

ОТЗЫВ

официального оппонента Дербина Александра Владимировича
на диссертацию Добрыниной Екатерины Анатольевны “Исследование вариаций гамма-фона с помощью сцинтилляционного детектора LVD”, представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 –
“Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий”.

Диссертационная работа Е.А. Добрыниной посвящена анализу временных вариаций фона большого сцинтилляционного детектора LVD, предназначенного для регистрации нейтрино от коллапса сверхновой и расположенного в подземной лаборатории Гран-Сассо, Италия. Исследования выполнены для низкоэнергетических событий, (0.5-3.0) МэВ, во внутренних, защищенных от внешней радиоактивности, счетчиках за период с 1992 по 2023 гг. Изменения скорости счета событий в указанной энергетической области связано, в основном, с вариациями концентрации радона в окружающем детекторы воздухе, которые могут быть вызваны различными интересными факторами.

Тема диссертации является **новой** и не связана напрямую с основной целью эксперимента LVD. Конкретная задача состояла в определении параметров вариаций – амплитуды, периода и фазы, – как для известных годовых, месячных, недельных и суточных периодов, так и для других возможных изменений. Вторая важная задача, успешно решенная в диссертации, состояла в определении причин изменения концентрации радона под землей и разделение геофизических и техногенных факторов. **Актуальность** и **значимость** исследований в обоих направлениях не вызывает сомнений.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что существуют указания на повышенный выход радона из грунта перед землетрясениями. Полученные в работе данные и развитые методы дают возможность исследовать факторы, сопутствующие землетрясениям. Следует отметить важность проведенных изучений для экспериментов, которые проводятся или проводились в лаборатории Гран-Сассо, таких как DAMA/LIBRA, XENON, CRESST, BOREXINO и других, ориентированных на регистрацию нейтрино или частиц темной материи и поиск редких процессов.

Диссертация Е.А. Добрыниной состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений и обозначений, и списка цитируемых работ. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, включая 53 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 79 наименований.

Во введении представлен краткий обзор основных положений, связанных с источниками радиоактивного фона подземных лабораторий, в частности, с радиоактивным газом ^{222}Rn . Показано, что изменения концентрации радона в подземных помещениях могут быть вызваны многими факторами, такими как устройство и режим работы вентиляции, вибрация и степень насыщения водой грунта, приливными силами и сейсмической активностью. В качестве примера приведены отклики детектора LVD на сильные землетрясения в Италии.

Отмечается, что ядерные эффекты взаимодействия мюонов космических лучей в зависимости от глубины исследовались в работах Г.Т. Зацепина и О.Г. Ряжской и их учеников Н.Ю. Агафоновой и А.С. Мальгина. Так, несмотря на известный поток мюонов под землей, нейтроны, появившиеся в результате взаимодействия мюонов, еще не до

конца изучены. Измерения сезонных вариаций нейтронов от мюонов под землей получены только в работах, выполненных с детектором LVD.

Обсуждается возможная связь изменений концентрации радона с сейсмологическими явлениями. В конце введения обоснована актуальность и новизна работы, сформулированы главные задачи работы, перечислены результаты диссертации, выносимые на защиту, и представлено описание структуры диссертации.

В первой главе подробно описан детектор LVD, созданный для регистрации нейтрино всех типов от гравитационных коллапсов звезд в реакциях взаимодействия с ядрами. Представлены результаты измерения фона естественной радиоактивности в зале, где расположен детектор LVD, обсуждается цепочка распада ^{222}Rn и регистрация возникающих гамма-квантов отдельным счетчиком. Показано, что мониторинг изменений скорости счета внутренних счетчиков LVD при низком пороге (0.5 МэВ) позволяет изучать вариации концентрации радона вблизи установки. Описан канал регистрации низкоэнергетических импульсов и разработанная автором автоматическая процедура отбора счетчиков для анализа. Приведены примеры графического представления данных о скорости счета гамма-квантов на каждой из трех башен LVD. Заключают главу выводы.

Вторая глава посвящена установлению вклада гамма-квантов, связанных с радоном, в низкоэнергетическую часть фона LVD. В первом разделе приведена зависимость скорости счета гамма-квантов счетчиками LVD от концентрации радона, которая определялась радонометром, регистрирующим альфа-частицы и установленным в детекторе LVD. Объясняется часовая задержка данных LVD относительно данных радонометра. Во втором разделе установлено количественное соотношение между скоростью счета гамма-квантов, регистрируемой LVD, и показаниями радонометра. Для определения отклика LVD к контролируемому увеличению концентрации радона было проведено несколько специальных измерений, в одном из которых в экспериментальный зал впускался воздух из соседних неветилируемых помещений с повышенной концентрацией радона.

В пятом разделе второй главы приведены данные по суточным и недельным изменениям скорости счета гамма-квантов детектором LVD, полученные методом наложения эпох, относящиеся к различным периодам организации вентиляции в зале LVD. Заключительное сравнение с данными детектора LSD, который был расположен в туннеле по Монбланом, показывает, что суточные и недельные вариации могут быть вызваны человеческой деятельностью.

В третьей главе проведен поиск возможных корреляций между скоростью счета гамма-квантов LVD и атмосферным давлением, температурой и влажностью в зале LVD, которые измерялись термогигрометром серийного производства, расположенным в различных точках внутри LVD. Проведенный сравнительный анализ скорости счета гамма-квантов с данными по температуре, влажности и давлению показал, что временное положение пиков в скорости счета не совпадает с пиками изменений в температуре, влажности и давлении.

Анализ данных скорости счета гамма-квантов не выявил корреляции с изменением атмосферного давления, по крайней мере на временных интервалах до 20 суток. Также не обнаружен какой-либо эффект для гамма-квантов во время резких понижений давления, что автор связывает с неизвестным режимом работы вентиляции и работой персонала, которые, возможно, маскируют эффект. Интересно, что обнаружена сильная несезонная антикорреляция скоростей изменения интенсивности гамма-квантов и атмосферного давления на отрезках в 3–4 месяцев.

Четвертая глава посвящена Фурье-анализу временной последовательности интенсивности гамма-квантов, регистрируемых LVD, и обсуждению возможных геофизических и гравитационных эффектов, способных модулировать скорость счета гамма-квантов в подземной лаборатории. Анализ был выполнен на данных с фиксированным режимом работы вентиляции в период с 2009 г. по 2021 г.

В результате Фурье анализа в спектре гармоник с большой значимостью найдены пики, соответствующие периоду одни сутки и 7 суток, первые автор связывает с солнечно-суточными приливами в грунте, вторые - с работой персонала в подземной лаборатории и автомобильным трафиком в туннелях. Наблюдение комбинационных частот подтверждает корректность выполненного Фурье анализа.

Метод наложения эпох для годовых интервалов и подгонка полученного распределения синусоидальной функцией дают для амплитуды модуляции значение $(3.0 \pm 1.1) \%$, а для фазы (7.5 ± 0.5) мес. с максимумом выхода радона в августе. Эта информация полезна для многих экспериментов, проводимых в лаборатории Гран-Сассо.

В третьем разделе главы выполнен поиск вариаций, связанных с гравитационными эффектами Луны для синодического периода между одинаковыми фазами луны, который составляет 29.5 суток. Анализ был выполнен двумя независимыми способами выделения начала эпохи с разделением данных на дневные и ночные, для учета человеческого фактора. В результате найдены явно выраженные вариации с периодом 29.5 суток с максимумом амплитуды $(0.8 \pm 0.15) \%$, который приходится на 3–5 день после полнолуния.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

По представленной работе можно сделать некоторые **рекомендации и замечания**.

1) Диссертация посвящена временному анализу сигналов со счетчиков LVD, было бы интересно увидеть фоновый амплитудный спектр сигналов отдельного счетчика (возможно, из специального измерения) и отклик счетчика на какой-нибудь калибровочный гамма-источник.

2) Отмеченное в диссертации Монте-Карло моделирование фоновых событий в детекторе LVD от естественной радиоактивности грунта и материалов конструкции представлено скромным рисунком 2.3. Было бы интересно увидеть другие результаты симуляции, например, отмеченный выше спектр сигналов отдельного счетчика в сравнении с М-К результатом.

3) При анализе временной последовательности значений интенсивности гамма-квантов, регистрируемых LVD, возможно, для сравнения с Фурье-анализом, было бы интересно использовать более широкий класс методов выделения периодического сигнала, таких, например, как построение периодограммы Ломба-Скаргла или метод эмпирического разложение по модам.

4) Обнаруженный интересный эффект "несезонная сильная антикорреляция трендов изменения скорости счета гамма-квантов и атмосферного давления на масштабах порядка 3–4 месяцев" остался в диссертации без комментариев.

5) Отсутствуют обычные замечания к оформлению работы. Хотя лучше, если рисунки 1.5, 1.10, 3.5, 3.6, 4.3 и 4.8 и подписи к ним находились бы на одной странице.

Отмеченные недостатки не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы Е.А. Добрыниной. В работе получены важные для низкофоновых подземных экспериментов результаты, среди которых можно выделить следующие:

1. Найдены годовые (сезонные) вариации скорости счета гамма-квантов. За период с 2004 по 2021 годы средняя амплитуда вариаций составила (3.0 ± 1.1) %, фаза (7.5 ± 0.5) мес., которая соответствует середине августа.

2. Методом наложения эпох двумя независимыми способами определены лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов с периодом 29.5 суток. Максимум амплитуды вариаций составляет (0.8 ± 0.15) % и приходится на 3–5 день после полнолуния.

В целом диссертация производит положительное впечатление, она выполнена на высоком научном уровне и хорошо написана. Основные результаты диссертационной работы являются **новыми, обоснованными и достоверными** и получены впервые. Они известны специалистам и своевременно и полно опубликованы в хороших физических журналах. Всего по теме диссертации опубликовано 15 работ, 13 из них в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, а также индексируемых в базах данных WoS и Scopus. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях. **Автореферат правильно и полно отражает** содержание диссертации.

Диссертация Добрыниной Е.А. «Исследование вариаций гамма-фона с помощью сцинтилляционного детектора LVD», удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

16 января 2025 г.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией низкофоновых измерений,

заведующий Отделом п/п ядерных детекторов,

Петербургского института ядерной физики

НИЦ "Курчатовский институт"

доктор физико-математических наук по специальности

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

А.В. Дербин

derbin_av@npi.nrcki.ru, +7(81371) 46327

188300 Ленинградская область, г. Гатчина

Орлова роща, ПИЯФ НИЦ КИ

Подпись А.В. Дербина заверяю:

Ученый секретарь ПИЯФ НИЦ КИ,

кандидат физико-математических наук

С.И. Воробьев

Сведения об официальном оппоненте

Дербин Александр Владимирович

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц, тел. +7(81371) 46327, адрес электронной почты: derbin_av@npi.nrcki.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение “Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова” Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Отделение нейтронных исследований, Отдел полупроводниковых ядерных детекторов, заведующий отделом.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. **Derbin A.V.**, Drachnev I.S., Muratova V.N., Semenov D.A., Trushin M.V., Unzhakov E.V. SEARCH FOR 8.4-KEV SOLAR AXIONS EMITTED IN THE M1 TRANSITION IN ^{169}Tm NUCLEI // JETP Letters. 2023. Т. 118. № 3. С. 160-164.
2. **Дербин А.В.**, Драчнев И.С., Котина И.М., Муратова В.Н., Ниязова Н.В., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННЫХ АНТИНЕЙТРИНО ЯДРА ^{144}Ce - ^{144}Pr ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ // Письма в Журнал технической физики. 2023. Т. 49. № 24. С. 3-5.
3. **Дербин А.В.**, Драчнев И.С., Муратова В.Н., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В. ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ АКСИОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 8.4 КЭВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ В M1-ПЕРЕХОДЕ ЯДЕР ^{169}Tm // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2023. Т. 118. № 3-4 (8). С. 154-158.
4. Базлов Н.В., Бубнов Е.Ф., **Дербин А.В.**, Драчнев И.С., Иванов Д.В., Коньков О.И., Котина И.М., Микулич М.С., Муратова В.Н., Ниязова Н.В., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В., Чмель Е.А. КОМПАКТНЫЙ КАЛИБРОВОЧНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ РАДИОНУКЛИДА ^{252}Cf И КРЕМНИЕВОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА // Ядерная физика. 2023. Т. 86. № 1. С. 179-184.
5. **Дербин А.В.**, Драчнев И.С., Ломская И.С., Муратова В.Н., Пилипенко Н.В., Семенов Д.А., Унжаков Е.В. ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ β -СПЕКТРА RaE ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022. Т. 53. № 2. С. 450-463.
6. Алексеев И.Е., Бахланов С.В., **Дербин А.В.**, Драчнев И.С., Котина И.М., Муратова В.Н., Ниязова Н.В., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В., Чмель Е.А. КРЕМНИЕВЫЙ 4п-СПЕКТРОМЕТР ЭЛЕКТРОНОВ β -РАСПАДА С ЭНЕРГИЕЙ ДО 3 МЭВ // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2. С. 19-24.