



Работа выполнена в *Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова*  
*Объединенного института ядерных исследований.*

Научный руководитель:

**Розов Сергей Владимирович**, кандидат физико-математических наук,  
*Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ, заместитель начальника отдела*

Официальные оппоненты:

**Яшин Игорь Иванович**,  
*доктор физико-математических наук,*  
*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение*  
*высшего образования*

*«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»,*  
*профессор отделения ядерной физики и технологий офиса*  
*образовательных программ*

**Казалов Владимир Владимирович**,  
*кандидат физико-математических наук,*  
*Филиал Баксанская нейтринная обсерватория*  
*Федерального государственного бюджетного учреждения науки*  
*Института ядерных исследований РАН,*  
*старший научный сотрудник*


С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединённого института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:

<https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь

диссертационного совета

*доктор физико-математических наук*

 Г.А. Карамышева

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Изучение свойств нейтрино и поиск частиц темной материи являются одними из основных направлений в физике частиц. Отдельным классом экспериментов, направленных на решение указанных задач, являются низкофоновые эксперименты. Такими экспериментами являются те, в которых число фоновых событий сопоставимо или меньше числа взаимодействий нейтрино или темной материи с детектором. Для корректной интерпретации результатов низкофонового эксперимента требуется иметь как можно более точную модель фона.

Нейтроны являются одним из опасных источников фоновых событий для экспериментов по изучению нейтрино и по поиску темной материи. Это связано с проникающей способностью нейтронов, и с тем, что попадая в детектор, нейтроны могут вызывать в нем сигналы, неотличимые от искомым [6, 7]. Нейтронные фоны могут изучаться с помощью основного и вспомогательных детекторов. Предварительные измерения нейтронных потоков в месте проведения эксперимента позволяют выбрать оптимальную конфигурацию защиты установки и сделать предположения о вкладе нейтронного фона в результат. Мониторинг изменений потока нейтронов во время основных измерений является основой для корректной интерпретации результатов эксперимента. Нетривиальная задача измерения быстрых, тепловых и эпитепимальных нейтронов зачастую заменяется измерением только тепловых нейтронов и использованием приближенных моделей нейтронного спектра. При этом, наличие даже минимальной информации о быстрых нейтронах приводит к качественному улучшению понимания нейтронного фона. Поэтому поиск простого способа регистрации быстрых нейтронов актуален в физике частиц.

«Золотым стандартом» для измерения потоков тепловых нейтронов являются пропорциональные  $^3\text{He}$ -счетчики. Это обусловлено высоким сечением

**Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ**

захвата теплового нейтрона ядром  $^3\text{He}$  (5333 б [8]) и низкой чувствительностью таких детекторов к  $\gamma$ -фону. Содержание изотопа  $^3\text{He}$  в природном гелии крайне мало и составляет 0,000137% [8]. По этой причине весь коммерчески доступный  $^3\text{He}$  нарабатывают в ядерных реакторах. Спрос на  $^3\text{He}$  постоянно увеличивается, а производство остается на прежнем уровне. Это привело к серьезной нехватке этого изотопа. Так, в 2009 году мировой потенциальный спрос на  $^3\text{He}$  составил 65000 литров, в то время как для поставок было доступно только 15000 литров [9, 10]. В 2020 году стоимость одного литра газообразного  $^3\text{He}$  составляла более 2750 долларов [11]. Все выше перечисленное сделало  $^3\text{He}$ -счетчики дорогим и труднодоступным средством для нейтронных измерений.

В настоящее время предпринимаются многочисленные усилия по поиску замены  $^3\text{He}$ -счетчикам [12, 13]. Однако, большинство новых детекторов и методов регистрации нейтронов разрабатываются для направлений науки и техники, в которых изучаемые потоки нейтронов достаточно велики (нейтронная и ядерная физика, атомные станции и т.д.). В низкофоновых же экспериментах требуется регистрация потоков на уровне естественного нейтронного фона, составляющего порядка  $10^{-3}$  нейтронов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  [14], а как правило, намного ниже. К примеру, в подземной лаборатории LSM в Модане (далее LSM) поток тепловых нейтронов составляет порядка  $10^{-6}$  нейтронов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  [15]. Для регистрации таких потоков детектор должен обладать высокой чувствительностью и малым собственным фоном. Таким образом, несмотря на большое количество методов и детекторов регистрации нейтронов, только небольшой их класс может подходить для измерения низких потоков нейтронов. Например,  $^3\text{He}$ -счетчики CHM-57 были изготовлены по специальной технологии [16]. Зачастую, при создании новой низкофоновой установки задачу регистрации низких потоков нейтронов приходится решать заново, с использованием новых уникальных подходов. Конечной целью исследования нейтронных потоков ранее известными или новыми методами,

является оценка фоновых событий в «больших» экспериментах. Результаты измерений нейтронных потоков, выполненные до создания основной исследовательской установки, имеют критическую значимость для оценки чувствительности эксперимента, а также для оптимизации конструкции детектирующих элементов, пассивной и активной защиты.

**Цели и задачи диссертационной работы:** Целями представленной работы было разработать новые способы регистрации потоков нейтронов, в том числе быстрых нейтронов, и использовать разработанные способы в низкофоновых экспериментах. Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Разработка нового метода регистрации тепловых нейтронов при помощи  $\gamma\gamma$ -совпадений в йодсодержащих детекторах.
2. Проведение измерений потоков тепловых нейтронов разработанным методом в подземной лаборатории LSM в Модане.
3. Разработка методики регистрации нейтронов разных энергий NaI(Tl+Li)-детектором.
4. Разработка новой методики прямой регистрации быстрых нейтронов  $^3\text{He}$ -счетчиками.
5. Определение фона быстрых нейтронов в эксперименте Ricochet, с помощью  $^3\text{He}$ -счетчика.
6. Проведение оценки отношения ожидаемого нейтронного сигнала к фону в эксперименте Ricochet.

#### **Научная новизна.**

1. Разработан новый метод регистрации нейтронов при помощи йодсодержащих сцинтилляторов.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ИРРО

2. Экспериментально показана возможность регистрации низких потоков нейтронов в подземной лаборатории по  $\gamma\gamma$ -совпадениям в NaI(Tl)-детекторе.
3. Предложена и экспериментально изучена методика использования NaI(Tl+Li)-детектора для регистрации нейтронов в широком энергетическом диапазоне.
4. Впервые показана возможность прямого измерения спектра быстрых нейтронов с помощью  $^3\text{He}$ -счетчика для целей низкофонового эксперимента.
5. Показана возможность оценки фоновых событий в области когерентного рассеяния нейтрино на основе измерений потоков быстрых нейтронов  $^3\text{He}$ -счетчиком.

#### **Практическая значимость.**

1. Разработанный метод регистрации нейтронов с помощью йодсодержащих сцинтилляторов позволяет регистрировать нейтронные потоки на уровне  $10^{-6}$  нейтронов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Это дает возможность использовать стандартные NaI(Tl)-детекторы для одновременной регистрации  $\gamma$ - и нейтронного фонов в низкофоновых экспериментах.
2. Благодаря разработанной методике возможно использовать NaI(Tl+Li)-детектор для регистрации тепловых, эпитептермальных и быстрых нейтронов тремя независимыми способами.
3. Продемонстрирована возможность регистрации спектра быстрых нейтронов низкофоновым  $^3\text{He}$ -счетчиком, что позволяет проводить точную оценку потока нейтронов в широком энергетическом диапазоне.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод регистрации низких потоков нейтронов по задержанным  $\gamma\gamma$ -совпадениям в йодсодержащих детекторах для целей низкофоновых экспериментов.
2. Результаты измерения фона тепловых нейтронов в подземной лаборатории LSM в Модане с помощью NaI(Tl)-детектора.
3. Методика регистрации нейтронных потоков NaI(Tl+Li)-детектором, позволяющая разделять зарегистрированные нейтроны по трем энергетическим диапазонам (тепловые, эпитептермальные и быстрые).
4. Результаты исследования собственного фона NaI(Tl+Li)-детекторов.
5. Новая методика и результат измерения спектра быстрых нейтронов с помощью низкофонового  $^3\text{He}$ -счетчика в эксперименте Ricochet.
6. Результаты оценки фоновых событий в области сигналов от когерентного рассеяния нейтрино в эксперименте Ricochet. По этой оценке счет фоновых событий будет лежать в диапазоне от  $9 \pm 2$  до  $44 \pm 3$  в день. Согласно разработанной и экспериментально проверенной модели фона, статистическая значимость регистрации когерентного рассеяния нейтрино в эксперименте Ricochet составит от 7,5 до 13,6  $\sigma$  после одного реакторного цикла.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается применением общепринятых подходов к проведению исследований и анализу экспериментальных данных. Измерения, описанные в диссертации, выполнены с использованием стандартного оборудования. Основные результаты диссертации докладывались на конференциях «Ядро 2018», «Ядро 2019», «ОМУС 2019», «НЕС 2019». Также результаты были представлены и обсуждались на семинарах ЛЯП ОИЯИ,

47-ой сессии Программно-консультативного комитета ОИЯИ по ядерной физике, 123-ей сессии Ученого совета ОИЯИ, рабочих совещаниях коллаборации Ricochet. Результаты проведенных исследований были удостоены премии 47-ой сессии Программно-консультативного комитета ОИЯИ по ядерной физике за лучший постерный доклад и премии ЛЯП ОИЯИ в номинации «Методические и прикладные исследования» в 2020 году.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах [1–4] и в одном материале конференции [5].

**Личный вклад автора.** Вклад автора диссертации был определяющим при разработке новых подходов к регистрации нейтронов. Автор принимал участие в создании измерительных установок, проводил измерения, в том числе с источниками нейтронов, осуществлял обработку и анализ данных. Автор занимался подбором и закупкой оборудования, для проведения описанных в диссертации исследований, а также подготовкой документов для таможенного оформления ввозимого в РФ оборудования. Автор принимал активное участие в написании статей и его вклад был основополагающим.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, словаря терминов и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 136 страниц, включая 50 рисунков и 9 таблиц. Библиография включает 121 наименование.

Во **введении** описываются актуальность и методика исследований, которым посвящена диссертация. Представлены выносимые на защиту результаты и вклад автора в их получении.

В **первой главе** рассмотрены основные источники и виды взаимодействия нейтронов с веществом.

Нейтроны могут образовываться в результате деления, ядерных реакций и взаимодействия космических лучей с веществом. Разные источники нейтронов имеют разный выход и энергетический спектр нейтронов. Вклад нейтронов различного происхождения может отличаться, в зависимости от

места измерений (подземная лаборатория, здание реактора, наземная лаборатория). На поверхности земли преобладают космогенные нейтроны, в то время как в подземной лаборатории основной вклад в суммарный поток будут вносить нейтроны деления и нейтроны от ядерных реакций.

В результате взаимодействия нейтронов с веществом могут возникать ядра отдачи,  $\gamma$ -кванты, заряженные частицы и другие нейтроны. Указанные частицы могут быть источниками фоновых сигналов в физическом эксперименте. Для борьбы с нейтронами используют специальную нейтронную защиту, которую можно разделить на пассивную и активную. Распространенным видом пассивной защиты является полиэтилен с добавлением бора или лития. В качестве активной защиты используют вспомогательные детекторы, которые позволяют отсеивать фоновые сигналы при обработке данных эксперимента.

Во **второй главе** приведено краткое описание трех низкофоновых экспериментов по поиску редких событий, в рамках которых требовалось изучение нейтронных фонов. Эксперименты  $\nu$ GeN [17, 18] и Ricochet [5] направлены на изучение когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах (CENNS). Целью проведения эксперимента EDELWEISS [19] является прямой поиск частиц темной материи. Оба изучаемых явления имеют важное значение для науки и могут стать ключом к Новой физике.

Ожидаемым сигналом от рассеяния нейтрино или темной материи являются ядра отдачи. Регистрация таких ядер представляет собой сложную задачу, так как их регистрируемая энергия может составлять всего несколько сотен эВ. Опасным фоном в указанных экспериментах являются нейтроны, так как рассеиваясь на ядрах детектора, они могут вызывать сигнал, аналогичный сигналу от рассеяния нейтрино или темной материи. Установка  $\nu$ GeN расположена в энергоблоке АЭС под ядерным реактором, а эксперимент EDELWEISS находится в подземной лаборатории. Это обеспечивает обоим экспериментам эффективную защиту от космического излучения равную  $\sim 50$



метрам водного эквивалента (м.в.э.) и  $\sim 4800$  м.в.э., соответственно. В обоих экспериментах нейтронный фон измерялся с помощью  $^3\text{He}$ -счетчиков. Измерения тепловых нейтронов позволили выбрать оптимальную конфигурацию защиты, а в случае EDELWEISS еще и дали возможность провести корректный анализ экспериментальных данных. Это позволило идентифицировать зарегистрированные события в области интереса как ядра отдачи от рассеяния нейтронов.

Эксперимент Ricochet будет проводиться вблизи исследовательского реактора ILL. Общая конструкция спектрометра Ricochet показана на Рисунке 1. Возможный высокий фон от быстрых нейтронов реакторного происхождения и относительно слабое подавление космогенного фона зданием реактора ( $\sim 15$  м.в.э.) требуют прецизионного изучения потоков нейтронов, в том числе и быстрых нейтронов. Разработка методики регистрации быстрых нейтронов и оценка нейтронного фона в эксперименте Ricochet описаны в Главе 5.

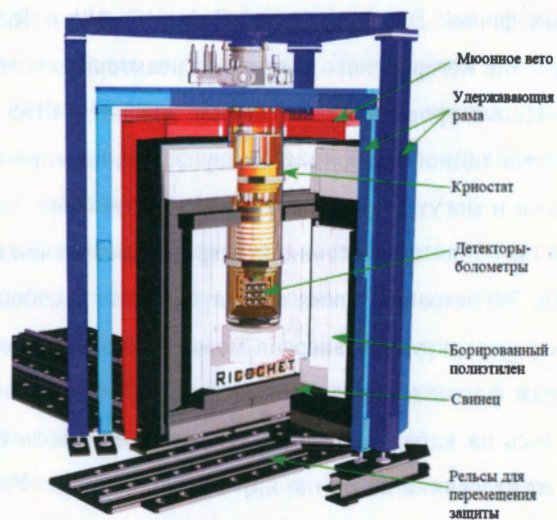


Рис. 1. Общая конструкция спектрометра Ricochet.

В третьей главе приведены распространенные альтернативы  $^3\text{He}$ -счетчикам. Рассмотрена регистрация нейтронов детекторами на основе сцинтилляторов: органических [20, 21], неорганических литийсодержащих [22, 23] и йодсодержащих [24–29].

Одной из основ регистрации нейтронов органическими и литийсодержащими неорганическими сцинтилляторами является техника разделения сигналов по форме импульса (PSD), которая позволяет разделять  $\gamma$ -фон и нейтронные сигналы, будь то протоны отдачи в органическом сцинтилляторе или продукты реакции захвата нейтрона на  $^6\text{Li}$  и  $^{10}\text{B}$ . Благодаря своим характеристикам (высокая эффективность регистрации нейтронов, простота в использовании и относительная дешевизна) указанные сцинтилляторы получили широкое распространение. Однако, для регистрации низких потоков нейтронов такими детекторами необходимо скрупулезное изучение их функций отклика. В случае литийсодержащих детекторов дополнительным и более серьезным фактором, препятствующим их применению в низкофонных экспериментах, являются их собственные  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фоны.

Детекторы на основе йодсодержащих сцинтилляторов (йодид натрия и йодид цезия) являются одними из самых распространенных  $\gamma$ -спектрометров в физических экспериментах. Это обусловлено их низкой стоимостью, высокой эффективностью регистрации  $\gamma$ -квантов и хорошим энергетическим разрешением ( $\sim 7\%$  для линии 662 кэВ в значении полуширины на полувысоте (ПШПВ) [30]). Ввиду наличия относительно высокого сечения захвата нейтронов у натрия, цезия и йода, входящих в состав указанных сцинтилляторов, были предложены различные методы регистрации нейтронов с использованием таких сцинтилляторов. Высокая чувствительность йодсодержащих детекторов к  $\gamma$ -фону сильно препятствует регистрации низких потоков нейтронов разработанными ранее методами.

В четвертой главе описан новый метод регистрации нейтронов с использованием задержанных  $\gamma\gamma$ -совпадений в йодсодержащих детекторах. В разработанном методе детектирование нейтронов происходит по их захвату ядром  $^{127}\text{I}$ . В результате захвата образуется ядро  $^{128}\text{I}$  в возбужденном состоянии. При разрядке этого ядра в основное состояние  $\sim 30\%$  распадов проходит через уровень 137,8 кэВ с периодом полураспада 845 нс. Это дает возможность регистрировать нейтроны по задержанным  $\gamma\gamma$ -совпадениям с временным окном в несколько мкс. Переход на уровень 137,8 кэВ создает мгновенный сигнал в детекторе, а распад уровня является задержанным сигналом. Так как фон случайных совпадений находится почти в квадратичной зависимости от общего фона, то использование этого метода становится особенно эффективным при проведении низкофоновых измерений.

Для проверки метода был использован NaI(Tl)-детектор  $\varnothing 63 \text{ мм} \times 63 \text{ мм}$ , подсоединенный к многоканальному анализатору DT5780. Для каждого события записывались амплитуда и время.

Для проверки чувствительности разработанного метода к природным потокам нейтронов ( $10^{-3} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ), указанным выше детектором были проведены фоновые измерения в ЛЯП ОИЯИ. Для подтверждения полученных с NaI(Tl)-детектором результатов, одновременно с ним нейтронные потоки регистрировались низкофоновым  $^3\text{He}$ -счетчиком СММ-57 [16] (Рисунок 2). Из анализа полученных результатов была определена чувствительность использованного NaI(Tl)-детектора к потоку нейтронов на уровне  $1 \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , которая составила  $6,5 \pm 1$  отсчетов в секунду.

Для определения возможности регистрации разработанным методом потоков нейтронов на уровне  $10^{-6} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  были проведены измерения в подземной лаборатории LSM в Модане. В этих измерениях использовался NaI(Tl)-спектрометр, аналогичный примененному в исследованиях в ОИЯИ. Для проверки результатов нейтронные потоки регистрировались двумя счетчиками СММ-57. За  $\sim 260$  дней измерений NaI(Tl)-спектрометр зарегистри-



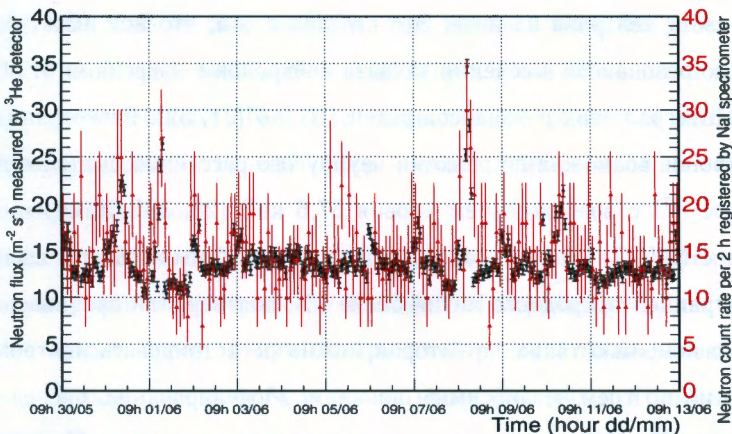


Рис. 2. Сравнение нейтронного потока измеренного  $^3\text{He}$ -детектором (черные точки с ошибками) и количества нейтронных событий зарегистрированных NaI(Tl)-спектрометром (красные треугольники).

стрировал 70 задержанных событий в области энергии 137,8 кэВ. Из них 34 события были определены как фон случайных совпадений. Фон рассчитывался по количеству одиночных событий во всем энергетическом спектре и в области пика 137,8 кэВ. Зарегистрированный NaI(Tl)-детектором нейтронный поток был определен на уровне  $2,1 \pm 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Это значение согласуется с потоками нейтронов, измеренными  $^3\text{He}$ -счетчиками СМ-57, которые составили  $(2,3 \pm 0,1^{\text{стат}} \pm 0,2^{\text{сист}}) \cdot 10^{-6} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $(3,1 \pm 0,1^{\text{стат}} \pm 0,3^{\text{сист}}) \cdot 10^{-6} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Измерения в подземной лаборатории LSM в Модане показали чувствительность метода к нейтронным потокам на уровне  $10^{-6} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Метод регистрации нейтронов по  $\gamma\gamma$ -совпадениям в йодсодержащих сцинтилляторах позволяет использовать спектрометр на основе кристалла NaI(Tl+Li) как детектор нейтронов в широком диапазоне энергий. Регистрация тепловых нейтронов в детекторе осуществляется по реакции захвата на



${}^6\text{Li}$ . Детектирование эпитеpmальных нейтронов возможно по  $\gamma\gamma$ -совпадениям после захвата нейтрона на йоде. Это связано с тем, что йод имеет большое количество резонансов в сечении захвата нейтронов с энергиями от 50 эВ до 10 кэВ. Интеграл этих резонансов равен 153,9 б [31, 32]. Регистрация быстрых нейтронов возможна по реакции неупругого рассеяния быстрого нейтрона на ядре  ${}^{127}\text{I}$  с возбуждением уровня 57,6 кэВ [28, 33]. Измерения, проведенные с NaI(Tl+Li)-детектором, размерами  $\varnothing 127\text{ мм} \times 152\text{ мм}$ , весом 7 кг и концентрацией природного лития более 1%, подтвердили предположение о том, что с помощью таких детекторов можно регистрировать нейтроны разных энергий по трем независимым каналам. Моделирование, проведенное в среде Geant4 [34–36], показало, что увеличение концентрации  ${}^6\text{Li}$  в кристалле приведет к увеличению числа реакций с тепловыми нейтронами на  ${}^6\text{Li}$ , и соответственно к уменьшению захватов тепловых нейтронов на  ${}^{127}\text{I}$ . Это позволит более эффективно разделять тепловые и эпитеpmальные нейтроны. В ходе исследований характеристик NaI(Tl+Li)-детектора было обнаружено загрязнение  $\alpha$ -изотопами материалов детектора (Рисунок 3).

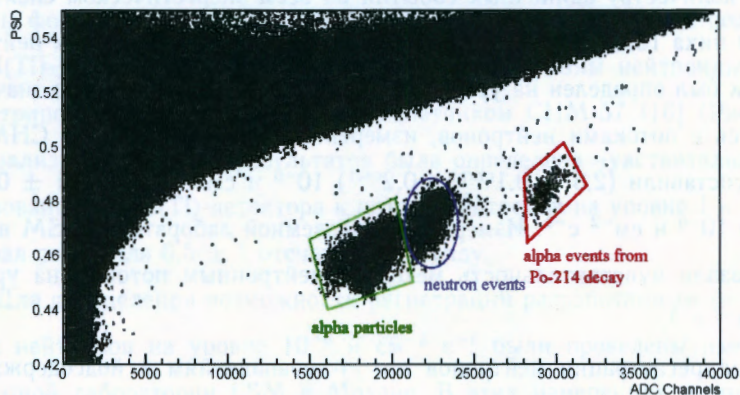
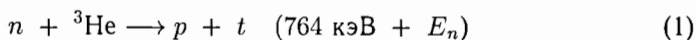


Рис. 3. PSD-диаграмма, полученная NaI-детектором в фоновых измерениях. Видно, что часть  $\alpha$ -событий накладывается на нейтронные.

Методом ВiРо часть  $\alpha$ -событий была идентифицирована как  $\alpha$ -частицы с энергией 7,69 МэВ от распада  $^{214}\text{Po}$ , счет которых оказался равен  $170 \pm 1$  событий в день. Измеренный квенчинг-фактор для таких  $\alpha$ -частиц составил  $\sim 0,6$ . Для применения NaI(Tl+Li)-детекторов в низкофоновых экспериментах необходимы дополнительный отбор и очистка материалов детектора от радиоактивных изотопов.

В **Пятой главе** диссертации представлены результаты измерений фона быстрых нейтронов в эксперименте Ricochet. Измерения проводились оригинальным методом регистрации быстрых нейтронов с низкофоновым  $^3\text{He}$ -счетчиком. Целью измерений была оценка фона быстрых нейтронов в области CENNS. Быстрые нейтроны регистрировались по реакции :



где  $E_n$  — кинетическая энергия нейтрона. Для энергий от 100 кэВ до 10 МэВ сечение реакции захвата остается на уровне  $\sim 1$  б, такое же сечение имеет и реакция упругого рассеяния [37]. Так как сечение захвата остается на уровне  $\sim 1$  б, то это открывает возможность регистрации быстрых нейтронов низкофоновым  $^3\text{He}$ -счетчиком. При проведении исследований, сигналом от быстрого нейтрона считалось событие с энергией более 1 МэВ. Собственный фон детектора в области интереса (1–4,5 МэВ) составлял 2 события на МэВ в день [38]. При проведении измерений разработанной методикой необходимо было учитывать ядра отдачи  $^3\text{He}$ , возникающие при упругом рассеянии нейтронов, и «стеночный» эффект.

При подготовке к исследованиям были проведены тестовые измерения, целью которых было определение различных параметров используемого счетчика. Так, было показано отсутствие зависимости эффективности регистрации от напряжения в пределах рабочего диапазона. В ходе этого теста напряжение, прикладываемое к счетчику, менялось от 1200 В до 1800 В. В результате тестов напряжение равное 1650 В было выбрано рабочим для



регистрации нейтронных событий с энергией до 10 МэВ. На Рисунке 4 показаны спектры, полученные  $^3\text{He}$ -счетчиком в IP21 с AmBe источником при напряжении 1650 В и в Дубне с PuBe источником для двух напряжений: 1200 В и 1500 В. Также была исследована зависимость отклика детектора CHM-57 от направления падающего нейтрона. Были рассмотрены случаи радиального и аксиального попадания нейтрона в детектор. В ходе этого теста не было выявлено сильной зависимости энергетического спектра от направления падающего нейтрона.

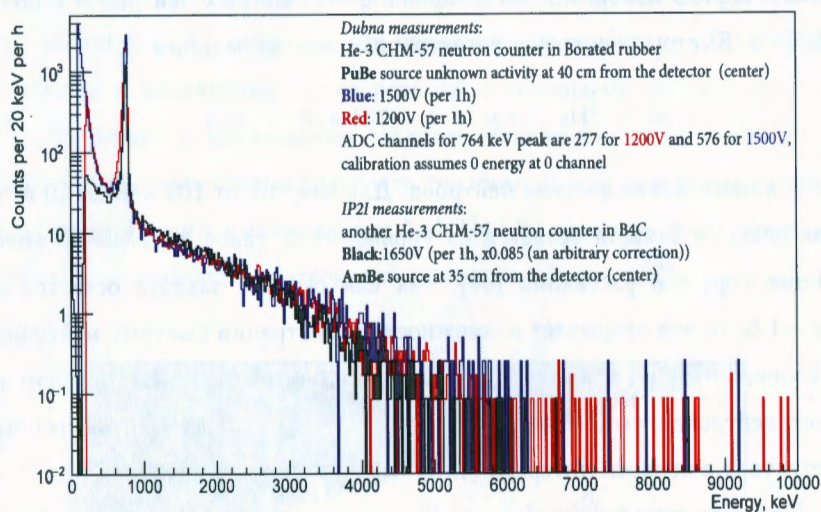


Рис. 4. Спектры, полученные  $^3\text{He}$ -счетчиком в IP21 с AmBe источником при напряжении 1650 В (черная линия) и в Дубне с PuBe источником для двух напряжений: 1200 В (красная линия) и 1500 В (синяя линия).

Для оценки нейтринного сигнала к фону была разработана модель космогенных нейтронов и нейтронов реакторного происхождения (реактогенных). Корректность модели подтвердилась в ходе измерений потоков ней-

тронов в лаборатории Института физики двух бесконечностей в Лионе (IP21) и месте проведения эксперимента Ricochet (вблизи реактора Института Лауэ — Ланжевена в Гренобле (ILL)) оригинальным методом с низкофоновым  $^3\text{He}$ -счетчиком. Измерения, проведенные с германиевыми детекторами-болометрами в IP21, показали, что разработанная модель позволяет проводить моделирование спектра ядер отдачи, вызванных нейтронами (см. Рисунок 5). Это позволило провести оценку нейтронных событий в эксперименте Ricochet.

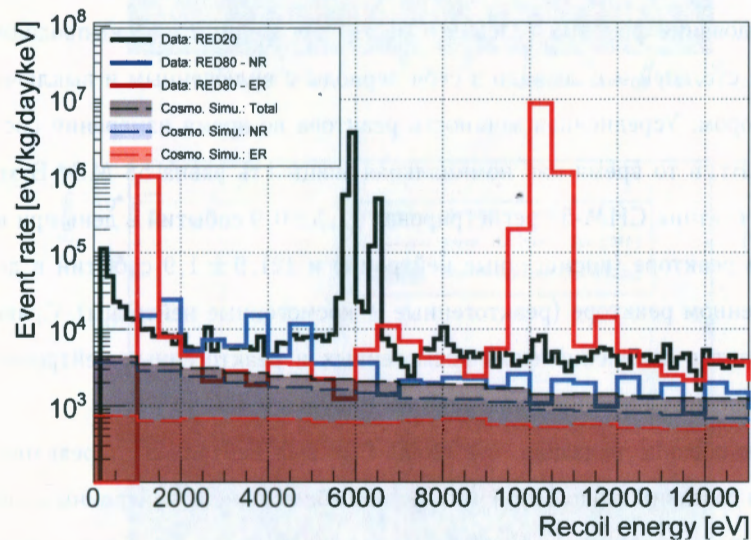


Рис. 5. Сравнение спектров, измеренных болометрами, с результатами моделирования космогенного фона. Черная линия — спектр, измеренный болометрами RED20. Красная и голубая линии — полученные болометрами RED80 спектры  $\gamma$ -квантов и ядер отдачи, соответственно. Закрашенными гистограммами показаны результаты моделирования космогенного фона: красная —  $\gamma$ -компонента, голубая — ядра отдачи, черная — суммарный фон. Ошибки в экспериментальных данных не показаны, но составляют 10% для RED20 [39] и 30% для RED80 [40]

Моделирование и измерение потоков быстрых нейтронов в месте проведения эксперимента Ricochet показало значительное превышение числа реактогенных нейтронов над космогенными. Максимальная энергия реактогенных нейтронов составляет  $\sim 6$  МэВ, в то время как энергия космогенных нейтронов может достигать  $\sim 200$  МэВ. Средний пробег нейтрона с энергией 6 МэВ в борированном полиэтилене составляет 6 см. Поэтому реактогенная компонента фона будет сильно подавляться пассивной защитой из 35 см борированного полиэтилена. Создание эффективной защиты от космогенных нейтронов не представляется возможным.

Исследование фоновых условий в месте проведения Ricochet продолжалось почти сто дней и включало в себя периоды с включенным и выключенным реактором. Усредненная мощность реактора во время измерений составила 42 МВт, в то время как номинальная мощность равна 58 МВт. В ходе измерений счетчик СНМ-57 регистрировал  $11,5 \pm 0,9$  событий в день при выключенном реакторе (космогенные нейтроны) и  $121,9 \pm 1,9$  событий в день при включенном реакторе (реактогенные + космогенные нейтроны). Сравнение результатов измерений фона космогенных и реактогенных нейтронов с результатами моделирования показано на Рисунке 6.

Моделирование показало, что вклад быстрых нейтронов от реактора в общий фон составит около одной четверти от общего числа нейтронных событий. Основным источником фоновых событий, несмотря на их общее меньшее количество, будут являться космогенные нейтроны. Общий ожидаемый фон от нейтронов составил  $9 \pm 2$  событий в сутки ( $7 \pm 2$  от космогенных нейтронов,  $2 \pm 0,3$  от реактогенных). Ожидаемый счет CENNS составляет 12,8 событий в сутки при эффективности регистрации равной 70%.

По результатам исследований было определено, что статистическая значимость регистрации CENNS в эксперименте Ricochet составит от 7,5 до  $13,6 \sigma$  после одного реакторного цикла.

**В заключении** приведено обобщение результатов выполненной работы.



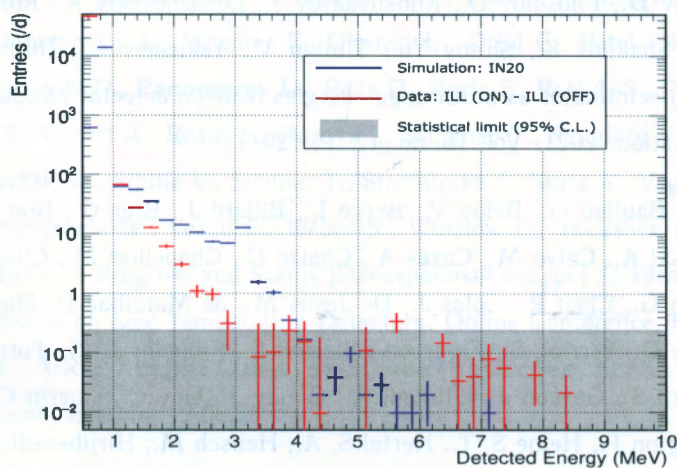
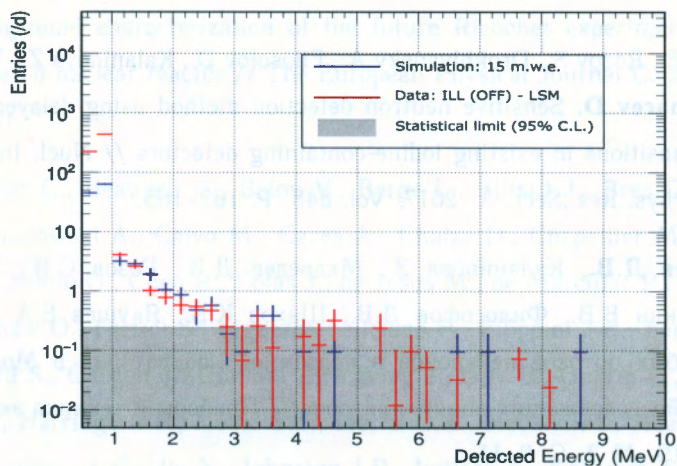


Рис. 6. Верхний график: сравнение космогенного фона в ILL-N7, измеренного  $^3\text{He}$ -счетчиком за 40,7 дней (красные точки), с результатами МС (синие точки). Нижний график: сравнение фона реактогенных нейтронов, измеренного  $^3\text{He}$ -счетчиком за 46,3 дня при усредненной мощности реактора 42 МВт (красные точки) с результатами МС (синие точки).



## Список публикаций

1. Yakushev E., Rozov S., Drokhllyansky A., Filosofov D., Kalaninova Z., Timkin V., **Пonomarev D.** Sensitive neutron detection method using delayed coincidence transitions in existing iodine-containing detectors // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2017. Vol. 848. P. 162–165.
2. **Пonomarev Д.В.**, Каланинова З., Медведев Д.В., Розов С.В., Розова И.Е., Тимкин В.В., Философов Д.В., Шахов К.В., Якушев Е.А. Измерение слабых потоков нейтронов в подземной лаборатории в Модане с помощью йодсодержащих сцинтилляторов // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 9–11.
3. **Пonomarev D.**, Filosofov D., Khushvaktov J., Lubashevskiy A., Rozova I., Rozov S., Shakhov K., Shitov Yu., Timkin V., Yakushev E., Zhitnikov I. NaI(Tl+Li) scintillator as multirange energies neutron detector // Journal of Instrumentation. 2021. Vol. 16, no. 12. P. 12011.
4. Augier C., Baulieu G., Belov V., Berge L., Billard J., Bres G., Bret J.-L., Broniatowski A., Calvo M., Cazes A., Chaize D., Chapellier M., Chaplinsky L., Chemin G., Chen R., Colas J., De Jesus M., de Marcillac P., Dumoulin L., Exshaw O., Ferriol S., Figueroa-Feliciano E., Filippini J.-B., Formaggio J. A., Fuard S., Gascon J., Giuliani A., Goupy J., Goy C., Guerin C., Guy E., Harrington P., Heine S. T., Hertel S. A., Heusch M., Hirjibehedin C. F., Hong Z., Ianigro J.-C., Jin Y., Johnston J. P., Juillard A., Karaivanov D., Kazarcev S., Lamblin J., Lattaud H., Li M., Lubashevskiy A., Marnieros S., Mayer D. W., Minet J., Misiak D., Mocellin J.-L., Monfardini A., Mounier F., Oliver W. D., Olivieri E., Oriol C., Patel P. K., Perbet E., Pinckney H. D., Poda D., **Пonomarev D.**, Rarbi F., Real J.-S., Redon T., Robert A., Rozov S., Rozova I., Salagnac T., Sanglard V., Schmidt B., Shevchik Ye., Sibille V., Soldner T., Stachurska J., Stutz A., Vagneron L., Van De Pontseele W.,

Vezzu F., Weber S., Winslow L., Yakushev E., Zinatulina D. Fast neutron background characterization of the future Ricochet experiment at the ILL research nuclear reactor // The European Physical Journal C. 2023. Vol. 83. P. 20.

5. Augier C., Beaulieu G., Belov V., Berge L., Billard J., Bres G., Bret J.-L., Broniatowski A., Calvo M., Cazes A., Chaize D., Chapellier M., Chaplinsky L., Chemin G., Chen R., Colas J., de Jesus M., de Marcillac P., Dumoulin L., Exshaw O., Ferriol S., Figueroa-Feliciano E., Filippini J.B., Formaggio J.A., Fuard S., Gascon J., Giuliani A., Goupy J., Goy C., Guerin C., Hirjibehedin C.F., Harrington P., Heine S.T., Hertel S.A., Heusch M., Hoarau C., Hong Z., Ianigro J.-C., Jin Y., Johnston J.P., Juillard A., Kazarcev S., Lamblin J., Lattaud H., Lubashevskiy A., Mayer D.W., Marnieros S., Minet J., Misiak D., Monfardini A., Mounier F., Olivieri E., Oriol C., Patel P.K., Perbet E., Pinckney H.D., **Пonomarev D.**, Poda D., Rarbi F., Real J.-S., Ricol J.-S., Redon T., Robert A., Rozov S., Rozova I., Salagnac T., Sanglard V., Schmidt B., Shevchik Ye., Sibille V., Soldner T., Stachurska J., Stutz A., Vagneron L., van de Pontseele W., Vezzu F., Weber S., Winslow L., Yakushev E., Zinatulina D. Ricochet Progress and Status [Электронный ресурс] // 19th International Workshop on Low Temperature Detectors. Online Conference, United States: 2021. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03454410> (дата обращения: 12.08.2022).

## Цитированная литература

6. Heusser G. Low-Radioactivity Background Techniques // Annual Review of Nuclear and Particle Science. 1995. Vol. 45, no. 1. P. 543–590.
7. Formaggio J., Martoff C. Backgrounds to sensitive experiments under-

- ground // Annual Review of Nuclear and Particle Science. 2004. Vol. 54, no. 1. P. 361–412.
8. Firestone R. et al. Table of Isotopes 8th edition, edited by V.S. Shirley. New York: Wiley, 1998. ISBN: 0471246999.
9. Kouzes R. The  $^3\text{He}$  Supply Problem [Электронный ресурс]. Technical Report. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2009. URL: [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-18388.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18388.pdf) (дата обращения: 12.08.2022).
10. Архаров А.М., Архаров И.А., Долгопятов Д.А., Бондаренко В.Л. Кризис поставок гелия-3: причины и пути преодоления // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. Т. 1. С. 30–33.
11. Niechcial J. et al. Operational Costs of  $\text{He}^3$  Separation Using the Superfluidity of  $\text{He}^4$  // Energies. 2020. Vol. 13. P. 6134.
12. Kouzes R. et al. Neutron detection alternatives to  $^3\text{He}$  for national security applications // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2010. Vol. 623, no. 3. P. 1035–1045.
13. Sacchetti F. et al.  $^3\text{He}$ -free neutron detectors and their applications // The European Physical Journal Plus. 2015. Vol. 130, no. 03. P. 53.
14. Komura K. et al. Variation of Environmental Neutron Flux with the Depth of Water and Soil // Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences. 2008. Vol. 9. P. 45–47.
15. Розов С.В. и др. Система мониторинга потока тепловых нейтронов в эксперименте по поиску тёмной материи EDELWEISS II // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74, № 4. С. 502–504.

16. Видякин Г.В. и др. Нейтронный пропорциональный счетчик с пониженным уровнем собственного фона // Приборы и техника эксперимента. 1989. Т. 32, № 4. С. 70–73.
17. Belov V. et al. The  $\nu\text{GeN}$  experiment at the Kalinin Nuclear Power Plant // Journal of Instrumentation. 2015. Vol. 10, no. 12. P. 12011.
18. Alekseev I. et al. First results of the  $\nu\text{GeN}$  experiment on coherent elastic neutrino-nucleus scattering // Phys. Rev. D. 2022. Vol. 106. P. L051101.
19. Armengaud E. et al. Performance of the EDELWEISS-III experiment for direct dark matter searches // Journal of Instrumentation. 2017. Vol. 12, no. 08. P. 08010.
20. Knoll G. Radiation Detection and Measurement, 3rd Edition. New York: Wiley, 1999. ISBN: 0471073385.
21. Hamel M. Plastic Scintillators. Cham: Springer Cham, 2021. ISBN: 9783030734879.
22. Bourne M. et al. Characterization of the CLYC detector for neutron and photon detection // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2014. Vol. 736. P. 124–127.
23. Yang K., Menge P. R., Lejay J., Ouspenski V. Scintillation properties and temperature responses of  $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6:\text{Ce}^{3+}$  // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC). 2013. P. 1–6.
24. Metwally W. A. Existing NaI detectors; an efficient alternative to He-3 detectors // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2014. Vol. 338. P. 48–51.

25. Holm P. et al. Neutron detection with a NaI spectrometer using high-energy photons // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2013. Vol. 697. P. 59–63.
26. Bernabei R. et al. On the investigation of possible systematics in WIMP annual modulation search // Eur. Phys. J. C. 2000. Vol. 18. P. 283–292.
27. Kuznetsov A. S. et al. First experiments on neutron detection on the accelerator-based source for boron neutron capture therapy // Technical Physics Letters. 2009. Vol. 35, no. 4. P. 346–348.
28. Collar J. et al. Coherent neutrino-nucleus scattering detection with a CsI[Na] scintillator at the SNS spallation source // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2015. Vol. 773. P. 56–65.
29. Bartle C., Haight R. Small inorganic scintillators as neutron detectors // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1999. Vol. 422, no. 1. P. 54–58.
30. Muminov I. et al. Application of NaI(Tl) detector for measurement of natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  in environmental samples: new approach by decomposition of measured spectrum // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. Vol. 84, no. 3. P. 321–331.
31. Pritychenko B., Sonzogni A. Sigma: Web Retrieval Interface for Nuclear Reaction Data // Nuclear Data Sheets. 2008. Vol. 109, no. 12. P. 2822–2827.
32. Сечения реакций на нейтронах [Сайт]. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/sigma/> (дата обращения: 12.08.2022).
33. Cecil F. E., Killian K., Rymes M. Gamma ray production cross sections in  $^{127}\text{I}$  by inelastic neutron scattering // Phys. Rev. C. 1979. — Jun. Vol. 19. P. 2414–2416.
34. Agostinelli S. et al. Geant4—a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. Vol. 506, no. 3. P. 250 – 303.
35. Allison J. et al. Recent developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2016. Vol. 835. P. 186–225.
36. Среда моделирования Geant4[Сайт]. URL: <https://geant4.web.cern.ch> (дата обращения: 12.08.2022).
37. Sayres A. R., Jones K. W., Wu C. S. Interaction of Neutrons with  $\text{He}^3$  // Phys. Rev. 1961. Vol. 122. P. 1853–1863.
38. Rozov S. et al. Monitoring of the thermal neutron flux in the LSM underground laboratory [Электронный ресурс] // ArXiv e-prints. 2010. 1001.4383. URL: <https://arxiv.org/abs/1001.4383> (дата обращения: 12.08.2022).
39. Armengaud E. et al. Searching for low-mass dark matter particles with a massive Ge bolometer operated above-ground // Phys. Rev. 2019. Vol. D99, no. 8. P. 082003.
40. Misiak D. Development of new cryogenic low-threshold detectors for the search of light dark matter and low-energy neutrino physics [Электронный ресурс]: Theses / Université de Lyon. 2021. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03328713> (дата обращения: 12.08.2022).