

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3-2000-92

На правах рукописи
УДК 539.173.4

РУСКОВ
Иван Николов

ДЕЛЕНИЕ ^{237}Np РЕЗОНАНСНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2000

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка
Объединённого института ядерных исследований

Научные руководители: доктор физических наук,
старший научный сотрудник II степени ИЯИЯЭ-БАН,
ДЕРМЕНДЖИЕВ Элмир

доктор физико-математических наук,
начальник Отдела ядерной и нейтронной физики,
Государственный научный центр Российской Федерации
Физико-энергетический институт
им. акад. А.И. Лейпунского, ГНЦ РФ-ФЭИ,
ГОВЕРДОВСКИЙ Андрей Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ЛЯР им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ
ГАНГРСКИЙ Юрий Петрович


доктор физико-математических наук,
профессор,
заведующий Кафедрой ядерной физики
Обнинского института атомной энергетики,
ГРУДЗЕВИЧ Олег Теофильевич

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Защита состоится « » _____ 2000 г. в _____ часов на заседании
специализированного совета Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики
им. И. М. Франка и Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова
Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области,
конференц-зал ЛЯР.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « » 2000 г.

Ученый секретарь специализированного совета:  ПОПЕКО А. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последние годы в связи с обсуждением проблемы *трансмутации* [Sha89] высокоактивных и токсичных трансурановых изотопов (^{237}Np , ^{236}Pu , $^{239-242}\text{Pu}$, $^{214,242\text{m},243}\text{Am}$, ^{245}Cm), образующихся в *активной зоне* (АЗ) современного ядерного реактора, интерес к ^{237}Np сильно возрос. Причина в том, что он образуется в больших количествах в АЗ. Имея $T_{1/2,\alpha} = 2,14 \cdot 10^6$ лет он является один из самых самых неблагоприятных изотопов с точки зрения *утилизации* радиоактивных “отходов”. Для его трансмутации предполагается использовать реакцию *деления* (n,f). Моделирование этого процесса требует знания всего набора ядерных данных для ^{237}Np , в том числе и *сечения* деления σ_f ^{237}Np нейтронами. Около порога при $E_n \approx 0,65$ МэВ оно плавно возрастает и известно с достаточной для целей трансмутации точностью. В *подпороговой* области σ_f имеет ярко выраженную *кластерную* структуру [FBM68+]. “Хвосты” делительных резонансов определяют величину σ_f в тепловой области. Поскольку для трансмутации предполагается использовать реакторы на *тепловых* нейтронах, то точное знание параметров резонансов очень важно и нужно. Тем более, что имеются *сильные различия* $\sim 1,5-3$ раза между данными разных групп [FBM68+, RVP76, JVO72, АММ84+, КУК92+].

Изучение резонансного деления ^{237}Np актуально и с точки зрения физики деления для получения важной информации о самом процессе деления ядра и его характеристиках, таких как: *высота и структура* барьеров деления; *структура* переходных состояний над барьерами деления; *силы связи* коллективной моды между состояниями I и II класса составного ядра, влияние *квантовых характеристик* возбуждённых состояний составного ядра на свойства осколков деления; *схемы* γ -переходов между высоковозбуждёнными состояниями делящегося ядра и т.д. [Щер90].

Цель работы

- 1) Измерение *сечения деления* $\sigma_f(E_n)$ и усреднённого сечения $\langle \sigma_f \rangle$ ^{237}Np в интервале энергии нейтронов $E_n \in (3-500)$ эВ и сравнение с данными других групп;
- 2) Определение *площадей* $\sigma_0 \Gamma_f$ и *делительных ширин* Γ_f резонансов деления ^{237}Np в интервале энергии нейтронов $E_n \in (3-60)$ эВ, где эти значения в работах различных авторов отличаются в 1,5–3 раза;
- 3) Проверка гипотезы о существовании (n, γ f)-реакции при подбарьерном делении ^{237}Np резонансными нейтронами; оценка её вклада в процессе деления, определение ширины $\Gamma_{\gamma f}$ и энергии E_{γ} предделительного γ -кванта.

Научная новизна и практическая ценность работы

Новизна экспериментов в том, что полученные нами экспериментальные результаты привели к предположению о существовании (n, γ f)-реакции в

подпороговом делении ^{237}Np , которая может быть конкурентом деления ядра через изомерное состояние.

Практическая ценность работы состоит в определении *сечения деления, параметров резонансов, энергетического хода σ_f* . Эти ядерные данные важны для расчёта реакторов на тепловых и/или быстрых нейтронах и для моделирования процесса трансмутации трансурановых изотопов.

Основные результаты диссертации

1. Измерено сечение деления с высокой *статистической* точностью в области $E_n \in (3 - 1000) \text{ эВ}$;
2. Определены площади $\sigma_0 \Gamma_f$ и ширины Γ_f для ряда слабых резонансов в области $E_n < 10 \text{ эВ}$, а также для резонансов в области первого резонансного кластера при $E_n \sim 40 \text{ эВ}$;
3. Впервые выявлена *вариация* выходов 3 и более γ -квантов деления от резонанса к резонансу, которая изменяется в пределах $\sim 5\%$ по отношению к усреднённому значению.
4. Показано, что *часть* этой вариации может быть связана с протеканием $(n, \gamma f)$ -реакции в подпороговом резонансном делении ^{237}Np нейтронами.
5. Впервые получена оценка энергии этого предделительного γ -кванта (или этих γ -квантов) $E_\gamma \geq 0,6 \text{ МэВ}$ и оценена ширина возможного $(n, \gamma f)$ -процесса ($\Gamma_{\gamma f} \sim 1 - 10 \text{ мкэВ}$).

Апробация работы

Представленные в диссертации результаты докладывались на симпозиуме “Ядерные данные для науки и технологии” в *Юлихе*, Германия, 1991 г., на конференциях по физике деления в *Смоленице*, Словакия (1993 г.), на конференциях и совещаниях по нейтронной физике в *Алуште* (1991 г.), *Дубне* (1994-95 гг.), *Обнинске* (1993-95 гг.). По материалам диссертации опубликованы 11 работ. Наши исследования были поддержаны Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 95-020-03740) и Международным Научно-Техническим Центром (грант № 471-97).

Публикации

Основные результаты опубликованы в 11 работах, в которых Диссертант является соавтором: в том числе, журнальные статьи – 4 [5, 7, 10, 11], доклады на международных конференциях и рабочих совещаниях – 5 [1, 2, 6, 8, 9], препринты ОИЯИ – 2 [3, 4].

Объем и структура диссертации

Диссертация содержит 195 страниц, включающих в себя 76 рисунков и 15 таблиц. Диссертация состоит из Введения, 4 глав и Заключения. Полный список литературы состоит из 301 наименований.

Большое число методических вопросов, которые могут оказаться полезными для Читателя, обсуждаются в отдельных Приложениях 1–9, содержащих 152 страниц, 49 рисунков и 20 таблиц, которые предоставлены в конце Диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении “²³⁷Np – проблемы фундаментального, прикладного и методического характера” дано исчерпывающее представление об актуальности исследования подпорогового деления ²³⁷Np и о современном состоянии проблемы. Подчёркнуто, что из-за больших сложностей, с которыми сопровождается изучение подпорогового деления изотопа ²³⁷Np, число работ по теме невелико, а полученные данные неполные. Существующие данные по параметрам резонансов и усреднённом сечении деления к началу нашей работы различались в 1,5–3 раза.

Первая глава “*Модели строения атомного ядра и деление*” представляет обзор по физике деления атомного ядра с точки зрения разных ядерных моделей. Коротко рассмотрены основные понятия физики деления ядра, такие как делимость, барьер и порог деления согласно моделям жидкой капли Хила-Уилера [HW39] и оболочечных поправок Струтинского [Str67], а так же модели составного ядра Н. Бора [Boh36]. Кроме того, обсуждается каналовая теория деления О. Бора [Boh56]. В § 1.8 подробно описана промежуточная структура в сечении подпорогового деления ²³⁷Np [FBM68+], ²⁴⁰Pu, ²³⁴U как результат разной по силе взаимной связи между состояниями I и II класса составного ядра. Рассматриваются и спонтанное деление тяжёлых ядер [FP40] и изомеры формы [PDK62+],

Во второй главе описана методика измерения сечения деления ²³⁷Np резонансными нейтронами, площадей $\sigma_0 \Gamma_f$ и ширины Γ_f резонансов деления и исследования вариации выходов γ -квантов деления от резонанса к резонансу.

В § 2.1 рассмотрен метод времени пролёта, который использовался для выделения эффекта деления нейтронами разных энергий.

В § 2.3 описаны условия измерений (§ 2.3.1) и составные части и характеристики созданной экспериментальной установки для исследования σ_f ²³⁷Np нейтронами. Она состояла из (Рис. 1): импульсного источника нейтронов ИИН (1) (§ 2.2); системы формирования нейтронного пучка (2)–(6); измерительно-накопительно-обрабатывающей компьютеризованной системы (ИНОС) (7)–(10).

В качестве ИИН использовался бустер ИБР-30, работающий совместно с ЛУЭ-40. Отмечаются как положительные стороны этого источника (относительно высокая плотность потока резонансных нейтронов до $E_n \sim 50$ эВ), так и его недостатки (относительно большой фон запаздывающих нейтронов и плохое энергетическое разрешение при ширине всплеск $\tau \sim 4$ мкс).

Частота повторения нейтронных импульсов была $f \approx 100$ Гц, а их средняя ширина $\langle \tau \rangle$ зависела от коэффициента размножения быстрых нейтронов k в активной зоне ИБР-30. Были выполнены измерения при двух размножениях нейтронов в АЗ: $\langle k \rangle \approx 200$ ($\langle \tau \rangle \approx 4$ мкс) и $\langle k \rangle \approx 100$ ($\langle \tau \rangle \approx 2,5$ мкс).

ИНОС (§ 2.3.2) состояла из детектора осколков деления (7), 4π-детектора γ – лучей (8), электроники детекторов осколков и γ – квантов (9), компьютеризованного модуля для временного и амплитудного анализа (10) и была расположена на III канале ИБР-30 в павильоне № 52 на расстояние $L \approx 58,4$ м от его АЗ (1). На этой базе диапазон доступных для измерения энергии нейтронов: $E_n \approx 0,2$ эВ – 1 кэВ, а временное разрешение нейтронного спектрометра составляло $\delta\tau \approx 70$ нс/м при $\langle k \rangle \approx 200$ и $\delta\tau \approx 40$ нс/м при $\langle k \rangle \approx 100$.

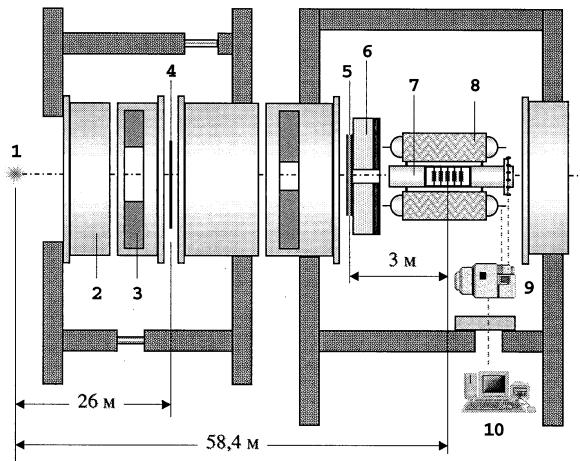


Рис. 1. Схема экспериментальной установки на 3 пучке ИБР-30:

1 – активная зона; 2 – вакуумированный нейтронный пучок; 3 – коллиматор нейтронного пучка; 4 – фильтр из Cd; 5 – фильтры из Mn, Co, Rh; 6 – защита-коллиматор; 7 – многосекционная камера деления; 8 – БЖСД; 9 – аналоговая часть электроники; 10 – компьютеризованный времяпролётный анализатор.

В § 2.3.2.1 и Приложении 6 описаны используемые для регистрации осколков деления многослойные ионизационные камеры деления (КД), работающие в импульсном режиме. Показано, что использование такого типа детектора осколков является предпочтительным для решения задач, связанных с регистрацией осколков деления на фоне высокой собственной α -активности ^{237}Np . Использовались две КД, содержащие разное количество изотопа непутия ^{237}Np : малая камера деления (МКД) $\{m_m(^{237}\text{Np}) \approx 0,133 \text{ г}\}$ и большая камера деления (БКД) $\{m_b(^{237}\text{Np}) \approx 1,5 \text{ г}\}$. Конструкция обеих КД определялась поставленными выше задачами и условиями измерений. КД располагалась в сквозном отверстии большого 6-секционного жидкостного сцинтилляционного детектора γ -лучей БЖСД (§ 2.3.2.2).

Некоторые параметры используемых мишеней даны в Таблице 1.

Конструкция и схема расположения электродов большой камеры деления (БКД) показана на **Рис. 2**. Рабочим газом служила стандартная смесь из 90 % Ar + 10 % CH₄ (P10-газ) при давлении $p \sim [600 \div 760]$ мм рт. ст.

Таблица 1

Мишени	Камера	МКД	БКД
Число двухсторонних мишеней с Np, шт.		6	15
Химическое соединение		NpO ₂	NpO ₂
Диаметр активного слоя, мм		40	80
Средняя плотность изотопа, мг/см ²		~ 1	~ 1
Суммарная масса, мг		133 ± 13	1507 ± 45
Суммарное число ядер ²³⁷ Np, 10 ²⁰		3,38 ± 0,34	38,30 ± 1,15
Примеси ²³⁹ Pu, г/г		10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Примеси ²³⁵ U, г/г		10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Калибровочные мишени из U, шт		1	1
Химическое соединение		U ₃ O ₈	U ₃ O ₈
Обогащение по изотопу ²³⁵ U, %		90	90
Средняя плотность изотопа, мг/см ²		1	1
Масса, мг		8,4 ± 0,85	10,5 ± 1,05
Число ядер ²³⁵ U, 10 ¹⁹		2,17 ± 0,22	2,71 ± 0,27

В качестве стандарта для определения σ_f ²³⁷Np использовалось сечение деления ²³⁵U в диапазоне резонансных энергий до E_n ~ 20 эВ, где имеется ряд сильных и относительно изолированных резонансов деления, чьи характеристики известны с высокой точностью [Mug84].

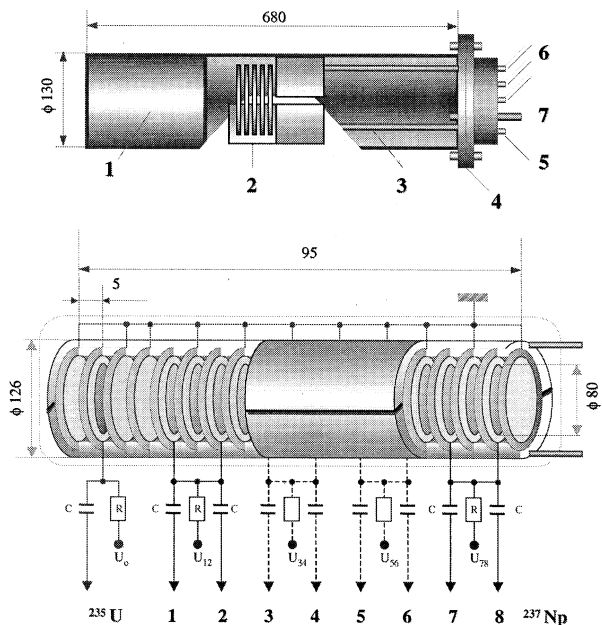


Рис. 2. Принципиальная схема БКД:

1 – корпус, 2 – плоскопараллельные секции, 3 – держатели, 4 – фланец, 5 – СР разъем для урановой секции, 6 – СР разъемы восьми нептуниевых секций, 7 – вакуумный вентиль для откачки и наполнения. Все размеры показаны в миллиметрах.

Определение числа ядер ^{237}Np в мишенях из Np , а так же числа ядер ^{235}U в калибровочной мишени из U проводилось с помощью α -спектрометра ЛЯР (Приложение 7). Определение доли примесей изотопа ^{235}U в Np -мишенях проводилось и по счёту делений в интервале энергий нейтронов $E_n \approx (8,55 \div 8,85)$ эВ во времяпролётных спектрах деления ^{237}Np (§ 2.4), т.е по проявлению наиболее сильного резонанса деления ^{235}U при $E_n \approx 8,8$ эВ. Таким образом, было определено, что доля примесей ^{235}U не более 10^{-6} г/г.

В § 2.3.2.2 рассмотрены регистрация γ -квантов деления при помощи 6-ти секционного жидкостного сцинтилляционного детектора нейтронов и γ -лучей и его характеристики [МПР72+].

Основное качество этого детектора в режиме регистрации γ -лучей – это его низкая чувствительность к рассеяным быстрым нейтронам и безрадиационное поглощение тепловых нейтронов растворенным в толуоле метил-боратом.

§ 2.4 посвящён измерениям времяпролётных (ВПС) и амплитудных спектров (АС) импульсов осколков деления и их совпадений с импульсами γ -квантов с БЖСД, а так же определению эффективности регистрации осколков (§ 2.4.2), величины и поведения фона (§ 2.4.4) в ВПС деления и совпадения.

Блок-схемы электроники БЖСД и большой камеры деления (БКД) показаны на Рис.3. Накопление, сохранение, предварительная обработка и визуализация спектров осуществлялась с помощью программы МАК [МАК91]. Каждый из 2048 канальных времяпролётных спектров состоял из 4 групп временных окон: 1024 x 1 мкс, 512 x 4 мкс, 256 x 8 мкс и 256 x 16 мкс.

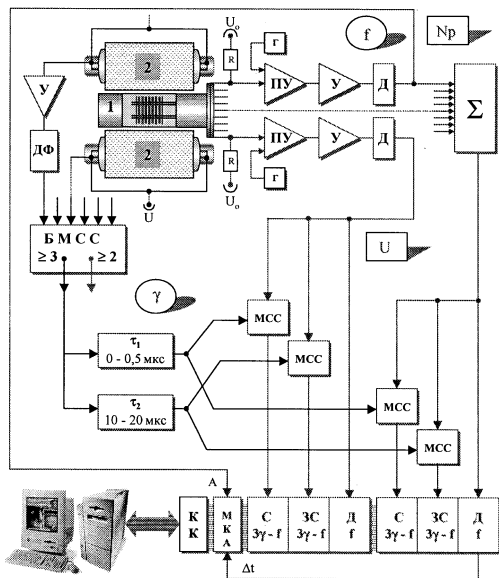


Рис. 3. Блок-схема электроники детекторов осколков и γ -квантов:

(1) – многослойная газовая ионизационная камера деления (БКД); (2) – БЖСД: ПУ – предусилитель; У – усилитель; Д – дискриминатор; ДФ – дискриминатор + формирователь; Σ – сумматор; БМСС – быстрая мажоритарная схема совпадений; МСС – “медленная” схема совпадений; МКА – многоканальный анализатор амплитуд АК-1024; (Д, С, ЗС) – временные анализаторы импульсов делений, совпадений и задержанных совпадений; КК – крейт-контролер, $U_0 \sim 300 - 400$ В, $U \sim 2100 - 2250$ В.

Для определения *эффективности* регистрации (§ 2.4.3) осколков деления ядер $^{237}\text{Np} - \epsilon_f^{(7)}$ и $^{235}\text{U} - \epsilon_f^{(5)}$, измерялись их амплитудные спектры. Постоянство величин $\epsilon_f^{(7)}$ и $\epsilon_f^{(5)}$ в разные моменты времени после нейтронной вспышки ИИН проверялось путём измерения амплитудных спектров осколков деления в 8 временных "окнах" шириною по 128 каналов каждое. Было найдено, что начиная со 2-го "окна" все амплитудные спектры имеют одинаковую форму без каких-либо сдвигов спектров по временной оси. Это свидетельствовало о постоянстве величин $\epsilon_f^{(7)}$ и $\epsilon_f^{(5)}$ вплоть до $E_n \sim 1$ кэВ.

Фон в ВПС деления ^{235}U определялся (§ 2.4.4.1) при помощи резонансных фильтров из *Mn* (337 эВ), *Co* (132 кэВ), *Rh* (1,26 эВ) и *Cd* (0,18 эВ), помещённых в пучок нейтронов. На Рис. 4. показано одно из измерений с резонансными фильтрами в пучке. Для определения параметров фоновой кривой нами использовался метод наименьших квадратов (§ 2.4.4.2), реализованный в неопубликованной до сих пор программе Диссертанта для обработки ВПС на базе минимизирующего модуля FUMILI [ГЖИ89], а также хорошо известная программа ORIGIN [Оги98] (Рис. 5).

Определение фона в ВПС деления ^{237}Np (§ 2.4.4.4) с помощью резонансных фильтров сильно затруднено по следующим причинам: во-первых – это чрезвычайно малые межрезонансные значения σ_f на уровне $\sim 10^{-2}$ барн, при которых применение резонансных

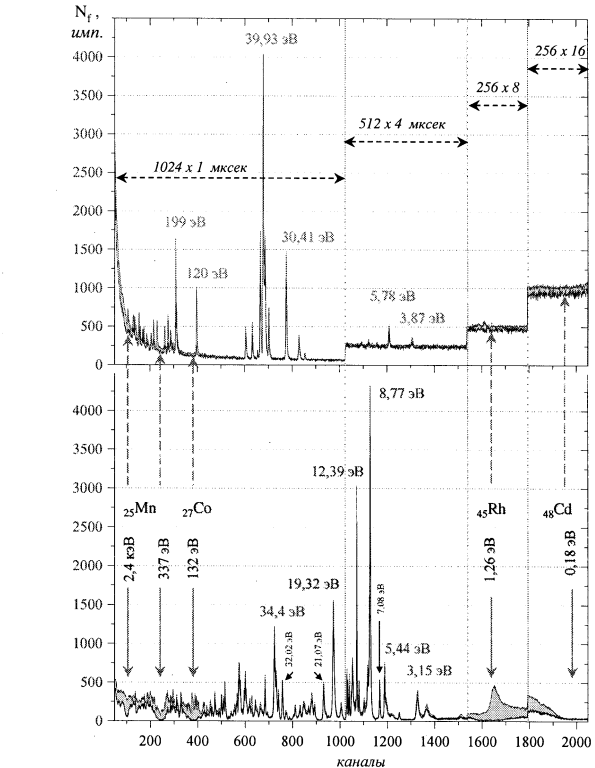


Рис. 4. Экспериментальные ВПС импульсов деления ^{235}U (снизу) и ^{237}Np (сверху). Используются "черные" резонансные фильтры из *Mn*, *Co*, *Rh* и *Cd*. Временная кодировка ВКП-4: 1024 x 1 мкс + 512 x 4 мкс + 256 x 8 мкс + 256 x 16 мкс. Время набора спектров: ≈ 21 ч. 20 мин. Коэффициент размножения нейтронов в АЗ ИБР-30: $k \approx 100$.

фильтров не даёт нужного эффекта; во-вторых, как

было указано выше, это – характерный для ИБР-30 недостаток – относительно высокий фон запаздывающих нейтронов из АЗ между вспышками (§ 2.2.1.3).

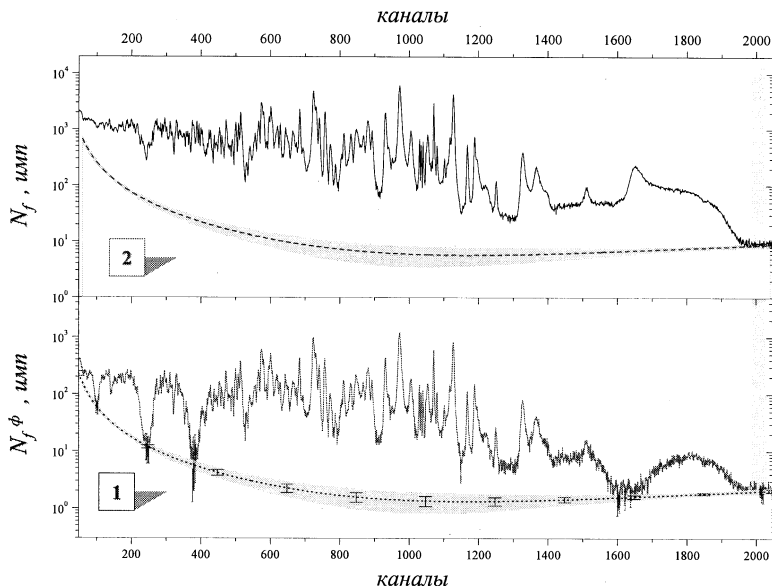


Рис. 5. ВПС ^{235}U вместе с кривыми фона. (1) – измерение с фильтрами нейтронов из *Mn, Co, Rh, Cd*, $t = 21$ ч. 20 мин; (2) – измерение с фильтром из *Cd*, $t = 83$ ч. 48 мин. Средняя мощность ИБР-30: $\langle W \rangle \sim 4,5$ кВ.

Поэтому, для определения фона в диапазоне E_n от ~ 3 эВ до ~ 1000 эВ выбирались ~ 20 -ти интервалов, где по данным [Mug84] нет резонансов и МНК проводилась гладкая кривая фона. Аппроксимация фоновых точек разными гладкими функциями показала, что величина неопределенностей при определении фона, возникающих при использовании различных функции для описания его хода в области кластера резонансов при энергии нейтронов $E_n \sim 40$ эВ, не больше статистической ошибки фона и практически не влияет на величину отношения площадей соответствующих резонансов в обоих ВПС – ”делительном” и ”совпадательном”.

Практически равноточные результаты были получены при использовании в качестве подгоночной функции суммы трёх экспонент (Рис. 6), полинома 6-ой степени, 4-параметричной квадратической функции или путём сглаживания спектров кубической сплайн-функцией (Рис. 7).

Фон в ВПС совпадений импульсов γ -детектора с импульсами КД (§ 2.4.4.6) имеет кроме плавно изменяющейся составляющей ещё и резонансную – это случайные совпадения между γ -квантами и фоновыми делениями.

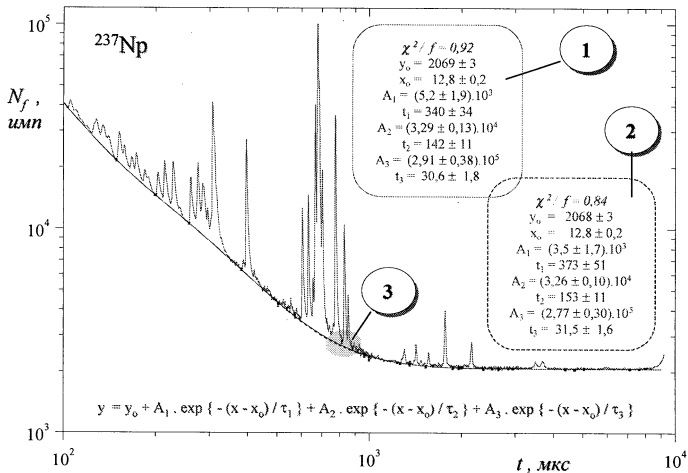


Рис. 6. Кривые фона в делительном ВПС ^{237}Np (в t -представлении). Показаны гладкие кривые фона и их параметры: (1) – фон проведён по 59 точкам; (2) – фон проведён по 56 точкам, не учитывая 3 точек в районе (3), доверительные интервалы - 95 %.

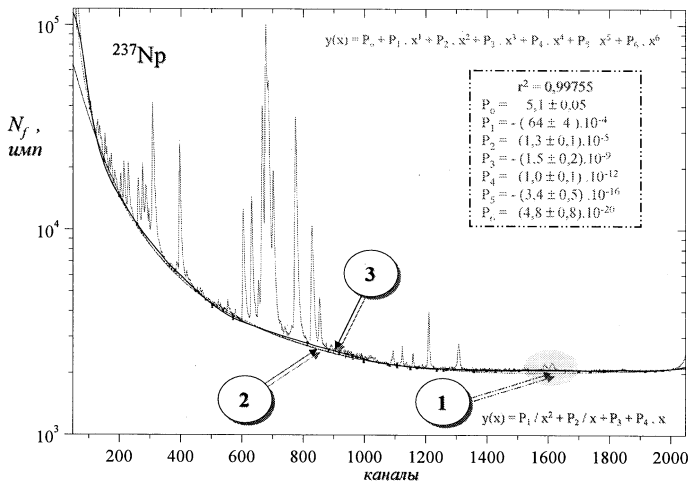


Рис. 7. Кривые фона в делительном ВПС ^{237}Np . Показаны гладкие кривые фона, полученные по 59 точкам с использованием: (1) – 4-параметричной квадратической функции (пунктир с точками); (2) – полиномом 6-степени (пунктирная линия); (3) – кубической сплайн-функцией (непрерывная линия).

Поэтому, для определения вклада случайных совпадений (СС) вводилась временная задержка импульсов с БСЖД и измерялись ВПС *задержанных совпадений* (ЗС). Измерения ВПС ЗС выполнялись одновременно с измерением мгновенных совпадений (МС) [ГКП59]. Ширина временного окна схемы совпадений после оптимизации была выбрана равной 1 мкс, а измерения проводились и на пониженной мощности реактора $\langle W \rangle \sim 4,5$ кВ, при которой ВПС имели несколько лучшее временное разрешение.

На **Рис. 8** показаны ВПС: деления (1), " $\geq 3\gamma$ -ф" – совпадений (2) и задержанных совпадений (3) для ^{237}Np . Эффективность детектирования делений в канале совпадений $\sim 42\%$, доля случайных совпадений $< 10\%$ от суммарного счёта совпадений и $\sim 2-3\%$ от счёта делений.

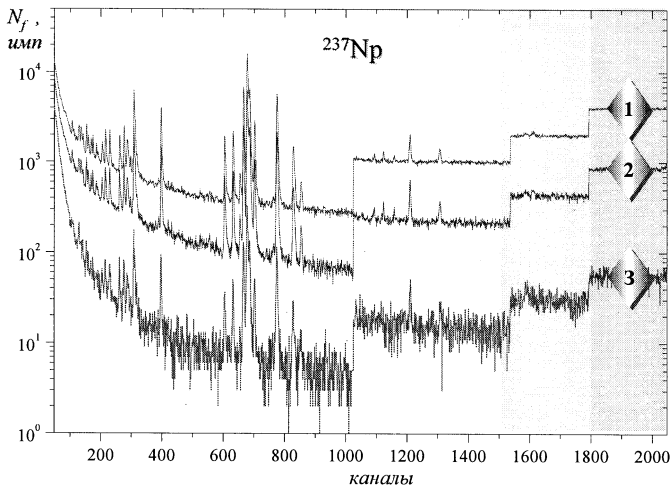


Рис. 8. Времяпролётные спектры ^{237}Np . Время измерения: $t = 83$ ч. 40 мин. Временная кодировка ВКП-4 как на **Рис. 4**. (1) – ВПС деления, $N_f = N_f(k)$; (2) – ВПС совпадений $\geq 3\gamma$ -квантов с делениями, $N_c = N_c(k)$; (3) – ВПС задержанных совпадений, $N_{zc} = N_{zc}(k)$; Временное окно (разрешающее время) схемы совпадений: $\tau = 1$ мкс. Время задержки: $t_3 = 5$ мкс.

После поканального вычитания ВПС задержанных совпадений (3) от суммарных совпадений (2), определялся фон согласно изложенной выше процедуре.

Третья глава посвящена методу определения из ВПС деления площадей $\sigma_0\Gamma_f$, ширины Γ_f и усреднённого сечения деления $\langle \sigma_f \rangle$ (§ 3.1).

Для определения величин $\sigma_0\Gamma_f$, ВПС, измеренные с помощью малой камеры деления (МКД) обрабатывались методом "площадей", а ВПС с БКД – методом "формы". Оба метода подробно описаны в Приложении 4 Диссертации.

Согласно методу "площадей", в приближении тонкой мишени и пренебрежимо малой межрезонансной интерференции, площадь j -ого резонанса

^{237}Np – $(\sigma_0 \Gamma_i)^{(7)}$, при известном значении площади $(\sigma_0 \Gamma_i)^{(5)}$ для i -ого резонанса ^{235}U , определялась по формуле:

$$(\sigma_0 \Gamma_f)_j^{(7)} = \left(\sum N_f \right)_j^{(7)} \cdot \left(\frac{\sigma_0 \Gamma_f}{\sum N_f} \right)_i^{(5)} \cdot \frac{n^{(5)} \varepsilon_f^{(5)}}{n^{(7)} \varepsilon_f^{(7)}} \cdot \left(\frac{E_j}{E_i} \right)^{0,9} \quad (1)$$

Таким образом, нахождение $(\sigma_0 \Gamma_i)^{(7)}$ сводилось к определению: сумм $(\sum N_i)_j^{(7)}$ и $(\sum N_i)_i^{(5)}$, которые являются суммарными скоростями деления в пределах соответствующих резонансов; эффективностей регистрации актов делений $\varepsilon_f^{(7)}$ и $\varepsilon_f^{(5)}$ с КД; числа ядер $n^{(7)}$ изотопа ^{237}Np в мишенях из нептуний и $n^{(5)}$ в калибровочной урановой мишени.

Для определения делительных ширин $(\Gamma_i)^{(7)}$ с помощью полученных площадей $(\sigma_0 \Gamma_i)^{(7)}$, из формул (4-26) Приложения 4, после несложных преобразований, можно получить следующую формулу:

$$(\Gamma_f)_j^{(7)} = 0,384 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{\sigma_0 \Gamma_f}{g \Gamma_n / \Gamma} \right)_i^{(7)} \cdot E_j \quad (2)$$

В ней все константы учтены числовым множителем, а размерность всех остальных величин дана в "эВ". Для расчёта $(\sigma_0 \Gamma_i)^{(5)}$ использовались рекомендованные значения для $\sigma_0^{(5)}$ и $\Gamma_f^{(5)}$, которые, как и значения нейтронных $(g \Gamma_n)_i^{(7)}$ и полных ширин $\Gamma_j^{(7)}$, брались из [Mug84]. Суммарные ошибки площадей и делительных ширин рассчитывались стандартным образом, учитывая ошибки всех величин в обеих формулах (1) и (2).

Для сравнения полученного нами сечения деления с данными других авторов, рассчитывалось усреднённое в интервале $[E_1 - E_2]$ сечение по следующей формуле:

$$\langle \sigma_f(E_1, E_2)^{(7)} \rangle_i = \frac{1,66 \cdot 10^{-6}}{E_2 - E_1} \cdot \sum_{E_i} N_f^{(7)} \cdot \left(\frac{E_j}{E_i} \right)^{0,9} \quad (3)$$

Здесь E_j – энергия нейтронов, соответствующая середине энергетического интервала $[E_1 - E_2]$, а E_i – энергия i -го калибровочного резонанса ^{235}U . Каждое значение $\langle \sigma_f(E_1, E_2) \rangle$ является средним по трём значениям $E_i \equiv E_{ni} \equiv \{7,1; 12,4; 19,3\}$ эВ.

После вычитания фона, для 27 резонансов в интервале 3 эВ ÷ 50 эВ были определены величины $\sigma_0 \Gamma_f$ и Γ_f (Таблицы 1 ÷ 4). В Таблице 1 представлены значения $\sigma_0 \Gamma_f$, измеренные Платтардом и др. [РВР76], Пикельнером и др. [ГКК70+] и нами [3, 5], в интервале $E_n \approx (0,5 \div 11)$ эВ. Видно, что данные полученные в Дубне систематически выше данных французской группы [РВР76]. В среднем, отношение сумм по величинам $\sigma_0 \Gamma_f$ работы [3, 5] и этой работы $\approx 2,4$. Значения $\sigma_0 \Gamma_f$ для резонансов в интервале $E_n \approx (24 \div 50)$ эВ показаны в Таблице 2. В этом интервале отношение $\approx 3,2$, т.е. на 30 % выше значения отношения в первом интервале. Но в обоих интервалах

имеются слабые резонансы, такие как при 4,86 эВ; 10,68 эВ; 29,49 эВ и 38,18 эВ, для которых разница в значениях выходит далеко за пределы ошибок $\Delta(\sigma_0 \Gamma_f)$. В **Таблице 3** и **Таблице 4** сравниваются значения делительных ширин Γ_f взятые из работ *Платтарда и др.* [РВР76], *Коллара и др.* [КТЛ71] и *Дерменджиева и др.* [3,5].

Таблица 1. Площади $\sigma_0 \Gamma_f$ резонансов в интервале энергий нейтронов от $\sim 0,5$ эВ до ~ 11 эВ.

E_n , (эВ)	$\sigma_0 \Gamma_f$, (барн.эВ) $\cdot 10^{-3}$		
	<i>Пикельнер и др. [ГКК70+]</i>	<i>Платтард и др. [РВР76]</i>	<i>Дерменджие в и др. [3,5]</i>
0,489	2,9 \pm 0,7		
1,321	3,8 \pm 1,0		
1,479	3,5 \pm 1,0		
1,969	1,9 \pm 1,0		
3,865	16 \pm 4	6 \pm 0,9	11,7 \pm 1,9
4,26		0,4 \pm 0,3	1,3 \pm 0,2
4,86		0,1 \pm 0,1	1 \pm 0,2
5,78	46 \pm 9	1,6 \pm 1,8	35,4 \pm 5,6
7,42	12 \pm 6	2,7 \pm 0,6	6,6 \pm 1,1
8,30		0,9 \pm 0,5	3,5 \pm 0,6
8,97		4,1 \pm 0,5	11,8 \pm 1,9
10,68		2,5 \pm 0,4	10,2 \pm 1,6
10,84		1,8 \pm 0,6	3,1 \pm 0,5
11,10		1,0 \pm 0,3	2,6 \pm 0,5

Таблица 2. Площади $\sigma_0 \Gamma_f$ резонансов в интервале энергий нейтронов от ~ 24 эВ до ~ 50 эВ.

E_n , (эВ)	$\sigma_0 \Gamma_f$, (барн. эВ) $\times 10^{-3}$	
	<i>Платтард и др. [РВР76]</i>	<i>Дерменджиев и др. [3,5]</i>
24,98	17,8 \pm 1,8	43 \pm 7
26,19	11 \pm 4	44 \pm 7
26,56	70,7 \pm 5,5	170 \pm 30
29,49	0,6 \pm 0,2	23 \pm 4
30,41	308 \pm 12	850 \pm 140
30,75	1,3 \pm 0,6	5,2 \pm 0,8
31,30	2,2 \pm 0,7	1,5 \pm 0,3
37,15	147,3 \pm 12	440 \pm 70
38,18	7,7 \pm 2,2	82 \pm 13
38,92	288 \pm 24	890 \pm 140
39,24	153,2 \pm 12	530 \pm 80
39,79	69,4 \pm 22	190 \pm 30
39,93	891,8 \pm 44,5	2920 \pm 470
41,35	389 \pm 27	1230 \pm 200
42,81	21,3 \pm 7	95 \pm 15
46,04	130,2 \pm 7	400 \pm 60
50,34	117,7 \pm 13	370 \pm 60

Сравнение данных, приведенных в **Таблицах 1 ÷ 4** показывает, что в интервале энергий нейтронов ниже ~ 50 эВ полученные значения делительных ширин Γ_f [3,5] для большинства резонансов согласуются, в пределах достигнутой точности ($\sim 15-20\%$) с рекомендованными значениями [Mug84], хотя значения Γ_f для некоторых резонансов выходили за пределы ошибок. Значения *усреднённого* сечения ^{237}Np в районе $E_n \in [3 \div 500]$ эВ представлены в **Таблице 5** (1-ая колонка) вместе с их полными ошибками.

Таблица 3. Делительные ширины Γ_f резонансов в интервале энергий нейтронов от $\sim 0,5$ эВ до ~ 11 эВ.

E_n (эВ)	Γ_f (мкэВ)			
	Рекомендованные значения [Mug84]	Пикельнер и др. [ГКК70+]	Платтард и др. [РВР76]	Дерменджиев и др. [3,5]
0,489	1,24 ± 0,26	1,3		
1,321	8,7 ± 0,5	4,1		
1,479	1,33 ± 0,14	1,1		
1,969	4,2 ± 0,3	8,4		
3,865	7,0 ± 0,7	7,8	3 ± 0,5	5,8 ± 1,0
4,26	0,34 ± 0,2		0,2 ± 0,2	6,4 ± 1,2
4,86	7,9 ± 0,2		0,07 ± 0,07	4,4 ± 0,9
5,78	12,6 ± 0,5	13	5 ± 0,5	11,1 ± 1,9
7,42	9,5 ± 0,9	19	4,2 ± 1,0	10,4 ± 1,9
8,31	670 ± 2		2,1 ± 0,6	8,7 ± 1,6
8,97	24,0 ± 1,2		8,8 ± 1,2	26 ± 5
10,68	5,4 ± 0,4		1,5 ± 0,3	6,4 ± 1,1
10,84	0,8 ± 0,3		0,8 ± 0,3	1,3 ± 0,2
11,10	3,4 ± 0,3		0,4 ± 0,1	1,2 ± 0,2

Последние включают в себя статистическую ошибку суммы делений $\Delta(\Sigma N_f^{(7)})$ в интервале нейтронных энергий $[E_1-E_2]$ и указанные выше систематические ошибки.

Значения для усреднённого сечения $\langle \sigma_f(\Delta E_n) \rangle$ показаны на Рис. 9 вместе с данными работ [РВР76], [ЈВО72] и [КҮК92+], которые получены на значительно отличающихся по своему энергетическому разрешению нейтронных спектрометрах: от $\sim 0,04$ % [РВР76] и ~ 2 % [3] до ~ 30 % [GDD97+] и ~ 40 % [КҮК92+]. Поэтому приведенное здесь сравнение данных, полученных на разных по разрешению спектрометрах, является качественным.

Видно, что значения усреднённого сечения работы [4,7] в интервалах $E_n \in \{5-6; 30-60; 110-130; 180-240\}$ эВ примерно в 3 раза выше величин $\sigma_f^{(7)}$, полученных в Сакле [РВР76], и в пределах ошибок согласуются с данными Кимуры и др. [КҮК92+] из Университета в Киото, а также с данными Джаколетти и др. [ЈВО72], полученными с использованием нейтронов подземного ядерного взрыва. Полученные нами значения усреднённого сечения между кластерами практически совпадают с данными Сакле, хотя можно было ожидать, что они, как и значения $\sigma_f^{(7)}$ в области кластеров, будут выше их.

На Рис. 10 показаны кривые усреднённого сечения деления ^{237}Np $\langle \sigma_f(E_n) \rangle$ на спектрометрах по времени замедления: (1) – [КҮК92+], (4) – [GDD97+] и по времени пролёта: (2) – [5], (5) – [12]. Пунктиром показано, оценённое сечение (3) – [Ign96]. Видно качественное согласие между ними. Определённое различие между [4] и [11] связано с более правильным определением фона в [11]. Таким образом, Дубненские данные по $\langle \sigma_f(E_n) \rangle$ согласуются с данными Кимуры и др. [КҮК92+], Джаколетти и др. [ЈВО72] и примерно в 3 раза выше данных Сакле [РВР76].

Таблица 4. Делительные ширины Γ_f резонансов в интервале энергий нейтронов от ~ 24 эВ до ~ 50 эВ

$E_n,$ (эВ)	Γ_f (мкэВ)			
	Рекомендованные значения [Mug84]	Коллар и др. [KTL71]	Платтард и др. [PBP76]	Дерменджиев и др. [3.5]
24,98	8,5 ± 0,6	40,8 ± 3,4	3,6 ± 0,5	8,2 ± 1,5
26,19	85 ± 5	71,6 ± 24	30,6 ± 8,5	160 ± 30
26,56	63 ± 2	64,2 ± 7,3	22,5 ± 3,2	57 ± 10
29,49	62 ± 46		9,9 ± 6,1	300 ± 50
30,41	270 ± 8	109 ± 13	79,8 ± 10,2	250 ± 40
30,75	6,6 ± 6,6	132 ± 40	5,1 ± 2,7	18 ± 3
31,30	17 ± 3	44,3 ± 23	6,9 ± 2,4	5 ± 0,9
37,15	340 ± 10	232 ± 46	142,3 ± 28,5	360 ± 60
38,18	20 ± 2	68,5 ± 21	8,6 ± 3,0	72 ± 13
38,92	1000 ± 200	710 ± 180	380,2 ± 84,0	970 ± 170
39,24	840 ± 12	533 ± 160	333,1 ± 105,8	1060 ± 190
39,79	21 ± 21		1686,9 ± 800,0	1480 ± 260
39,93	7720 ± 66	5500 ± 970	864,7 ± 122,7	6360 ± 1110
41,35	700 ± 20	275 ± 48	216,7 ± 32,5	720 ± 130
42,81	1000 ± 100	307 ± 88	236,8 ± 153,4	1110 ± 200
46,04	700 ± 40	550 ± 110	276,1 ± 139,8	820 ± 140
50,34	57 ± 70	57,2 ± 8,4	23,3 ± 5,9	310 ± 50

Четвёртая глава посвящена поиску ($n, \gamma f$)-реакции в подпороговом делении ^{237}Np резонансными нейтронами.

В § 4.1 описан механизм ($n, \gamma f$)-процесса.

В § 4.2 обсуждаются экспериментальные методы его исследования.

Особо внимание уделено прямому методу, связанному с регистрацией

мгновенных γ -квантов. Так как γ -кванты в

основном излучаются на поздней фазе деления, т.е. через $\sim 10^{-15}$ с после деления составного ядра, то

предполагают, что величина энергии

возбуждения составного ядра слабо влияет на множественность и форму γ -спектров с осколков деления. Поэтому, вариацию множественности (или её функционалом) и полной энергии γ -квантов деления от резонанса к резонансу, за счёт испускания предделительного γ -кванта, считают индикатором существования ($n, \gamma f$)-реакции.

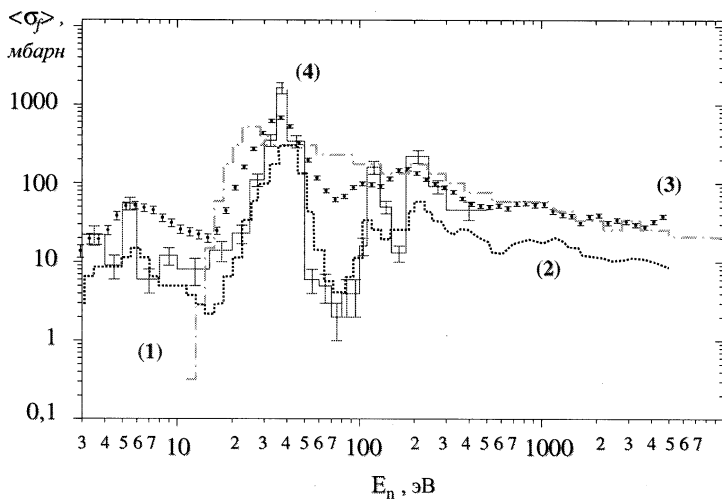
Вариацию средней множественности делительных γ -квантов $\Delta \langle v_\gamma \rangle$ по отношению к средней множественности предделительных γ -квантов $\langle v_{\gamma f} \rangle$ определяют формулой [RTS73+]:

$$\Delta \langle v_\gamma(E_\gamma) \rangle = (\Gamma_{\gamma f} / \Gamma_f) \langle v_{\gamma f} \rangle \quad (4)$$

Таблица 5 Усреднённое сечение деления ^{237}Np в интервале энергий нейтронов от 3 эВ до 500 эВ.

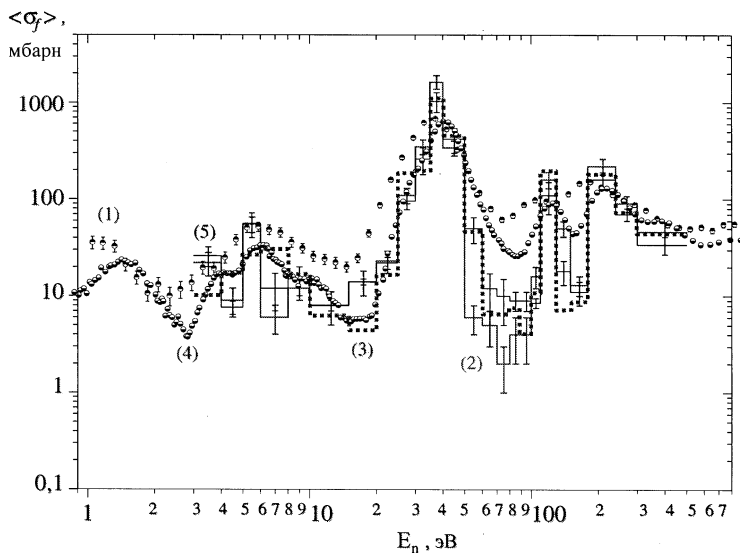
ΔE_n , эВ	$\langle \sigma_f \rangle$, мбарн				
	[4,7]	по Γ_f из [3,5]	по Γ_f из [11]	по Γ_f из [Mug84]	[11]
3 – 4	22 ± 6	18,3 ± 4,8	18 ± 2	22 ± 1	26 ± 6
4 – 5	9 ± 3	5,2 ± 0,6	1,7 ± 0,1	5,1 ± 0,2	7,6 ± 1,2
5 – 6	55 ± 10	53 ± 14	51 ± 7	61 ± 5	56 ± 16
6 – 8	6 ± 2	6,4 ± 1,4	6,1 ± 0,7	10,5 ± 0,4	12 ± 5
8 – 10	12 ± 3	12 ± 2	10 ± 1	210 ± 17	15 ± 5
10 – 15	8 ± 3	5,3 ± 0,9	3,4 ± 0,3	6 ± 3	8 ± 1
15 – 20	14 ± 4	0,49 ± 0,09	0,48 ± 0,04	0,53 ± 0,04	14 ± 1
20 – 25	23 ± 6	10 ± 3	13,5 ± 1,8	12,5 ± 1,1	22 ± 3
25 – 30	110 ± 20	82 ± 14	74 ± 7	76 ± 5	96 ± 18
30 – 35	350 ± 60	254 ± 65	253 ± 32	276 ± 22	260 ± 80
35 – 40	1640 ± 260	1346 ± 222	1263 ± 116	1362 ± 79	1030 ± 240
40 – 50	340 ± 60	294 ± 52	283 ± 23	292 ± 16	420 ± 120
50 – 60	6 ± 2	57 ± 18	50 ± 6	53 ± 4	50 ± 15
60 – 70	5 ± 2				12 ± 5
70 – 80	2 ± 1				10 ± 5
80 – 90	4 ± 2				9 ± 2
90 – 100	4 ± 2				9 ± 2
100 – 110	16 ± 4				8,5 ± 1,0
110 – 130	160 ± 30				110 ± 40
130 – 150	50 ± 9				18 ± 5
150 – 180	13 ± 3				11 ± 3
180 – 240	220 ± 40				160 ± 30
240 – 300	91 ± 17				70 ± 10
300 – 500	46 ± 12				34 ± 7

Считается, что из-за большого числа выходных каналов этой реакции ширина Γ_γ остается *постоянной* для резонансов *одного* спина [Lyn68]. Поскольку средние множественность $\langle \nu_\gamma \rangle$ и энергия предделительных γ -квантов $\langle E_\gamma \rangle$ зависят *только* от этого процесса, то они должны быть *постоянными* для резонансов *одного* спина.



м.м.м.м.м.

Рис. 9. Сравнение значений $\langle \sigma_T \rangle$ для ^{237}Np , измеренных на нейтронах подземного ядерного взрыва (1) – [JBO72], в Сакле (2) – [RBR76], на KULS (3) – [KYK92+] и на ИБР-30+ЛУЭ-40 (4) – [4,7].



м.м.м.м.м.

Рис. 10. Значения $\langle \sigma_T \rangle$ для ^{237}Np , измеренные на установках: KULS (1) – [KYK92+], ФАКЕЛ (4) – [GDD97+], ИБР-30+ЛУЭ-40: (2) – [4,7] и (5) – [11], показаны вместе с оценочными значениями (3) – [Ign96].

Тогда для средней множественности γ -квантов деления $\langle v_\gamma \rangle$ в случае существования $(n,\gamma f)$ -реакции имеем следующее соотношение [RTS73+, Tro78, Щер90, Рya97]:

$$\langle v_\gamma \rangle = \langle v_{\gamma_0} \rangle + \Delta \langle v_\gamma \rangle = \langle v_{\gamma_0} \rangle + (\Gamma_{\gamma f} / \Gamma_f) \langle v_{\gamma f} \rangle \quad (5)$$

Здесь $\langle v_{\gamma f} \rangle$ – среднее значение множественности предделительных γ -квантов, а $\langle v_{\gamma_0} \rangle$ – среднее значение множественности γ -квантов при отсутствие $(n,\gamma f)$ -реакции; $\Gamma_{\gamma f}$ и Γ_f – ширина этой реакции и полная ширина деления. Обычно среднее значение множественности γ -квантов деления, в случае отсутствия $(n,\gamma f)$ -реакции, $\langle v_{\gamma_0} \rangle \sim 7$ [VWS73], а для средней множественности $\langle v_{\gamma f} \rangle$ предполагается, что она равна 1. Из соотношений (4) – (5) видно, что в случае протекания $(n,\gamma f)$ -процесса должны наблюдаться *корреляции* величин множественности γ -квантов v_γ с обратной шириной деления $1/\Gamma_f$. Информация о *множественности* γ -квантов получается используя *метод совпадений* нескольких γ -квантов деления с актами деления ядер.

§ 4.3 посвящён описанию эксперимента, а § 4.4 – определению относительных флуктуации выходов γ -квантов деления от резонанса к резонансу. *Отношение* R_i числа отчётов в i -ом резонансе ВПС *совпадения* импульсов от 3 и больше γ -квантов с импульсами осколков к числу отчётов в соответственном резонансе ВПС *деления* определялось по формуле:

$$R_i = \left(\frac{n_{\gamma f f}}{n_f} \right)_i = \frac{\sum_{j=a_i}^{b_i} N_c(i, j)}{\sum_{j=a_i}^{b_i} N_f(i, j)} = \int_{E_{\gamma 1}}^{E_{\gamma 2}} \varepsilon_\gamma(E_\gamma) \langle v_\gamma(E_\gamma) \rangle_i dE_\gamma \quad (6)$$

Величины R_i , определённые по формуле (6), представляют в действительности *вероятности* регистрации актов деления ядра по γ -квантам деления. Ожидается, что изменению средней множественности γ -квантов деления $\Delta \langle v_\gamma \rangle$ на $\sim 50\%$, отвечает изменение в их выходе ΔR на $\approx 8\%$. Т.е.:

$$\Delta \langle v_\gamma \rangle \sim 6 \Delta R \quad (7)$$

Значения выходов R_i γ -квантов в резонансах деления были *нормированными* к значению $R_{39,93}$ для резонанса при энергии 39,93 эВ, имеющего *наибольшую* ширину деления, $\Gamma_f \sim 6 - 7$ мэВ [10]. На **Рис. 11** и **Рис. 12** представлены величины:

$$\underline{R}_i = R_i / R_{39,93} \quad (8)$$

В результате получается следующая формула для нормированных γ -выходов отдельных резонансов:

$$\underline{R}_i = \frac{R_i}{R_{39,93}} = 1 + \frac{1}{R_{39,93}} \cdot \frac{\Gamma_{\gamma f}}{\Gamma_f} \int_{E_{\gamma 1}}^{E_{\gamma 2}} \varepsilon_\gamma(E_{\gamma f}) \langle v_{\gamma f}(E_{\gamma f}) \rangle_i dE_{\gamma f} \equiv a + b \cdot \frac{1}{\Gamma_f} \quad (9)$$

Отсюда сразу становится ясно, что значение коэффициента линейной корреляции r между *относительными выходами* γ -квантов и обратной шириной деления может служить индикатором о протекании (n,γ) -реакции.

Для оценки *энергии* E_γ возможных предделительных γ -квантов были использованы 3 разных значения порогов регистрации γ -квантов БЖСД, соответствующих энергиям γ -квантов $E_\gamma \sim \{0,2; 0,4; 0,6\}$ МэВ. Полученные из этих трёх измерений величины относительных выходов γ -квантов в области разрешённых резонансов деления нейтронами с энергиями $E_n \leq 10$ эВ, в резонансном кластере при $E_n \sim 40$ эВ и в области неразрешённых резонансов при энергии $100 \text{ эВ} < E_n < 400 \text{ эВ}$, показаны на **Рис. 11** и **Рис. 12**.

В интервале энергий нейтронов $100 \text{ эВ} < E_n < 400 \text{ эВ}$, значения усреднённых по многим резонансам относительных выходов γ -квантов близки к 1. *Средневзвешенное* значение относительных выходов в этом энергетическом интервале составляет $\langle R \rangle_w^{\text{ур}} = 1,030 \pm 0,005$. Оно близко к усреднённому относительному γ -выходу для “40 эВ”- кластера – $\langle R \rangle_w = 1,025 \pm 0,012$, так как центральные резонансы резонансных кластеров при ~ 40 эВ, ~ 120 эВ и ~ 200 эВ имеют большие и близкие значения ширин деления $\Gamma_f \sim 10^{-2}$ эВ.

В интервале энергии нейтронов $E_n \leq 10$ эВ все резонансы имеют экстремально низкие значения делительных ширин – $\Gamma_f \leq 26$ мкэВ. Нами определены оба значения: *среднее* и *средне взвешенное* по всем наблюдаемым в нашем эксперименте резонансам, т.е. $\langle R \rangle_w^{\text{lr}} = 1,08 \pm 0,02$ и $\langle R \rangle^{\text{lr}} = 1,12 \pm 0,06$ соответственно. Видно, что в рамках ошибок оба значения согласуются между собой.

Чтобы *проверить* является ли увеличение относительных выходов γ -квантов результатом ^{237}Np (n,γ) -реакции, каждый из трёх наборов величин R был проверен “ $1/\Gamma_f$ ” – тестом, т.е. на наличие линейной корреляции между величинами R и обратными делительными ширинами $1/\Gamma_f$, в соответствии с формулой (9). Более полное описание самого теста и полученные результаты даны в Приложении 9.

В § 4.5 обсуждаются результаты теста на наличие (n,γ) -реакции в подпороговом делении ^{237}Np резонансными нейтронами, которые сводятся к следующему:

1. Имеется *значительная* и статистически *значимая* линейная корреляция между значениями относительных выходов γ -квантов деления R и обратными делительными ширинами Γ_f^{-1} наблюдаемых резонансов в диапазоне энергии нейтронов от ~ 3 эВ до ~ 60 эВ;
2. Линейная корреляция *большая* при измерении с “низким” ($E_\gamma \sim 0,2$ МэВ) и “высоким” ($E_\gamma \sim 0,6$ МэВ) порогами: $r(R, \Gamma_f^{-1}) \sim 0,7-0,8$, тогда как при измерении с “промежуточным” порогом ($E_\gamma \sim 0,4$ МэВ) она *умеренная* $r(R, \Gamma_f^{-1}) \sim 0,3-0,5$ и *не очень значимой*. Это можно “объяснить” предполагая наличие структурности в энергетическом спектре γ -квантов деления. Исключение возможных методических ошибок при проведении нашего эксперимента может быть реализовано проведением более точных экспериментов с одновременной регистрацией энергетического спектра и множественности γ -квантов деления.

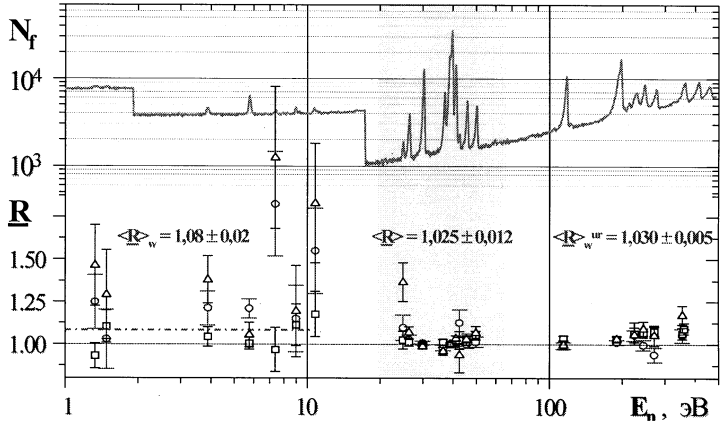


Рис. 11. Относительные выходы $\geq 3\gamma$ -квантов R в отдельных резонансах деления ^{237}Np в области энергии нейтронов $E_n \in (1 - 500)$ эВ, при 3 разных порогах их регистрации $E_\gamma \sim \{0,2; 0,4; 0,6\}$ МэВ

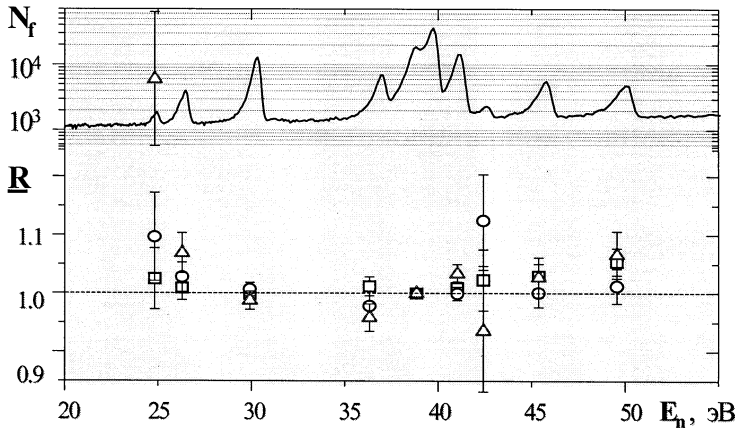


Рис. 12. Относительные выходы 3 и больше γ -квантов R в отдельных резонансах деления ^{237}Np при 3 разных порогах их регистрации E_γ : $\sim 0,2$ МэВ (треугольники); $\sim 0,4$ МэВ (квадратики); $\sim 0,6$ МэВ (кружочки) в области 40-эВ кластера резонансов, $E_n \in (25 - 50)$ эВ [8,10].

3. Линейная корреляция между сравниваемыми величинами (R, Γ_f^{-1}) только для резонансов кластера при ~ 40 эВ во всех трёх энергетических интервалах хотя и умеренной по величине, является *не очень значимой*. Это может быть связано как с недостаточным объёмом этой выборки, так и с “маскированием” ($n, \gamma f$)-реакцию во II минимуме потенциального барьера прямым делением.

Из полученного для интервала энергии нейтронов ≤ 10 эВ средневзвешенного значения относительных выходов $\langle R \rangle_w \approx 1,08$ и из формулы (7), при предположении об излучении 1 предельного γ -кванта, получается следующая оценка для ширины ($n, \gamma f$)-реакции:

$$\Gamma_{\gamma f} \sim 0,5 \cdot \Gamma_f \quad (10)$$

Таким образом, из (10) и наблюдаемых величин делительных ширин для резонансов со спином $J = 3$ в этом интервале E_n , можно сделать вывод, что ширина ($n, \gamma f$)-процесса находится в диапазоне:

$$3 \text{ мкЭВ} < \Gamma_{\gamma f} < 6 \text{ мкЭВ} \quad (11)$$

так как верхняя граница значения ширины ($n, \gamma f$)-реакции не может быть больше минимально наблюдаемой ширины делительных резонансов. Эта оценка для $\Gamma_{\gamma f}$ получена впервые. Наша оценка на несколько порядков превышает рассчитанное в работе Втюрина-Попова [VP77] значение ($\Gamma_{\gamma f}^I \sim 0,2$ нЭВ).

Относительные выходы γ -квантов в резонансах при $E_n = 26,19$ эВ и $E_n = 50,34$ эВ первого кластера таковы, что оценённые по формуле (10) делительные ширины $\Gamma_{\gamma f} \sim (80-155)$ мкЭВ во много раз больше значения $\Gamma_{\gamma f}$ для слабых резонансов вдали от уровня II класса при $E_n \sim 40$ эВ. Единственная до сегодняшнего дня оценка для ширины ($n, \gamma f$)-процесса во II минимуме потенциального барьера деления дана в той-же работе Втюрина-Попова [VP77] и составляет $\Gamma_{\gamma f}^{II} = 150$ мкЭВ. С другой стороны, все эти оценки несколько десятков раз ($\sim 30-40$) превышают величины $\Gamma_{\gamma f}^I$, которые были указаны выше для очень слабых резонансов в интервале до 10 эВ.

В § 4.6 рассмотрено одно из возможных объяснений наблюдаемого “усиления” оценённой ширины $\Gamma_{\gamma f}$ ($n, \gamma f$)-процесса в области резонансного кластера при ~ 40 эВ, которое дано в работе Дерменджиева [Дер95]. Согласно этой гипотезе вариация выходов γ -квантов деления от слабых резонансов ниже 10 эВ, т.е. вдали от уровней II класса, объясняется как результат протекания ($n, \gamma f$)-процесса в I минимуме [Лупб8] двугорбого потенциального барьера деления. Увеличение значения ширины $\Gamma_{\gamma f}^{II}$ этой реакции в резонансах первого кластера могло бы явиться результатом её протекания во II минимуме барьера деления. Качественно это объясняется следующим образом: Время жизни $T_f \sim 1 / \Gamma_f$ составного ядра по отношению к делению в резонансе с делительной шириной $10^{-6} < \Gamma_f < 10^{-5}$ эВ составляет величину порядка $10^{-9}-10^{-10}$ с. Характерное время испускания каскада γ -квантов при захвате нейтрона тяжёлыми ядрами $\sim 10^{-14}$ с и

соответствует радиационной ширине $\Gamma_\gamma \sim 40$ мэВ. Поэтому испускание предделительного γ -кванта за столь длительный промежуток времени кажется вполне вероятным. Таким образом, предполагается, что в слабых делительных резонансах испускание предделительного γ -кванта происходит между уровнями I минимума в барьере деления. Делительные резонансы в *кластерах* имеют значения Γ_f на 2–3 порядка больше, чем в слабых резонансах. При этом интервал времени до деления ядра сокращается и более заметным становится конкурирующий процесс – прохождение через внутренний барьер с последующим испусканием γ -кванта во II минимуме. Получена численная оценка для отношения ширин $\Gamma_{\gamma f}^{II} / \Gamma_{\gamma f}^I \sim 30$ для (n, γ f)-процесса вблизи уровня II класса. Отмечено, что относительно высокие ошибки данных *единственного* пока эксперимента по изучению (n, γ f)-процесса в резонансах ^{237}Np , а также отсутствие необходимых экспериментальных данных о состоянии делящихся ядер при больших деформациях не позволяют провести более точные оценки величин $\Gamma_{\gamma f}^{II} / \Gamma_{\gamma f}^I$. Там же, на основании полученных нами экспериментальных результатов, высказано предположение о том, что существование именно (n, γ f)-процесса во II минимуме потенциального барьера деления препятствует заселению изомерного уровня и сильно подавляет вероятность изомерного деления ^{237}Np .

В Заключение подводятся итоги выполненной работы и излагаются основные выводы:

1. На III горизонтальном канале импульсного быстрого реактора ИБР-30 Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ была *создана установка* для изучения *процесса деления* атомных ядер тяжёлых элементов резонансными нейтронами разных энергий путём регистрации γ -квантов и осколков деления (§ 2.3);
2. Для измерения сечения подпорогового деления ^{237}Np , получения параметров резонансов деления и поиска (n, γ f)-реакции созданы многослойные импульсные ионизационные камеры деления, одна из которых содержит рекордное количество сверхчистого изотопа ^{237}Np порядка 1,5 г;
3. Измерены площади Γ_f и делительные ширины $\sigma_0 \Gamma_f$ резонансов первого кластера при энергии около 40 эВ и сверхслабых делительных резонансов ^{237}Np в интервале энергии резонансных нейтронов ниже 10 эВ. Последние измерены с самой высокой, до сегодняшнего дня, статистической точностью. Полученные в 1993 г. данные включены в Атлас данных *Сухоручкина* [SSD98]. Для большинства резонансов наши данные согласуются в пределах достигнутой точности с рекомендованными значениями [Mug84] и отличаются \sim в 3 раза от опубликованных группы в *Саклэ* (Франция) [PBR76] величин делительных ширин Γ_f и \sim в 1,5 раза от данных *Геля* (Белгия) [KTL71]. Т.е. установлено, что эти данные содержат систематическую ошибку в 150 %;

4. Полученные данные по усреднённому сечению деления $\langle\sigma_f\rangle$ подтвердили данные *Кимуры* из Университета в *Киото* (Япония) [KYK92+]. Данные *Курчатовского* института [GDD97+] так же подтверждают наши данные [4, 7], которые обсуждались *Игнатьевым* (из ФЭИ-Обнинск) на конференции по ядерным данным в Японии [Ign97]. Улучшенные значения параметров резонансов и энергетического хода сечения деления, которые были получены в Дубне, опубликованы в [11];
5. **Впервые** были измерены относительные выходы R γ -квантов в сверхслабых резонансах вне резонансных кластеров, в резонансах первого резонансного кластера при энергии около 40 эВ и в резонансных кластерах в интервале 100-500 эВ;
6. **Впервые** обнаружена *статистически значимая* линейная корреляция между относительными выходами γ -квантов деления R и обратными делительными ширинами резонансов $1/\Gamma_f$, которая показывает, что влияние $(n,\gamma f)$ -реакции на наблюдаемые вариации выходов γ -квантов деления не может быть исключено;
7. **Впервые** экспериментально были оценены энергия этого пред делительного γ -кванта ($E_\gamma \geq 0,6$ МэВ) и ширина возможного $(n,\gamma f)$ -процесса ($\Gamma_{\gamma f} \sim 1-10$ мкэВ) в I минимуме двугорбого барьера деления [11];
8. **Впервые**, на основании полученных результатов выдвинуто предположение о возможном существовании $(n,\gamma f)$ -процесса во II минимуме двугорбого барьера деления, конкурирующее процесс заселения изомерного состояния [Дер95].

Полученные нами данные по сечению деления и по резонансным параметрам могут быть использованы в экспериментах по моделированию трансмутации ^{237}Np в высокопоточных реакторах следующего поколения.

Относительно высокие ошибки данных *единственного пока* эксперимента по поиску $(n,\gamma f)$ -реакции в подбарьерном делении ^{237}Np не позволяют более точно определить вклад этой реакции. Но полученная нами индикация о её протекания при подбарьерном делении ^{237}Np резонансными нейтронами может послужить дополнительной и достаточно весомой причиной *продолжить* эти исследования.

Для получения более надёжных и качественных данных нужно:

- 1) существенно улучшить фоновые условия эксперимента и повысить разрешения нейтронного спектрометра;
- 2) использовать многодетекторные, высокоэффективные и быстрые детекторы γ -квантов и осколков деления;
- 3) для сбора и обработки детекторных сигналов использовать более современную электронику.

Список публикации с основными результатами диссертации:

1. Dermendjiev, E., Goverdovsky, A.A., Furman, W.I., Pikelner, L.B., Ruskov, Iv., Siegler, P., Zamyatnin, Yu.S. "Fission Gamma-ray multiplicity measurements in ^{233}U , ^{235}U , ^{237}Np and ^{239}Pu low energy fission resonances", *Proc. of the Int. Conf. "Nuclear Data for Science and Technology"*, Jülich, 13-17 May 1991, p.147-149, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1992.
2. Dermendjiev E., Goverdovsky A.A, Ruskov Iv., Zamyatnin Yu.S., "Resonance parameters of low energy fission resonances of ^{237}Np ", *An Int. Workshop "Dynamical aspects of nuclear fission"*, Smolenice Castle, CSSR, 1993.
3. Говердовский А. А, Дерменджиев Е., Русков И., Замятнин Ю. С., "Площади и делительные ширины низколежащих резонансов ^{237}Np ", *Препринт РЗ-93-283*, ОИЯИ, Дубна, 1993.
4. Говердовский А.А., Дерменджиев Е., Русков И., Замятнин Ю.С., "Сечение деления ^{237}Np нейтронами с энергией $E_n \leq 500$ эВ", *Препринт ОИЯИ РЗ-93-440*, Дубна, 1993.
5. Говердовский А. А, Дерменджиев Е., Русков И., Замятнин Ю. С., "Площади и делительные ширины низколежащих резонансов ^{237}Np ", *Ядерная физика* **57**, № 8 (1994) 1362; Dermendjiev E., Ruskov I., Zamyatnin Yu.S., Goverdovsky A.A., "Resonance Areas and Fission Widths of Low lying Resonances of ^{237}Np ", *Physics of Atomic Nuclei* **57** (1994) 1362.
6. Dermendjiev E., Goverdovsky A. A., Ruskov Iv., Zamyatnin Yu. S., Study of ^{237}Np Low Energy Resonance Neutron Fission, In *Proceedings of the XII Conference on Nuclear Fission*, 27-30 Sept., 1994, Obninsk, Russia.
7. Говердовский А.А, Дерменджиев Е., Замятнин Ю.С., Русков И., "Сечение деления ^{237}Np нейтронами с энергией $E_n \leq 500$ эВ", *Ядерная физика* **58**, № 1 (1995) 27. Goverdovsky A.A., Dermendjiev E., Zamyatnin Yu.S., Ruskov I., "Cross Section of ^{237}Np Fission Induced by Neutrons with Energy $E_n \leq 500$ eV", *Physics of Atomic Nuclei* **58**, № 1 (1995) 24.
8. Borzakov S. B., Dermendjiev E., Kalinin A. I., Konovalov V.Yu., Ruskov I., Soloviev S.M., Zamyatnin Yu.S., "Study of fission γ -ray yields from low energy resonances of ^{237}Np and observation of the $(n,\gamma f)$ -process", E3-95-307, *Proc. of the III Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei*, Dubna, April 26-28, 1995, p. 307-317.
9. Borzakov S.B., Dermendjiev E., Goverdovsky A.A., Kalinin A.I., Konovalov V.Yu., Ruskov I., Soloviev S.M., Zamyatnin Yu.S. "Study of Fission γ -ray Yields from Low Energy Resonances of ^{237}Np and Observation of the $(n,\gamma f)$ -process", In *Proceedings of the XIII Meeting on Physics of Nuclear Fission in the Memory of Prof. G.N. Smirenkin*, Obninsk, 3-6 October, 1995, p. 41-51.
10. Borzakov S.B., Dermendjiev E., Goverdovsky A.A., Kalinin A.I., Konovalov V.Yu., Ruskov I., Soloviev S.M., Zamyatnin Yu.S., "Study of Fission γ -ray Yields from Low Energy Resonances of ^{237}Np and Searching for the $(n,\gamma f)$ -process", *Ядерная физика* **59**, № 7 (1996) 1175-1179.

11. Борзаков С. Б., Говердовский А.А., Дерменджиев Э., Замятин Ю.С., Калинин А.И., Коновалов В.Ю., Русков И., Соловьев С.М., "Параметры резонансов и сечение деления ^{237}Np нейтронами с энергиями ниже 1000 эВ", *Ядерная физика* **62**, № 5 (1999) 933-940; S.B. Borzakov, E. Dermendjiev, A.A. Goverdovsky, A.I. Kalinin, V.Yu. Konovalov, I. Ruskov, S.M. Soloviev, and Yu.S. Zamyatnin, "Resonance Parameters and Neutron Cross, Section for ^{237}Np Fission Induced by Neutrons with Energies Below 1000 eV", *Physics of Atomic Nuclei* **62**, № 5 (1999) 872-879.

Литература

- [ГЖИ88] Гришин В.К., Живописцев Ф.А., Иванов В.А., "Математическая обработка и интерпретация физического эксперимента, М.: МГУ, 1988.
- [ГКК70+] Гаврилов К.А., Кошаева К.К., Крайтор С.Н., Пикельнер Л.Б., *Атомная энергия* **28** (1970) 362.
- [ГКП59] Голданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И., *Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц*, М.: ФМЛ, (1959) 366.
- [Дер95] Дерменджиев Е., "(n, γ) – процесс во II минимуме двугорбого барьера деления ^{237}Np ", *Сообщение ОИЯИ Р3-95-469*, Дубна, 1995.
- [МАК91] Хрыкина Т. Д., "Программа МАК - для сбора и визуализации спектров от времяпролётных кодировщиков в системе КАМАК", Частное сообщение, 1991
- [МПР72+] Малэцки Х., Пикельнер Л.Б., Родионов К.Г., Саламатин И.М., Шарапов Э.И., "Детектор нейтронов и гамма-лучей для работ в области нейтронной спектроскопии", *Сообщение ОИЯИ 13-6609*, Дубна, 1972.
- [Щер90] Щербаков О.А., "Экспериментальные исследования (n, γ)-реакции", *ФЭЧАЯ* **21**, вып.2, 1990.
- [АММ84+] Auchampauh G.F., Moore M.S., Moses J.D., Nelson R.O., Exterman R.C., Olsen C.E., *Phys. Rev.* **29C** (1984) 174.
- [BGM90] Brosa U., Großmann S., Müller A., Nuclear Scission, *Physics Reports* **197**, № 4, (1990) 167.
- [Boh36] Bohr N., *Nature* **133** (1936) 344.
- [Boh56] Bohr A., *Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses At. Energy* **2** (1956) 151.
- [FBM68+] Fubini A., Blons J., Michaudon A., Paya D., *Phys. Rev. Lett.* **20** (1968) 1373.
- [FP40] Flerov G.N., Petrjak K.A., *Phys. Rev.* **58** (1940) 89.
- [GDD97+] Gerassimov V.F., Danichev V.V., Dement'ev V.N., Zenkevitch V.S., Mosolev G.V., "Measurements of Transuranium Isotopes Fission Cross Section With Lead Slowing-Down Spectrometer", *Proc. of the ISINN-5*, E3-97-213, Dubna, (1997) 348.
- [Hof76] Hoffman M., *Bull American Phys. Soc.* **21** (1976) 655.
- [HW39] Hill D.L., Wheeler J.A., *Phys. Rev.* **54** (1939) 426.
- [Ign97] Ignatyuk A., "Analysis of the evaluated data discrepancies for minor actinides and development of improved evaluations", *Selected papers of ISIC Workshop on Nuclear Data of Minor Actinides*, 27-31 May 1996, JAERI, Tokai-mira, Ibaraki-ken, Japan (JAERI – Conf. 97-001, p. 262-292).

- [JBO72] Jiacoletti R.J., Brown W.K., Olson H.G., *Nucl. Sci. Eng.* **48** (1972) 412; Hoffman M., *Bull. American Phys. Soc.* **21** (1976) 655.
- [KTL71] Kollar W., Theobald J.P., Lanzano G., *Zeit. für Physik* **248** (1971) 355.
- [KYK92+] Kimura I., Yamanaka A., Kanasawa S., Kobayashi K., Yamamoto S., Nakagome Y., Fujita Y., Tamai T., Report in *Int. Seminar on Neutron Physics*, Dubna, April 1992.
- [LBA91+] Lisowski P.W., Bowman C.D., Arthur E.D., Young P.G., Proc. Int. Conference "Nuclear Data for Science and Technology", Jülich, FGR, 13-17 May 1991, Springer-Verlag, (1992) 92.
- [Lyn68] Lynn J.E., AERE-R-5891, UKAE, Harwell, 1968; "*The theory of neutron resonance reactions*", Clarendon Press, Oxford, 1968, 435.
- [MPR72+] Malecky K., Pikelner L.B., Rodionov K.G., Salamatin I.M., Sharapov E.I., *JINR Report 13-6609*, Дубна, 1972.
- [Mug84] Mughabghab S.F., "*Neutron Cross Sections*" 1B, BNL, Academic Press Inc., 1984, New York, USA.
- [Ori98] "A powerful data analysis and technical graphis package: ORIGIN 6.0". <http://www.microcal.com/>.
- [PBP76] Plattard S., Blons J., Paya D., *Nucl. Sci. Eng.* **61** (1976) 477.
- [PDK62+] S. Polikanov, V. A. Druin, V. A. Karnachov, V. L. Mikheev, A. A. Pleve, N. K. Skobelev, V. G. Subbotin, G. M. Ter-akop'yan, V. A. Fomichev, *Zh. Eksperim. Theoret. Fiz.* **42**, (1962) 1464; *Sov. Phys. -JETP* **15**, (1962) 1016.
- [RTS73+] Ryabov Yu., Troshon J., Shackleton D., Freaut J., " γ -ray multiplicities in ^{239}Pu fission induced by resonance neutrons: experimental evidence for the (n, γ f)-reaction", *Nuc. Phys.* **A216** (1973) 395.
- [Rya97] Ryabov Yu.V., "Investigations of (n, γ f)-reaction for U-235 and Pu-239 resonances and structure of fission barrier", *Proc. of V Int. Seminar on Inter. of Neutr. with Nuclei, Dubna*, 14-17 May 1997, p. 422.
- [Sha89] Shapira J., "Long term Nuclear Waste Management: Present Status and Alternatives", *Nucl. Inst. Meth.* **A280** (1989) 568.
- [SSD98] Sukhoruchkin S.I., Soroko Z.N., Deriglazov V.V., Tables of Neutron Resonance Parameters, *Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology I/16: Elementary Particles, Nuclei and Atoms*, sub. V. B, Springer-Verlag Press, 1998,
- [Str67] Strutinsky V.M., *Nucl. Phys.* **A95** (1967) 420.
- [Tro78] Trochon J., "Etude des proprietes de la fission dans les resonances de ^{239}Pu induites par neutrons lents": *These de Doctorat*, Paris, 1978.
- [VP77] Vturin V.A., Popov Yu.P., *Report JINR P3-10775*, Dubna, 1977.
- [VWS73] Verbinski V., Weber H., Sund R., *Phys. Rev.* **C7** (1973) 1173.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 2000 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 26.04.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 2,38

Тираж 100. Заказ 52001

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области