

B-294

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6-91-176

ВЕНОС
Драгослав

УДК 539.163

МНОГОДЕТЕКТОРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР МУК
НА БАЗЕ Ge(Li) -ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ
ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДОВ ^{211}Rn И ^{159}Yb

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1991

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

Кандидат физико-математических наук
Кандидат физико-математических наук

В.А. Морозов
И.Адам

Официальные опоненты:

Доктор физико-математических наук
Кандидат физико-математических наук

Д.Э. Пенионжкевич
А.А. Сорокин

Ведущее научно-исследовательское учреждение
Ленинградский институт ядерной физики
им. В.П. Константинова АН СССР, г. Гатчина

Защита диссертации состоится "___"_____1991 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 "___"_____1991 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук

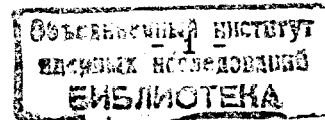
Ю.А. Батусов

Актуальность темы диссертации. Спектрометрия γ -излучения, наблюдаемого при распаде радиоактивных нуклидов, является одним из важных методов при определении характеристик атомных ядер. Большое значение, которое имеет определение таких квантовых характеристик как спины ядерных уровней, вероятности электромагнитных переходов и их мультипольный состав, обусловлено тем, что эти физические величины представляют собой чувствительные критерии проверки ядерных потенциалов и волновых функций в теоретических моделях ядер. Среди многих аспектов изучения структуры атомного ядра в последнее время большое внимание уделяется изучению свойств ядер, удаленных от полосы β -стабильности см. например работы в Conference Abstract - 5th int. conf. on nuclei far from stability, Sept. 14-19, 1987, Rosseau Lake, Ontario, Canada. Поскольку периоды полураспада таких ядер $T_{1/2} \leq 1$ мин., то эффективное их исследование можно проводить только на "ИЗОЛЬ"-установках.

Настоящая работа выполнена в Научно-экспериментальном отделе ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Она посвящена разработке и созданию многодетекторного спектрометра МУК (Многодетекторные угловые корреляции), предназначенного для исследований радиоактивного распада короткоживущих нейтронно-дефицитных нуклидов, удаленных от полосы бета стабильности, в рамках экспериментального "ИЗОЛЬ" комплекса ЯСНАПП-2 (ЯСНАПП - Ядерная спектроскопия на пучке протонов) и проведению исследований ядер с помощью спектрометра МУК.

Цель работы:

1. Разработка и создание многодетекторного спектрометра МУК на базе Ge(Li)-детекторов для изучения ядерного γ -излучения в режимах "он-лайн" и "офф-лайн".
2. Создание методики обработки экспериментальных данных для спектрометра МУК.
3. Разработка пакета вычислительных программ для обработки экспериментальной информации, получаемой на



спектрометре МУК.

4. Исследование распадов $^{211}\text{Rn} \rightarrow ^{211}\text{At}$ и $^{159}\text{Yb} \rightarrow ^{159}\text{Tm}$ с помощью спектрометра МУК.

Метод исследований и научная новизна результатов. Создан многодетекторный спектрометр МУК с семью Ge(Li)-детекторами, позволяющий проводить измерения γ - γ -совпадений, временных спектров, угловых γ - γ -корреляций и одиночных γ -спектров, как в режиме "он-лайн" на пучке фазотрона ЛЯП ОИЯИ, так и в режиме "офф-лайн" для долгоживущих радиоактивных нуклидов.

Были отработаны методики измерений одиночных γ -спектров, спектров γ - γ -совпадений, временных спектров и угловых γ - γ -корреляций, а также методика обработки экспериментальных данных по этим измерениям. Для "сшивания" данных по угловым γ - γ -корреляциям, полученных на различных парах детекторов, был предложен метод, основанный на использовании информации по случайным γ - γ -совпадениям, которые регистрируются в ходе эксперимента на спектрометре МУК.

Написан пакет вычислительных программ для обработки информации, получаемой на спектрометре МУК.

Предложена методика обработки результатов корреляционного эксперимента. Методика основана на анализе значений величин χ^2 . Такой подход позволяет при определении спинов уровней получить корректное значение доверительного интервала.

В режиме "офф-лайн" были проведены измерения угловых γ - γ -корреляций, наблюдаемых при распаде $^{211}\text{Rn} \rightarrow ^{211}\text{At}$. Корреляции для 15 каскадов были измерены впервые. В энергетическом спектре ^{211}At были установлены однозначно спины для 10 уровней при значении доверительного интервала 95%. Для 8 γ -переходов были установлены значения отношений смеси δ . Анализ этих значений вместе с другими электромагнитными характеристиками ядра ^{211}At в рамках многочастичной оболочечной модели показал, что в базис протонных волновых функций, обычно используемых при расчетах (т.е. $h_{9/2}$, $f_{7/2}$ и $i_{13/2}$), необходимо ввести также одночастичные состояния $f_{5/2}$, $p_{3/2}$, $p_{1/2}$.

Проведены "он-лайн" эксперименты в линию с

масс-сепаратором комплекса ЯСНАПП-2. Исследовались короткоживущие нуклиды с $A=159$ с целью получения новых данных по распаду ^{159}Yb ($T_{1/2}=1.4$ мин, $Q_{\beta^+}^{\text{SYS}}=4.6$ МэВ). Проведен анализ измеренных одиночных γ -спектров, спектров γ - γ -совпадений и спектров задержанных γ - γ -совпадений. В результате анализа экспериментальных данных было идентифицировано 36 новых γ -переходов. Предложена схема распада ^{159}Yb , в которую, в дополнение к ранее известным двум возбужденным состояниям ^{159}Tm , введено 17 новых уровней. Уточнено время жизни состояния с энергией 166.1 кэВ, $T_{1/2}=37.5 \pm 1.3$ нс, и определены приведенные вероятности двух γ -переходов.

Практическая значимость работы. Созданный многодетекторный спектрометр МУК с семью Ge(Li)-детекторами, позволяет проводить в одном эксперименте измерения γ - γ -совпадений, времен жизни возбужденных состояний ядер в диапазоне от 7 нс до нескольких сот наносекунд, угловых γ - γ -корреляций и одиночных γ -спектров, как в режиме "он-лайн" для короткоживущих ядер, получаемых на масс-сепараторе комплекса ЯСНАПП-2, так и в режиме "офф-лайн" для долгоживущих радиоактивных нуклидов. Углы между детекторами спектрометра МУК фиксированы, и они позволяют измерять корреляционную функцию в одном эксперименте. Это означает, что при обработке экспериментальных данных по угловым γ - γ -корреляциям нет необходимости введения поправок на распад радиоактивного источника и на флуктуацию интенсивности ионного пучка масс-сепаратора. Перечисленные выше измерения позволяют определять энергии и интенсивности γ -переходов, устанавливать схему распада радиоактивных нуклидов, определять отношения смеси γ -переходов и приведенные вероятности перехода в случае наличия информации о типе γ -перехода (магнитный или электрический).

Метод "сшивания" данных по угловым γ - γ -корреляциям, полученных для различных пар детекторов, при котором используются данные по случайным совпадениям, можно применить и на других многодетекторных системах.

Новая методика обработки корреляционных данных на основе

анализа значения величины χ^2 , которая включает в себя также данные по конверсии, позволяет получать корректное значение доверительного интервала при определении спинов ядерных уровней и отношений смеси δ .

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Создание многодетекторного спектрометра МУК на базе Ge(Li)-детекторов для изучения ядерного γ -излучения в режимах "он-лайн" и "офф-лайн".

2. Создание методики обработки экспериментальных данных для спектрометра МУК.

3. Разработка пакета вычислительных программ для обработки экспериментальной информации, получаемой на спектрометре МУК.

4. Отработка методики извлечения спинов ядерных уровней и отношений смеси δ γ -переходов с использованием данных по угловым γ - γ -корреляциям и данных по конверсионным электронам, на основе анализа величины χ^2 .

5. Результаты исследования распадов $^{211}\text{Rn} \rightarrow ^{211}\text{At}$ и $^{159}\text{Yb} \rightarrow ^{159}\text{Tm}$.

Апробация работ.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 27^{ой} сессии Комитета по структуре ядра секции Ученого совета ОИЯИ по физике низких энергий (Дубна, 1986 г.), на Рабочих совещаниях по ЯСНАПП-2 (Дубна, 1987 г., 1990 г.), на 37^{ом}, 39^{ом}, Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, на семинарах по физике атомного ядра для ОИЯИ.

Главные положения диссертации отражены в 8 опубликованных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц и 34 рисунка. Список использованной литературы включает 105 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследований ядер,

удаленных от полосы бета-стабильности, сформулирована цель работы и описывается структура диссертации.

В первой главе изложена теория угловых корреляций гамма излучения, как средства получения ядерно-физической информации и приведены основные формулы, необходимые для интерпретации результатов измерений корреляционной функции. Обсуждаются методы обработки результатов измерений корреляционной функции.

При обработке экспериментальных данных по угловым γ - γ -корреляциям определяются значения коэффициентов $A_{\lambda\lambda}^{\text{ЭКС}}$, ($\lambda=2,4$) корреляционной функции. Дальнейший традиционный анализ, т.е. определение спинов ядерных уровней и отношений смеси δ γ -переходов, проводится методом Колемана (Coleman C.F. - Nucl. Phys., 1958, 5, p. 495-503) или Арнса и Виденбека (Arns R.G., Wiedenbeck M.L. - Phys. Rev., 1958, 111, p. 1631-1633). Указанные подходы обладают некоторыми недостатками: 1- в них не указываются значения доверительного интервала, полученного результата, 2- в них не учитывается тот факт, что коэффициенты A_{22} и A_{44} не являются статистически независимыми, 3- при определении $A_{\lambda\lambda}^{\text{ЭКС}}$ (обычно путем минимизации величины χ^2) не накладываются условия на величину $A_{\lambda\lambda}$, хотя допустимые значения коэффициентов $A_{\lambda\lambda}$ лежат в ограниченном интервале. Помимо того в работах по изучению угловых корреляций используется также информация о мультипольности переходов, которая была получена из конверсионных данных. Все эти обстоятельства приводят к тому, что доверительный интервал для конечного результата, т.е. либо для установления значений спинов ядерных уровней, либо для интервала значений параметра δ , становится другим по сравнению с ожидаемым. Предложенный нами метод, основанный на анализе значений величины χ^2 , включающей помимо данных по угловым γ - γ -корреляциям, также данные по конверсионным электронам, позволяет получать вполне определенное и корректное значение доверительного интервала.

Вторая глава. Спектрометр МУК состоит из семи истинно-коаксиальных Ge(Li)-детекторов, расположенных в одной плоскости симметрично по окружности, в центре которой



Рис. 1. Спектрометр МУК для "он-лайн" измерений. На снимке показан корреляционный стол с Ge(Li)-детекторами и транспортное устройство радиоактивных источников.

помещается радиоактивный источник (см. рис. 1). Чувствительный объем детекторов равен $\approx 40 \text{ см}^3$. Угол между соседними детекторами составляет 51.4° и, таким образом, при измерении угловых γ - γ -корреляций имеются три угла 51.4° , 102.9° и 154.3° , каждый из которых реализуется для 7 пар детекторов. Полуширина кривой мгновенных γ - γ -совпадений (КМС) для каждой пары детекторов в отдельности с источником ^{60}Co составляет 8.0-12.9 нс при энергии γ -излучения в интервале 60-1333 кэВ. Для обеспечения измерений в режиме "он-лайн" было создано транспортное устройство радиоактивных источников (ТУРИ) с движущимся коллектором, который периодически переносит накопленную активность к детекторам и затем ее убирает. Устройство ТУРИ работает на принципе катушечного магнитофона. В качестве коллектора используется лента шириной 12.5 мм. Скорость передвижения ленты составляет 76 см/с. Управление ТУРИ осуществляется микропроцессорным устройством, с помощью которого задается время накопления. Комплекс

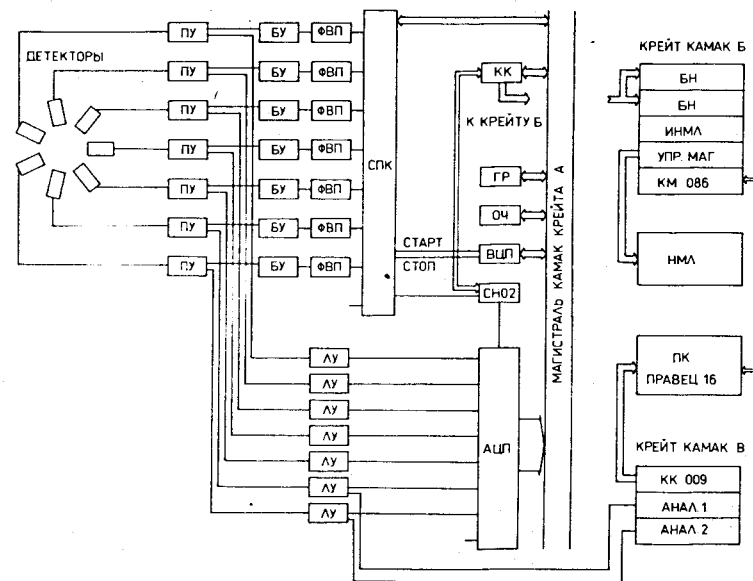


Рис. 2. Блок-схема электронной аппаратуры спектрометра МУК. ПУ-предусилитель, БУ-быстрый усилитель, ЛУ-линейный усилитель, ФВП-формирователь временной привязки, СПК-блок совпадений, КК-контроллер, ГР-грейдер, ОЧ-одноадресное чтение, АЦП и ВЦП-амплитудно- и временно- цифровой преобразователь, БН-буферный накопитель, КМ086-контроллер, НМЛ-магнитофон, ПК-персональный компьютер.

электронной аппаратуры, блок-схема которого приведена на рис. 2, предназначен для одновременного измерения мгновенных и задержанных γ - γ -совпадений, зарегистрированных любой парой из семи Ge(Li)-детекторов, и одиночных γ -спектров, зарегистрированных в двух выбранных детекторах. Многомерная информация о каждом случае совпадения, т.е. параметры ϕ - γ_1 - γ_2 - t записываются в ходе эксперимента последовательно на магнитные ленты. С целью уменьшения количества магнитных лент в измерениях была предусмотрена возможность проведения фильтрации многомерных данных.

Третья глава. При измерении γ - γ -совпадений на многодетекторном спектрометре возникает вопрос о форме представления получаемой информации в удобном для анализа

виде. Измерение γ - γ -совпадений на спектрометре МУК можно представить как совместный эксперимент на 21 двухдетекторном спектрометре, и обрабатывать эти измерения традиционным способом, т.е. для заданных энергетических окон на одном детекторе получать спектры ответа на другом детекторе (анализ сечений матрицы совпадений). Но при таком способе обработки получается слишком большое количество спектров. Эта проблема была решена путем такой настройки электронных трактов, при которой максимумы пиков от γ -переходов в тракте каждого детектора находятся в канале с одним и тем же номером, что позволяет суммировать 21 матрицу совпадений в одну, которая обрабатывается вышеупомянутым способом.

Техника задержанных совпадений является одним из наиболее распространенных методов получения информации о временах жизни ядерных состояний. При стандартной настройке аппаратуры на спектрометре МУК и в случае использования метода наклона при обработке кривой задержанных совпадений интервал измеряемых периодов полураспада составляет от ≈ 7 нс до нескольких сот наносекунд. Со стороны малых значений периодов полураспада этот диапазон определяется величиной склона КМС, а со стороны больших значений заданным временным интервалом блока совпадений.

Значения интенсивностей γ - γ -совпадений $I(\phi_k)$, $k=1,2,3$, определенные для соответствующих углов между детекторами, используются при вычислении коэффициентов угловой корреляции A_{22} и A_{44} . Интенсивности $I(\phi_k)$ получают после сортировки данных по угловым γ - γ -корреляциям, после введения поправок на совпадения с фоном и случайные совпадения, а также поправок на относительную эффективность регистрации гамма квантов различными трактами. Для спектрометра МУК были разработаны два метода введения поправок на эффективность регистрации совпадений. В первом методе регистрируются одиночные γ -спектры с помощью амплитудно-цифровых преобразователей, управляемых от формирователей временной привязки, поочередно для каждого тракта до или после эксперимента. Для введения поправок используются отношения площадей линий, входящих в исследуемые каскады. Во втором методе введения поправок на

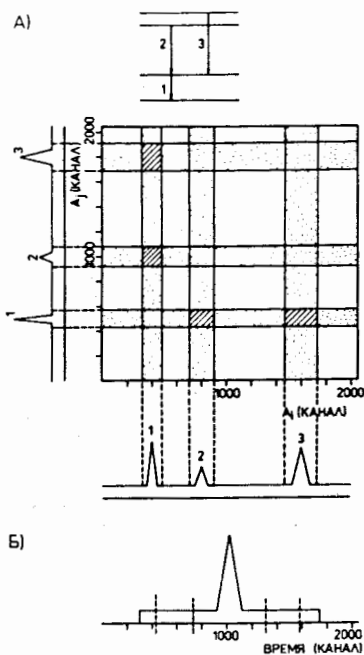
эффективность регистрации γ -излучения детекторами используется информация извлекаемая из спектров случайных совпадений, которые также регистрируются в ходе эксперимента на спектрометре МУК. Использование этого метода, который до сих пор в литературе не упоминался, стало в наших исследованиях преобладающим. Метод основан на двух фактах:

а) интенсивности как истинных, так и случайных совпадений квантов γ_1 с другими γ -квантами пропорциональны эффективности регистрации γ_1 в детекторе $\epsilon(\gamma_1)$,

б) гамма кванты, которые случайно совпали, не коррелированы в пространстве, и это означает, что для них $A_{22}=A_{44}=0$.

При анализе угловой корреляции каскада γ_1 - γ_2 наиболее простым способом введения поправок является использование случайных совпадений γ_1 с γ_2 , поскольку число этих совпадений также как и число истинных совпадений пропорционально произведению $\epsilon_i(\gamma_1) \cdot \epsilon_j(\gamma_2)$, где i, j обозначают номера детекторов. Этот подход не дает хорошего результата, поскольку в реальном эксперименте таких совпадений наблюдается очень мало, что приведет к большим ошибкам поправок, и тем самым, к большим ошибкам значений коэффициентов угловой корреляции. Количество случайных совпадений, когда γ_1 квант регистрируется в определенном детекторе и любой другой гамма квант в любом другом детекторе, значительно больше. Такого рода случайные совпадения можно использовать для введения поправок на эффективность регистрации γ -излучения. Использование случайных совпадений для "сшивания" данных, отразилось на алгоритме фильтрации данных. Фильтрация проводилась с помощью выборки цифровых окон по осям энергии и времени. Цифровые окна вводились как входные данные перед началом эксперимента в программу набора. Окна устанавливались на заданных γ -линиях в энергетическом спектре каждого детектора. Таким образом был получен для каждой пары детекторов в соответствии с заданными каскадами набор двумерных окон. На рис. 3. эти окна обозначены точками или наклонными линиями. В верхней части рисунка показан фрагмент схемы уровней ядра с каскадами переходов 1-2, 1-3, которые исследовались в опыте. Заштрихованные окна обозначают те случаи совпадений,

информация о которых записывалась на магнитную ленту независимо от значения временной координаты, т.е. ее значение определялось только временным интервалом блока совпадений. Из этих совпадений определялись числа истинных совпадений.



События, которые попадали в двухмерные окна, отмеченные точками, записывались на магнитную ленту тогда, когда их временная координата находилась в диапазонах вне КМС.

Рис. 3. Схематическое изображение положения окон фильтрации данных для случая двух каскадов. А-одномерные окна на осях детекторов i и j и соответствующие двухмерные окна; Б-два одномерных окна, устанавливаемые на фоне случайных совпадений общей временной кривой.

Для обработки информации, получаемой в экспериментах на многодетекторном спектрометре МУК, был разработан комплекс программ. Программы написаны на языке ФОРТРАН-4 и поставлены на ЭВМ ЕС-1040 ЛЯП ОИЯИ, ВАКС ЛВТА ОИЯИ и Правец-16.

Программы обработки одномерной информации:

- 1- LEV- определение положения максимумов γ -линий, их площадей и полуширин при обработке одиночных γ -спектров.
- 2- PS- приготовление файлов с графическими данными для вычерчивания γ -спектров на графопостроителе.

Программы обработки многомерной информации:

- 1- SIS- сортировка энергетических и временных интегральных спектров совпадений, по которым определяются окна на осях энергии и времени. Эти окна используются в качестве входных данных для программ SCS, STS, SADC.
- 2- SCS- сортировка сечений матрицы γ - γ -совпадений.

3- STS- сортировка временных распределений совпадений для заданных каскадов γ -квантов от всех пар детекторов.

4- SADC- для заданных каскадов γ -квантов определяются числа истинных совпадений для всех пар детекторов и числа случайных совпадений, необходимых для введения поправок на эффективность регистрации γ -совпадений. Вычисляются ненормированные интенсивности совпадений квантов γ_1 с квантами γ_2 для пары детекторов (i, j) $I'(\gamma_1, \gamma_2, i, j)$, которые используются в качестве входных данных в программе ECDIF или ADC1 (см. ниже). В том случае, когда эффективности регистрации гамма квантов заранее известны, производится расчет интенсивностей совпадений для каждой пары детекторов, из которых получают значения $I(\phi_k)$ как средневзвешенное. Конечным результатом являются значения коэффициентов A_{22} и A_{44} .

Программы анализа корреляционной функции:

- 1- ECDIF- входными данными являются ненормированные интенсивности совпадений $I'(i, j, \gamma_1, \gamma_2)$. Результатом программы являются коэффициенты x_n $n=1, 2, \dots, 7$, которые используются в качестве поправок для $I'(i, j, \gamma_a, \gamma_b)$.
- 2- ADC1- для заданного каскада вычисляются значения коэффициентов A_{22} и A_{44} . Входными данными являются: набор интенсивностей $I'(i, j, \gamma_a, \gamma_b)$, набор значений x_n $n=1, 2, \dots, 7$, и поправки на телесные углы.
- 3- ADC2- проводится расчет величин A_{22} и A_{44} путем минимизации значения χ^2 . В качестве входных данных служат интенсивности совпадений $I_j(\phi_k)$, определенные для углов ϕ_i в нескольких измерениях ($j=1, 2, \dots$).
- 4- SACE и AQQ- с помощью этих программ проводится расчет поправок на конечный телесный угол $Q_\lambda(\gamma)$ для истинно коаксиального Ge(Li)-детектора.
- 5- CLSD- проводится минимизация значения χ^2 , который построен на основе данных по угловым γ - γ -корреляциям и данных по конверсионным электронам. Результатом расчетов являются значения отношений смеси мультиполей и величина χ_{\min}^2 .

Четвертая глава. С целью проверки работоспособности спектрометра МУК был проведен ряд контрольных измерений

угловых γ - γ -корреляций в режиме "офф-лайн". В этих измерениях использовались радиоактивные источники ^{60}Co , ^{160}Tb , ^{119}Te , ^{152}Eu . Почти все полученные нами значениями A_{22} и A_{44} совпадают в пределах одной ошибки с известными результатами.

На спектрометре МУК были проведены измерения угловых корреляций γ -лучей при распаде ^{211}Rn в "офф-лайн" режиме. Изотоп ^{211}Rn получался при облучении ториевой мишени протонами с энергией 660 МэВ на фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. На рис. 4. показан измеренный одиночный

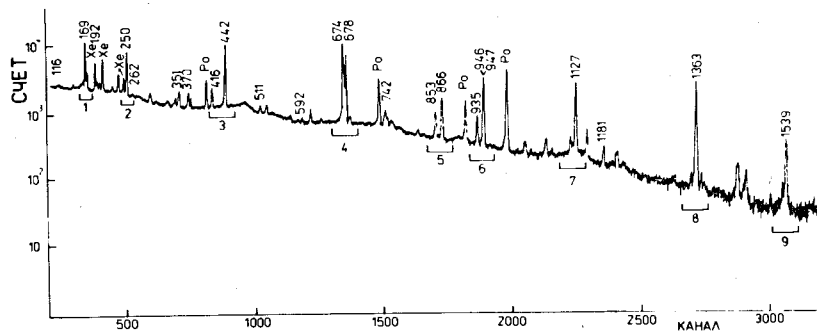


Рис. 4. Одиночный γ -спектр, наблюдаемый при распаде ^{211}Rn .

γ -спектр. На рисунке также отмечены положения и ширины окон, поставленных на линиях, которые вошли в измеряемые каскады. Ширина окон на временной кривой для отбора случайных совпадений составляла 2×110 нс. Были измерены коэффициенты углового распределения для 18 каскадов, из них для 15 каскадов впервые (см. табл. 1). Для определения спинов уровней и отношений смеси был использован предложенный нами метод анализа величины χ^2 . Эта процедура продемонстрирована для некоторых каскадов на рис. 5. Были установлены значения спинов для 10 уровней в ^{211}At при доверительном интервале не ниже 95%.

Ядро ^{211}At имеет замкнутую оболочку по числу нейтронов $N=126$ и три протона сверх оболочки $Z=82$. Это означает, что его свойства в области малых энергий возбуждения должны определяться главным образом поведением трех протонов. Были

Таблица 1. Коэффициенты угловых γ - γ -корреляций для некоторых измеренных каскадов в ^{211}At .

№	Каскад (кэВ)	A_{22}	A_{44}
1	442-674	0.228 (9)	-0.026 (15)
2	1363-442	-0.040 (12)	0.007 (17)
3	1363-250	-0.039 (18)	-0.026 (62)
4	250-866	-0.178 (19)	-0.018 (48)
5	1363-169	-0.001 (17)	0.011 (36)
6	250-192	0.185 (62)	-0.16 (14)
7	934-866	-0.094 (50)	-0.038 (89)
8	853-947	0.037 (30)	-0.058 (61)
9	678-853	-0.103 (43)	-0.029 (78)
10	946-442	-0.152 (65)	0.04 (14)
11	1539-169	-0.046 (58)	-0.09 (11)
12	1539-442	-0.053 (34)	-0.05 (8)
13	1363- (250) -192	-0.28 (18)	-0.02 (34)
14	250- (192) -674	0.30 (16)	0.07 (28)

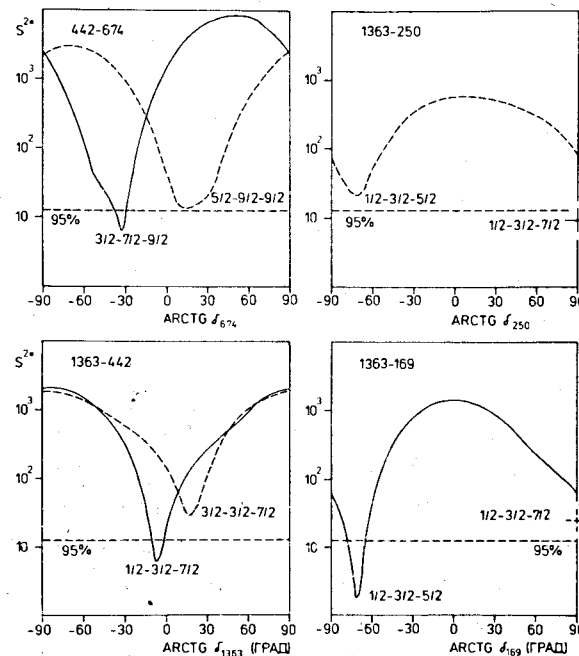


Рис. 5. Зависимость значения χ^2 от $\arctg(\delta)$ для альтернативных описаний некоторых каскадов в ^{211}At . Штрихованная линия обозначает отвергнутый вариант.

проведены теоретические расчеты структуры ^{211}At с целью интерпретации всей накопленной по этому ядру экспериментальной информации, включая наши данные по отношениям смеси δ . Теоретический анализ был проведен в рамках многочастичной модели оболочек, учитывающей только валентные протоны выше остова ^{208}Pb . В этом случае влияние возбуждений фононов на низколежащие состояния ^{211}At учитываются посредством ренормализации остаточного взаимодействия. В вычислениях были использованы экспериментальные значения протонных одночастичных энергий для состояний $h_{9/2}$, $h_{7/2}$, $i_{13/2}$, $f_{5/2}$, $p_{3/2}$, $p_{1/2}$. Согласие между экспериментальными и теоретическими значениями энергий уровней удовлетворительное. В расчетах электромагнитных характеристик ^{211}At влияние фононных возбуждений учитывалось путем введения эффективных электромагнитных операторов. Наблюдается хорошее согласие рассчитанных значений с экспериментальными данными для приведенных вероятностей $E2$ переходов и статических электромагнитных моментов и удовлетворительное соответствие рассчитанных значений $\delta(E2/M1)$ с экспериментальным. Следует отметить, что при расчетах в рамках обычно используемого базиса с протонными подоболочками $h_{9/2}$, $f_{7/2}$ и $i_{13/3}$, экспериментальные значения отношений смеси не объясняются.

Изучение распада ^{159}Yb проводилось в "он-лайн" режиме на экспериментальном комплексе ЯСНАПП-2. Нуклид ^{159}Yb ($T_{1/2}=1.4$ мин.) был получен в реакции глубокого расщепления вольфрама протонами, ускоренными до энергии $E_p=660$ МэВ на фазотроне ЛЯП ОИЯИ. Интенсивность выведенного пучка протонов составляла ≈ 2 мкА. Были измерены одиночные γ -спектры и спектры γ - γ -совпадений при β -распаде изобары $A=159$. С целью получения оптимальной загрузки Ge(Li)-детекторов (8000 регистрируемых импульсов/сек.), ток пучка протонов понижался до $I_p=0.3$ мкА. Одиночные спектры и спектры γ - γ -совпадений были измерены в диапазоне 50-1700 кэВ. Продолжительность эксперимента составляла 5 часов. Всего было зарегистрировано $\approx 10^7$ совпадений. На рис. 6 представлены часть наблюдаемого одиночного спектра и соответствующих спектров совпадений. В

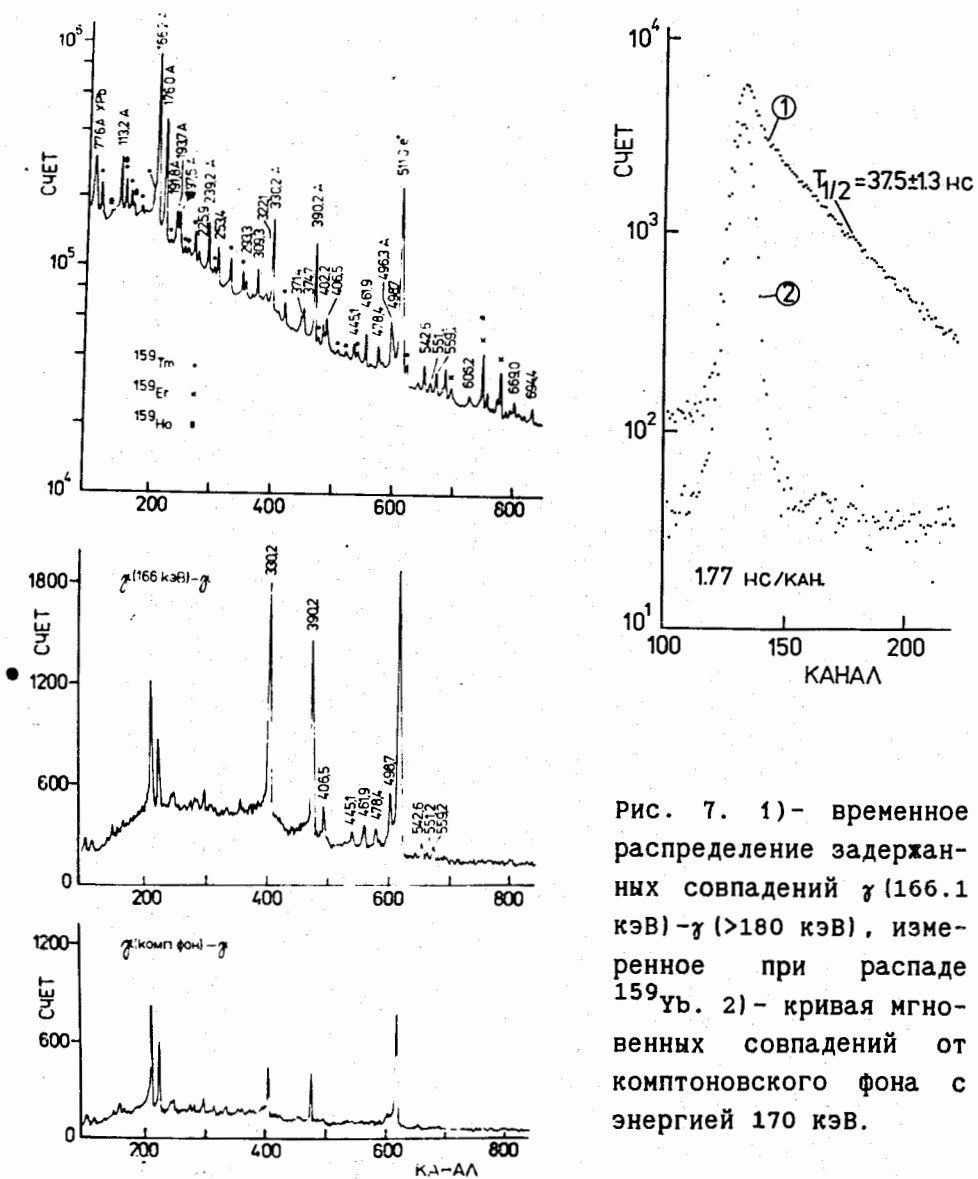


Рис. 6. Одиночный спектр и спектры совпадений с γ -лучами 166.1 кэВ и комптоновским фоном, наблюдаемые при распаде изобары $A=159$. Для линий ^{159}Yb приведены значения их энергии в кэВ.

распаде ^{159}Yb было идентифицировано, помимо 12 ранее известных γ -переходов, 36 новых γ -линий (см. табл.2).

Таблица 2. Энергии и относительные интенсивности γ -переходов из распада ^{159}Yb .

E_γ (кэВ)	I_γ	E_γ (кэВ)	I_γ	E_γ (кэВ)	I_γ
(53.0)		309.3(2)	42(7)	551.2(3)	7(4)
77.70(10)	69(4)	319.1(3)	7(2)	559.24(15)	36(3)
113.18(6)	132(7)	322.08(11)	24(2)	572.5(2)	44(4)
166.16(5)	1000	330.24(8)	182(13)	606.2(3)	14(2)
176.01(5)	142(13)	330.5(2)	39(7)	619.9(9)	8(2)
177.12(5)	317(19)	371.40(12)	28(2)	656.8(3)	7(2)
191.79(12)	44(5)	374.7(3)	24(5)	663.3(3)	13(2)
193.72(8)	70(7)	390.20(8)	225(12)	669.00(17)	28(3)
197.5(2)	40(10)	402.15(10)	37(4)	694.4(2)	24(3)
225.85(14)	30(4)	406.54(13)	46(5)	712.82(17)	27(3)
239.17(11)	115(8)	445.1(2)	21(4)	732.9(3)	12(2)
248.2(3)	10(3)	461.9(2)	37(5)	740.2(3)	10(2)
253.4(3)	30(10)	478.38(13)	43(4)	747.0(2)	42(4)
267.42(15)	22(2)	496.30(11)	83(5)	998.8(3)	28(3)
293.34(10)	35(2)	498.65(14)	50(4)	1125.7(2)	47(4)
302.7(3)	11(2)	542.60(13)	45(3)	1385.3(3)	12(2)

Обработка временных спектров, полученных в наших измерениях, позволила уточнить период полураспада уровня 166.1 кэВ $T_{1/2} = 37.5 \pm 1.3$ нс (в более ранней работе Andre S., Foin C. et al. - Z. Phys., A231, 1985, p. 363-364 приводится значение $T_{1/2} = 35 \pm 5$ нс). На рис. 7 показаны соответствующие временные кривые мгновенных и задержанных совпадений. Исходя из полученного значения времени жизни уровня 166.1 кэВ, и в предположении того, что переходы 113.2 и 166.1 кэВ имеют мультипольность E1, мы вычислили значения приведенных вероятностей и факторов запрета для этих переходов. Полученные значения $B(E1)$ и $F_w(E1)$ хорошо укладываются в систематику однотипных переходов в нечетных изотопах Tm. В схему возбужденных состояний ^{159}Tm было введено 17 новых уровней (см. рис.8).

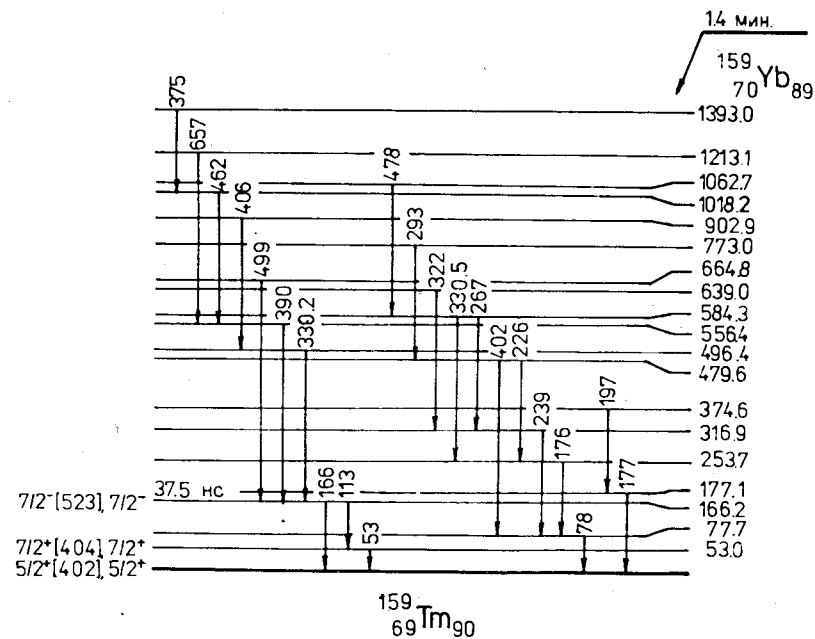


Рис. 8. Схема возбужденных состояний ^{159}Tm .

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертации:

1) При непосредственном участии автора был создан многодетекторный спектрометр МУК на базе 7 Ge(Li)-детекторов, позволяющий проводить исследования распада радиоактивных изотопов в одномерном или многомерном режимах. На спектрометре можно проводить одновременно измерения одиночных γ -спектров, спектров γ - γ -совпадений, времен жизни ядерных уровней и функции угловых γ - γ -корреляций каскадов с интенсивностью $>5\%$ на распад в режимах "off-line" и "on-line".

2) Отработана методика измерения γ - γ -совпадений, угловых γ - γ -корреляций и времен жизни ядерных уровней, а также методика обработки соответствующих экспериментальных данных, получаемых на спектрометре МУК. Методика была проверена в ряде экспериментов при измерениях в "off-line" и "on-line" режимах.

3) Разработан пакет вычислительных программ для обработки информации, получаемой на спектрометре МУК.

4) Предложена и, в случае измерений угловых γ - γ -корреляций, наблюдаемых при распаде ^{211}At , использована методика извлечения отношений смеси δ и спинов ядерных уровней на основе анализа величины χ^2 , в которую, помимо информации об угловых корреляциях, входят также другие экспериментальные данные, зависящие от δ .

5) Измерены угловые γ - γ -корреляции 18 каскадов в ядре ^{211}At , из них для 15 впервые, на основании чего были определены отношения смеси для семи переходов и установлены спины 10 ядерных уровней.

6) Схема уровней ^{211}At и его электромагнитные свойства были проанализированы на основе проведенных теоретических расчетов в рамках многочастичной модели оболочек с учетом фононных возбуждений остова. Показано, что для правильного описания экспериментальных значений параметров смеси необходимо включить в обычно используемый базис протонных волновых функций $h_{9/2}$, $f_{7/2}$ и $i_{13/2}$ также состояния $f_{5/2}$, $p_{3/2}$, $p_{1/2}$.

7) Было проведено исследование распада ^{159}Yb ($T_{1/2}=1.4$ мин) в режиме "on-line" на пучке комплекса ЯСНАПП-2. Проведен анализ одиночных γ -спектров, спектров γ - γ -совпадений и задержанных γ - γ -совпадений. В результате анализа экспериментальных данных было идентифицировано 36 новых γ -переходов. Предложена схема распада ^{159}Yb , в которую в дополнение к ранее известным двум возбужденным состояниям ^{159}Tm введено 17 новых уровней. Уточнено время жизни состояния с энергией 166.1 кэВ, $T_{1/2}=37.5\pm 1.3$ нс и определены приведенные вероятности двух γ -переходов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Абросимов В.Н., Адам И., Василев Д., Венос Д., Гонс З., Гонусек М., Градец И., Громов К.Я., Калинин А.И., Калинин В.Г., Кривоустов М.И., Лизурей Г., Медведь С.В., Мерзляков С.И., Мисиак А., Морозов В.А., Пражак Ф., Разов В.И., Срнка Д., Стегайлов В.И., Чалоун П., Форет Ф. Многодетекторная корреляционная установка для ЯСНАПП-2.-ОИЯИ, Р6-86-320, Дубна, 1986.-14 с.
2. Абросимов В.Н., Адам И., Вагнер В., Венос Д., Гонс З.,

Гонусек М., Громов К.Я., Калинин В.Г., Кривоустов М.И., Морозов В.А., Пражак Ф., Стегайлов В.И., Чалоун П., Первые методические измерения на многодетекторной корреляционной установке для ЯСНАПП-2.- Тезисы 37. совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Юрмала, 1987, с.539.

3. Абросимов В.Н., Адам И., Венос Д., Куклик А., Лизурей Г.Р. Мисиак А., Морозов В.А., Пражак Ф., Срнка Д., Стегайлов В.И., Отландов И.А., Временные свойства Ge(Li)- детекторов многодетекторной корреляционной установки.- ОИЯИ, Р6-85-83, Дубна, 1985.- 5 с.
4. Венос Д., Адам И., Гнатович В., Гонусек М., Система программ для обработки спектров регистрируемых на многодетекторной корреляционной установке (МУК).- ОИЯИ, Р6-88-100, Дубна, 1988.- 13 с.
5. Адам И., Венос Д., Гонусек М., Морозов В.А., Пражак Ф., Форет И., Чалоун П., Устройство транспортировки радиоактивных источников (ТУРИ) для установки МУК.- ОИЯИ, 13-87-682, Дубна, 1987.- 5 с.
6. Венос Д., Адам И., Бонч-Осмоловская Н.А., Гонс З., Кестарова О., Морозов В.А., Норсеев Ю.В., Стегайлов В.И., Чалоун П., Корреляции направлений γ -лучей в ^{211}At .- ОИЯИ, Р6-89-200, Дубна, 1989.- 12 с.
7. Venos D., Adam J., Bonch-Osmolovskaja N.A., Caloun P., Erohina K.I., Isakov Y.I., Kjostarova O.D., Morozov V.A., Norseev Ju.V., Stegajlov V.I., Investigation of the decay of $^{211}\text{Rn} \rightarrow ^{211}\text{At}$ and the three-particle configuration in ^{211}At .- J. Phys. G, 1990, 16, p.1009-1018.
8. Тлусты П., Венос Д., Адам И., Громов К.Я., Калинин В.Г., Кестарова О., Морозов В.А., Стегайлов В.И., Чалоун П., Солнышкин А.А., Срнка Д., Яницки М., Исследование распада ^{159}Yb .- Тезисы докладов 41-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Минск, 16-19 апреля), 1991), Ленинград "Наука", 1990, с. 90.

Рукопись поступила в издательский отдел

19 апреля 1991 года.