

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Пасхалов Антон Анатольевич

Экспериментальное исследование процесса испускания внутреннего
тормозного излучения при α -распаде ^{214}Po

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2018

Работа выполнена Отделе ядерных реакций Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобелевца Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** — **Еремин Николай Владимирович**,
к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
НИЦ Нанотехнологий ФГУП ЦНИХМ
- Официальные оппоненты** — **Тер-Акопьян Гурген Мкртычевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, ОИЯИ, Лаборатория ядерных
реакций им. Г.Н. Флерова, главный
научный сотрудник
- Кузаков Константин Алексеевич**
доктор физико-математических наук,
доцент, МГУ имени М.В.Ломоносова,
Физический факультет, Отделение ядерной
физики, кафедра физики атомного ядра и
квантовой теории столкновений
- Игашов Сергей Юрьевич**
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФГУП
«ВНИИА» им. Духова

Защита диссертации состоится «09» ноября 2018 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу:

119991, Москва, Ленинские горы 1, строение 5 (19 корпус), ауд. 2-15.

E-mail: galan_lidiya@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/144669354/>.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
МГУ.01.11, к.ф.-м.н.

Л.И.Галанина

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Первые теоретические и экспериментальные работы, в которых предсказывалась возможность испускания тормозного излучения при α -распаде тяжелых ядер, были опубликованы еще в 1990-х годах [1,2]. К настоящему времени экспериментальные исследования этого процесса выполнены всего лишь в трех научных центрах – НИИЯФ МГУ [3], университете Тохоку (Япония) [4] и институте Макса Планка (ФРГ) [5]. Основным препятствием для проведения экспериментов является низкая интенсивность исследуемого процесса (в диапазоне 10^{-12} – 10^{-8} фотон/(кэВ·распад)), что приводит к длительной экспозиции эксперимента (около одного года) и, соответственно, к повышенным требованиям в стабильности и надежности работы измерительной аппаратуры.

Метод регистрации внутреннего тормозного излучения основан на интерференционных пространственно-временных явлениях в выходах тормозных фотонов, сопровождающих вылет заряженных продуктов ядерных реакций.

Впервые этот метод был использован для определения времен жизни возбужденных состояний составных ядерных систем в интервале от 10^{-19} до 10^{-21} с при взаимодействии легких ядер реакций $^{12}\text{C}(p,p)$, $^{16}\text{O}(p,p)$ [6-9]. В этих работах было показано, что данная методика позволяет экспериментально получать информацию о временной эволюции ядерных процессов, идущих с образованием составного ядра, без априорного предположения о механизмах ядерных превращений (т.н. «безмодельность» методики).

В реакциях с тяжелыми ионами промежуточных энергий метод тормозного излучения позволил оценить температуру «горячей зоны» сталкивающихся ядер [10-12]. При этом возможны два механизма

испускания тормозных фотонов – кулоновское ускорение взаимодействующих ионов и рассеяние нейтрон-протонных пар в «горячей зоне».

Следует подчеркнуть, что интерференционные эффекты в выходах тормозных фотонов, сопровождающих ядерные превращения, могут возникать не только вследствие наличия временной задержки между моментом влета частицы в ядро и моментом ее вылета, но и из-за определенной пространственной протяженности источника испускания фотонов. Так, в работе [13] были измерены энергетические спектры тормозных фотонов при спонтанном делении тяжелых ядер, а наблюдаемые минимумы при энергиях E_γ около 60 МэВ интерпретировались как результаты интерференции тормозных фотонов.

Интерференция в выходе тормозных фотонов при α -распаде тяжелого ядра имеет также пространственную природу – между амплитудами рождения тормозных фотонов при движении α -частицы внутри и в подбарьерной областях и во внешней области ускорения в кулоновском поле ядра.

Имеющиеся к настоящему времени экспериментальные данные по выходам тормозных фотонов при α -распаде тяжелых ядер были получены с использованием аналоговых оцифровщиков амплитуды энергетических сигналов и временной привязки к фронтам импульсов с α - и γ -детекторов. Наблюдаемый в последние несколько лет прогресс в развитии цифровых методов обработки данных с детекторов ядерного излучения позволяет использовать быстрые временные оцифровщики форм сигналов, и тем самым:

- существенно повысить чувствительность методик измерения низкоинтенсивных ядерных превращений;
- уменьшить число используемых электронных блоков в измерительных трактах;
- повысить надежность результатов измерений в длительных экспериментах;

- увеличить информативность получаемой информации.

ЦЕЛЯМИ диссертационной работы являются:

1. Создание экспериментальной установки по регистрации γ -квантов и тормозных фотонов, возникающих в ядерных превращениях с вероятностью до 10^{-12} от основной моды распада, на основе быстрых временных оцифровщиков формы сигналов с полупроводниковых детекторов.
2. Получение достоверных экспериментальных данных по выходам тормозных фотонов при α -распаде тяжелых ядер.

При этом решаются следующие ЗАДАЧИ:

1. Разработка методики регистрации совпадений тормозных фотонов и α -частиц с использованием современной экспериментальной базы — запоминающего быстрого цифрового осциллографа и полупроводникового германиевого детектора большого объема;
2. Апробация методики в эксперименте по измерению вероятностей α - γ переходов на первые возбужденные состояния дочерних ядер при распаде ^{226}Ra .
3. Разработка алгоритмов оптимизации временного и энергетического разрешения измерительной установки. Апробация программы на различных типах сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов γ -излучения.
4. Проведение эксперимента и получение экспериментальных данных по выходам тормозного излучения при α -распаде ядра ^{214}Po и сравнение их с имеющимися в литературе экспериментальными и расчетными данными других авторов, а так же с результатами теоретического расчета, выполненного в рамках одночастичной квантово-механической модели α -распада при разных параметрах потенциальной ямы.

5. Анализ перспективных направлений развития метода тормозного излучения к исследованию динамики α -распада тяжелых ядер.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, выносимые на защиту:

1. Методика регистрации тормозных фотонов и γ -квантов, испускаемых в редких ядерных превращениях, происходящих с вероятностью до 10^{-12} фотон/(кэВ·распад) на новой элементной базе с использованием быстрых временных оцифровщиков формы сигналов и полупроводниковых детекторов. Разработаны алгоритмы оптимизации временного и энергетического разрешения измерительной установки.
2. Полученные экспериментальные данные по энергетической зависимости вероятности выхода тормозного излучения, сопровождающего α -распад ядра ^{214}Po в диапазоне энергий от 100 кэВ до 1 МэВ.
3. Измеренные значения вероятностей испускания γ -квантов с возбужденных уровней дочерних ядер ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{210}Pb , заселяемые при α -распаде ядер ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{214}Po .
4. Результаты расчета вероятности испускания тормозных фотонов при α -распаде тяжелых ядер, основанные на квантово-механической одночастичной модели α -распада.
5. Анализ перспектив развития метода тормозного излучения при исследовании динамики распада тяжелых ядер с помощью быстрых временных оцифровщиков.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Впервые получены экспериментальные данные по вероятностям испускания высокоэнергетического тормозного излучения при α -распаде ^{214}Po в энергетическом диапазоне от 100 кэВ до 1 МэВ, измеренные с помощью германиевого детектора большого объема и быстрых оцифровщиков формы сигналов с использованием вейвлет-анализа,

несущие в себе информацию как о механизме α -распада, так и о динамике процесса туннелирования α -частицы через кулоновский барьер ядра.

Впервые обосновано введение универсального параметра $\Delta E \cdot \tau$, характеризующего чувствительность экспериментальной методики к регистрации редких ядерных совпадений. Показано, что сцинтилляционные детекторы, используемые для регистрации тормозных фотонов, испускаемых при α -распаде, по этому параметру не уступают полупроводниковым германиевым детекторам.

Показано, что предложенная методика регистрации α - γ совпадений позволяет надежно измерять вероятности α -переходов на первые возбужденные уровни дочерних ядер на уровне 10^{-5} .

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

состоит в разработке и апробировании экспериментальной методики измерений редких ядерных превращений на новой элементной базе с использованием германиевого детектора большого объема и быстрых временных оцифровщиков формы сигналов. Данная методика применима для исследования ядерных и атомных процессов, протекающих с малой вероятностью, и может быть использована для изучения временной эволюции ядерных превращений, а именно, для измерения времен жизни возбужденных ядерных состояний, при изучении динамики спонтанного деления тяжелых ядер, для изучения процессов перестройки атомных оболочек, происходящих вследствие ядерных превращений.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано в ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна), НИЦ Курчатовский институт, ФЭИ Обнинск, ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г.Троицк).

Материалы диссертации легли в основу патента на изобретение «Способ детектирования потока нейтронов и гамма-излучения», № 2300784 от 10 июня 2007 г.

ДОСТОВЕРНОСТЬ работы подтверждается согласием между результатами эксперимента по измерению выходов внутреннего тормозного излучения при α -распаде ^{214}Po с использованием германиевого детектора с полученными ранее автором данными с использованием сцинтилляционного NaI(Tl)-детектора и имеющимися в литературе результатами теоретического расчета внутреннего тормозного излучения с использованием реалистического ядерного потенциала.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на специализированных семинарах отдела ядерных реакций, отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ, международном совещании по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра ЯДРО-2003 (Москва, 2003), международной европейской конференции люминесцентных детекторов и преобразования ионизирующих излучений (Львов, 2006), международных конференций по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016» (г.Саров) и «ЯДРО-2018» (г.Воронеж).

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД

Автор принял непосредственное участие в разработке методики эксперимента, его проведении и обработке результатов. Выполнен расчет эффективности регистрации γ -квантов разной мультипольности в реальной геометрии эксперимента в пакете Geant4.

Им проведен анализ полученных экспериментальных данных разными классами вейвлетов, разработаны программы по автоматизации обработки. Введен критерий для определения временной привязки к фронту сигнала с детектора и определена оптимальная глубина разложения при вейвлет-анализе данных. С целью уменьшения влияния радиационных повреждений на характеристики полупроводникового детектора α -частиц им исследована

возможность замены традиционного кремния на природный алмаз Па группы – была исследована выборка из нескольких сотен алмазных детекторов, подвергнутых радиационному облучению α -частицами.

Автором предложен параметр $\Delta E \cdot \tau$, характеризующий порог чувствительности экспериментальной методики регистрации редких ядерных превращений, сопровождающихся испусканием γ -квантов. С целью получения информации о величине этого параметра для разных типов детекторов γ -квантов автором был поставлен эксперимент по регистрации γ - γ совпадений сигналов с использованием детекторов из сверхчистого германия, теллурид-кадмия и сцинтилляционных детекторов на основе йодистого натрия, йодистого цезия и тригерманата висмута.

Личный вклад автора в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющим и полностью отражен в списке публикаций.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты по теме диссертации изложены в 15-ти печатных работах [1-15], из них семь – в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI [1-7]. Материалы диссертации легли в основу патента на изобретение «Способ детектирования потока нейтронов и гамма-излучения», № 2300784 от 10 июня 2007 г.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав с описанием проведенных экспериментов, с описанием методики, заключения, двух приложений и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 141 страницу, содержит 44 рисунка и 18 таблиц. Список используемой литературы содержит 91 наименование.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность темы исследования, кратко сформулированы основные цели работы, описано распределение материала по главам и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ анализируется современное состояние проблемы испускания внутреннего тормозного излучения, сопровождающего α -распад тяжелых ядер. Обсуждается актуальность исследования данного процесса и проводится анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных по измерению выходов тормозных фотонов при α -распаде тяжелых радионуклидов. Показано, что существующие экспериментальные данные имеют малую статистическую достоверность и нуждаются в существенном уточнении. Так, выходы тормозных фотонов при α -распаде ядра ^{210}Po измерены группой японских физиков лишь до энергий $E_\gamma \approx 500$ кэВ с большой экспериментальной погрешностью. В области энергий тормозных фотонов ≈ 400 кэВ наблюдался некий локальный минимум в вероятности их испускания, который был интерпретирован авторами как результат интерференции в амплитудах вероятности испускания тормозного излучения, соответствующих подбарьерной области движения α -частицы и внешней области.

Приведена систематика существующих теоретических моделей, используемых для описания изучаемого явления и показано, что при расчете выхода тормозного излучения, сопровождающего α -распад, имеет место ряд принципиальных допущений, которые не позволяют однозначно определить природу процесса, а именно, оценить степень влияния подбарьерной области движения α -частицы на полную вероятность испускания тормозных фотонов. Так, классическая модель тормозного излучения дает завышенные по сравнению с экспериментом результаты. Квантово-механические расчеты, выполненные в рамках одночастичной теории α -распада с применением первого порядка теории возмущений и с учетом подбарьерной

области движения α -частицы позволяют сделать вывод о деструктивном характере интерференции между вкладом от подбарьерной и внешней областей в полную вероятность выхода тормозного излучения. Однако эти расчеты показывают отсутствие каких-либо локальных минимумов в энергетическом спектре тормозных фотонов. Численный расчет с использованием нестационарного уравнения Шредингера указывает на возможность существования локального максимума в вероятности испускания тормозных фотонов при высоких энергиях.

На рисунках 1–2 представлены имеющиеся в литературе экспериментальные данные [3,2] по регистрации внутреннего тормозного излучения при α -распаде изотопов $^{210,214}\text{Po}$ и ^{226}Ra .

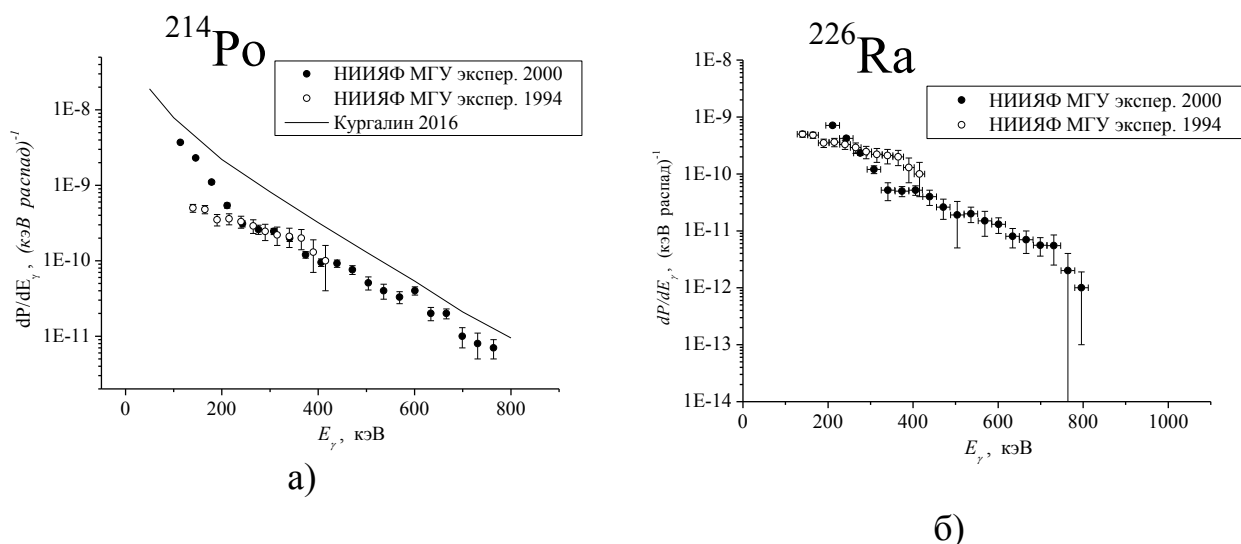


Рисунок 1 Экспериментальные данные по выходу тормозного излучения при α -распаде ядер ^{214}Po (а) и ^{226}Ra (б)

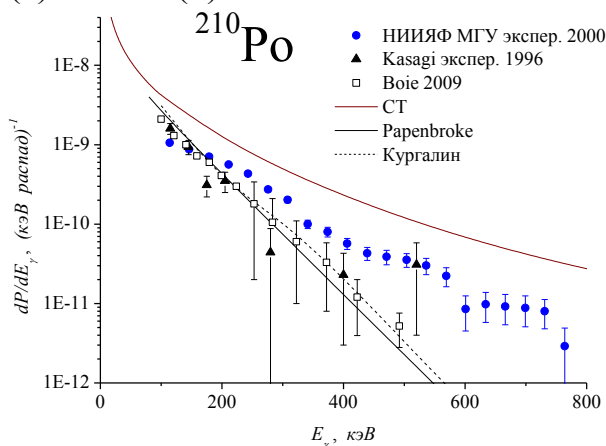


Рисунок 2 Экспериментальные данные по выходу тормозного излучения при α -распаде ядер ^{210}Po

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ представлено описание разработанной методики измерения энергетических спектров тормозного излучения, сопровождающего ядерные превращения, в диапазоне энергий от нескольких десятков кэВ до 1 МэВ, в условиях малого выхода тормозных фотонов (когда полная вероятность испускания фотона, отнесенная к одному акту распада, не превышает 10^{-7}). Описана методика обработки получаемых в эксперименте данных, основанная на нахождении параметров сигналов с детекторов с помощью вейвлет-анализа, определении глубины разложения сигнала с кремниевого α -детектора и γ -детектора. Обосновано преимущество вейвлет-преобразования Хаара перед вейвлет-преобразованием Добеши для определения энергии регистрируемых частиц и временных меток сигналов. Для временного анализа сигнала с Ge-детектора использовался метод постоянной амплитуды с компенсацией фронта (ARC-метод). Так, на рисунке 3 представлены результаты вейвлет обработки формы сигнала с γ -детектора и ее влияние на время рассогласования между сигналами с γ - и α -детекторов.

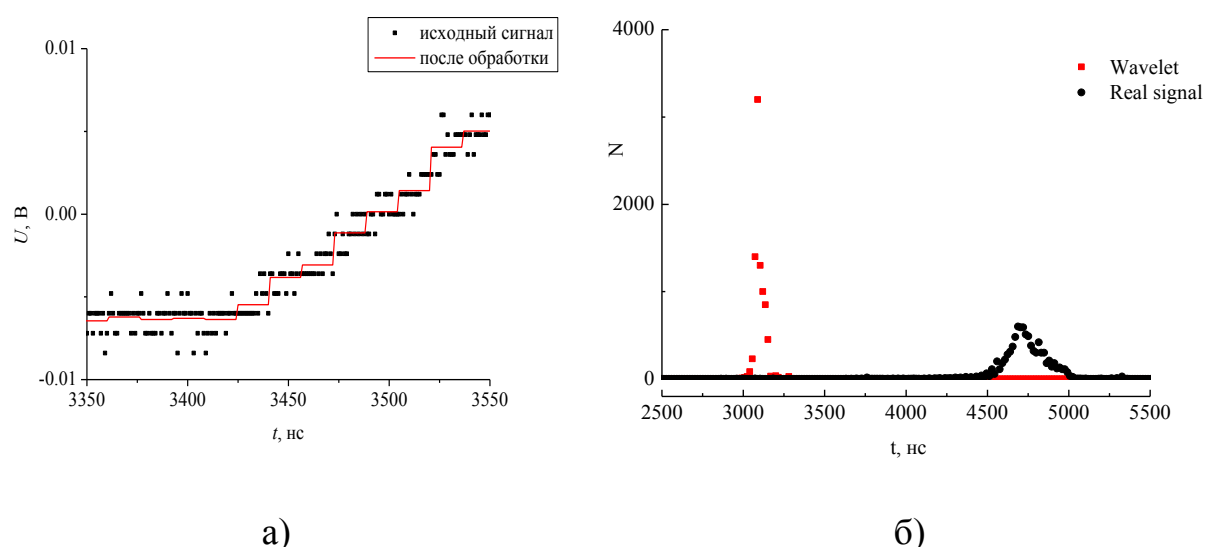


Рисунок 3 Результаты вейвлет обработки сигналов:

- а) осциллограмма сигнала с германиевого детектора до и после шумоподавления;
- б) распределение времен рассогласования между сигналами с γ - и α -детекторов (ТАС-спектр),
 - до вейвлет-преобразования, ■ после вейвлет-преобразования

С помощью цифрового осциллографа Tektronix DPO 7354 проведено экспериментальное определение значений вероятностей испускания γ -квантов с возбужденных уровней дочерних ядер ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{210}Pb , заселяемые вследствие α -распада материнских ядер ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{214}Po . Наблюдаемое удовлетворительное согласие между результатами эксперимента с использованием Ge-детектора и данными, полученными ранее со сцинтилляционным NaI(Tl)-детектором, и имеющимися литературными данными указывает на корректность предложенной методики (см. таблицу 1).

Таблица 1 – экспериментальные данные по вероятностям γ -переходов с первых возбужденных уровней дочерних ядер.

переход	эксп. данные настоящей работы	Эксп. данные работы [2]	лит. данные [14]
$\alpha_1-\gamma_2$	$(4,97 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$	–	$4,90 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_2-\gamma_1$	$(1,56 \pm 0,28) \cdot 10^{-5}$	–	$1,21 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_3-\gamma_1$	$(6,26 \pm 0,15) \cdot 10^{-4}$	$(6.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$	$7,80 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_4-\gamma_1$	$(9,56 \pm 2,19) \cdot 10^{-6}$	–	$1,10 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_5-\gamma_1$	$(9,39 \pm 0,68) \cdot 10^{-5}$	$(1.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$

Приведены результаты эксперимента по измерению выходов тормозного излучения при α -распаде изотопа ^{214}Po (см. таблицу 2).

Таблица 2 – результаты эксперимента по измерению выходов тормозного излучения при α -распаде изотопа ^{214}Po

Энергия тормозного фотона E_γ , кэВ	интервал энергий ΔE_γ , кэВ	вероятность испускания тормозного фотона dP/dE_γ	Δ
164.4	20	3.11E-09	1.54E-10
204.5	20.1	2.20E-09	1.27E-10
244.6	20.1	1.43E-09	1.08E-10
284.7	20	1.14E-09	1.07E-10
324.8	20	5.50E-10	7.63E-11
364.9	20.1	3.82E-10	6.36E-11
405	20.1	1.70E-10	4.24E-11
445.1	20.1	8.49E-11	3.00E-11
585.5	112.4	2.65E-11	1.56E-11
745.8	32.1	3.21E-11	1.51E-11
904.9	108.2	3.63E-12	9.15E-12

Получено, что энергетические спектры тормозных фотонов монотонно спадают с ростом энергии E_α , а локальных минимумов в спектрах не обнаружено.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ приведено описание процесса испускания тормозных фотонов в рамках одночастичной квантово-механической модели α -распада. В дипольном приближении рассчитан спектр тормозного излучения при вылете α -частицы из сферически симметричного прямоугольного ядерного потенциала. Проведена оценка выбора глубины потенциальной ямы и радиуса ядра для $^{210,214}\text{Po}$ и ^{226}Ra . Отмечается, что выбранные в работе Папенброка и Бертча [15] параметры прямоугольной ямы, находятся в противоречии с условием квантования Бора-Зоммерфельда. Произведенный расчет выхода тормозного излучения для ядра ^{210}Po с учетом условия квантования Бора-Зоммерфельда (числом нулей волновой функции во внутри барьерной области $n = 11$, вместо $n = 5$), приводит к значительному увеличению вероятности вылета тормозного фотона (см. рисунок 4).

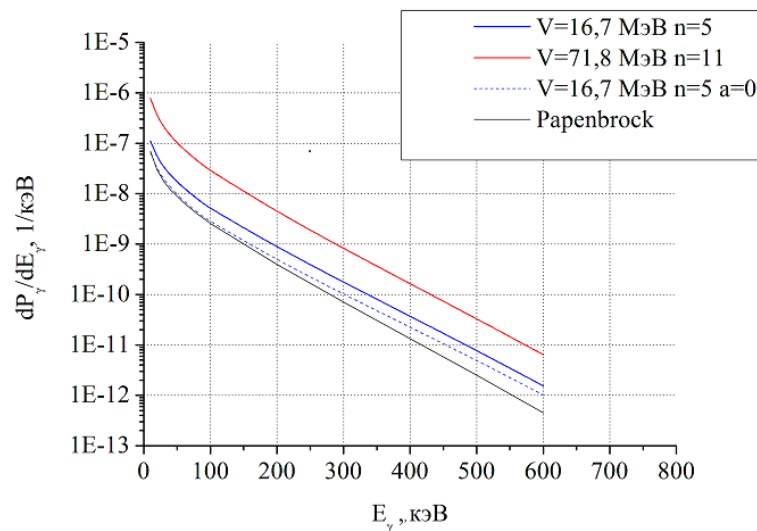


Рисунок 4 Сравнение результатов расчета вероятности вылета тормозного фотона при α -распаде ядра ^{210}Po с данными Папенброка и Бертча [15] для параметров ядерного потенциала $V_0 = 16,7 \text{ МэВ}$, $r_0 = 8,76 \text{ фм}$

С целью проверки степени влияния модельного ступенчатого подъема сферически симметричного прямоугольного потенциала, был рассмотрен

потенциал в виде суммы сферически симметричной прямоугольной ямы и потенциала гармонического осциллятора. Результаты расчета показали, что вклад внутри барьерной области существенно зависит от формы ядерного потенциала – при гладких краях ямы, общий выход тормозного излучения уменьшается в несколько раз по сравнению с прямоугольной ямой, что подтверждается и расчетами других авторов с использованием реалистического потенциала МакФаддена-Сэчлера [16] (см. рисунок 5).

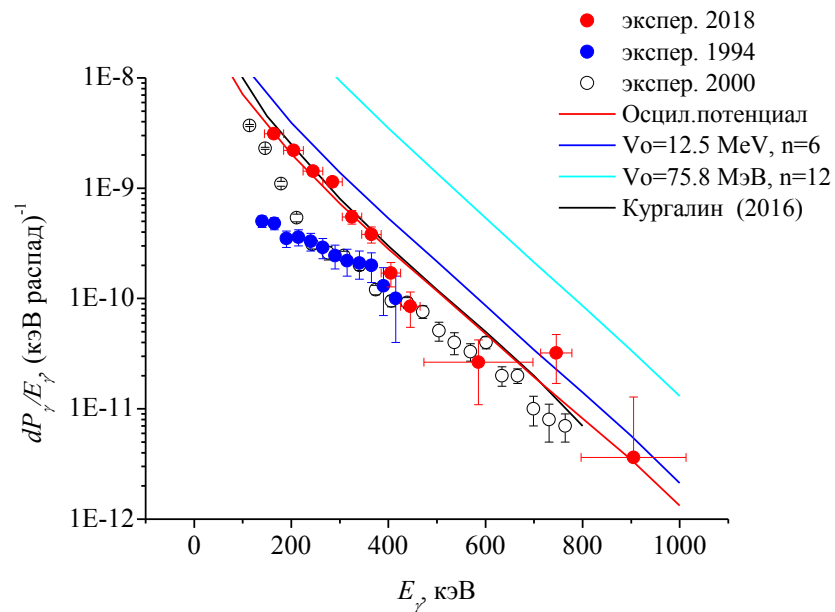


Рисунок 5. Вероятность выхода тормозного излучения при α -распаде ядра ^{214}Po : ● — результаты настоящей работы; ●, ○ — результаты предыдущих экспериментов [3,2]; сплошные линии — результаты расчета настоящей работы с параметрами прямоугольного ядерного потенциала $r_0 = 9,19$ фм и V_0 , соответствующим номеру корня $n=6$ — 12,5 МэВ, и $n=12$ — 75,8 МэВ; красная сплошная линия — результаты расчета с использованием осцилляторного потенциала; черная сплошная линия — результаты расчета с реалистическим ядерным потенциалом [16]

Показано, что в выбранной геометрии эксперимента поправка на квадрупольное излучение в выходе тормозных фотонов составляет менее 1%.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ рассмотрены перспективы развития метода тормозного излучения при исследовании динамики распада тяжелых ядер с помощью быстрых временных оцифровщиков сигналов с различных

детекторов, как сцинтилляционных, так и полупроводниковых – на основе сверхчистого германия и теллурида кадмия.

Проведено сравнение параметра $\Delta E \cdot \tau$, являющегося важной характеристикой методики регистрации редких совпадений. Установлено, что наилучшим значением параметра $\Delta E \cdot \tau$ обладают полупроводниковый детектор γ -излучения на основе сверхчистого германия и сцинтилляционный NaJ(Tl)-детектор.

В Заключение сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

В Приложении 1 приводится программа для обработки сохраненных экспериментальных данных и определения энергии зарегистрированных частиц и интервала времени между импульсами с детекторов.

В Приложении 2 представлены результаты численного расчета вероятности выхода тормозного излучения при α -распаде тяжелых ядер $^{210,214}\text{Po}$ и ^{226}Ra .

ЛИТЕРАТУРА

1. I.Massa, G.Vannini. Recent Advances in Nuclear Decay-time Measurement. — La rivista del Nuovo Cimento. 1982. V.5. Ser.3. p. 1-69.
2. К.Зайдель, Д.Зелигер, К.Райф и др. Предравновесный распад в ядерных реакциях // ЭЧАЯ. 1976. Т.7. стр. 499-552.
3. A.D'Arrigo, N.V.Eremin, G.Giardina et al. Investigation of Bremsstrahlung Emission in Alpha-Decay of Heavy Nuclei // Phys.Letters B. 1994. V.332. p. 25-30.
4. J.Kasagi, H.Yamazaki, N.Kasajima, et al. Bremsstrahlung in α -Decay of ^{210}Po and ^{244}Cm : Are α -particles Emitting Photons in Tunneling? : Preprint of Laboratory of Nuclear Science. Tohoku University. Japan. 1996.
5. H. Boie, H. Scheit, U. D. Jentschura et al. Bremsstrahlung in α -Decay Reexamined – Phys.Rev.Lett. 99. 022505.2007.
6. A.Cristallini, C.Moroni, I.Massa, et al. Measurement of the Bremsstrahlung Spectrum Produced by Proton Scattering on Carbon. Phys.Letters B. 1975. V.56. p. 245-246.
7. N.V.Eremin, V.F.Strizhov, B.V.Govorov. Bremsstrahlung Study of Nuclear Reaction Dynamics: The $^{12}\text{C} + p$ Reaction. Nucl.Phys.A. 1990. V.510. p. 125-138.

8. A.D'Arrigo, N.L.Doroshko, N.V.Eremin et al. Delay-advance Phenomenon Observed by Bremsstrahlung Spectrum of the $^{12}\text{C} + p$ Collisions. Nucl.Phys.A. 1993. V.564. p. 217-226.
9. A.D'Arrigo, N.L.Doroshko, N.V.Eremin et al. Bremsstrahlung Study of Nuclear Reaction Dynamics: The $^{16}\text{O} + p$ Reaction. Nucl.Phys.A. 1992. V.549. p. 375-386.
- 10.J.P. Bondorf, H.Nifenecker. Nuclear eletromagnetic bremsstrahlung: a new tool for studying heavy ion reactions. Nucl.Phys. A. 1985.V.442. p.478–508.
- 11.W. Greiner D. Vazak. B. Muller. Pion and gamm-ray bremsstrahlung in nuclear collisions at intermediate energies. J.Phys.G: Nucl.Phys. 11:13091321. 1985.
- 12.W. Benenson, C.L.Tam, J. Stevenson et al. Mass dependence ... reaction. Phys.Rev.C. 1989. V.39. N 4. p.1371–1376.
- 13.N.V.Eremin, T.V. Klochko, M.G. Glotova et al. Emission of High Energy Gamma-rays in Spontaneous Fission. Proceedings of International Scholl-Seminar on Heavy Ion Physics. 1993. Dubna. V.2, pp. 539-543.
- 14.C.M.Lederer, R.B.Firestone, V.S.Shirley. Table of Isotopes (Eighth edition).1996. CD-ROM Edition (Version 1.0. March). Lawrence Berkley National Laboratory. University of California.
- 15.T. Papenbrock and G. F. Bertsch. Bremsstrahlung in α -Decay - Phys. Rev. Lett. 80. 4141 (1998).
- 16.S.D. Kurgalin, Yu.M. Tchuvil'sky, T.A. Churakova. 2016. Internal Bremsstrahlung of Strongly Interacting Charged Particles.ISSN 1063-7788. Physics of Atomic Nuclei. 2016. Vol. 79. No. 6. pp. 943–950.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Выводы, полученные в ходе выполнения данной диссертационной работе, заключаются в следующем:

1. Разработана методика регистрации тормозных фотонов и γ -квантов, испускаемых в редких ядерных превращениях, происходящих с вероятностью $10^{-12} - 10^{-8}$ фотон/(кэВ·распад) на новой экспериментальной базе с использованием быстрых временных оцифровщиков формы сигналов и полупроводниковых детекторов. Разработаны алгоритмы оптимизации временного и энергетического разрешения измерительной установки.

2. Апробация методики проведена путем измерения вероятностей испускания γ -квантов с возбужденных уровней дочерних ядер ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{210}Pb , заселяемые при α -распаде ядер ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{214}Po . Наблюдаемое удовлетворительное согласие между результатами эксперимента с использованием Ge-детектора и данными, имеющимися в литературе и полученными ранее со сцинтилляционным NaI(Tl)-детектором, указывает на корректность предложенной методики.
3. Впервые проведен эксперимент и получены данные по энергетической зависимости вероятности выхода тормозного излучения, сопровождающего α -распад ядра ^{214}Po в диапазоне энергий от 100 кэВ до 1 МэВ, находящиеся в удовлетворительном согласии с результатами теоретического расчета в рамках реалистической ядерной модели α -распада, а так же с результатами предыдущего эксперимента, когда регистрация тормозных фотонов осуществлялась с помощью сцинтилляционного детектора и аналоговых электронных блоков.
4. Результаты расчета вероятности испускания тормозных фотонов при α -распаде тяжелых ядер, основанные на квантово-механической одночастичной модели α -распада показали, что на вероятность испускания тормозных фотонов оказывает влияние выбор параметров квантово-механической модели (формы потенциальной ямы, числа нулей волновой функции в области действия ядерного потенциала). Получено удовлетворительное согласие результатов расчета выходов тормозного излучения при α -распаде ^{214}Po и ^{226}Ra в рамках модели осцилляторного потенциала ядра с данными теоретического расчета с использованием реалистического потенциала МакФаддена-Сэчлера.
5. Рассмотрены перспективы развития метода тормозного излучения в применении к исследованию динамики распада тяжелых ядер. С помощью вейвлет-преобразования формы регистрируемых сигналов

определены глубины разложения сигналов с различных типов γ -детекторов (сцинтилляционных – (NaI(Tl) и BGO, и полупроводниковых – из сверхчистого германия и теллурида кадмия) и проведено сравнение параметра, определяющего энергетическое и временное разрешение методики регистрации редких совпадений – $\Delta E \cdot \tau$. Установлено, что наилучшим его значением обладают детекторы на основе сверхчистого германия и сцинтиллятора NaI(Tl).

Исследована возможность использования для регистрации α -частиц детекторов на основе природного алмаза Па группы. Несмотря на неоспоримые преимущества в радиационной стойкости алмазных детекторов по сравнению с кремниевыми детекторами, малая площадь рабочей поверхности, делает их использование в экспериментах по регистрации тормозного излучения проблематичным.

Список публикаций по теме диссертации:

Результаты, опубликованные в научных журналах Scopus, WoS, RSCI:

1. G. Giardina, N.V. Eremin, A.A. Paskhalov *et al.* Bremsstrahlung emission during α -decay of ^{226}Ra . Modern Physics Letters A. 2008. V.23. №31. pp. 2651-2663. (имп.фактор 1.3340)
2. G. Giardina, N.V. Eremin, A.A. Paskhalov *et al.* Bremsstrahlung emission accompanying the α -decay of ^{214}Po . European Physical Journal A. 2008. V. 36. № 1. p. 31 – 36. (имп.фактор 2.015)
3. Yu.V. Gulyaev, A.A. Altukhov, A.A. Paskhalov *et al.* Radiation Intensity Detectors Based on Natural Diamond. Physica Status Solidi(a). N 2 . 2001. pp. 356-360.
4. V.Kh.Liechtenstein, N.V.Eremin, A.A.Paskhalov *et al.* First tests of a thin natural diamond detector as an energy spectrometer for low-energy heavy ions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2004г. V.521. pp.203-207.
5. N.V. Eremin, A.A. Paskhalov, S.S. Markochev *et al.* New experimental method of investigation the rare nuclear transformations accompanying atomic processes: bremsstrahlung emission in spontaneous fission of ^{252}Cf . International Journal of Modern Physics E. 2010. Vol. 19. Nos.5 & 6. p.1183-1188, DOI: 10.1142/S0218301310015655 (имп.фактор 0.6950)

6. Н. В. Еремин, С. С. Маркочев, А. А. Пасхалов и др. Измерение выхода высокоэнергетических γ -квантов, сопровождающих спонтанное деление ядер ^{252}Cf . Известия РАН. Серия физическая. 2011. том 75. №4. с. 576-578. RINC 0.4570
7. Н.В. Еремин, А.А. Пасхалов. К вопросу о регистрации тормозного излучения при α -распаде тяжелых ядер с помощью быстрых цифровых преобразователей. Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 5. сс. 640–643. RINC 0.4510

Материалы конференций и семинаров:

8. N.V.Eremin, A.A.Paskhalov, D.A.Smirnov. Energy spectra of bremsstrahlung photons accompanying α -decay of ^{226}Ra and $^{210,214}\text{Po}$ nuclei. 53 международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра ЯДРО-2003. Тезисы докладов международного совещания. Из-во Московского Университета 2003. стр. 101.
9. N.V.Eremin, A.A.Paskhalov, D.A.Smirnov. The influence of nuclear surface deformation on the bremsstrahlung emission from α -decay of heavy nuclei. 53 международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра ЯДРО-2003. Тезисы докладов международного совещания. Из-во Московского Университета 2003. стр. 101.
10. Eremin N.V., Paskhalov A.A., Smirnova S.A. *et al.* Inorganic scintillators in the mixed alpha-gamma-neutron fields. Book of abstracts of 6th European conference on luminescent detectors and transformers of ionizing radiation. Львов. 2006. С.63.
11. Н.В. Еремин, А.А. Пасхалов. Использование быстрых временных осциллографов в совпадательных экспериментах с полупроводниковыми детекторами. Международная конференция «ЯДРО-2016» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. г.Саров. 2016. Тезисы докладов. С.178.
12. Н.В. Еремин, А.А. Пасхалов. Нахождение параметров сигналов с детекторов ядерного излучения, зарегистрированных быстрым цифровым осциллографом, методом вейвлет преобразования. Международная конференция «ЯДРО-2016» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. г.Саров. 2016. Тезисы докладов. С.180.
13. Н.В. Еремин, А.А. Пасхалов. Выделение редких ядерных превращений из фонового излучения методом временных рядов. Международная конференция «ЯДРО-2016» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. г.Саров. 2016. Тезисы докладов. С.177.
14. Н.В. Еремин, А.А. Пасхалов. Измерение выхода тормозного излучения при α -распаде ^{214}Po . Международная конференция

«ЯДРО-2018» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. г.Воронеж. 2018. Тезисы докладов. с.109.

15. Н.В. Еремин, А.А. Пасхалов. Регистрация низкоинтенсивных альфа-гамма переходов в цепочке распада ^{226}Ra . Международная конференция «ЯДРО-2018» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. г.Воронеж. 2018. Тезисы докладов. с.110.

Патент на изобретение

«Способ детектирования потока нейтронов и гамма-излучения», № 2300784 от 10 июня 2007 г.