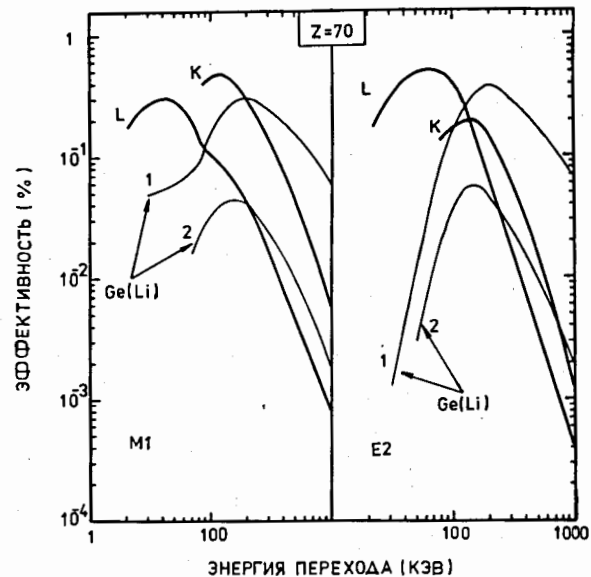


Рис. 5. Эффективность регистрации электромагнитных переходов типа M1, E2 в изотопах с  $Z = 70$ : с помощью бета-спектрометра по K, L - конверсионным электронам (K, L) и Ge(Li)-детекторов по  $\gamma$ -лучам (1 - объем 38 см<sup>3</sup>, 2 - объем 1,3 см<sup>3</sup>).

высокая, чем по  $\gamma$ -излучению, что демонстрирует преимущество использования спектрометров e- $\gamma$  совпадений по сравнению со спектрометрами  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений в этой области энергий.

На основе модернизированного бета-спектрометра и  $\gamma$ -спектрометров создана установка e- $\gamma$  совпадений - рис. 6 (раздел 3) для он-лайн экспериментов. В он-лайн экспериментах радиоактивные ионы от масс-сепаратора имплантируются в алюминизированную майларовую ленту, расположенную под углом 45° относительно направления ионного пучка. Накопленная активность одновременно является источником для бета-спектрометра, т.е. накопление и измерение происходит на одном и том же месте. Лентопротяжное устройство спектрометра по истечении заданного времени накопления и измерения отводит радиоактивный источник на расстояние 200 мм за 0,1 с. Время цикла смены источника  $\sim 1$  с.

Электронное обеспечение спектрометра (рис. 7) включает в себя блоки фирмы ORTEC и блоки аналоговой и цифровой электроники, разработанные в ЛЯП ОИЯИ. Основой электроники является микроЭВМ КМ-001, которая обеспечивает автоматическое управление лентопротяжным устройством, режимами

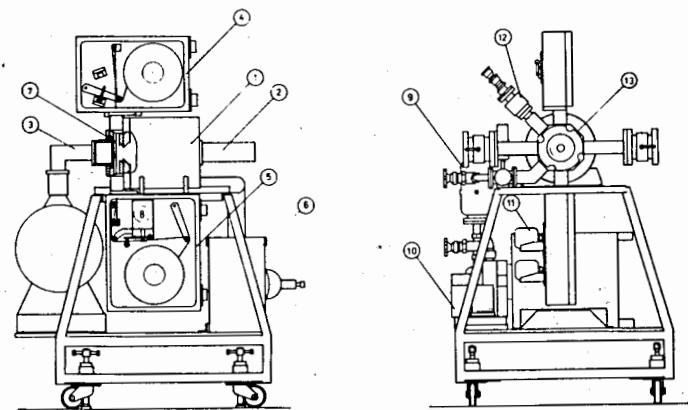


Рис. 6. Конструкция и основные узлы спектрометра e- $\gamma$  совпадений: 1- бета-спектрометр, 2- детектор излучения, 3- детектор  $\gamma$ -излучения, 4,5- верхняя и нижняя камеры ЛПУ, 6- магниторазрядный насос НОРД-250, 7- алюминизированная майларовая лента, 8- электромагнит ЛПУ, 9- азотная ловушка, 10- форвакуумный насос, 11- электродвигатели КД-25, 12- шлюз для введения градуировочных источников, 13- измерительная камера.

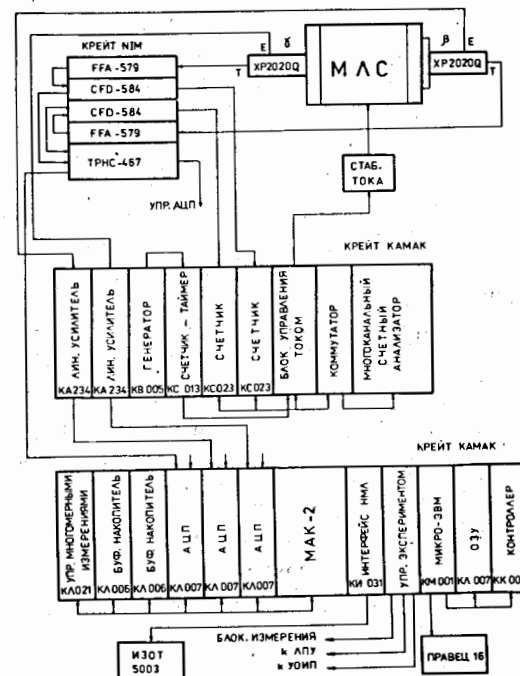


Рис. 7. Блок-схема спектрометра e- $\gamma$  совпадений.

измерений и осуществляет режим трехмерного  $e-\gamma-t$  анализа совпадающих излучений.

Временные характеристики спектрометра совпадений были изучены на источнике  $^{60}\text{Co}$  в режиме  $\beta-\gamma$  совпадений. Результаты измерений представлены на рис. 8, где приведены значения разрешающего времени установки и

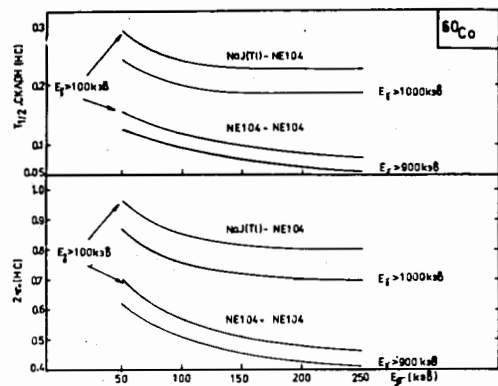


Рис. 8. Временные характеристики спектрометра  $e-\gamma$ -совпадений.

крутизна склона кривых мгновенных совпадений (КМС) в различных энергетических интервалах. При использовании в  $\gamma$ -спектрометре пластического сцинтиллятора и выборе  $E_\gamma > 900$  кэВ при  $E_\beta = 250$  кэВ были получены

разрешение  $2\tau_0 = 410$  пс и крутизна склона КМС  $S_{I/2} = 50$  пс.

Проведенная нами оценка вклада неизохронности траекторий электронов и временных разбросов системы транспортировки света бета-спектрометра (сцинт. + световод + ФЭУ) в разрешающее время спектрометра совпадений показывает, что  $\delta t$  (МЛС) = 365 пс при  $E_e = 250$  кэВ и  $\delta t$  (МЛС) = 474 пс при  $E_e = 20$  кэВ.

Спектрометр  $e-\gamma$  совпадений был использован в он-лайн измерениях комплекса ЯСНАПП-2 (раздел 4). Исследовались спектры ЭВК,  $\gamma$ -спектры, а также времена жизни возбужденных состояний короткоживущих ядер с  $A = 151, 153, 155-160$  в линию с масс-сепаратором на пучке протонов фазотрона ОИЯИ. Измерения проведены при интенсивности протонного пучка  $0,8 \div 1,2$  мкА. На рис. 9 приведены спектры ЭВК, измеренные в мультиплексном режиме во время накопления активности (он-лайн) и после отклонения ионного пучка (офф-лайн).

Измерены времена жизни возбужденных состояний с энергией 39,4; 86,7; 136; 202 кэВ в ядре  $^{155}\text{Dy}$ , 61,1 кэВ в  $^{157}\text{Dy}$ . Полученные значения хорошо согласуются с ранее полученными результатами других авторов. Измеренное время жизни уровня 74,4 кэВ в ядре  $^{158}\text{Tm}$  составляло  $T_{I/2} = 1,74(4)$  нс (рис. 10). Время жизни уровня 110 кэВ в  $^{155}\text{Ho}$  оценено нами как  $T_{I/2} < 0,7$  нс. Полученное значение фактора запрета  $F < 130$  показывает, что переход 110 кэВ может являться  $\ell$ -запрещенным М1-переходом типа  $1g_{7/2} - 2d_{5/2}$ , происходящим в сферическом ядре, или же переходом в деформированном ядре между состояниями  $7/2^+/404/$  и  $5/2^+/402/$ .

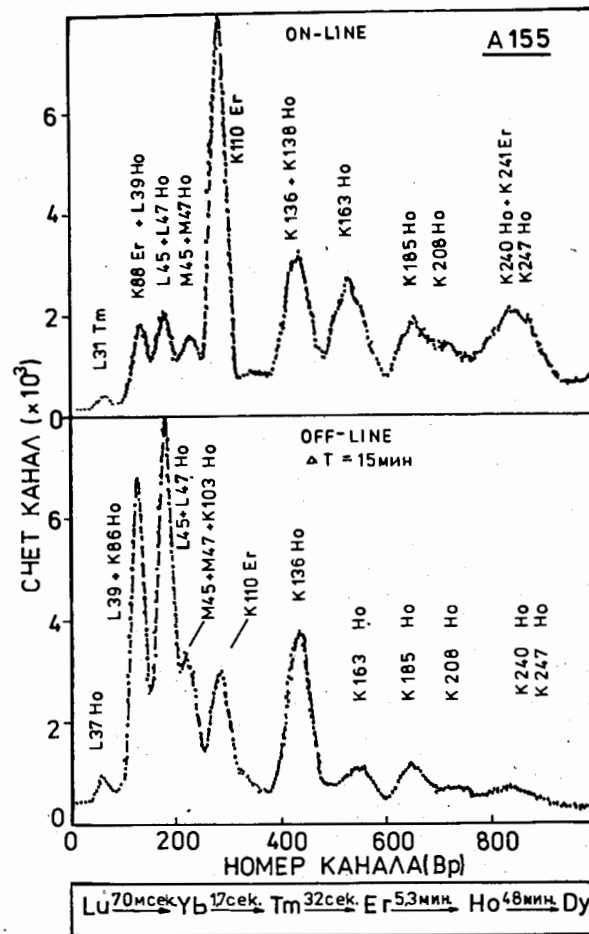


Рис. 9. Спектры ЭВК для изобар с  $A = 155$ , измеренные при непрерывном накоплении (он-лайн) и после отклонения (офф-лайн) ионного пучка.

**Третья глава.** В первом разделе описываются программы обработки временных спектров, созданные при участии автора в Научно-экспериментальном отделе ядерной спектроскопии и радиохимии ЛЯП.

Во втором разделе, на основе обработки генерированных спектров задержанных совпадений проведен анализ некоторых частных случаев распада изомерных состояний ядер, когда времена жизни состояний  $\tau_i > 2\tau_0$  ( $\tau_0$  - полуширина на полувысоте КМС).

Нами были рассмотрены два случая регистрации изомерных состояний ядер при радиоактивном распаде:

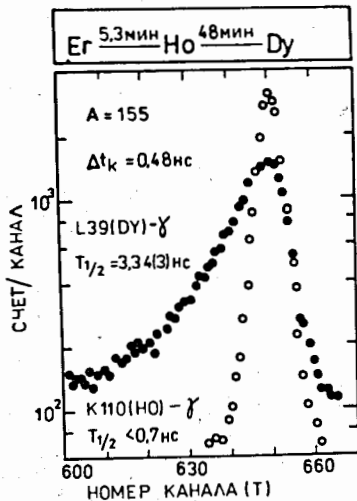
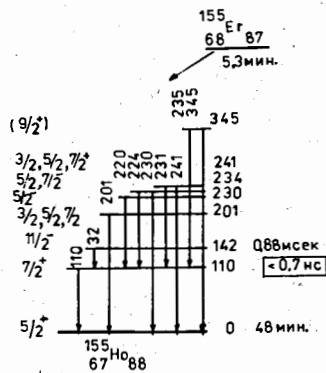
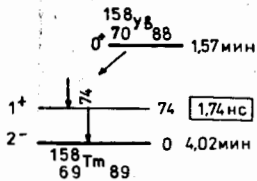
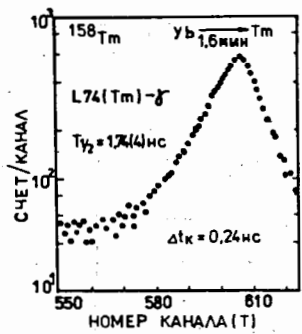


Рис. 10. Кривые задержанных совпадений при распаде уровней с энергиями 74,4 кэВ в  $^{158}\text{Tm}$ , 39 кэВ в  $^{155}\text{Dy}$  и 110 кэВ в  $^{155}\text{Ho}$  и фрагменты схем распада.

1. Распад взаимно не связанных состояний (параллельный распад, рис. IIа). Предполагается, что в канале СТАРТ временного спектрометра регистрируются  $\gamma$ -лучи  $E_{\gamma_1}$  и  $E'_{\gamma_1}$ , а в канале СТОП -  $E_{\gamma_2}$  и  $E'_{\gamma_2}$ .

2. Распад состояний, связанных последовательными ядерными переходами (последовательный распад, рис. IIб). В этом случае могут быть два варианта: 1) в канале СТАРТ регистрируется переход  $E_{\gamma_1}$ , а в канале СТОП -  $E_{\gamma_3}$ ; 2) при регистрации  $E_{\gamma_1}$  в канале СТАРТ,  $E_{\gamma_2}$  и  $E_{\gamma_3}$  регистрируются в канале СТОП. Временные спектры генерировались как свертка одного или двух экспоненциальных распределений с симметричной

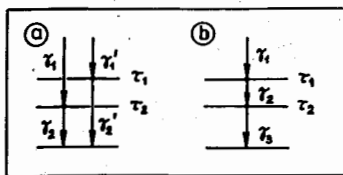


Рис. II. Варианты распада возбужденных состояний ядер: а - параллельный распад, б - последовательный распад.

аппаратурной кривой в виде гауссиана и в двух вариантах  $\delta = \tau_2/\tau_1$ ;  $\delta < 1$  и  $\delta > 1$ .

Обработка полученных спектров производилась с помощью программы POSITRONFIT (Kirkgaard P., Eldrup M. - *Comp. Phys. Comm.*, 1972, v. 3, p.240-255) и сводилась к процедуре определения  $\tau$  при вариации начального канала обработки  $N_{\text{н.к.}}$  в предположении, что спектр является однокомпонентным. Ранее подобный подход для обработки временных спектров использовался для оценки вычитаемого фона на конечный результат (W.R.Neal, H.B.Kraenz, *Phys. Rev.*, 1965, v. B137, p.II64-II74), а также для исследования зависимости полученного времени жизни для разных методов обработки от интервала обрабатываемого участка временного спектра (B.Olsen, L. Bostrom, *Nucl. Instz. Meth.*, 1966, v. 44, p.65-72). Результаты обработки с вариацией  $N_{\text{н.к.}}$  показывают, что для однокомпонентного спектра ( $\delta = 1$ ) наблюдается постоянное плато в зависимости  $\tau = f(N_{\text{н.к.}})$  в то время, когда для двух компонентного спектра полученное значение  $\tau$  возрастает по мере роста номера начального канала обработки (рис. 12).

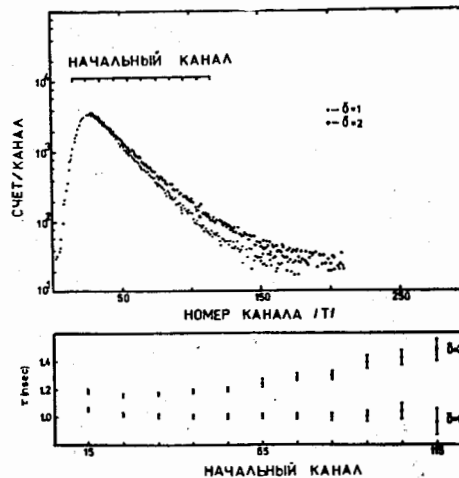


Рис. 12. Результаты обработки спектров задержанных совпадений с вариацией  $N_{\text{н.к.}}$  для однокомпонентного ( $\delta = 1$ ) и двухкомпонентного спектров в случае параллельного распада изомерных состояний.

Более объективный вывод о неоднородности временного распределения можно получить подгонкой полученной зависимости  $\tau = f(N_{\text{н.к.}})$  линией регрессии  $\tau = a N_{\text{н.к.}} + b$ .

Наклон линии характеризуется параметром  $a$ . Для случая параллельного распада зависимость значения  $a$  от  $\delta$  при разных соотношениях  $I_2/I_1$  приведены на рис. 13. Анализ зависимости  $a = f(I_2/I_1)$  показывает, что чувствительность способа обработки с вариацией начального канала обработки к наличию примесной компоненты во временном распределении достигает максимума при отношении интенсивностей  $I_2/I_1 \approx 0,5 \div 1$  (рис. 14).

Для спектров, соответствующих варианту 1) последовательного распада, подгонка полученной зависимости  $\tau = f(N_{\text{н.к.}})$  (рис. 15) прямой линией, начиная с 45-65 каналов (где  $\chi^2 \leq 1,1$ ) показывает, что параметр  $a$  отрицательный и его значение уменьшается как по мере уменьшения  $\delta < 1$ ,



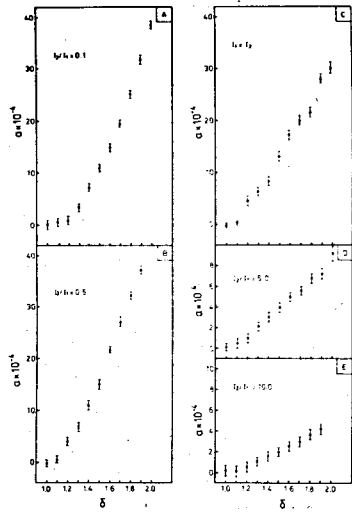


Рис. 13. Зависимость параметра  $\alpha$  от  $\delta$  для разных значений  $I_2/I_1$ .

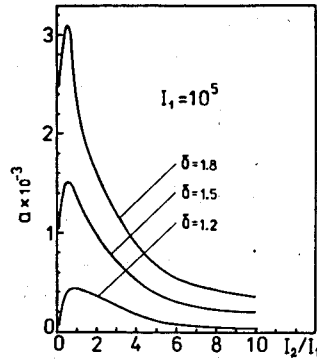


Рис. 14. Зависимость значения  $\alpha$  от отношения интенсивностей  $I_2/I_1$ .

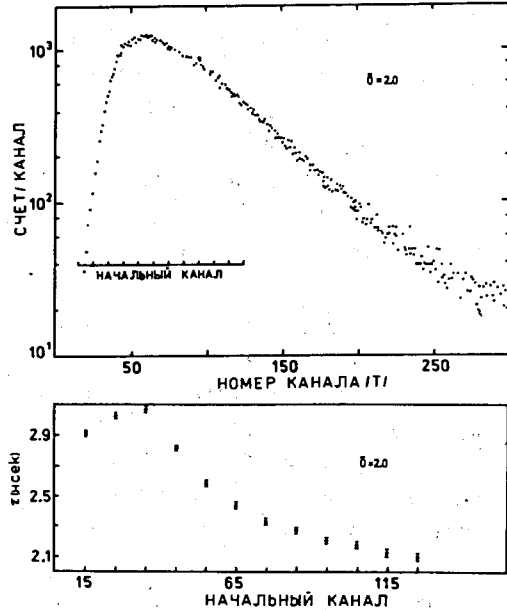


Рис. 15. Результаты обработки спектра задержанных совпадений при последовательном распаде (вариант 1).

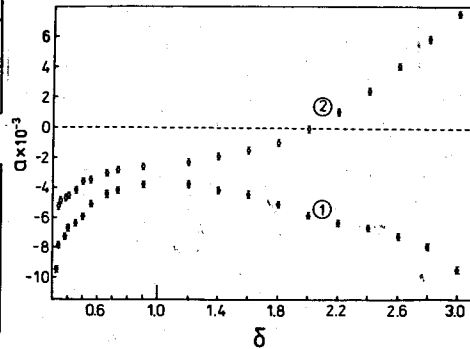


Рис. 16. Зависимость параметра  $\alpha$  от  $\delta$  для последовательного распада (1 - вариант 1, 2 - вариант 2)

так и при увеличении  $\delta > 1$  (рис. 16, кривая 1). Для спектров, соответствующих варианту 2) последовательного распада, наблюдается характерная для этих спектров зависимость  $\alpha = f(\delta)$  (рис. 16, кривая 2): при  $\delta < 2$  параметр  $\alpha < 0$  и уменьшается с уменьшением  $\delta$ ; для спектров с  $\delta = 2$ ,  $\alpha \approx 0$  и в дальнейшем по мере увеличения  $\delta$  ( $\delta > 2$ ) - наблюдается рост параметра  $\alpha$  в область положительных значений.

Предложенный способ обработки был применен для обработки временных спектров распада уровней с энергиями 379 и 316 кэВ в  $^{169}\text{Tm}$ . Эти уровни распадаются последовательными переходами. При этом измеренный спектр  $K93-\gamma > 100$  кэВ совпадает с вариантом 1 и  $K93-\gamma > 50$  кэВ с вариантом 2. Полученные значения параметра  $\alpha = 5,6(1)$  для  $K93-\gamma > 50$  кэВ и  $\alpha = -4,76(4)$  для  $K93-\gamma > 100$  кэВ хорошо согласуются с установленной нами зависимостью  $\alpha \sim f(\delta)$  для последовательного распада состояний. В этом случае, анализируя полученные результаты, можно сделать вывод и об относительном расположении изомерных состояний.

Из проведенного анализа следует, что:

1. Параметр  $\alpha > 0$  может быть как при параллельном, так и при последовательном двухкомпонентном распаде. При этом, если распад последовательный, то  $\tau_2 > 2\tau_1$  и  $E^*(\tau_1) > E^*(\tau_2)$ .

2. Параметр  $\alpha < 0$  позволяет установить, что наблюдается последовательный двухкомпонентный распад.

3. Значение параметра  $\alpha \approx 0$  соответствует чистому однокомпонентному распаду или параллельному двухкомпонентному распаду, когда интенсивность одной компоненты намного больше интенсивности другой. Если  $\alpha \approx 0$ , то не исключается также возможность последовательного двухкомпонентного распада с  $\delta = 2$  ( $\tau_2 = 2\tau_1$ ).

В четвертой главе для широкого диапазона ядер проведен анализ частичных периодов полураспада  $T_{1/2}^j$  возбужденных состояний ядер, разряжающихся  $\gamma$ -переходами мультипольности  $M4, M2, E3, E1, M1$  ( $\Delta l = 0, 2$ ) в нечетных ядрах и  $E2(2_1^+ - 0_1^+)$ ,  $E3(3_1^- - 0_1^+)$  в четно-четных. Для выявления полуэмпирической зависимости  $T_{1/2}^j$  от энергии  $\gamma$ -переходов была принята аппроксимация функции  $T_{1/2}^j A^n = a E_\gamma^{-b}$  в виде прямой в дважды логарифмическом масштабе в соответствии с представлениями о радиационных переходах в одночастичной модели ядра, где  $b = 2L + 1$ ,  $n = (2/3)L$  для электрических и  $n = 2/3(L - 1)$  для магнитных переходов;  $a$  - величина, постоянная для переходов конкретной мультипольности  $L$ : Такой подход отличается от подхода других авторов к этой проблеме (*L. Grodzins, 1962, PL, v. 2, №2, p.88; S. Raman et al., 1988, PR.C, v. 37, №2, p.805; S. Raman et al., 1989, ADNDT, v. 42, №1, p.1*), которые рассматривают зависимость  $T_{1/2}^j \sim f(E_\gamma^{-b}, A^n)$ . Наш подход позволяет исследовать степенную зависимость  $T_{1/2}^j \sim f(E_\gamma^{-b})$  исходя из представлений электромагнитных переходов в одночастичной модели ядра.

Для расчетов доверительных интервалов массивов  $\lg(T_{I/2}^{\tau} A^n)$  был использован метод регрессивного анализа. Несмотря на условность предположения о нормальном распределении экспериментальных данных в логарифмическом масштабе показано, что массивы экспериментальных данных (кроме переходов с мультипольностью E1) практически включаются в доверительные интервалы с уровнем достоверности 68% и эти интервалы в большинстве случаев довольно узки, не более одного - полутора порядков по разбросу значений  $T_{I/2}^{\tau}$ . Это может означать, что принятый метод аппроксимации оказался оправданным. На рис. 17 приведены массивы экспериментальных точек и доверительные интервалы для E2( $2_1^+ - 0_1^+$ ) и E3 переходов в четно-четных ядрах.

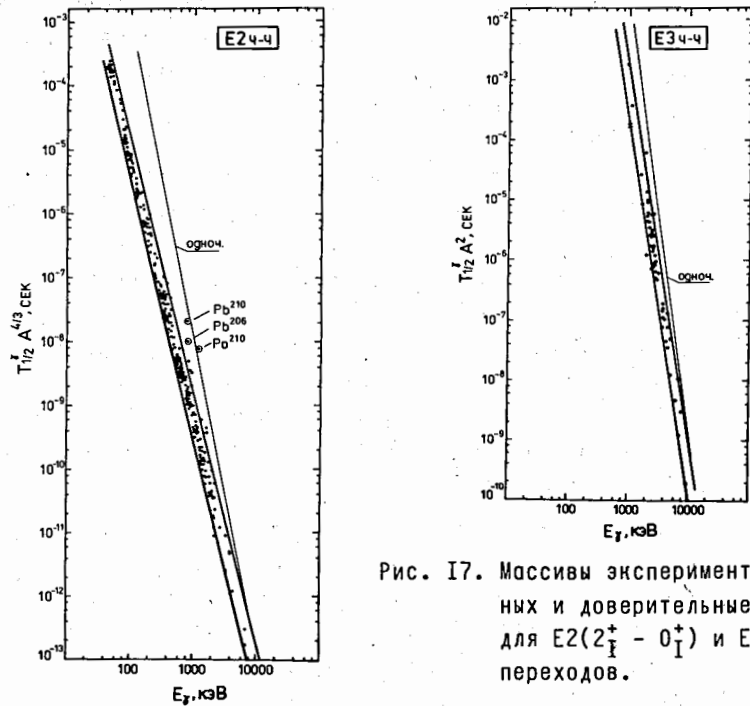


Рис. 17. Массивы экспериментальных данных и доверительные интервалы для E2( $2_1^+ - 0_1^+$ ) и E3( $3_1^- - 0_1^+$ ) переходов.

Из рис. 18 видно, что доверительные интервалы  $T_{I/2}^{\tau} A^n$  для переходов различной мультипольности достаточно удалены друг от друга. Таким образом, этот график может быть использован для прогнозирования эксперимента или для интерпретации полученных результатов.

Оценка степенных параметров  $b$  в функции  $T_{I/2}^{\tau} A^n = a E_{\gamma}^{-b}$ , входящих линейно в аппроксимацию и оценки их погрешностей показывают, что для большинства массивов переходов различной мультипольности эмпирические значения  $b$  совпадают с одночастичными (рис. 19). Исключение составляют E2 ( $2_1^+ - 0_1^+$ ) ( $b_{\text{эмп.}} = 3,98(5)$ ) и E3 ( $3_1^- - 0_1^+$ ) ( $b_{\text{эмп.}} = 6,11(37)$ ) - переходы в

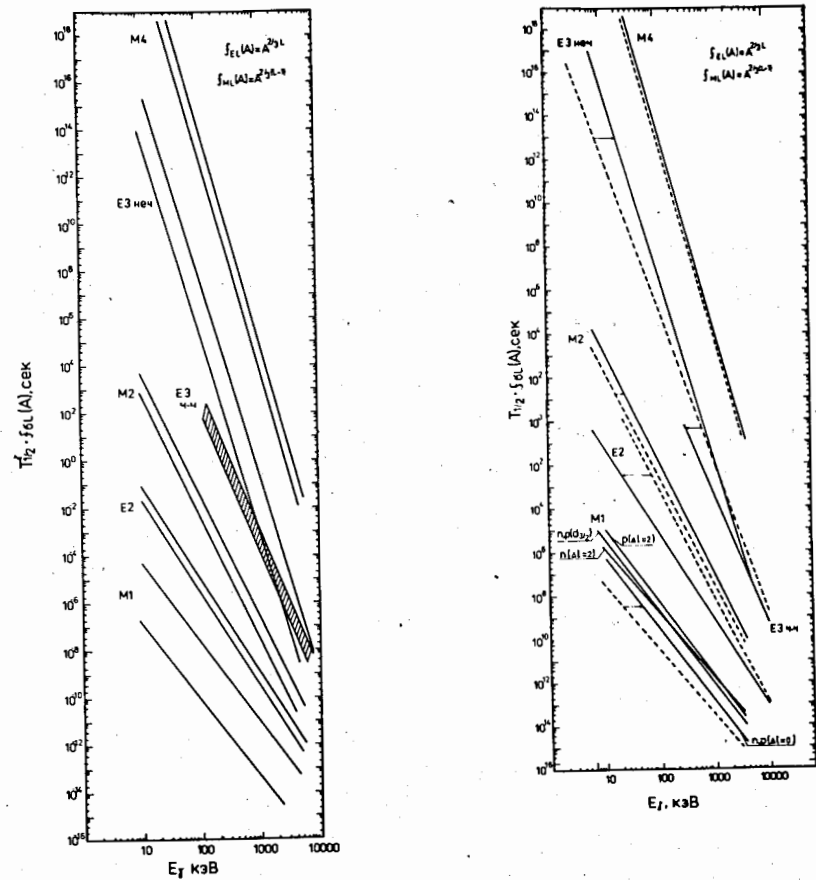


Рис. 18. Доверительные интервалы для переходов различной мультипольности.

Рис. 19. Линии регрессии (сплошные линии) и одночастичных оценок (пунктирные).

четно-четных и E3 переходы в нечетных ядрах ( $b_{\text{эмп.}} = 8,51(0,26)$ ), для которых даже при уровне достоверности 99,99% предельные значения параметров  $b$  заметно отличаются от одночастичных.

В заключение приводятся основные результаты, полученные в диссертации:

- I. Проведен полный комплекс методических исследований в целях модернизации магнитно-линзового бета-спектрометра Герхольма для он-лайн экспериментов:
  - детально исследовано распределение магнитного поля в бета-спектрометре;
  - исследованы траектории движения электронов в спектрометре;

- разработана и изготовлена система кольцевых и винтовых диафрагм, обеспечивающих сепарацию электронов и позитронов и оптимизацию отношений светосилы и разрешения (по импульсу) спектрометра.

В результате модернизации улучшены электронно-оптические характеристики бета-спектрометра. Энергетическое разрешение бета-спектрометра  $\Delta E_p/E_p = 0,4 \pm 3\%$  при светосиле  $T = 0,6 \pm 5\%$  и 93% трансмиссии электронов для выбранного акцентанса входных диафрагм при полном подавлении позитронов является наилучшим результатом, полученным на подобных бета-спектрометрах с треугольной формой магнитного поля.

2. Создана установка  $e^- \gamma$  совпадений для он-лайн экспериментов по исследованию короткоживущих ядер на базе модернизированного бета-спектрометра. Временное разрешение установки  $2\tau_0 = 410$  пс и  $S_{I/2} = 50$  пс при  $E_\gamma > 900$  кэВ и  $E_\beta = 250$  кэВ не уступает результатам, полученным на известных аналогах спектрометров  $e^- \gamma$ -совпадений.

3. Установка  $e^- \gamma$  совпадений была использована в он-лайн экспериментах комплекса ЯСНАПП-2. Экспериментальные результаты показывают высокую эффективность использования созданной установки для исследований ядер удаленных от полосы бета-стабильности.

4. Получена оценка периода полураспада состояния с энергией 110 кэВ в  $^{155}\text{Ho}$ , возбуждаемом при радиоактивном распаде  $^{155}\text{Er}$ . Измерено время жизни уровня 74,4 кэВ в  $^{158}\text{Tm}$ .

5. Разработана методика корректной обработки временных спектров, полученных методом задержанных совпадений. Развитая методика анализа временных спектров способствует идентификации ветвей параллельного и последовательного распада изомеров при наличии нескольких изомеров в ядре и корректно выбрать вид функции свертки для дальнейшей обработки.

6. Проведен систематический анализ парциальных периодов полураспада  $T_{I/2}^{\gamma}$  возбужденных состояний ядер, разряжающихся  $\gamma$ -переходами мультипольности  $M1(\Delta L = 0, 2)$ ,  $M2$ ,  $M4$ ,  $E1$ ,  $E3$  в нечетных и  $E2(2_1^+ - 0_1^+)$ ,  $E3(3_1^- - 0_1^+)$  в четно-четных ядрах.

Обнаружено существенное отклонение степенной зависимости  $T_{I/2}^{\gamma} A^n = f(E_\gamma^{-b})$  от одночастичных оценок для  $E3$ -переходов в четно-четных и нечетных ядрах. Подтверждается ранее полученная другими авторами зависимость  $T_{I/2}^{\gamma} \sim f(E_\gamma^{-4})$  для  $E2(2_1^+ - 0_1^+)$  переходов в четно-четных ядрах.

Полученные графики эмпирической зависимости  $T_{I/2}^{\gamma} A^n = f(E_\gamma^{-b})$  могут быть использованы для прогнозирования эксперимента или для интерпретации полученных результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.М.Абазов, А.К.Качалкин, Э.Крупа, Н.А.Лебедев, Г.Лизурей, В.А.Морозов, В.Таньска-Крупа, Э.Н.Худайбердиев. Модернизация магнитно-линзового спектрометра для он-лайн экспериментов.- Дубна, 1985.-12 с. (Сообщения/Объед.ин-т ядерн.исслед.: Р6-85-238).
2. В.Н.Абросимов, Э.Крупа, В.А.Морозов, В.М.Разов, В.Таньска-Крупа, Э.Худайбердиев. Спектрометрические характеристики установки  $e^- \gamma$  совпадений - МЛС для он-лайн экспериментов.-Дубна, 1986, -II с. (Препринт/Объед.ин-т ядерн.исслед.: Р6-86-675). В сб.: Тезисы докладов XXXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра.- Л.-Наука, 1987, с.522.
3. Н.А.Бонч-Осмоловская, В.А.Морозов, Э.Н.Худайбердиев. Парциальные периоды полураспада  $T_{I/2}^{\gamma}$  возбужденных состояний ядер. -Изд.АН СССР, сер.физ., т.52, II, 1989, с.2159-2168. В сб.: Тезисы докладов XXXIX совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра.-Л.:Наука, 1988, с.132.
4. В.А.Морозов, Э.Н.Худайбердиев. Анализ кривых задержанных совпадений при параллельном и последовательном распаде изомерных состояний в ядре.-Дубна, 1989.-15 с. (Препринт/Объед.ин-т ядерн.исслед.: Р6-89-765). В сб.: Тезисы докладов XL совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра.- Л.:Наука, 1990, с.454
5. В.Н.Абросимов, Д.Еленков, В.Г.Калинников, Э.Крупа, В.А.Морозов, Э.Н.Худайбердиев, Ю.В.Юшкевич, М.Янички. Спектрометр  $e^- \gamma$  совпадений в он-лайн измерениях комплекса ЯСНАПП-2. В сб.: Тезисы докладов XL совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра.-Л.: Наука, 1990, с. 441.