

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи



Громов Максим Борисович

**РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРИНО
С ЭНЕРГИЯМИ ОТ 1 ДО 50 МЭВ
С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА VOREXINO**

Специальность 01.04.16 —
«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Чепурнов Александр Сергеевич**,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Синёв Валерий Витальевич**,
доктор физико-математических наук,
Институт ядерных исследований РАН,
ведущий научный сотрудник

Ольшевский Александр Григорьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Объединённый институт ядерных исследований,
начальник отдела ЛЯП

Роганова Татьяна Михайловна,
доктор физико-математических наук,
Научно-исследовательский институт ядерной
физики имени Д.В. Скобельцына МГУ,
заведующая лабораторией

Защита диссертации состоится 1 декабря 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 («19 корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ им. М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/73224575/>

Автореферат разослан 25 октября 2017 г..
Телефоны совета для справок: +7 (495) 939-58-69, +7 (916) 871-77-50.
Электронная почта совета для справок: galan_lidiya@mail.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.11,
кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник



Галанина Л. И.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Развитие экспериментальной техники во второй половине XX века позволило надёжно регистрировать нейтринное излучение. Изначальная проблема – малые сечения взаимодействия $\sigma \approx 10^{-44} - 10^{-34} \text{ см}^2$ – стала преимуществом. Рождаясь в плотных объектах в ходе ядерных реакций и радиоактивных распадов, нейтрино достигает наблюдателя практически без изменений своих характеристик. Поэтому становится возможным изучение физических процессов внутри Солнца и Земли, а также внутри массивных звёзд на последней стадии их эволюции, когда происходит гравитационный коллапс и вспыхивает сверхновая. Кроме того, поток нейтрино можно зафиксировать при работе АЭС и взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. Таким образом, научные исследования в области нейтринной физики имеют фундаментальный и междисциплинарный характер.

Однако для регистрации нейтрино необходимы детекторы большого объёма с массами мишеней от сотен тонн из-за малого сечения взаимодействия в особенности в области энергий от сотен кэВ до нескольких МэВ. При этом возможно построение спектра или, в крайних случаях, выполнение минимального анализа, показывающего существование излучения от того или иного источника, либо дающего верхний предел на поток. Создание нейтринных детекторов большого объёма стало возможным только в последние три десятилетия. Были сооружены экспериментальные установки LVD [1], Super-Kamiokande [2], SNO [3], KamLAND [4],[5]. В стадии строительства находятся детекторы нового поколения – JUNO [6], [7] и НурекКамиоканде [8]. В эксперименте Bogexino [9] масса мишени составляет $\approx 278 \text{ т}$, что позволяет регистрировать потоки нейтрино с энергией $\sim 1 \text{ МэВ}$ от уровня в $10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Затрудняет регистрацию событий с участием нейтрино высокий уровень фона. Он связан как с естественной радиоактивностью элементов конструкции детектора, так и с неустраняемым фоном от мюонной компоненты космических лучей. Для минимизации космогенного фона установки размещают глубоко под землёй, снабжают слоистой защитой, а для минимизации собственного радиоактивного фона при строительстве используют материалы с высокой радиохимической частотой. Оставшийся вклад фоновых событий максимально устраняется при обработке данных с помощью программных фильтров. Все эти методы экспериментальной физики нашли отражение в детекторе Bogexino. При этом удалось достичь рекордно низкого уровня фона, наилучшего в мире к моменту написания данной диссертационной работы [10], [11], [12], [13], [14].

Нейтринное излучение в детекторе Bogexino регистрируется с помощью реакций упругого рассеяния нейтрино на электронах и обратного β -

распада. Наблюдаются электронные нейтрино от Солнца и электронные антинейтрино от реакторов АЭС и от распада долгоживущих радиоактивных изотопов в недрах Земли. Тем не менее с помощью реакции упругого рассеяния на электронах и с помощью реакций неупругого рассеяния на ядрах углерода могут регистрироваться мюонные и таонные нейтрино. Они могут возникать при вспышке сверхновой или при других астрофизических явлениях (например, гамма-всплесках) и в редких процессах (рождение атмосферных нейтрино с энергией до 50 МэВ).

С помощью детектора Borexino был получен ряд выдающихся результатов по спектроскопии нейтрино от Солнца [15],[16],[17],[18],[19], а также зарегистрированы гео-нейтрино [20], [21], проведены исследования экзотических процессов [22] и электромагнитных свойств нейтрино [23], [22], [24]. Эти результаты показали значительный потенциал детектора. Однако энергетический диапазон измерений ограничен сверху 10 – 15 МэВ. Для регистрации вспышек сверхновых, атмосферных нейтрино низких энергий и поиска корреляций между нейтринными и другими астрофизическими сигналами (гравитационные волны, гамма-всплески и быстрые радиовсплески) необходимо иметь возможность детектировать нейтрино с энергиями до 50 МэВ. В таблице 1 дан краткий обзор возможных источников нейтринного излучения, соответствующих физических задач, а также приведены оценки ожидаемых сигналов в детекторе Borexino и ссылки на исследования.

Электронная система сбора данных детектора Borexino, называемая Laben [9], была разработана для спектроскопии нейтрино, возникающих в ходе термоядерных реакций внутри Солнца. Основная задача состояла в регистрации нейтрино с энергией 862 кэВ от реакции с участием ${}^7\text{Be}$. Поэтому система сбора данных была спроектирована для работы в субмэвном диапазоне с минимальным порогом в ~ 200 кэВ¹. При регистрации событий с энергиями на два порядка больше (около 10 – 20 МэВ) система сбора данных Laben выдаёт искажённую информацию, так как происходит переполнение зарядочувствительных усилителей. Как следствие, понижается эффективность регистрации событий.

Есть и другие недостатки системы Laben:

1. наличие мёртвого времени после каждого триггера;
2. неспособность регистрировать большого числа событий (от $\sim 3-5$) за короткий (< 1 мс) интервал времени;
3. тип применяемых АЦП не позволяет производить отбор событий по форме импульса²;

¹Соответствующая энергия регистрируемых нейтрино с помощью реакции упругого рассеяния на электронах составляет ~ 400 кэВ.

²Удалось для событий с энергией до ~ 5 МэВ реализовать отбор по методу Gatti [25].

4. недостаточная эффективность мюонного триггера, приводящего даже при применении дополнительных программных алгоритмов к пропуску примерно одного мюона раз в три дня;
5. сбои и отказы в работе отдельных модулей электронной системы, что ведёт к потере живого времени;
6. потеря времени (до нескольких минут) при перезапуске сеанса измерений, который выполняется каждые шесть часов.

Чтобы расширить диапазон измеряемых энергий и преодолеть недостатки имеющейся системы Laben, был разработан и внедрён в структуру сбора данных Vortexino дополнительный электронно-измерительный комплекс. Он базировался на быстрых (400 МГц) АЦП, за что в англоязычной литературе получил название FADC (от англ. *Flash ADC system*, русский вариант – *система на быстрых АЦП*). Согласно [9], [26], [27] и [28] у нового комплекса также было несколько дополнительных преимуществ:

1. регистрация событий в диапазоне энергий от 1 до ~ 50 МэВ;
2. гибкая логика выработки главного триггера на базе цифрового модуля с ПЛИС;
3. отсутствие мёртвого времени между событиями;
4. рабочий цикл $\sim 100\%$;
5. независимость комплекса FADC от системы сбора данных Laben.

Для использования новой системы на быстрых АЦП необходимо было провести калибровку и разработать программное обеспечение для возможности выполнения обработки данных. Созданные инструменты должны были быть протестированы в ходе совместного анализа с применением обеих систем.

Совместный анализ выполнялся при измерении гео-нейтринного потока, так как методология этого анализа была хорошо разработана [20], [21]. Также совместный анализ проводился при поиске корреляций между гамма-всплесками и нейтринными сигналами.

Важно отметить, что в дальнейших исследованиях система сбора данных на быстрых АЦП будет активно использоваться и при измерениях в области энергий 1 – 3 МэВ в рамках программы SOX по поиску стерильных нейтрино [29].

Целями данной работы являются:

1. обеспечение возможности регистрации нейтрино от различных источников в детекторе Vortexino в диапазоне энергий от 1 до ~ 50 МэВ;
2. измерение потока гео-нейтрино;
3. проверка созданных инструментов в ходе измерений на детекторе и при проведении анализа данных.

Источник	Тип нейтринного излучения	Ожидаемый диапазон энергий МэВ	Оценка полного потока в LINGS в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Каналы регистрации
Солнечные нейтрино				
GNO*	ν_e	< 1.740	$\sim 5 \cdot 10^8$	$\nu e\text{-ES}$
реp	ν_e	1.442	$\sim 1.5 \cdot 10^8$	$\nu e\text{-ES}$
^8B	ν_e	< 14.060	$\sim 5 \cdot 10^6$	$\nu e\text{-ES}$
вер	ν_e	< 18.773	$\sim 8 \cdot 10^3$	$\nu e\text{-ES}$
Солнечные вспышки	$\nu_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\mu$	< 50	$\sim 1 - 100$	$\nu e\text{-ES}$ $\nu^{12}\text{C-NC}, \nu^{12}\text{C-CC}$
Оспигляции ^8B -нейтрино в антинейтрино	$\bar{\nu}_e$	< 14.060	< 100	IBD
Иные источники				
Гео-нейтрино	$\bar{\nu}_e$	< 3.26	$\sim 2 - 5 \cdot 10^6$	IBD
Атмосферные нейтрино	$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	< 50	$\lesssim 10 - 100$	$\nu e\text{-ES}, \nu p\text{-ES}$ IBD, $\nu^{12}\text{C-NC}, \nu^{12}\text{C-CC}$
Вспышки сверхновых	$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$	< 50	$\sim 10^8 - 10^{10}$	$\nu e\text{-ES}, \nu p\text{-ES}$ IBD, $\nu^{12}\text{C-NC}, \nu^{12}\text{C-CC}$
DSNB	$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$	$\sim 10 - 50$	$\lesssim 10^4$	$\nu e\text{-ES}, \nu p\text{-ES}$ IBD, $\nu^{12}\text{C-NC}, \nu^{12}\text{C-CC}$
Гамма-всплески	$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$	< 50	$< 10^{10}$	$\nu e\text{-ES}, \text{IBD}$

* Не учитываются реакции $e\text{N}, e\text{O}, e\text{F}$, так как невозможно выделить их из фона в детекторе Borexino.

Таблица 1 — Классификация компонент нейтринного спектра в детекторе Borexino по возможным источникам. **Расматривается область энергий нейтрино от 1 до 50 МэВ. Особенности:** $\nu e\text{-ES}$ — упругое рассеяние нейтрино на электронах, $\nu p\text{-ES}$ — упругое рассеяние нейтрино на «свободных» протонах, IBD — обратный β -распад, $\nu^{12}\text{C-NC}$ — реакция на углероде ^{12}C через нейтральный ток, $\nu^{12}\text{C-CC}$ — реакция на углероде ^{12}C через заряженный ток.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить калибровку системы сбора данных FADC, используя для этого имеющиеся данные.
2. Выполнить калибровку с помощью радиоактивных источников.
3. Разработать новую оригинальную систему для онлайн калибровки при энергиях от 1 до ~ 50 МэВ.
4. Разработать алгоритм восстановления пространственного положения событий в детекторе по данным системы FADC. Реализовать этот способ в виде программного инструмента, который был бы встроен в имеющуюся среду обработки данных. Исследовать качество пространственной реконструкции.
5. Проверить созданные программные инструменты путём сопоставления результатов поиска антинейтринных событий в данных измерений, сделанных при помощи систем FADC и Laben.
6. Построить спектр антинейтрино, используя результаты обеих систем сбора данных. Выделить гео-нейтринный вклад. Оценить поток и вероятность нулевого гео-нейтринного сигнала.

Научная новизна

1. Коррекция энергетической шкалы детектора Wogehino была выполнена общепринятым методом наблюдения за дрейфом моноэнергетической гамма-линии от захвата нейтронов на водороде ^1H . Научная новизна заключается в разработанной автором диссертации специальной процедуре обработки экспериментальных данных, выбирающей в автоматическом режиме по форме спектра момент смены коэффициента пересчёта измеренного заряда в энергию.
2. Предложена новая методика онлайн калибровки жидкоцинтилляционных детекторов без использования радиоактивных источников в области энергий от 1 до ~ 50 МэВ.
3. На основе технологии искусственных нейронных сетей разработан и реализован способ отбора событий по их координатам для детектора со сферической геометрией и при условии большого количества ($> 10^3$) фотоумножителей, объединённых произвольным образом в группы.
4. Измерен поток гео-нейтрино в Национальной лаборатории Гран-Сассо, а гипотеза отсутствия нейтринного излучения из внутренних слоёв Земли исключена с достоверностью 5.9σ в ходе поиска гео-нейтрино.

Достоверность

Результаты измерения потока гео-нейтрино согласуются с данными, полученными ранее на детекторах Wogehino и KamLAND с меньшей статистической значимостью. Экспериментальные результаты соответствуют

теоретическим оценкам, однако, требуют уточнения (большей статистики) для построения наиболее правильной модели структуры, компонентного состава и эволюции Земли. Результаты калибровки и пространственной реконструкции событий, зарегистрированных системой FADC, сопоставлялись с аналогичными данными параллельно работающей системы Laben. Использование новых программных инструментов, созданных диссертантом, разрешалось коллаборацией Vorexino только после получения удовлетворительных результатов проверки соответствия.

Для проверки реализуемости предложенной методики онлайн калибровки выполнено Монте-Карло моделирование, которое подтвердило теоретические оценки и правильность выбора компонентов для калибровочной системы.

Практическая значимость

Подход, применённый для определения положений событий в детекторе, является универсальным и может быть использован для пространственной реконструкции событий в любых детекторах нейтрино и тёмной материи, работающих в режиме реального времени. Также разработанный алгоритм можно применять в области физики ядра и элементарных частиц для разделения событий по форме импульса.

Разработанная специальная процедура обработки экспериментальных данных для коррекции энергетической шкалы может быть использована в других нейтринных детекторах на органических жидких сцинтилляторах.

Энергетическая шкала и программа восстановления пространственного положения события в детекторе для системы сбора данных на быстрых АЦП применяются членами коллаборации Vorexino в разных анализах, а также при исследовании стабильности детектора и при мониторинге работоспособности аппаратуры. В эксперименте SOX, который будет проводиться на базе детектора Vorexino, созданное программное обеспечение планируется активно использовать.

В работе описана новая методика калибровки в реальном времени жидко-сцинтилляционных несегментированных детекторов нейтрино типа Vorexino без использования радиоактивных источников в области энергий от 1 до ~ 50 МэВ. У предложенной методики есть дополнительные практические применения:

1. Имитация реакции обратного бета-распада в детекторе Vorexino.
2. Уточнение пространственной реконструкции положения событий в детекторе Vorexino.
3. Исследование оптических свойств жидких органических сцинтилляторов.
4. Изучение эффекта наложений сцинтилляционных событий.
5. Проверка и тестирование электронных системы сбора данных жидко-сцинтилляционных детекторов.

Разработанные аппаратные средства представляют собой управляемый источник коротких ультрафиолетовых импульсов, что позволяет применять разработанную систему калибровки в аналитическом приборостроении и в медицине.

Подтверждение существования гео-нейтрино с достоверностью 5.9σ и измерение соответствующего потока частиц в Национальной лаборатории Гран-Сассо открывают новые перспективы по исследованию внутренних областей Земли. Эти результаты помогут лучше понять, как эволюционировала Земля с точки зрения геологии и геофизики, каков её компонентный состав и какова структура.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Измерен поток электронных антинейтрино из недр Земли (гео-нейтрино) в детекторе Bogexino по данным, набранным в период с декабря 2007 по март 2015. Результаты измерения исключают гипотезу отсутствия гео-нейтрино.
2. Выполнена коррекция энергетической шкалы детектора Bogexino, изменяющейся в связи с деградацией светосбора. В основу коррекции положено наблюдение за дрейфом моноэнергетической гамма-линии от захвата нейтронов на водороде ^1H . Процедура коррекции позволила дополнительно проконтролировать долговременную стабильность работы детектора Bogexino.
3. Разработан метод калибровки жидко-сцинтилляционных детекторов без использования радиоактивных источников, позволяющий построить шкалу в диапазоне энергий от 1 до ~ 50 МэВ. Метод основан на имитации сцинтилляционных сигналов от продуктов ядерных реакций в детекторе с помощью коротких ультрафиолетовых импульсов, вызывающих люминесценцию.
4. Для улучшения отношения сигнал/фон и для отбора пространственно связанных событий, обусловленных ядерными реакциями в детекторе Bogexino, разработана и применена методика, основанная на определении пространственных координат сцинтилляционных сигналов с помощью нейронных сетей.

Личный вклад

Для регистрации нейтрино и проведения исследований с использованием системы сбора данных на быстрых АЦП (FADC) детектора Bogexino автор выполнил следующие работы:

1. Осуществил энергетическую калибровку электронно-измерительного комплекса на быстрых АЦП, используя в качестве реперных точек моноэнергетические гамма-линии от захвата нейтронов на водороде ^1H и углероде ^{12}C , а также максимум бета-спектра ^{12}B .
2. Выполнил коррекцию энергетической шкалы детектора Bogexino, изменяющейся в связи с деградацией светосбора. В основу коррекции положено наблюдение за дрейфом моноэнергетической гамма-

линии от захвата нейтронов на водороде ^1H . Используя особенности процедуры коррекции, провёл мониторинг долговременной стабильности работы детектора Borexino.

3. Разработал метод калибровки детектора без использования радиоактивных источников в области энергий от 10 до ~ 50 МэВ в режиме реального времени. Калибровочная система была спроектирована и протестирована.
4. Разработал методику отбора событий в детекторе Borexino, основанную на определении пространственных координат сцинтилляционных сигналов с помощью нейронных сетей. Методика применена в гео-нейтринном анализе.

В рамках исследований гео-нейтрино и внутреннего строения Земли с помощью детектора Borexino диссертант выполнил анализ данных системы FADC, результаты которого учитывались при построении спектра антинейтрино в области энергий от 1.8 до ~ 9 МэВ. В этом спектре диссертантом выделены вклады от различных источников. Получено число зарегистрированных гео-нейтрино, оценен соответствующий поток и вероятность отсутствия нейтринного излучения из недр Земли.

Апробация работы

Материалы данной работы многократно представлялись автором и обсуждались с коллегами на регулярных совещаниях коллаборации Borexino. Получено одобрение со стороны коллаборации на использование материалов в рамках диссертации. Основные результаты работы докладывались лично автором на следующих конференциях и семинарах:

1. The Calibration System Based On the Controllable UV/visible LED Flasher for the Veto System of the DarkSide Detector. MEPhI. Moscow, Russia, October 10-14, 2016. The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics. (*Abstract ICPPA-2016*).
2. Online calibration of neutrino liquid scintillator detectors above 10 MeV. MEPhI. Moscow, Russia, October 5-10, 2015. International Conference on Particle Physics and Astrophysics. (*Abstract ICPPA-2015*).
3. Antineutrino physics in Borexino. MSU. Moscow, Russia, August 20-26, 2015. The 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. (*Presentation 17LomConf*).
4. Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте BOREXINO. ИЯИ РАН. Троицк, Россия, 19 января 2015. Доклад на семинаре ОФВЭ ИЯИ РАН (рук. Ю.Г. Куденко). (*Презентация на сайте семинара*).
5. Гео-нейтрино и исследования строения Земли. НИИЯФ МГУ. Москва, Россия, 25-26 ноября 2014. XV межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». (*Труды XV школы*).

6. Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Борексино. НИЯУ МИФИ, ОФН РАН. Москва, Россия, 17-21 ноября 2014. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» - 2014. (*Презентация ICSSNP-2014*).

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях.

Из них 3 статьи удовлетворяют требованиям ВАК

1. *Agostini M., Gromov M. B., et al.* Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts // *Astropart. Phys.* 2017. Vol. **86**. Pp. 11–17. (*Preprint 1607.05649v2*). Публикация в составе коллаборации. Издание рецензируемое и индексируется в международных базах Web of Science и Scopus.
2. *Громов М. Б.* Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Борексино // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2014. Т. **5**, № 9—10. С. 782. (*Электронная версия elibrary.ru*). Рецензируемое издание, включено в Перечень ВАК.
3. *Agostini M., Gromov M. B., et al.* Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data // *Phys. Rev. D.* 2015. Vol. **92**, № 3. P. 031101. (*Preprint 1506.04610v2*). Публикация в составе коллаборации. Издание рецензируемое и индексируется в международных базах Web of Science и Scopus.
4. *Chepurnov A. S., Gromov M. B., Shamardin A. F.* Online calibration of neutrino liquid scintillator detectors above 10 MeV // *J. Phys.: Conf. Series.* 2016. Vol. **675**, № 1. P. 012008. URL [IOP website](#). Издание индексируется в международных базах Web of Science и Scopus.
5. *Chepurnov A. S., Gromov M. B., et al.* The Calibration System Based On the Controllable UV/visible LED Flasher for the Veto System of the DarkSide Detector // *J. Phys.: Conf. Series.* 2017. Vol. **798**, № 1. P. 012118. URL [IOP website](#). Издание индексируется в международных базах Web of Science и Scopus.
6. *Громов М. Б.* Гео-нейтрино и исследования строения Земли // Труды XV межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». НИИЯФ МГУ. Москва, Россия: МГУ, 2014. С. 88—97. (*Труды XV школы*).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 173 страницы, включая 48 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 215 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, дано обоснование научной новизны, достоверности и практической значимости результатов диссертационной работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** даётся общий обзор целей эксперимента Borexino, методов регистрации нейтринного излучения, приводится общее описание устройства детектора и систем сбора данных. Также освещается вопрос фоновых условий, включающий в себя радиохимическую чистоту сцинтиллятора и конструкционных материалов, экранировку от мюонной компоненты вторичных космических лучей, удалённость от научно-исследовательских реакторов и АЭС.

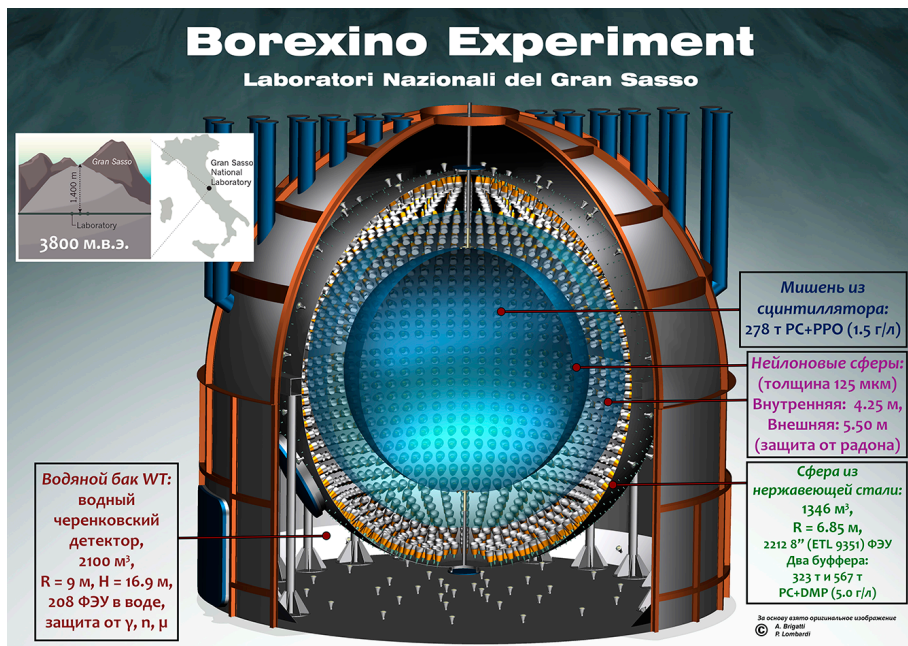


Рис. 1 — Общая схема расположения и устройства детектора Borexino.

Детектор *Borexino* расположен в Национальной лаборатории Гран-Сассо (сокр. LNGS) в зале С подземного комплекса. Скальный массив над лабораторией обеспечивает частичную защиту от космических лучей аналогичную 3800 мвэ. Экспериментальная установка представляет собой низкофоновый жидко-сцинтилляционный детектор работающий в режиме реального времени и снабжённый слоистой защитой. Общая схема детектора и его расположение представлены на рисунке 1. Установка состоит из двух основных частей: внутреннего сцинтилляционного (сокр. ID) и внешнего водного черенковского (сокр. OD) детекторов. Для обеспечения регистрации нейтрино с энергиями в несколько сотен кэВ ФЭУ работают в однофотонном режиме. Сбор данных выполняется с помощью двух электронно-измерительных комплексов, именуемых FADC и Laben. Первый комплекс позволяет регистрировать события с энергиями от 1 до ~ 50 МэВ, в то время как второй - в диапазоне энергий от ~ 200 кэВ до 20 МэВ. При 2000 работающих ФЭУ обеспечивается энергетическое разрешение $5\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$ и $8.5\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$ соответственно. Детектор *Borexino* является координатно-чувствительным. Точность определения координаты по данным системы Laben составляет $11 \text{ см}/\sqrt{E(\text{МэВ})}$, а по данным системы FADC - $20 \text{ см}/\sqrt{E(\text{МэВ})}$.

Основной целью эксперимента была спектрометрия субмэвных нейтрино от Солнца (электронных нейтрино), поток которых согласно Стандартной Солнечной Модели (сокр. ССМ) [30], [31], [32] не превышал $10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Построение и анализ спектра при небольшой статистике и малой энергии солнечных нейтрино ($\lesssim 1$ МэВ) усложнялись значительным фоном, вызванным как естественной радиоактивностью материалов, так и космическими лучами. Достигнутый беспрецедентный уровень радиохимической чистоты [10], [11], [12], [13], [14], позволил не только осуществить поставленные цели [15], [16], [17], [18], [19], но и значительно расширить программу исследований. Последняя её редакция, актуальная на начало 2017 года, включает три фазы (раздела). Первые две из них имеют два научных направления: основное и дополнительное. Основное направление нацелено на измерение потоков нейтрино от Солнца, рождающихся в разных реакциях термоядерного синтеза в центре звезды. Дополнительное направление состоит из множества разнообразных физических исследований, посвященных изучению с помощью нейтринного излучения астрофизических объектов и явлений, строения и эволюции Земли, свойств элементарных частиц. Третья фаза эксперимента нацелена на поиск стерильных нейтрино с использованием искусственно созданного радиоактивного источника $^{144}\text{Ce-}^{144}\text{Pr}$.

В рамках расширенной программы исследований значительное внимание уделено регистрации антинейтрино от различных источников. Это стало возможным благодаря удачному расположению детектора *Borexino*. Значительное среднее расстояние до АЭС, составляющее около 1170 км,

обеспечивает малое количество фоновых антинейтрино, которое оценивается в ~ 10 событий в год.

Для регистрации нейтринного излучения используются две реакции. Это реакция упругого рассеяния нейтрино на электронах рабочей среды

$$\nu_x + e^- \longrightarrow \nu_x + e^-, \text{ где } x = e, \mu, \tau, \quad (1)$$

и обратный β -распад (сокр. ОБР) для детектирования электронных антинейтрино

$$\bar{\nu}_e + p \longrightarrow n + e^+. \quad (2)$$

Несмотря на то, что в отличие от первой вторая реакция имеет энергетический порог 1.806 МэВ, она привлекательна в виду чёткой сигнатуры. Позитрон и нейтрон порождают сигналы в детекторе, связанные между собой во времени и в пространстве.

$$\text{Мгновенное событие: } e^+ + e^- \longrightarrow 2\gamma, E_{\text{МГН}} = (E_{\bar{\nu}_e} - 0.784) \text{ МэВ} \quad (3)$$

$$\text{Запаздывающее событие: } n + p \longrightarrow d + \gamma (2.22 \text{ МэВ}) \quad (4)$$

Во второй главе рассматривается процедура оффлайн калибровки детектора. Описываются как причины, побудившие автора заняться этим вопросом, выбранные пути решения, детали методик, так и достигнутые результаты.

Полученная как результат оффлайн калибровки энергетическая шкала использовалась и используется во всех физических анализах, в которых задействованы данные системы FADC. В частности, шкала применялась при отборе и исследовании гео-нейтринных сигналов и при поиске корреляций между нейтринными сигналами и гамма-всплесками. Результаты опубликованы в двух статьях [33], [34].

Результаты первичного анализа данных, предпринятого в рамках дипломной работы автора [35] с целью поиска антинейтрино от разных источников, указали на необходимость аккуратной энергетической калибровки детектора. Её отсутствие было обусловлено поздним введением системы FADC в эксплуатацию. Набор физических данных начался с декабря 2009 года, тогда как калибровочная кампания, включавшая в себя использование радиоактивных источников во внутреннем нейлоновом резервуаре для построения энергетической шкалы, закончилась летом того же года.

Под оффлайн калибровкой какого-либо детектора понимают построение или уточнение энергетической шкалы путём добавления реперных точек по итогам специального анализа данных, собранных в течение сеансов физических измерений. Также под оффлайн калибровкой подразумевают коррекцию энергетической шкалы. Необходимость такой коррекции обычно связана с тремя основным факторами:

- учётом выхода из строя фотоумножителей;

- дрейфом характеристик элементной базы электронно-измерительных комплексов из-за смены внешних условий эксплуатации (чаще всего, из-за изменения температурного режима);
- изменениями в детекторе (например, обновлением оборудования систем сбора данных).

Коррекция энергетической шкалы по набранным данным также позволяет осуществлять медленный контроль за работой детектора в целом.

При оффлайн калибровке системы FADC использовались монолинии 2.22 МэВ и 4.95 МэВ, возникающие при захвате нейтронов ядрами водорода ^1H и углерода ^{12}C соответственно, и максимум β -спектра распада космогенного ^{12}B $Q_\beta = 13.37$ МэВ. С помощью этих трёх реперных точек система была откалибрована до энергии в 15 МэВ.

Процедура калибровки была разделена на две части. Для начала проводился анализ пика от захвата нейтронов на водороде. Большая статистика (несколько сотен тысяч событий за всё время измерений) позволяла не только точно определять положение реперной точки в 2.22 МэВ, но и корректировать её положение со временем. Используя нулевую энергию как дополнительную реперную точку, строилась линейная шкала. На практике она была выражена коэффициентом пересчёта, который менялся со временем. Во второй части анализа проверялось, как сильно построенная шкала неточна на больших энергиях. Для этой цели использовались монолиния захвата нейтронов на углероде и максимум β -спектра от распада космогенного бора. Дополнительно проводилось сопоставление энергий одних и тех же событий согласно информации с обеих систем сбора данных.

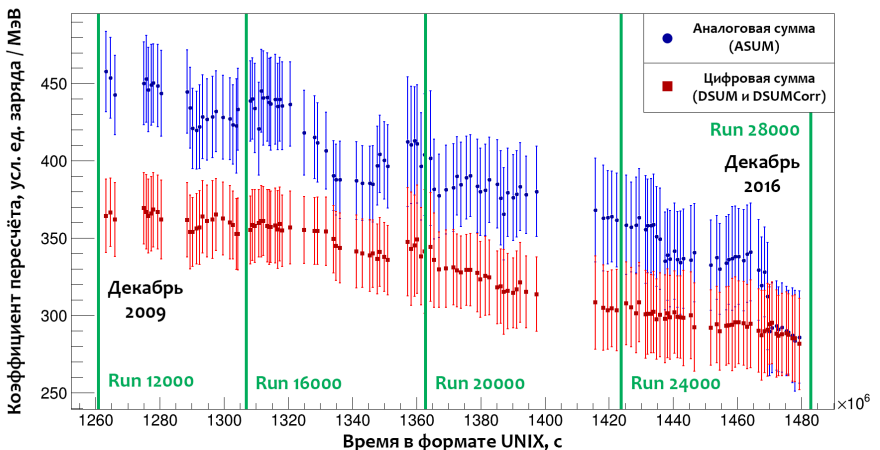


Рис. 2 — Изменение значения коэффициента пересчёта собранного заряда в энергию с течением времени.

Положение γ -линии от захвата нейтронов на водороде определялось с применением оригинального алгоритма. Для его пояснения рассмотрим поведение исследуемого спектра в зависимости от количества событий. Когда статистика маленькая, количество событий имеет тот же порядок, что и число делений по оси, где откладывается собранный заряд. Пик широкий. Далее с увеличением числа событий, он становится уже. Ситуация приобретает обратный характер, когда изменения в количестве фотоумножителей начинают отражаться в статистике, постепенно уширяя пик. Спектр аппроксимируется распределением Гаусса, стандартное отклонение которого линейно связано с шириной монолинии. Таким образом, стандартное отклонение является естественным параметром, наблюдая за изменением которого можно делать выводы о смещении спектра.

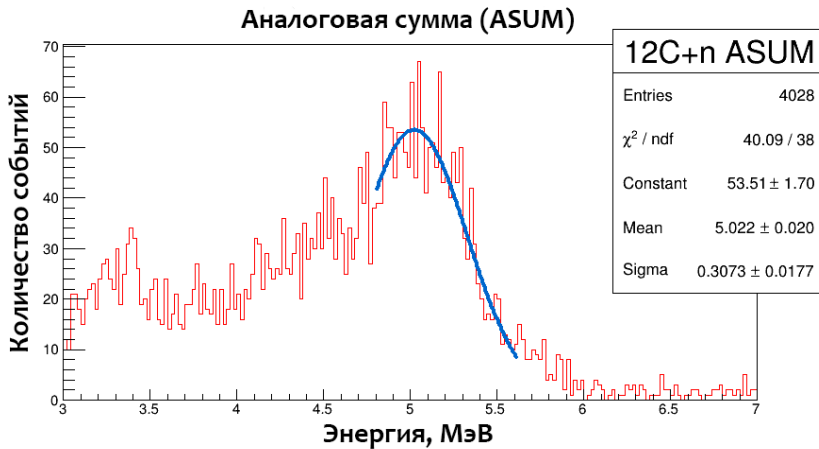


Рис. 3 — Проверка линейности энергетической шкалы по монолинии от захват нейтрона на углероде при использовании переменной ASUM.

Контроль за формой моноэнергетической линии осуществляется по следующему алгоритму. Набирается спектр. Если событий больше некоторого минимального количества n_{min} , требуемого для удачной аппроксимации, при добавлении каждого нового события выполняется фитирование пика распределением Гаусса. Получают его параметры. Если значение стандартного отклонения оказывается наименьшим из найденных ранее, то это значение запоминается как текущее наименьшее. Одновременно сохраняются и другие параметры аппроксимации, в том числе и ошибка определения стандартного отклонения. Также фиксируется номер сеанса измерений. Процедура продолжается пока не будет удовлетворено следующее неравенство, рассматриваемое как базовое правило.

$$\sigma_i > \sigma_{min} + \alpha \Delta \sigma_{min}, \quad (5)$$

где σ_i - текущее значение стандартного отклонения, σ_{min} - минимальное значение стандартного отклонения, найденное после последнего обнуления спектра, $\Delta\sigma_{min}$ - ошибка, с которой определено минимальное значения стандартного отклонения, α - параметр анализа. α подбирался вручную. Было найдено, что алгоритм хорошо работает при $\alpha = 2$. Уменьшение параметра ухудшает математическую обоснованность результата, а увеличение негативно сказывается на продолжительности вычислений и приводит к понижению точности получаемого результата.

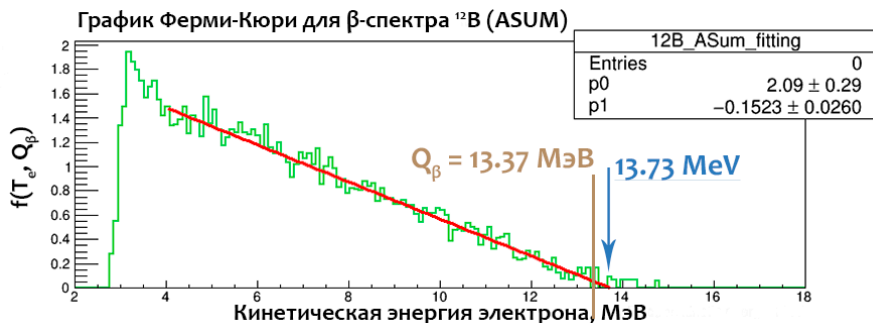


Рис. 4 — Проверка линейности энергетической шкалы по максимуму β -спектра от распада космогенного бора ^{12}B при использовании переменной ASUM.

Искомым параметром является положение пика при минимальной стандартном отклонении. Оно соответствует энергии захвата нейтрона на водороде. Соответствующее отношение задаёт коэффициент пересчёта из собранного заряда в энергию для периода с начала набора спектра до момента, когда аппроксимация имеет наименьшее стандартное отклонение. Новый спектр должен набираться с момента, в который зафиксировано начало уширения старого, т.е. с момента нахождения минимального стандартного отклонения. Из-за этого алгоритм отчасти напоминает челночный бег.

В системе FADC присутствует три переменных, которые соответствуют разным методам вычисления величины собранного заряда с ФЭУ. Они называются Аналоговой суммой (сокр. ASUM), Цифровой суммой (сокр. DSUM) и Скорректированной для больших энергий цифровой суммой (сокр. DSUMCorr). Первая используется для восстановления энергий событий до 10 МэВ. Вторая и третья представляют из себя разные версии одной переменной, предназначенной для определения энергии выше 10 МэВ. На меньших энергиях DSUM и DSUMCorr совпадают. На рисунке 2 показано смещение γ -линии за 5.5 лет работы детектора Bogexino. Ошибка измерения энергии растёт со временем. Если изначально она составля-

ла $8.5\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$, то к концу 2016 года возросла примерно на 70% до $14.5\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$.

Результат проверки линейности энергетической шкалы по монолинии от захвата нейтрона на углероде для переменной ASUM показаны на рисунке 3. Для других переменных ситуация подобная. Отклонения от построенной линейной энергетической шкалы составляют 1.6% для ASUM, 0.2% для DSUM и 0.7% для DSUMCorr. Все отклонения лежат в пределах ошибки линейной шкалы.

Максимальная энергия электронов, рождающихся в распаде космического бора ^{12}B , была найдена путём построения графика Ферми-Кюри. Как следует из рисунка 4, для ASUM отклонение равно 2.7%. Из аналогичных графиков для DSUM и DSUMCorr найдены отклонения в 4.1% и 2.5% соответственно. Эти отклонения порядка ошибки линейной шкалы для энергии 15 МэВ, что вполне допустимо.

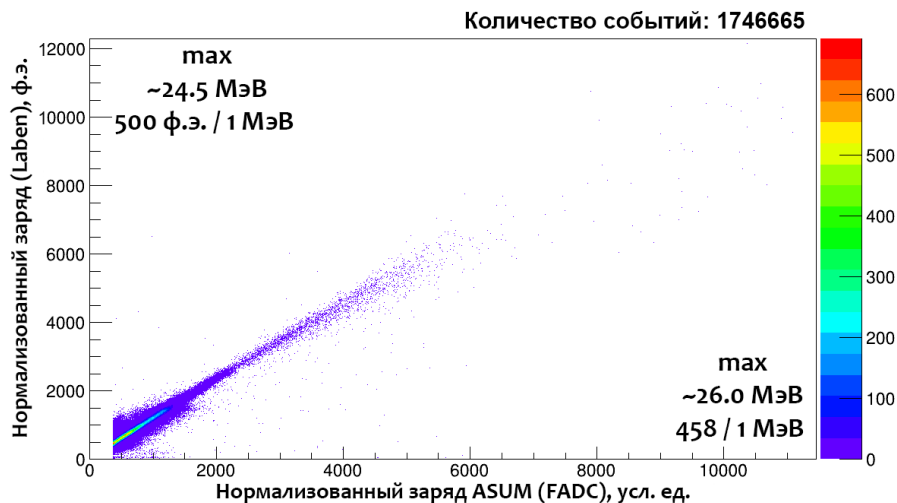


Рис. 5 — Сопоставление энергий одних и тех же физических событий в детекторе Wogehino, зарегистрированных обоими системами сбора данных.

Дополнительное сопоставление энергий событий, зарегистрированных обоими системами сбора данных, подтвердило, что до 15 МэВ для электронно-измерительного комплекса FADC применима линейная энергетическая шкала. Сравнение данных Laben и FADC представлено на рисунке 5. Приведена диаграмма только для переменной ASUM, так как для остальных двух переменных диаграммы такие же.

В третьей главе обсуждается необходимость восстановления пространственного положения событий в детекторе, описываются потенциа-

ные подходы к проблеме, реализация выбранного метода для электронно-измерительного комплекса на быстрых АЦП и полученные результаты.

Восстановление положения событий в детекторе Vortexino является необходимым элементом анализа данных. Координатная чувствительность позволяет выделять доверительный объём в мишени детектора, в котором те или иные фоны минимальны. Благодаря знанию координат удаётся отбирать события связанные в пространстве, например, при регистрации антинейтрино с помощью реакции обратного β -распада. Отклик детектора зависит от положения события.

Пространственная реконструкция по данным системы на быстрых АЦП использовалась в исследованиях, которые были опубликованы в статьях [33], [34].

Фотоэлектронные умножители во внутреннем детекторе расположены на стальной сфере. Если в некоторой точке детектора возникает сцинтилляция, то излучённые фотоны достигают фотоумножителей в разные моменты времени. Следовательно, возникает некоторое распределение срабатывания сенсоров. Анализируя это распределение можно извлечь информацию о координатах события.

В системе Laben пространственная реконструкция [36] была реализована с помощью метода максимального правдоподобия. Искался экстремум следующей функции

$$\mathcal{L}(\vec{r}_0, t_0) = \prod_i f_{q_i}(t_{f,i}) = \prod_i f_{q_i}\left(t_i - t_0 - n_{\text{эфф}} \frac{d_i(\vec{r}_0)}{c}\right), \quad (6)$$

где \vec{r}_0 определяет положение события в детекторе, t_0 - момент сцинтилляции, $f_{q_i}(t_{f,i})$ - плотность вероятности для времени пролёта, q_i есть заряд, собранный во временном окне длиной 80 нс, i - номер ФЭУ, t_i - момент регистрации первого фотоэлектрона, n - эффективный показатель преломления среды, $d_i(\vec{r}_0)$ - расстояние от события до ФЭУ с номером i . Важно отметить, что вид функции плотности вероятности f_{q_i} зависит от количества фотоэлектронных событий, зарегистрированных фотоумножителем i . Была достигнута точность определения координат $11 \text{ см}/\sqrt{E(\text{МэВ})}$.

Однако для системы сбора данных FADC метод максимального правдоподобия не применим. Система Laben обрабатывает информацию с каждого ФЭУ, в то время как комплекс на быстрых АЦП оцифровывает данные с групп фотоумножителей с числом сенсоров до 24 штук. ФЭУ объединены случайным образом. В одной группе часто оказываются сенсоры из разных участков сферы. В итоге распределение времен срабатывания ФЭУ сильно искажается. Была предпринята попытка сопоставить каждой группе сенсоров некоторый эффективный фотоумножитель и затем применить метод максимального правдоподобия. Но достигнутая точность составляла порядка 1 м, чего явно недостаточно для анализа.

Разрешить проблему получилось с применением адаптивных методов, а именно нейронных сетей. Такой подход к вопросу априори имел ограничение по точности. Так как нейронные сети предварительно тренируют, то важна представительность данных. Допустим, что необходимо получить пространственную реконструкцию с точностью определения положения события в 10 см. Для этого необходимо иметь хотя бы по одному событию-примеру в каждом кубическом объёме мишени со стороной 10 см. Учитывая полный объём сцинтиллятора во внутреннем нейлоновом резервуаре составляет 320 м^3 , для тренировки сети требуется минимум $3.2 \cdot 10^5$ событий. Более того, события должны быть точечными или треками с длиной $< 10 \text{ см}$. Выполнение всех этих условий возможно при использовании в качестве примеров для тренировки данных о пространственном положении зарегистрированных событий в системе Laben.

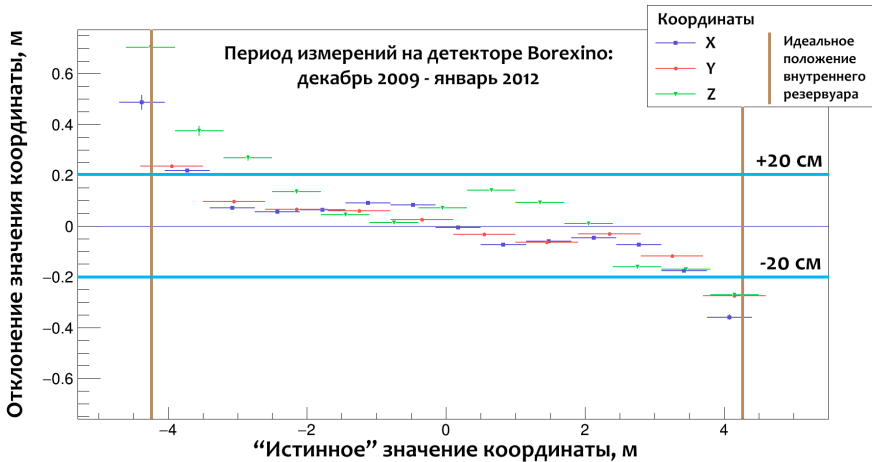


Рис. 6 — Отклонения значений, выдаваемых тренированной нейронной сетью, от «истинных» (от значений в системе Laben). Проверка выполнялась на тестовом наборе данных.

События отбирались из данных, набранных с декабря 2009 по октябрь 2015 года. Было отобрано около $1.2 \cdot 10^6$ примеров. Так как количество ФЭУ изменяется со временем, отобранные события делились на 3 части и строились 3 независимые сети. Тестовые и тренировочные наборы формировались в соотношении 1:4. Построение и использование нейронных сетей было реализовано с использованием инструментов среды ROOT (ROOT Multi-Layer Perceptron). Было использовано множество конфигураций и все реализованные в ROOT методы обучения [37], [38]. Наилучшего результата удалось достигнуть при следующих настройках:

- 182 входа соответствующие временной и амплитудной информации с 91 калана АЦП;
- 2 скрытых слоя с 27 нейронами в первом и 12 нейронами во втором;
- 3 выхода - координаты x, y, z ;
- метод обучения BFGS³ [39].

Результаты обучения для периода сбора данных с декабря 2009 по январь 2012 года представлены на рисунке 6. Для других двух периодов ситуация аналогичная. Согласно консервативной оценке ошибка определения координаты события во внутреннем нейлоном резервуаре не превышает в среднем 22 см, а по радиусу - 30 см. Для дальнейшего уточнение пространственной реконструкции требуется проведение калибровки с использованием радиоактивных и светодиодных источников. Также улучшить определение положений событий в детекторе можно следующими двумя способами:

- за счёт исключения каналов АЦП, которые обрабатывают информацию от фотоумножителей, сильно рассредоточенных по сфере;
- путём изменения в рамках каждой стойки порядка подключения суммарных сигналов к активным 8-канальным аналоговым сумматорам системы сбора данных на быстрых АЦП.

В **четвертой главе** рассматривается физический анализ данных с целью выделения гео-нейтринных событий и измерения соответствующего потока. Поясняется необходимость таких исследований, приводится обзор имеющихся экспериментальных измерений и сделанных по ним выводов, описываются перспективы изучения вопроса. Кроме того, гео-нейтринный анализ используется для проверки созданных программных инструментов обработки данных системы FADC.

Под понятием «гео-нейтрино» подразумевают нейтрино и антинейтрино, возникающие в ходе распадов радиоактивных изотопов, входящих в компонентный состав Земли.

Общий обзор изучения гео-нейтрино и строения Земли с помощью потоков этих частиц дан автором в статье [40]. Предшествующие результаты исследований на детекторе Bogexino были кратко описаны в работе [41]. Итоги представленного анализа были опубликованы в статье [33].

Исследование гео-нейтрино позволяет дать в той или иной мере ответы на четыре фундаментальных вопроса.

- Подтвердить или опровергнуть существование гео-нейтрино. Оценить поток частиц, дав или конкретное значение, или ограничение сверху.
- Объяснить наблюдаемый тепловой поток (47 ± 2)ТВт [42] из недр Земли.
- Детальнее исследовать структуру и компонентный состав Земли.
- Уточнить этапы эволюции Земли и Солнечной системы и сопутствующие этим этапам процессы.

³Broyden - Fletcher - Goldfarb - Shanno

Сопоставление результатов систем Laben и FADC	
Количество событий в Laben	78
Количество событий в FADC	46*
Количество отброшенных	1 (мюон)
Конечное число событий	77
* Различие в цифрах обусловлено разницей в периодах сбора данных	
Экспозиция Laben (учитывая эффективность)	(904 ± 44) т · г (5.5 ± 0.3) · 10 ³¹ прот. · г
Живое время Laben	1841.9 дней ≈ 5.04 лет
Живое время FADC	1072.3 дней ≈ 2.93 лет
Эффективность регистрации в Laben	(84.5 ± 1.5)%
Эффективность регистрации в FADC	(83.0 ± 2.0)%
Соотношение сигнал/шум	100

Таблица 2 — Результаты отбора антинейтринных событий.

Первое указание на существование гео-нейтрино было получено коллаборацией KamLAND в 2005 году [43]. Результат подтверждался последующими измерениями [44], [45]. Аналогичные исследования проводились в ходе эксперимента Borexino, следуя научной программе фаз I и II [20], [21]. Однако гипотеза отсутствия гео-нейтрино по итогам этих работ была исключена с достоверностью $\sim 4.5\sigma$, что не позволяло сделать окончательный вывод. Также малое количество зарегистрированных событий (десятки) было недостаточным для ответа на остальные фундаментальные вопросы, приведённые выше.

Поиск гео-нейтрино в детекторе Borexino изначально выполнялся только по данным системы Laben. При подготовке статьи [21] автор проводил частично независимый отбор потенциальных гео-нейтринных событий с использованием информации системы FADC [35]. Выявленные недостатки были учтены и максимально исправлены, о чем сказано в предыдущих главах, а также в диссертации [28]. Новый независимый анализ был направлен как на улучшение результатов гео-нейтринных исследований, так и на проверку разработанных для системы на быстрых АЦП инструментов. Такой подход был особенно привлекателен, потому что методология регистрации антинейтрино была хорошо разработана и давала возможность проверить сразу все улучшения системы FADC. Результаты анализа приведены в таблице 2. Количество найденных событий не совпадало из-за разной экспозиции. Тем не менее была продемонстрирована готовность электронно-измерительного комплекса на быстрых АЦП к использованию в исследованиях. Этот факт был принят во внимание при поиске корреляций между гамма-всплесками и нейтринными сигналами [34].

Источник	Фон* [соб./ (907 г · г)]
${}^9\text{Li} - {}^8\text{He}$ ($N_{\text{LiHe}}^{\text{ож}}, \sigma_{\text{LiHe}}$)	$0.194_{-0.089}^{+0.125}$
Случайные совпадения ($N_{\text{случ}}^{\text{ож}}, \sigma_{\text{случ}}$)	0.221 ± 0.004
Коррелированные во времени события (α, n) в сцинтилляторе ($N_{\alpha}^{\text{ож}}, \sigma_{\alpha}$)	$0.035_{-0.028}^{+0.029}$
(α, n) в буфере	< 0.51
Быстрые n (от μ в WT)	< 0.01
Быстрые n (от μ в скальных породах)	< 0.43
Незарегистрированные мюоны	0.12 ± 0.01
Спонтанное деление в ФЭУ ${}^{214}\text{Bi} - {}^{214}\text{Po}$	0.032 ± 0.003 0.009 ± 0.013
Итог	$0.78_{-0.10}^{+0.13}$ < 0.65 (Монте-Карло)
* Фон дан для полной экспозиции, использованной в анализе.	

Таблица 3 — Ожидаемый остаточный фон для антинейтринных событий после применения критериев отбора. Данные приводятся при доверительном интервале 90%.

Слоистая защита не устраняет полностью фон. Для его минимизации используют различные критерии отбора событий, которые выбираются по итогам дополнительных анализов данных. Данная работа была выполнена коллегами автора по коллаборации Wogehino, и её итоги представлены в таблице 3.

Аппроксимация спектра и выделение компонент были выполнены с помощью метода максимального правдоподобия (от англ. *Unbinned maximum likelihood estimation*) на основе данных системы Labex. Искался экстремум следующей функции

$$\begin{aligned}
& \ln \mathcal{L} (N_{\text{гео}}, N_{\text{реакт}}, S_{\text{случ}}, S_{\text{LiHe}}, S_{\alpha}) = \\
& = -N_{\text{теор}} (N_{\text{гео}}, N_{\text{реакт}}, S_{\text{случ}}, S_{\text{LiHe}}, S_{\alpha}) + \sum_{i=1}^N \ln f (Q_i, N_{\text{гео}}, N_{\text{реакт}}, S_{\text{случ}}, S_{\text{LiHe}}, S_{\alpha}) - \\
& \quad - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{S_{\text{случ}} - N_{\text{случ}}^{\text{ож}}}{\sigma_{\text{случ}}} \right)^2 + \left(\frac{S_{\text{LiHe}} - N_{\text{LiHe}}^{\text{ож}}}{\sigma_{\text{LiHe}}} \right)^2 + \left(\frac{S_{\alpha} - N_{\alpha}^{\text{ож}}}{\sigma_{\alpha}} \right)^2 \right], \quad (7)
\end{aligned}$$

где использовалось пять функций плотности вероятности:

- Монте-Карло спектр гео-нейтрино с заданной относительной распространённостью радиоактивных элементов U и Th, равной хондритовому (массовому) соотношению $m_{\text{Th}}/m_{\text{U}} \approx 3.9$;
- Монте-Карло спектр реакторных антинейтрино;
- измеренный спектр случайных совпадений;
- Монте-Карло спектр для распадов ${}^9\text{Li} - {}^8\text{He}$;

	KamLAND (2013)	Borexino (2013)	Borexino (2015)
$N_p, 10^{32}$	0.598 ± 0.013	0.109 ± 0.006	0.109 ± 0.006
$\xi, 10^{32}$ протон · год	4.90 ± 0.10	0.369 ± 0.016	0.55 ± 0.03
$N_{\text{гео}}$	116_{-27}^{+28}	14.3 ± 4.4	$23.7_{-5.7}^{+6.5} -0.6$
$G_{\text{экс}}, \text{TNU}$	$23.7_{-6.0}^{+6.2}$	38.8 ± 12.0	$43.5_{-10.4}^{+11.8} -2.4$
G^{**}, TNU	$31.5_{-4.1}^{+4.9}$	$40.3_{-5.8}^{+7.3}$	$40.3_{-5.8}^{+7.3}$
$\Phi, 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$3.4_{-0.8}^{+0.8}$	–	–
$\Phi_{\text{экс}}(\text{U}), 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	–	2.1 ± 1.5	2.7 ± 0.7
$\Phi_{\text{экс}}(\text{Th}), 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	–	2.6 ± 3.1	2.3 ± 0.6
P	$2 \cdot 10^{-6}$ ($\sim 4.2\sigma$)	$6 \cdot 10^{-6}$ ($\sim 4.5\sigma$)	$3.6 \cdot 10^{-9}$ ($\sim 5.9\sigma$)
* Результат получен автором, используя данные из статьи [45].			
** По данным статьи [46].			

Таблица 4 — Сравнение результатов по регистрации потока гео-нейтрино, полученных в детекторах KamLAND и Borexino. 1 TNU (Земная Нейтринная Единица) соответствует одному событию в мишени с 10^{32} «свободными» протонами за один год.

– Монте-Карло спектр n от реакции $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ в сцинтилляторе.

Все компоненты фона, кроме реакторных антинейтрино, рассматривались в качестве свободных параметров в пределах отклонений в 1σ от ожидаемых значений, приведённых в таблице 3. Энергетическая шкала была масштабирована на 3.5%, а доверительный объём для мгновенных событий от реакции ОБР выделялся путём отступа от поверхности внутренней нейлонной сферы 30 см⁴. Результаты аппроксимации показаны на рисунке 7 и приводятся в таблице 4.

В пятой главе предлагается и описывается методика онлайн калибровки жидко-сцинтилляционных детекторов в области энергий от 10 до ~ 50 МэВ. В основу предлагаемого нового подхода положено использование управляемого светодиодного генератора коротких ультрафиолетовых импульсов для имитации точечных сцинтилляционных сигналов в детекторе. Методика была опубликована автором вместе с коллегами в статьях [47], [48].

Необходимость новой калибровки с применением как радиоактивных источников, так и светодиодных вызвана рядом причинами:

- уточнение энергетической шкалы в области 1 – 10 МэВ;
- потенциальная калибровка на энергиях 10 – 50 МэВ;
- изучение отклика в детекторе в зависимости от пространственного положения события;

⁴В предыдущих статьях [20], [21] отступ составлял 25 см.

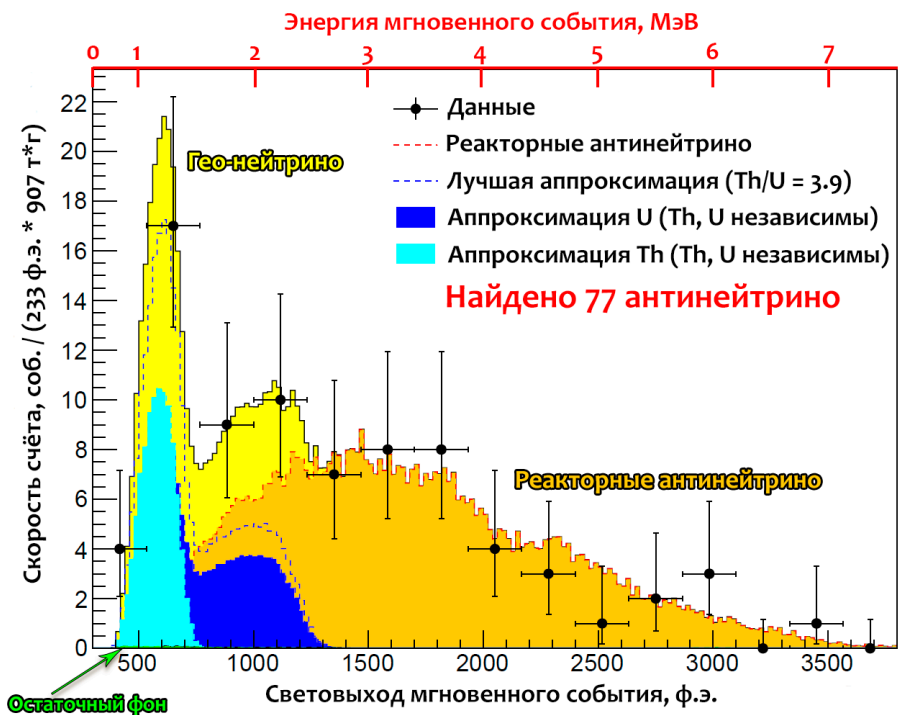


Рис. 7 — Аппроксимация спектра мгновенных событий, полученного по данным системы Laben.

- получение реперных сигналов для программы пространственной реконструкции событий в детекторе;
- получение опорных данных для алгоритмов отбора событий по форме импульса;
- настройка программного пакета для Монте-Карло моделирования;
- исследование формы нейлонового резервуара;
- изучение наложений сигналов с целью правильной их обработки;
- тестирование электронно-измерительного комплекса;
- исследование свойств сцинтиллятора⁵.

В калибровочной кампании осенью 2017 года предлагается опробовать новую методику. Общая схема предлагаемой калибровочной системы приведена на рисунке 8. Основу системы составляет специально созданный светодиодный генератор коротких импульсов на основе идей, развитых в статьях [49], [50], [51]. Генератор имеет два независимых канала, к которым подключаются светодиоды ультрафиолетового или оптического диапазонов. Управление работой каждого канала осуществляется удалённо посредством персонального компьютера через специальный модуль. Мож-

⁵В основном, оптических.

Калибровочная система на основе управляемого светодиодного генератора коротких ультрафиолетовых импульсов

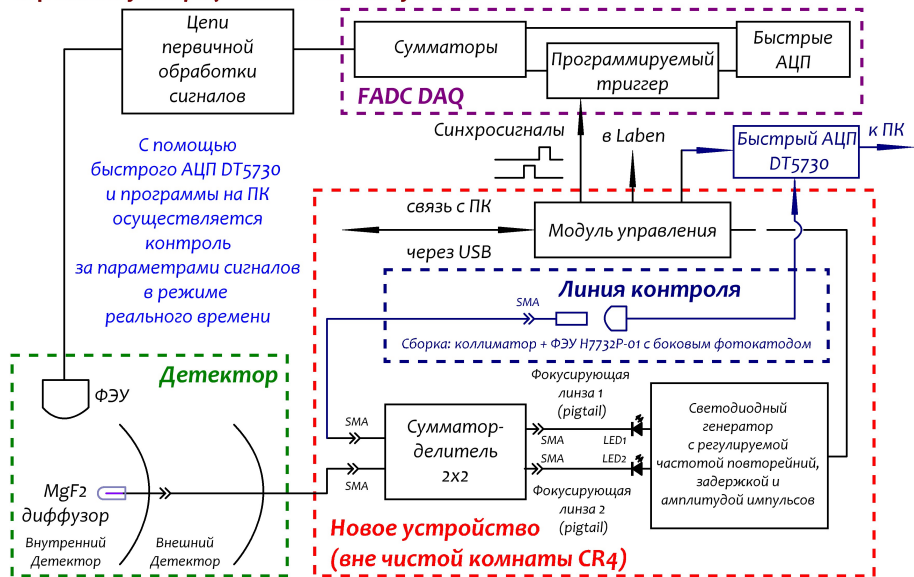


Рис. 8 — Общая схема новой светодиодной системы для энергетической калибровки детектора.

но менять частоту следования импульсов, их амплитуду, выставлять задержку между сигналами на разных каналах. Таким образом, можно имитировать различные физические процессы, например, реакцию обратного β -распада. Через подключение дополнительных плагинов к программе управления осуществляется генерация заданной последовательности импульсов.

Для имитации сигналов с энергией в несколько десятков МэВ, предполагается, что количество излучённых диффузором (рассеивателем) фотонов прямо пропорционально энергии. Моделирование показывает, что данное утверждение вполне справедливо, а 1 МэВ энергии соответствует примерно $1.1 \cdot 10^4$ УФ фотонов с $\lambda = 260$ нм при положении источника в центре детектора. Выполненные оценки показывают, что современные светодиоды с номинальной мощностью 0.1 – 0.5 мВт, работающие в импульсном режиме, даже при стократном затухании в оптическом волокне, соединительных разъёмах и диффузоре создают не менее 10^6 фотонов/МэВ, и, следовательно, подходят для использования в предлагаемой калибровочной системе.

Используется стандартная система ввода источников детектора Vorexip0 [52], к которой прикрепляется оптическое волокно в тефлоновой трубке и диффузор. Последний служит для увеличения изотропности излучения, особенно принимая во внимание, что ультрафиолет с исполь-

зующей длиной волны (265 ± 5) нм поглощается сцинтиллятором Worexino в слое с толщиной менее < 0.1 мм вокруг источника [53]. Диффузор выполнен в виде цилиндрической кварцевой колбы (~ 10 см в высоту и 0.5 см в диаметре), имеющей шарик диаметром 2 см на конце. В колбу помещён защищенный на полтора сантиметра от внешней оболочки конец оптического волокна. Пространство между внутренними стенками колбы и оптоволокомно заполнено рассеивающим УФ излучение гелем. Конструкция диффузора и его крепления к системе ввода источников разработаны так, что возникающая анизотропия излучения из-за присутствия элементов системы ввода источников локализована в пределах конуса с раствором в 20° .

Для наблюдения за стабильностью работы калибровочной системы и характером зависимости энергии УФ сигналов от поданного на светодиоды напряжения в режиме реального времени используется линия контроля мощности, реализованная на базе ФЭУ Hamamatsu H7732P-01 с боковым фотокатодом. При этом изначально линия контроля мощности была построена на основе фотодиода и зарядочувствительного трансимпедансного усилителя. Однако от такого подхода пришлось отказаться из-за технических сложностей, возникающих при юстировке системы.

Линия контроля включается в калибровочную систему при помощи оптического сумматора-делителя 2×2 . Он сначала складывает поступающие со светодиодов сигналы с учётом временных задержек, а после делит сумму на две одинаковые копии⁶. Один результирующий сигнал через оптическое волокно с диффузором на конце направляется в детектор. Другой сигнал выдаётся на линию контроля. Сигналы с ФЭУ вместе с синхроимпульсами с управляющего модуля светодиодного генератора поступают в измерительный тракт, состоящий из АЦП CAEN DT5730 и персонального компьютера. Измерительный тракт позволяет контролировать параметры сигналов в режиме реального времени. Синхроимпульсы также выдаются системе сбора данных FADC и Laben.

Калибровка выполняется по следующему алгоритму. Выполняется серия тестовых измерений с применением как радиоактивных источников, так и светодиодной калибровочной системы. Измерения проводятся для примерно $50-60$ позиций источников (опорных положений) во внутреннем детекторе. Для каждого опорного положения в ходе промежуточного оффлайн анализа строится шкала энергий до $10-11$ МэВ, исходя из полученных спектров радиоактивных источников. Далее для каждого светодиода подбираются коэффициенты ослабления сигналов для смещения, по возможности, начала зависимости энергии вспышки в детекторе от напряжения, поданного на светодиод, в область $1-3$ МэВ. Выполняется серия повторных измерений со светодиодами, чтобы подтвердить правильность

⁶Опционально предусмотрены варианты деления суммы в других отношениях для модификации диапазона энергий имитируемых событий.

выбранных коэффициентов ослабления. После этого для всех позиций в непосредственной близости от опорных положений проводят калибровку с применением радиоактивных и светодиодных источников, используя соответствующие коэффициенты ослабления. При этом имитируются события в детекторе в максимально широком диапазоне энергий. Зависимость энергии вспышки от напряжения, поданного на светодиод, отслеживается с помощью линии контроля мощности, т.е. выполняются относительные измерения. Полагается, что количество УФ фотонов, зарегистрированных линией контроля мощности, пропорционально как количеству УФ фотонов, излучённых диффузором, так и полному заряду соответствующего события в детекторе *Bohexino*. Такой подход позволяет в ходе оффлайн анализа соотнести все сигналы от светодиодной системы во внутреннем детекторе с конкретными энергиями, проведя калибровку до ~ 50 МэВ.

В заключениях приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Получен спектр антинейтрино, выделены вклады от реакторных антинейтрино и гео-нейтрино. Благодаря использованию реакции обратного β -распада, характеризующейся чёткой сигнатурой событий в жидко-сцинтилляционных детекторах, а также вследствие высокой радиохимической чистоты *Bohexino*, отношение гео-нейтринный сигнал/фон составляет 100. Этот факт сыграл ключевую роль, так как несмотря на малый объём статистических данных (найденно ~ 24 гео-нейтринных событий), гипотеза отсутствия гео-нейтрино исключена с достоверностью 5.9σ . Измерено значение потока гео-нейтрино в LNGS, равное $5.0 \pm 1.3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.
2. В гео-нейтринном анализе использовались данные обоих электронно-измерительных комплексов *Bohexino*. Использование информации, собранной системой на быстрых АЦП, стало возможным благодаря выполнению следующих работ.
 - а) Проведению энергетической калибровки системы FADC, используя в качестве реперных точек моноэнергетические гамма-линии от захвата нейтронов на водороде ^1H и углероде ^{12}C , а также максимум бета-спектра ^{12}B .
 - б) Разработке и применению метода коррекции энергетической шкалы, изменяющейся в связи с деградацией светосбора со временем. В основу метода положено наблюдения за дрейфом моноэнергетической гамма-линии от захвата нейтронов на водороде ^1H . С помощью данного метода также проведён мониторинг долговременной стабильности работы детектора внутреннего детектора и системы сбора данных на быстрых АЦП. Метод может быть применён для других жидко-сцинтилляционных нейтринных детекторов.
 - в) Разработке и применению методики, основанной на определении

пространственных координат сцинтилляционных сигналов с помощью нейронных сетей, для улучшения соотношения сигнал/фон и для отбора пространственно связанных событий, в частности, продуктов реакции обратного β -распада. Необходимость нового подхода к определению положения событий в детекторе *Bohexino* продиктована наличием в системе FADC суммирования групп сигналов с фотоумножителей, расположенных в разных участках стальной сферы внутреннего детектора и объединённых по 24 штуки или менее. Используемая методика применима для других жидко-сцинтилляционных нейтринных детекторов практически независимо от геометрического расположения ФЭУ.

Внесённые улучшения в процесс сбора и обработки данных системы на быстрых АЦП позволяют использовать эту систему для решения широкого круга задач нейтринной физики.

3. Для расширения динамического диапазона измеряемых энергий системой FADC до ~ 50 МэВ разработан метод калибровки без использования радиоактивных источников. Метод основан на имитации сцинтилляционных сигналов от продуктов ядерных реакций в детекторе *Bohexino* с помощью коротких ультрафиолетовых импульсов, вызывающих люминесценцию. Важно отметить, что данный метод безопасен для низкофоновой среды установки и персонала лаборатории, практически не требует создания дополнительной инфраструктуры и является универсальным для жидко-сцинтилляционных детекторов.

Проделанная работа помогла достоверно зарегистрировать гео-нейтринное излучение из внутренних областей Земли и расширить возможности детектора *Bohexino* по регистрации нейтрино от разных источников. Улучшения будут особенно актуальны в случае наблюдения нейтринного излучения от вспышки сверхновой.

Список литературы

1. *N. Y. Agafonova et al.* // *Astropart. Phys.* 2008. Vol. **28**, № 6. Pp. 516–522. (*Preprint* [0710.0259v1](#)).
2. *S. Fukuda et al.* // *NIMPA*. 2003. Vol. **501**, № 2–3. Pp. 418–462.
3. *J. Boger et al.* // *NIMPA*. 2000. Vol. **449**, № 1–2. Pp. 172–207. (*Preprint* [nucl-ex/9910016v2](#)).
4. *K. Eguchi et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. **90**, № 2. P. 021802. (*Preprint* [hep-ex/0212021](#)).
5. An Overview of the KamLAND 1-kiloton Liquid Scintillator / *F. Suekane et al.* // *Proceedings. KEK, Japan.* 2004. KEK-RCNP International School and mini-Workshop for Scintillating Crystals and their Applications in Particle and Nuclear Physics. Nov. 17-18, 2003. (*Preprint* [physics/0404071v2](#)).
6. JUNO Conceptual Design Report: tech. rep. / *T. Adam et al.* 09/2015. (*Preprint* [1508.07166v2](#)).
7. *F. An et al.* // *J. Phys. G.* 2016. Vol. **43**, № 3. P. 030401. (*Preprint* [1507.05613v2](#)).
8. Hyper-Kamiokande Public Design Report: tech. rep. / *K. Abe et al.*; KEK. 02/2016. No. 2016–21. Report number: ICRR-Report-701-2016-1. (*Preprint* [online version](#)).
9. *G. Alimonti et al.* // *NIMPA*. 2009. Vol. **600**, № 3. Pp. 568–593. (*Preprint* [0806.2400v1](#)).
10. *G. Alimonti et al.* // *NIMPA*. 2009. Vol. **609**, № 1. Pp. 58–78. URL [online version](#).
11. *J. Benziger et al.* // *NIMPA*. 2008. Vol. **587**, № 2–3. Pp. 277–291. (*Preprint* [0709.1503v2](#)).
12. *Marcocci S.* Rivelazione in tempo reale di neutrini solari con Borexino: Conference presentation. Incontri di Fisica delle Alte Energie 2016 (IFAE 2016). Genova (Italia). 30 Marzo – 1 Aprile 2016. URL [presentation](#).
13. *Rossi N.* The Borexino Experiment: Past, Present and Future: Conference presentation. The XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2016). London (United Kingdom). July 4–9, 2016. URL [presentation](#).
14. *Zavatarell S.* Recent solar and geo- ν results from Borexino: Conference presentation. Neutrino Oscillation Workshop 2016 (NOW 2016). Otranto (Lecce, Italy). September 4–11, 2016. URL [presentation](#).
15. *G. Bellini et al.* // *Phys. Rev. D.* 2010. Vol. **82**, № 3. P. 033006. (*Preprint* [0808.2868v3](#)).

16. *G. Bellini et al.* // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. **107**, № 14. P. 141302. (Preprint [1104.1816v2](#)).
17. *G. Bellini et al.* // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. **108**, № 5. P. 051302. (Preprint [1110.3230v1](#)).
18. *G. Bellini et al.* // Nature. 2014. Vol. **512**, № 7515. Pp. 383–386. URL [Nature website](#).
19. First Simultaneous Precision Spectroscopy of pp , ${}^7\text{Be}$, and pep Solar Neutrinos with Borexino Phase-II: tech. rep. / *M. Agostini et al.* 07/2017. (Preprint [1707.09279v1](#)).
20. *G. Bellini et al.* // Phys. Lett. B. 2010. Vol. **687**, № 4–5. Pp. 299–304. (Preprint [1003.0284v2](#)).
21. *G. Bellini et al.* // Phys. Lett. B. 2013. Vol. **722**, № 4–5. Pp. 295–300. (Preprint [1303.2571v2](#)).
22. *G. Bellini et al.* // Phys. Lett. B. 2011. Vol. **696**, № 3. Pp. 191–196. (Preprint [1010.0029v1](#)).
23. *C. Arpesella et al.* // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. **101**, № 9. P. 091302. (Preprint [0805.3843v2](#)).
24. Limiting neutrino magnetic moments with Borexino Phase-II solar neutrino data: tech. rep. / *M. Agostini et al.* 07/2017. (Preprint [1707.09355v3](#)).
25. *Gatti E., Martini F. D.* A new linear method of discrimination between elementary particles in scintillation counters // Nuclear Electronics. Vol. II / ed. by *B. Rosenbaum*. IAEA. Vienna: IAEA, 04/1962. Pp. 265–276. Proceedings of the Conference on Nuclear Electronics at Belgrade. Yugoslavia (Serbia). May 15–20, 1961. (*e-book Nuclear Electronics II*).
26. *Lukyanchenko G., Litvinovich E.* // J. Phys.: Conf. Series. 2016. Vol. **675**, № 1. P. 012037. URL [IOP website](#).
27. Система сбора данных на основе быстрых оцифровщиков формы импульса: тех. отч. / *Е. А. Литвинович и др.*; Нац. исследовательский центр «Курчатовский институт». 2013. ИАЭ—6756/2.
28. *Лукьянченко Г. А.* Экспериментальный комплекс на базе быстрых оцифровщиков формы импульса в составе детектора Бorexино для регистрации нейтринного излучения от астрофизических источников [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.16 / *Лукьянченко Георгий Александрович*. М., 2017. 114 с.
29. *G. Bellini et al.* // J. High Energy Phys. 2013. Vol. **2013**, № 8. P. 038. URL [JHEP website](#) (Preprint [1304.7721v2](#)).
30. *J. N. Bahcall et al.* // Rev. Mod. Phys. 1982. Vol. **54**, № 3. P. 767. URL [online version](#).

31. *M. Asplund et al.* // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2009. Vol. **47**, № 1. Pp. 481–522. (*Preprint* [0909.0948v1](#)).
32. *Serenelli A. M., Haxton W. C., Peña-Garay C.* // Astrophys. J. 2011. Vol. **743**, № 1. P. 24. URL [Astrophys. J. website](#) Report numbers: UCB-NPAT-11-005, NT-LBNL-11-008. (*Preprint* [1104.1639v1](#)).
33. *M. Agostini et al.* // Phys. Rev. D. 2015. Vol. **92**, № 3. P. 031101. (*Preprint* [1506.04610v2](#)).
34. *M. Agostini et al.* // Astropart. Phys. 2017. Vol. **86**. Pp. 11–17. (*Preprint* [1607.05649v2](#)).
35. *Громов М. Б.* Анализ спектра антинейтрино в детекторе BOREXINO [Текст]: дис. ... маг. 01.04.16: защищена 24.12.12 / *Громов Максим Борисович*. М., 2013. 39 с.
36. *McCarty K. B.* The Borexino Nylon Film and the Third Counting Test Facility: PhD thesis Ph.D. / *McCarty Kevin B.* USA, New Jersey, Princeton, 2006. 483 pp.
37. *Delaere C.* Designing and using Multi-Layer Perceptrons with ROOT: Workshop presentation. 2004 ROOT users workshop. URL [presentation](#).
38. *Delaere C.* TMultiLayerPerceptron: Designing and using Multi-Layer Perceptrons with ROOT. 01/2004. URL [electronic documentation](#).
39. *Fletcher R.* Practical methods of optimization. Second edition. England, Chichester: John Wiley & Sons, 1987.
40. *Громов М. Б.* Гео-нейтрино и исследования строения Земли // Труды XV межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». НИИЯФ МГУ. Москва, Россия: МГУ, 2014. С. 88—97. (*Труды XV школы*).
41. *Громов М.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. **5**, № 9—10. С. 782. (*Электронная версия* [elibrary.ru](#)).
42. *Davies J. H., Davies D. R.* // Solid Earth. 2010. Vol. **1**. Pp. 5–24. URL [Solid Earth website](#).
43. *T. Araki et al.* // Nature. 2005. Vol. **436**, № 7050. Pp. 499–503. URL [Nature website](#).
44. *A. Gando et al.* // Nature Geosci. 2011. Vol. **4**. Pp. 647–651.
45. *A. Gando et al.* // Phys. Rev. D. 2013. Vol. **88**, № 3. P. 033001. (*Preprint* [1303.4667v2](#)).
46. *M. Baldoncini et al.* // Phys. Rev. D. 2015. Vol. **91**, № 6. P. 065002. (*Preprint* [1411.6475v2](#)).
47. *Chepurinov A. S., Gromov M. B., Shamardin A. F.* // J. Phys.: Conf. Series. 2016. Vol. **675**, № 1. P. 012008. URL [IOP website](#).

48. *A. Chepurinov et al.* // J. Phys.: Conf. Series. 2017. Vol. **798**, № 1. P. 012118. URL [IOP website](#).
49. *J. S. Kapustinsky et al.* // NIMPA. 1985. Vol. **241**, № 2–3. Pp. 612–13. URL [ScienceDirect website](#).
50. *Lubsandorzhiev B. K., Vyatchin Y. E.* // JINST. 2006. Vol. **1**. T06001. URL [IOP website](#) (*Preprint* [physics/0410281v1](#)).
51. *Lubsandorzhiev B. K., Vyatchin Y. E.* Stability studies of nanosecond light sources based on blue ultra bright LEDs. 2004. *Preprint* [physics/0403018v1](#).
52. *Hardy S. E.* Measuring the ^7Be Neutrino Flux From the Sun: Calibration of the Borexino Solar Neutrino Detector: PhD thesis Doctor of Philosophy in Physics / *Hardy Steven E.* Blacksburg, Virginia: Virginia Tech. & Virginia State U., 03/2010. 435 pp. URL [online version](#).
53. *Johnson M. C.* Scintillator purification and study of light propagation in a large liquid scintillation detector: PhD thesis Ph.D. / *Johnson Michael Clinton.* USA, New Jersey, Princeton, 1998. 382 pp.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Громов Максим Борисович

РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРИНО
С ЭНЕРГИЯМИ ОТ 1 ДО 50 МЭВ
С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА BOREXINO

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 23.10.2017 г.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Формат А4/2. Усл. печ. л. 1.

Заказ № 486. Тираж 80 экз.

Типография «КОПИЦЕНТР»

119234, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 20

Тел. 8(926)168-59-93

www.autoreferatvmgu.ru

