

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.12.123

Фоменко Кирилл Александрович

ПОИСК АКСИОНОВ, РОЖДАЕМЫХ В РЕАКЦИИ $p(d, {}^3\text{He})A$
НА СОЛНЦЕ, И ЗАПРЕЩЕННЫХ ПРИНЦИПОМ ПАУЛИ ПЕРЕХОДОВ
В ЯДРАХ ${}^{12}\text{C}$ НА ДЕТЕКТОРЕ БОРЕКСИНО

01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2014

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

Научные руководители: доктор физико-математических наук
Дербин Александр Владимирович,
кандидат физико-математических наук
Смирнов Олег Юрьевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
нач. лаб. ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ
Барабаш Александр Степанович,
кандидат физико-математических наук,
зав. группой ИЯИ РАН
Копылов Анатолий Васильевич.

Ведущая организация: НИИЦ «Курчатовский Институт»

Защита состоится «__» _____ 2014 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при ОИЯИ по адресу: 141980, Дубна, ОИЯИ, Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Дзелепова, корп.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайте
http://wwwinfo.jinr.ru/dissertation/DC_dlnp.htm

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Г. А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Стандартная модель элементарных частиц и их взаимодействий (СМ), основанная на группах симметрии, хорошо описывает большинство экспериментальных результатов. Однако, к настоящему моменту в модели остается ряд нерешенных вопросов: наличие большого количества свободных параметров, преобладание вещества над антивеществом, неясная ситуация с происхождением холодной темной материи, наконец, природа осцилляций нейтрино. Эти и ряд других вопросов заставляет экспериментаторов обращать внимание на поиски физических явлений, лежащих за рамками СМ, которые могли бы дать ключ к ее дальнейшему расширению. Поиск *редких* процессов, происходящих при низких («не ускорительных») энергиях, представляет собой один из методов изучения процессов, являющихся *доминирующими* при энергиях великого объединения; таким образом, осуществляется проникновение в область энергий, заведомо невозможную для ускорительных экспериментов обозримого будущего, и чрезвычайно интересную с точки зрения расширения современных знаний о физической картине мира.

Одна из загадок СМ, не поддающаяся разрешению на протяжении долгого времени, связана с нарушением СР-симметрии в сильных взаимодействиях. Дело в том, что в лагранжиан КХД входит член, отвечающий за взаимодействие глюонных полей; он называется, в соответствии с коэффициентом, Θ -членом и является СР-нечетным. Однако, экспериментально СР-нарушение в сильных взаимодействиях до сих пор не обнаружено. В частности, верхний предел на электрический дипольный момент нейтрона приводит к ограничению $\Theta \leq 10^{-9}$, что является крайне малой величиной по сравнению с другими коэффициентами в лагранжиане КХД.

Наиболее естественное решение СР-проблемы было предложено в модели с новой глобальной киральной симметрией, спонтанное нарушение которой позволяет точно скомпенсировать СР-несохраняющий член в лагранжиане КХД. При этом спонтанное нарушение такой симметрии должно приводить к возникновению новой нейтральной псевдоскалярной частицы — аксиона. Аксион, описываемый первоначально предложенной схемой, имел достаточно жесткие предсказания на массу и константы связи, и его существование было надежно закрыто серией экспериментов. Однако, вскоре были предложены новые теоретические модели, в которых аксион имеет очень маленькую массу, слабые константы связи с веществом и большое время жизни. Такие модели служат основанием для продолжения экспериментального поиска псевдоскалярной частицы, слабо взаимодействующей с веществом. Другая причина интенсивных поисков аксионов обусловлена тем, что аксионы, вместе с классом слабо взаимодействующих массивных частиц (т.н. WIMPs — weakly interacting massive particles), являются наиболее популярными кандидатами на роль частиц, из которых состоит «темная материя» во Вселенной.

Таким образом, в настоящее время проблема экспериментального обнаружения аксиона является актуальной задачей как физики частиц, так и астрофизики.

Принцип запрета Паули (ПП), сформулированный В.Паули в 1925 г. для объяснения закономерностей периодической системы элементов и особенностей атомных спектров, является одним из наиболее фундаментальных законов природы. Однако, на основе современных теоретических представлений до сих пор нет ответа на вопрос: «с какой точностью справедлив принцип Паули?» Связано это, прежде всего, с отсутствием каких-либо «настоящих» (самосогласованных и непротиворечивых) моделей, допускающих слабое нарушение принципа Паули; такие модели, по-видимому, должны выходить за рамки квантовой теории поля. Поиск процессов с нарушением ПП является одной из принципиальных проверок границ применимости квантово-полевого подхода, лежащего в основе современных физических представлений о структуре мира.

Цель диссертационной работы.

Данная диссертация посвящена экспериментальному поиску аксионов, рождающихся в реакции $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ (5.5 МэВ) на Солнце, и запрещенных ПП переходов в ядрах ${}^{12}\text{C}$ на сверхнизкофономом детекторе Борексина.

Научная новизна.

В ходе выполнения диссертационной работы в составе экспериментальной группы Борексина проведены серии измерений общей продолжительностью 737.8 суток, выполнены калибровки энергетической шкалы и пространственного разрешения детектора, создано и модернизировано программное обеспечение для управления сбором данных и мониторинга состояния компонент детектора. Выработаны оптимальные критерии отбора данных детектора Борексина для поиска редких процессов.

Получены энергетические спектры от взаимодействия аксиона в детекторе для процессов комптоновской конверсии, аксиоэлектрического эффекта, конверсии аксиона в фотон в поле ядра и распада на 2 γ -кванта в области масс аксиона $m_A \leq 1$ МэВ, вычислены энергии связи для непаулевских ядер с тремя протонами или тремя нейтронами на S -оболочке. Проведено моделирование методом Монте-Карло функций отклика детектора для всех четырех каналов взаимодействия аксиона и событий непаулевских переходов в ядре ${}^{12}\text{C}$ с излучением γ , p , n и β^\pm .

В результате, получены новые модельно-независимые ограничения на константы связи аксиона с электроном, фотоном и нуклоном для масс аксиона $m_A < 1$ МэВ и новые ограничения на величины аксион-электронной и аксион-фотонной констант связи как функций массы аксиона. Получены новые, наиболее сильные на настоящий момент пределы на вероятности непаулевских переходов нуклонов с $1P_{3/2}$ -оболочки на $1S_{1/2}$ -оболочку в ядрах ${}^{12}\text{C}$ с испусканием γ -квантов, n -, p - и β^\pm -частиц, позволяющие установить новые верхние пределы на относительные интенсивности непаулевских и нормаль-

ных ядерных, электромагнитных и слабых переходов.

Практическая ценность.

Предложенные в работе новые подходы к анализу результатов, полученных с жидкостинцилляционным детектором большого объема, могут использоваться при проведении фундаментальных исследований, связанных с регистрацией редких реакций и распадов на существующих и планирующихся нейтринных детекторах.

Разработанные в диссертации пакеты программ могут использоваться для различных целей. В частности, реализованные подходы кросс-платформенного программирования и методика быстрого переноса приложений с систем реального времени (Linux) на пользовательские терминалы под управлением MS Windows могут быть полезны для широкого круга экспериментов, использующих различные типы рабочих станций.

Положения, выносимые на защиту.

1. Рассчитан поток аксионов с энергией 5.5 МэВ, рождающихся в реакции $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ на Солнце. Получены энергетические спектры для процессов комптоновской конверсии, аксиоэлектрического эффекта, конверсии аксиона в фотон в поле ядра и распада на 2 γ -кванта в детекторе Борексина. Проведено моделирование функций отклика детектора для всех четырех каналов методом Монте-Карло.
2. Вычислены энергии связи для непаулевских состояний ядер с тремя протонами или тремя нейтронами на S -оболочке, выделены реакции, регистрация которых возможна на детекторе Борексина: ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\tilde{\text{C}} + \gamma$, ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\tilde{\text{B}} + p$, ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\tilde{\text{C}} + n$, ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\tilde{\text{N}} + e^- + \bar{\nu}$ и ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\tilde{\text{B}} + e^+ + \nu$. Получены функции отклика детектора для вышеперечисленных непаулевских переходов (с излучением γ -квантов и p -, n - и β^\pm -частиц) путем моделирования в пакете Geant4.
3. В составе экспериментальной группы Борексина проведены серии измерений общей продолжительностью 737.8 суток, выполнены калибровки энергетической шкалы и пространственного разрешения детектора. Создано и модернизировано программное обеспечение для автоматизированного управления сбором данных и мониторинга состояния компонент детектора Борексина. Разработаны и запущены система выявления неисправностей каналов ФЭУ и модуль вывода информации для системы управления электроникой.
4. Установлены оптимальные критерии отбора данных при поиске сигналов, вызванных взаимодействием аксионов. Проведена математическая обработка полученных спектров, заключавшаяся в поиске пика с энергией 5.5 МэВ от реакции $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ на Солнце. Получены новые модельно-независимые ограничения на константы связи аксиона с электроном g_{Ae} , фотоном $g_{A\gamma}$ и нуклонами g_{AN} : $|g_{Ae} \times g_{3AN}| \leq 5.5 \times 10^{-13}$

и $|g_{A\gamma} \times g_{3AN}| \leq 4.6 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$ для массы аксиона $m_A < 1 \text{ МэВ}$ (90% у.д.). Получены новые ограничения на константы связи g_{Ae} и $g_{A\gamma}$ как функций массы аксиона в модели адронного аксиона: $|g_{Ae} \times m_A| \leq 2.0 \times 10^{-5} \text{ эВ}$ и $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 1.7 \times 10^{-12}$ (90% у.д.). Данные результаты исключают большую область возможных значений констант связи $g_{Ae} \in (10^{-11} \dots 10^{-9})$ и $g_{A\gamma} \in (2 \times 10^{-14} \dots 10^{-7}) \text{ ГэВ}^{-1}$ и масс аксиона $m_A \in (0.01 \dots 1) \text{ МэВ}$.

5. Выполнен анализ экспериментальных данных с целью поиска сигнала от непаулевских переходов в ядрах ^{12}C . Получены новые, наиболее строгие на настоящий момент, пределы на вероятности непаулевских переходов нуклонов с $1P_{3/2}$ -оболочки на $1S_{1/2}$ -оболочку в ядрах ^{12}C с испусканием γ , n , p и β^\pm -частиц: $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{C}} + \gamma) \geq 5.0 \times 10^{31}$ лет, $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{B}} + p) \geq 8.9 \times 10^{29}$ лет, $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{C}} + n) \geq 3.4 \times 10^{30}$ лет, $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{N}} + e^- + \bar{\nu}) \geq 3.1 \times 10^{30}$ лет и $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{B}} + e^+ + \nu) \geq 2.1 \times 10^{30}$ лет (все для 90% у.д.). На основании полученных пределов на время жизни непаулевских переходов установлены новые верхние ограничения на относительные интенсивности непаулевских и нормальных переходов: $\delta_\gamma^2 \leq 2.2 \cdot 10^{-57}$, $\delta_N^2 \leq 4.1 \cdot 10^{-60}$ и $\delta_\beta^2 \leq 2.1 \cdot 10^{-35}$ (90% у.д.).

Личный вклад автора.

Все приведенные результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация.

Основные положения диссертационной работы докладывались автором на международных конференциях «BUE-CTP Conference on Neutrino Physics in the LHC Era» (Luxor, Египет, 2009), «15 Ломоносовская Конференция по физике элементарных частиц» (Москва, 2011), «CTP: Speakable in quantum mechanics: atomic, nuclear and subnuclear physics tests» (Trento, Италия, 2011), на сессии отделения физических наук РАН (Москва, 2009), на научных семинарах Национальной лаборатории Гран-Сассо (LNGS, Италия, 2009-2012) и Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований (Дубна, 2009-2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы, из них 4 в соавторстве, 3 в изданиях по перечню ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список использованной литературы содержит 181 наименование. Текст диссертации содержит 144 страницы машинописного текста, включая 43 рисунка и 8 таблиц.

Содержание работы

Во введении дано краткое описание основных причин введения в теорию и последующего экспериментального поиска нейтральной псевдоскалярной частицы — аксиона, современного положения Принципа запрета Паули

в физике и роли возможного экспериментального открытия его нарушения. Сформулированы цели работы, изложена структура диссертации.

Глава 1 представляет собой обзор свойств аксиона в современных моделях и основных экспериментальных результатов по его поиску.

В первом разделе рассмотрены основные теоретические положения — от появления аксиона в теории до современных моделей, перечислены возможные каналы регистрации аксиона.

Во втором разделе подробно рассматривается взаимодействие аксиона через константу связи с фотоном $g_{A\gamma}$: распад аксиона на два фотона $A \rightarrow 2\gamma$ и конверсия аксиона в фотон в поле ядра $A + N(A,Z) \rightarrow \gamma + N(A,Z)$ (конверсия Примакова). Приведены явные выражения для константы связи $g_{A\gamma}$ как функции параметра нарушения симметрии Пиччеи-Квина f_A , времени жизни аксиона относительно распада на два фотона, интегрального сечения конверсии аксиона в фотон в поле ядра, а также оценки значений этих величин при некоторых значениях параметров.

В третьем разделе рассмотрено взаимодействие аксиона через константу связи с электроном g_{Ae} : конверсия аксиона в фотон $A + e \rightarrow \gamma + e$ (комптоновская конверсия) и аксио-электрический эффект $A + e + Z \rightarrow e + Z$. Приведены выражения для константы связи g_{Ae} как функции массы аксиона в DFSZ и KSVZ моделях, дифференциального и интегрального сечений аксион-комптоновской конверсии, интегрального сечения аксио-электрического эффекта. Сделаны оценки значений данных выражений для ряда значений входящих в них параметров.

В четвертом разделе рассматривается взаимодействие аксиона с нуклонами, определяющееся константой связи g_{AN} . Приведены оценки значений изоскалярной g_{0AN} и изовекторной g_{3AN} частей константы g_{AN} , достаточно хорошо согласующиеся в DFSZ и KSVZ моделях, дано выражение для относительной вероятности ядерного перехода с излучением аксиона (w_A) к вероятности магнитного перехода (w_γ).

Раздел пятый посвящен обзору экспериментальных ограничений на параметры аксионных моделей. Представлены первоначальные эксперименты по поиску «стандартного» аксиона, надежно закрывшие его существование, и более поздние эксперименты различных типов по поиску аксиона со слабым взаимодействием с веществом («невидимого»): эксперименты по поиску конверсии аксиона в фотон (и обратно) в магнитном поле с использованием резонаторов, «гелиоскопов», твердотельных детекторов, интенсивных лазерных пучков в качестве источника фотонов, и эксперименты по поиску пропавшего γ -кванта в ядерных магнитных переходах (с излучением аксиона вместо фотона).

Также обсуждаются астрофизические ограничения, возникающие из параметров зарегистрированной вспышки Сверхновой (SN1987A), времени зажигания гелия звезд шаровых звездных скоплений — красных гигантов и звезд горизонтальной ветви, теории горячей темной материи (предел ГТМ),

из данных по поглощению α -линий Лаймана межгалактическими газовыми облаками и сценариев инфляционного и струйного образования аксионов как части холодной темной материи.

В заключительном разделе первой главы подробно обсуждаются механизмы возможного возникновения аксионов на Солнце, а также результаты по поиску аксионов от реакций « pp »-цепочки и цикла CNO, полученные с помощью HPGe-детектора и на прототипе детектора Борексина — STF.

Вторая глава посвящена обзору попыток построения теорий с возможностью малого нарушения Принципа Паули (ПП) и экспериментальных подходов для поиска этого нарушения.

В первом разделе описывается эволюция теоретических представлений о месте и роли ПП в физике, начиная с работ самого Паули, Дирака и Ферми, и заканчивая моделями Игнатьева-Кузьмина, Окуня и Гринберга-Мохapatры. Показано, что непротиворечивой теории, позволяющей ответить вопросы:

- возможно ли описать нарушение ПП как малый эффект,
- каковы параметры, количественно характеризующие степень нарушения ПП,
- каковы наблюдаемые экспериментальные проявления малого нарушения ПП, следующие из теории

на настоящий момент не существует, а результаты экспериментов по поиску нарушения ПП представляются как пределы на время жизни атомов или ядер относительно запрещенных переходов, или как пределы на отношение скоростей нормальных и непаулевских переходов.

Во втором разделе представлены экспериментальные исследования, нацеленные на две основные возможности для проверки ПП: поиск атомов и ядер, уже находящихся в непаулевских состояниях и поиск излучения, сопровождающего непаулевские переходы в атомах и ядрах. Перечислены эксперименты и их результаты, начиная от пионерских работ Голдхабера и Шарф-Голдхабер по распаду электрона, Логана и Любичича по поиску непаулевских переходов в нуклонах и ядрах, Новикова и Поманского по поиску аномальных атомов, вплоть до современных данных.

Глава третья посвящена описанию детектора Борексина.

В первом разделе дано общее описание детектора, особенностей его конструкции, основанной на концепции последовательной защиты, основных компонент и детектирующих объемов, окружающих фоновых условий, а также класса решаемых задач.

Во втором разделе подробно рассматривается методика регистрации событий в жидкосцинтиляционном детекторе. Перечислены виды излучений и методы их регистрации, особенности нелинейного отклика детектора в области низких энергий, обусловленные ионизационным гашением. Приведена

таблица значений и пределов на содержание примесей радиоактивных изотопов в сцинтилляторе Борексино, характеризующая уникальную особенность эксперимента — высочайшую степень очистки элементов детектора от примесей элементов, дающих вклад в фон естественной радиоактивности.

Рассмотрены частотные спектры излучения компонент сцинтиллятора — псевдокумола и сместителя спектра, временные спектры сцинтиллятора, полученные на тестовой установке, а также параметры переноса сцинтилляционного света в объеме детектора. Описываются методы идентификации частиц по форме временного импульса, активно используемые в анализе данных: метод «tail-to-total» и фильтр Гатти.

Третий раздел посвящен методам изучения пространственного и энергетического разрешений детектора. Описывается серия калибровочных измерений, выполненных с помощью конструктивно предусмотренных приспособлений для размещения внутри и вне активного сцинтилляционного объема детектора радиоактивных источников малой интенсивности. Приводятся результаты: координатных измерений для 182 размещений источника ^{222}Rn и полученная зависимость разрешения координаты события от энергии; измерений для определения энергетического разрешения детектора с источником $^{241}\text{Am}^9\text{Be}$ и полученное соответствие зарядовой и энергетической шкал в области энергий выше 2 МэВ, разрешение по энергии как функция энергии, найденное по ширинам калибровочных пиков и параметры аппроксимирующей линейной зависимости; измерений вклада внешнего фона с γ источником ^{228}Th , размещавшимся во внешней части сцинтилляционного объема детектора и параметры аппроксимирующей эмпирической кривой.

В заключительном разделе описываются электронный и программный интерфейсы сбора и обработки данных, в частности, назначение и реализованная функциональность программы мониторинга работы каналов электроники и фотоумножителей (dbMon).

В **четвертой главе** представлен анализ данных по поиску аксионов, рождающихся в реакции $p(d, {}^3\text{He})\text{A}$ на Солнце.

В первом разделе проводится вычисление ожидаемого потока солнечных аксионов на основании данных о величине потока pp -нейтрино. Коэффициент пропорциональности между двумя этими потоками определяется изовекторной частью g_{3AN} константы связи g_{AN} , входящей в выражение для отношения w_A/w_γ между вероятностями ядерного M1-перехода с испусканием аксиона (w_A) и с испусканием γ -кванта:

$$\frac{w_A}{w_\gamma} = \frac{\chi}{2\pi\alpha} \left[\frac{g_{3AN}}{\mu_3} \right]^2 \left(\frac{p_A}{p_\gamma} \right)^3 = 0.54(g_{3AN})^2 \left(\frac{p_A}{p_\gamma} \right)^3$$

где p_γ и p_A — импульсы фотона и аксиона, $\alpha \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры, $\mu_3 \approx 4.73$ — изовекторный ядерный магнитный момент, χ — параметр, зависящий от матричного элемента перехода. Таким образом,

ожидаемый поток аксионов (на поверхности Земли) равен:

$$\Phi_{A0} = \Phi_{\nu pp} \left(\frac{w_A}{w_\gamma} \right) = 3.23 \times 10^{10} (g_{3AN})^2 (p_A/p_\gamma)^3,$$

где $\Phi_{\nu pp} = 6.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ — поток pp -нейтрино.

Также обсуждается влияние прохождения аксионного потока через вещество Солнца и удаленности источника и детектора. Оцениваются ограничения, возникающие из этих двух факторов, на величины констант связи: требование выхода аксионного потока за пределы солнечной короны ограничивает возможные для измерения в земных экспериментах значения констант взаимодействия на уровне $g_{AN} < 10^{-3}$, $g_{A\gamma} < 10^{-4} \text{ ГэВ}^{-1}$, $g_{Ae} < 10^{-6}$ при $m_A < 2m_e$ и $g_{Ae} < (10^{-12} - 10^{-11})$ при $2m_e < m_A < 5.5 \text{ МэВ}$.

Во втором разделе описывается процедура нахождения функций отклика детектора для каналов комптоновской конверсии, аксиоэлектрического эффекта, конверсии аксиона в фотон в поле ядра и распада на 2 γ -кванта, полученных при помощи Монте-Карло моделирования. Программный комплекс g4bx моделирования детектора Борексина основан на пакете GEANT4 и учитывает эффекты ионизационного гашения в сцинтилляторе, а также нелинейную зависимость светосбора от координаты события. Особое внимание уделено процессам возбуждения и распространения (поглощения, переизлучения и рассеяния) сцинтилляционного света. Полученные энергетические спектры для всего активного объема и для центральной области детектора после отборов, аналогичных примененным для данных, показаны на рис. 1. Признаком аксионного взаимодействия в детекторе для все четырех рассматриваемых каналов является пик вблизи ~ 2600 фотоэлектронов.

Ответные функции подгонялись гауссовыми распределениями со свободными средним и разрешением. Результаты подгонки, переведенные в электронвольты, а также эффективности регистрации во внутреннем объеме детектора, приведены в таблице 1.

Канал	Позиция пика, E_{MC} , МэВ	Разрешение пика, σ , МэВ	Эффективность регистрации, ϵ
Аксиоэл. эф.	5.595	0.140	0.315
Компт. конв.	5.467	0.140	0.358
Примак. конв.	5.446	0.144	0.368
Распад на 2γ	5.290	0.141	0.350

Таблица 1: Положение и разрешение пиков Монте-Карло, а также эффективность регистрации в доверительном объеме для каналов аксионного взаимодействия.

В третьем разделе детально описан анализ данных, в частности, методы идентификации фоновых событий от основных источников: космических мюонов, нейтронов, радиоактивных изотопов с временами распада от десятых

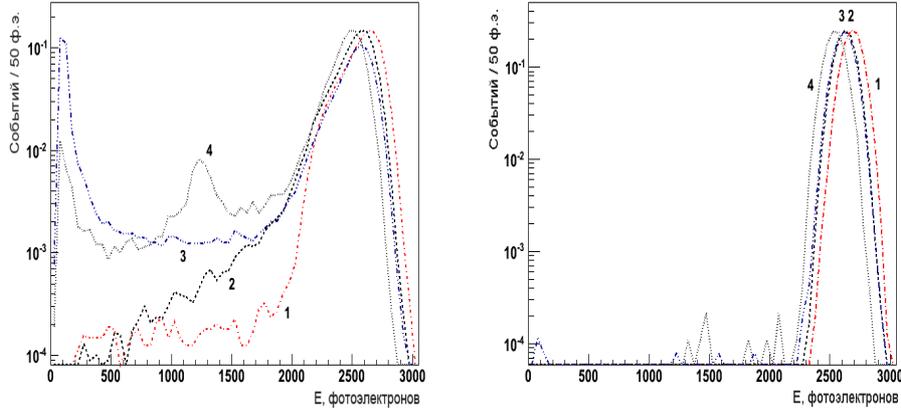


Рис. 1: Функции отклика детектора на каналы взаимодействия аксиона во всем ВО (слева) и в ДО (справа): (1) – аксиоэлектрический эффект; (2) – комптоновская конверсия; (3) – примаковская конверсия; (4) – распад на 2 γ -кванта.

долей секунд до десятков секунд, а также α -подобных событий в сцинтилляторе.

Эффективность комбинированного мюонного триггера Борексина, состоящего из внешнего черенковского вето-детектора и программно определяемого (на основе разделения сигналов по форме импульса) триггера во внутреннем активном объеме, лучше или равна 99.992%. Абсолютная величина мюонного потока, не идентифицируемого комплексным мюонным вето, составляет $(4.5 \pm 0.9) \times 10^{-4}$ мюона/(100 т.д).

Захват нейтрона водородом ($\sigma = 0.33$ барн) или ядром ^{12}C ($\sigma = 0.003$ барн) в сцинтилляторе сопровождается характерным монохроматическим γ -квантом с энергией 2.2 МэВ или 4.9 МэВ, соответственно. Исключение событий во временном окне 2 мс ($\sim 8\tau_n$) после каждого мюона, пересекшего детектор, позволяет подавить фоновые события от рассеяния, термализации и поглощения космогенных нейтронов, в том числе, образованных за пределами активного объема.

Фоновые события от короткоживущих ($\tau < 2$ с) изотопов — ^{12}B , ^8He , ^9C , ^9Li , ^8B , ^6He и ^8Li — могут быть подавлены введением мертвого времени величиной 6.5 с после каждого мюона во внутреннем объеме, что соответствует более чем 5 временам жизни ^8Li ($\tau = 1.21$ с). Остаточный фоновый счет, обусловленный короткоживущими космогенными элементами, составляет $(1.7 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ события/(100 т.д) в интервале энергий больше 3 МэВ. Граничная энергия β -спектра ^{10}C равна 3.6 МэВ, что, согласно полученным функциям отклика, значительно ниже интервала для поиска пика от

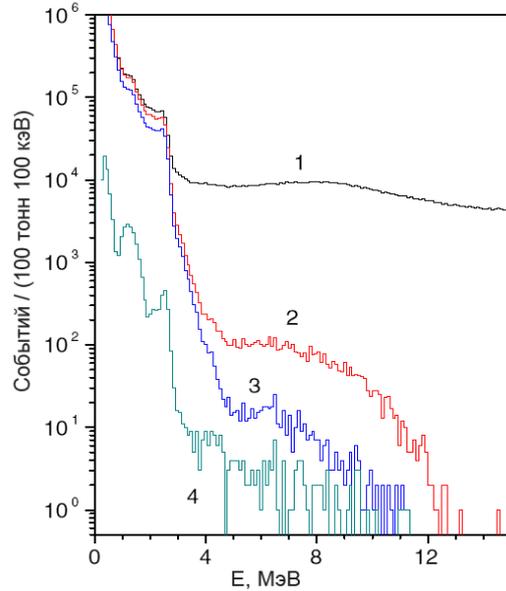


Рис. 2: Энергетический спектр событий и эффекты отбора. Сверху вниз: (1) исходный спектр, вычтены коррелированные во временном интервале 1.25 мс группы событий; (2) исключены мюонные события и события в интервале 2 мс после каждого мюона; (3) исключены события в интервале 6.5 с после каждого мюона, прошедшего внутри активного объема; (4) события внутри доверительного объема с отрицательным значением переменной Гатти.

каналов взаимодействия аксиона в детекторе. Единственным из долгоживущих космогенных изотопов, дающим вклад в фоновый счет в интересующей энергетической области, является ^{11}Be ($Q = 11.5$ МэВ). Вклад от распадов данного изотопа был учтен в подгоночной функции.

Экспериментальные энергетические спектры событий Борексино в диапазоне энергий 1 – 15 МэВ за период в 737.8 дней набора данных показаны на рис. 2. Кривая (1) соответствует исходному спектру, из которого вычтены группы коррелированных событий во временном интервале 1.25 мс, что убирает, в основном, ^{214}Bi - ^{214}Po совпадения из цепочки ^{238}U . Спектр (2) получен после вычитания всех мюонных событий, а также событий в интервале 2 мс после каждого мюона для подавления фона от событий захвата космогенных нейтронов. Спектр (3) получен из (2) дополнительным вычитанием событий во временном окне 6.5 с после каждого мюона, прошедшего в активный объем детектора, что позволяет подавить фон от распадов короткоживущих космогенных изотопов. Вычитание вводит 202.2 дня общего мертвого времени, уменьшая время экспозиции до 535.6 дней. Кривая (4) соответствует со-

Канал, аббревиатура	Компт. к. СС	Акс. эфф. АЕ	$A \rightarrow 2\gamma$ ДС	Примак. к. РС
S^{lim} , 68(90)% у.д.	3.8(6.9)	3.4(6.5)	4.8(8.4)	3.8(6.9)

Таблица 2: Верхние пределы на количество зарегистрированных детектором Борексина за 536 дней набора данных аксионов, на 68(90)% уровне достоверности.

бытиям в центральной, программно выделяемой области детектора радиуса 3.021 м, максимально защищенной от внешнего радиационного фона. Дополнительно, применен отбор на основе разделения событий по форме импульса — фильтру Гатти.

Четвертый раздел описывает процедуру подгонки экспериментального спектра. Финальный энергетический спектр событий Борексина (кривая (4), рис. 2) в области энергий от 3 до 8.5 МэВ описывался модельной функцией, состоящей из суммы экспоненты, отвечающей за вклад от непрерывного фона, и гауссиана, отвечающего за вклад от искомого пика:

$$N^{th}(E) = a + b \times e^{-cE} + S/(\sqrt{2\pi}\sigma) \times e^{-(E_{MC}-E)^2/(2\sigma^2)},$$

где E_{MC} и σ — Монте-Карло значения энергии центра и разрешения для искомого пика (таблица 1), a , b и c — подгоночные параметры, описывающие фон, и S — интенсивность искомого пика.

Число событий в аксионном пике S находилось подгонкой по методу максимального правдоподобия, с функцией правдоподобия, образованной в предположении Пуассоновского распределения числа событий в каждом бине экспериментального распределения:

$$L = \prod_i \frac{e^{N_i^{th}} (N_i^{th})^{N_i^{exp}}}{N_i^{exp}!},$$

где $N_i^{th}(E)$ и $N_i^{exp}(E)$ — теоретическое (модельное) и экспериментальное количество событий в i бине, соответственно. При подгонке разрешение пика σ было зафиксировано на значении из Монте-Карло, параметры a , b и c были свободными параметрами, параметр E_0 центра пика варьировался вблизи $E_{MC} \pm 30$ кэВ с гауссовой весовой функцией для учета неопределенности в калибровке энергетической шкалы. Число степеней свободы в диапазоне интервала подгонки 3.2 – 8.4 МэВ равнялось 46.

Верхний предел на число событий в аксионном пике S^{lim} для каждого канала находился путем построения профиля функции правдоподобия $L^{max}(S)$, где $L^{max}(S)$ отвечает максимуму L при подгонке спектра с фиксированным значением S , фиксированным σ , свободными параметрами a , b и c и значением E , варьируемым около $E_{MC} \pm 30$ кэВ. Для нахождения вероятности P_S , соответствующей значению $\chi^2_{P_S}$ для каждого S из профайла,

проводилось Монте-Карло моделирование с многократным (100000) розыгрышем событий числом $N = N^{exp}$ по подгоночной функции с фиксированными значениями параметров, полученных из результатов подгонки. Значения S^{lim} при $P_S = 0.68$ и $P_S = 0.9$ для каждого канала приведены в таблице 2.

Результаты по полученным ограничениям на величины аксионного потока и константы связи g_{AN} , g_{Ae} , $g_{A\gamma}$ приведены в пятом разделе. Ограничения на число событий с энергией 5.5 МэВ дают прямые модельно-независимые верхние пределы на значения произведений аксионного потока от Солнца на сечения взаимодействия аксиона с электронами, протонами и атомами углерода:

$$S = \Phi_A \sigma_{A-e,p,C} N_{e,p,C} T \epsilon \leq S^{lim},$$

где $N_{e,p,C}$ — число электронов, протонов или атомов углерода в мишени, T — время измерения и ϵ — эффективность регистрации детектора. Пределы на интенсивности взаимодействия для каждого канала равны:

$$\begin{aligned} \Phi_A \sigma_{A-e} &\leq 4.5^{-39} \text{с}^{-1}, \\ \Phi_A \sigma_{A-p} &\leq 2.5^{-38} \text{с}^{-1}, \\ \Phi_A \sigma_{A-C} &\leq 3.3^{-38} \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

Экспериментальный предел на S_{CC}^{lim} может быть использован для установления верхнего ограничения на произведение констант $|g_{Ae} \times g_{zAN}|$ как функции массы аксиона m_A : при $p_A/p_\gamma \simeq 1$ и $m_A \leq 1$ МэВ

$$|g_{Ae} \times g_{zAN}| \leq 5.5 \times 10^{13} \text{ (90\% у.д.)}.$$

Зависимость произведения $|g_{Ae} \times g_{zAN}|$ от m_A чисто кинематическая; таким образом, полученное ограничение модельно-независимо и верно для любой псевдоскалярной частицы. Необходимо подчеркнуть, однако, что полученный результат ограничен условиями, накладываемыми требованием возможности выхода аксионов из Солнца: $g_{Ae} < 10^{-6}$, $g_{A\gamma} < 10^{-4}$ ГэВ⁻¹ и $g_{AN} < 10^{-3}$. На рис. 3 приведены полученные результаты (кривая 1) в сравнении с другими экспериментами. В рамках модели адронного (KSVZ) аксиона константа g_{zAN} может быть связана с массой аксиона, что позволяет получить ограничения на величину константы g_{Ae} как функции аксионной массы: при условии $p_A/p_\gamma \simeq 1$

$$|g_{Ae} \times m_A| \leq 2.0 \times 10^{-5} \text{ эВ (90\% у.д.)}, \quad (1)$$

где m_A выражена в эВ. Для $m_A = 1$ МэВ данное ограничение соответствует $g_{Ae} \leq 2.0 \times 10^{-11}$.

Ограничение на произведение констант $|g_{A\gamma} \times g_{zAN}|$, получаемые из значения S^{lim} для канала аксионного распада:

$$|g_{A\gamma} \times g_{zAN}| \times m_A^2 \leq 3.3 \times 10^{-11} \text{ эВ (90\% у.д.)}.$$

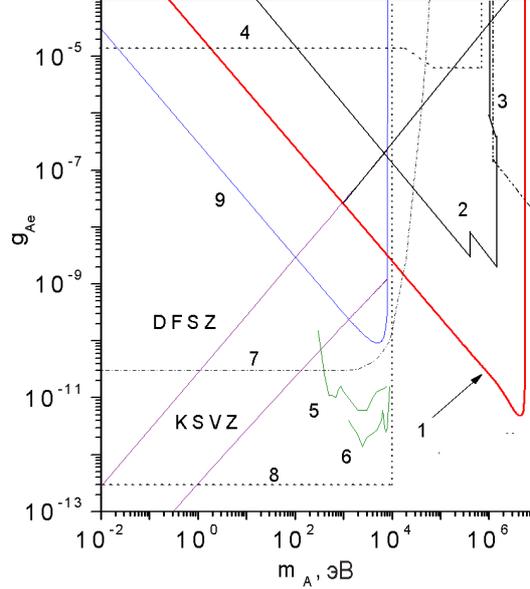


Рис. 3: Полученные экспериментальные ограничения на константу связи g_{Ae} как функцию массы (кривая 1) в сравнении с другими экспериментами: 2 – реакторные и солнечные эксперименты, 3 – эксперименты по сбросу пучка, 4 – распад ортопозитрония, 5 – CoGeNT, 6 – CDMS, 7 – эксперименты по светимости солнечных аксионов, 8 – резонансное поглощение, 9 – астрофиз. ограничения (красные гиганты).

Отсюда в рамках модели адронного аксиона для $m_A < 1$ МэВ можно получить явное ограничение на константу $g_{A\gamma}$ как функцию аксионной массы:

$$|g_{A\gamma}| \times m_A^3 \leq 1.2 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2.$$

Область исключенных значений $g_{A\gamma}$, полученная по каналу распада аксиона на 2 γ -кванта, показана на рис. 4 (кривая 1a, исключена область выше кривой).

Экспериментальный предел на S_{PC}^{lim} для канала конверсии Примакова может быть использован для установления верхнего ограничения на произведение констант $|g_{A\gamma} \times g_{3AN}|$:

$$|g_{A\gamma} \times g_{3AN}| \leq 4.6 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1} \text{ (90\% у.д.)},$$

где константа $g_{A\gamma}$ выражена в ГэВ^{-1} . В модели адронного аксиона константа связи g_{3AN} явно выражается через массу аксиона, и для $m_A < 1$ МэВ возможно получить ограничение на константу $g_{A\gamma}$ как функцию массы:

$$|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 1.7 \times 10^{-12} \text{ (90\% у.д.)},$$

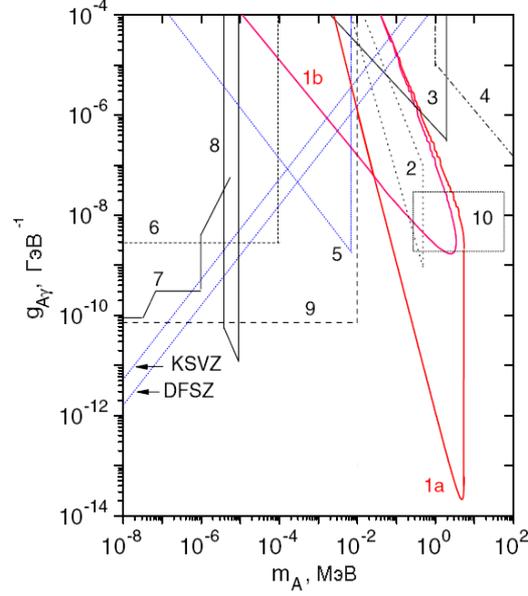


Рис. 4: Полученные экспериментальные ограничения на константу связи $g_{A\gamma}$ как функцию массы (1,a – распад на 2γ , 1,b – конверсия Примакова) в сравнении с другими экспериментами: 2 – STF, 3 – реакторные эксперименты, 4 – эксперименты по сбросу пучка, 5 – резонансное поглощение, 6 – конверсия солнечных аксионов в кристаллах, 7 – CAST и ТОКЮО гелиоскопы, 8 – телескопы, 9 – астрофиз. ограничения (красные гиганты), 10 – ожидаемые области для моделей с тяжелыми аксионами.

где $g_{A\gamma}$, выражается в GeV^{-1} , а масса аксиона m_A – в эВ. Область исключенных значений $g_{A\gamma}$, полученная по каналу примаковской конверсии, показана на рис. 4 (кривая 1b, исключена область выше кривой). С учетом условий, накладываемых требованием регистрации аксионного распада в земных экспериментах и порогом чувствительности Борексина, данное ограничение соответствует диапазону аксионных масс $m_A = (1.5 - 73)$ кэВ.

Глава 5 посвящена методике и результатам экспериментального поиска паули-запрещенных переходов в ядрах ^{12}C .

В первом разделе вычисляются энергии реакций для непаулевских состояний ядра ^{12}C с тремя протонами или тремя нейтронами на S -орбитали, выделены реакции, регистрация которых возможна на детекторе Борексина. Каналы, регистрация которых возможна на детекторе Борексина, вместе со значениями выделяемой в переходе энергии, приведены в таблице 3. Для остальных реакций, таких как $^{12}\text{C} \rightarrow ^{10}\widetilde{\text{B}} + d$, $^{12}\text{C} \rightarrow ^9\widetilde{\text{B}} + t$, $^{12}\text{C} \rightarrow ^9\widetilde{\text{Be}} + ^3\text{He}$, $^{12}\text{C} \rightarrow ^6\widetilde{\text{Li}} + ^6\text{Li}$ и $^{12}\text{C} \rightarrow ^6\widetilde{\text{Li}} + ^4\text{He} + d$, за исключением $^{12}\text{C} \rightarrow ^9\widetilde{\text{B}}_{3p} + t$, зна-

Канал	Q_{3p} , (МэВ)	Q_{3n} (МэВ)
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{C}} + \gamma$	17.9 ± 0.9	17.7 ± 0.6
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{B}} + p$	6.3 ± 0.9	7.8 ± 1.0
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{C}} + n$	6.5 ± 0.9	4.5 ± 0.6
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{N}} + e^- + \bar{\nu}_e$	18.9 ± 0.9	-
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{B}} + e^+ + \nu_e$	-	17.8 ± 0.9

Таблица 3: Значения Q при непаулевских переходах (3 нейтрона или 3 протона на $1S$ -оболочке).

чения Q отрицательны. Эти реакции не могут быть вызваны непаулевскими переходами.

Методика и результаты моделирования функций отклика детектора в пакете GEANT4 для непаулевских переходов, перечисленных в таблице 3, описываются во втором разделе. Функции отклика детектора для каналов с излучением γ , p , n и β^\pm представлены на рис. 5.

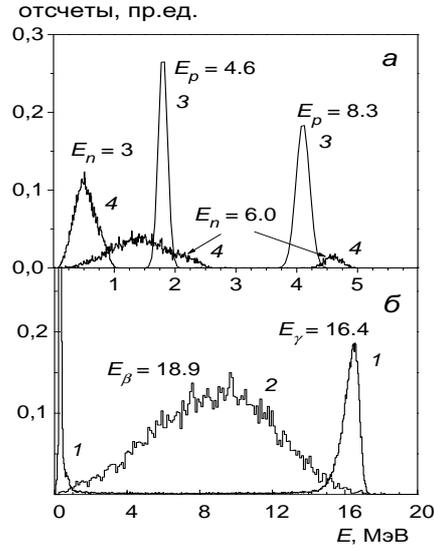


Рис. 5: Функции отклика Борексина: 1) $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{C}} + \gamma$ (16.4 МэВ), внутренний объем и 1 м прилегающего буфера; 2) $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{N}} + e^- + \bar{\nu}$ (18.9 МэВ); 3) $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{B}} + p$ (4.6 и 8.3 МэВ); 4) $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{C}} + n$ (3.0 и 6.0 МэВ).

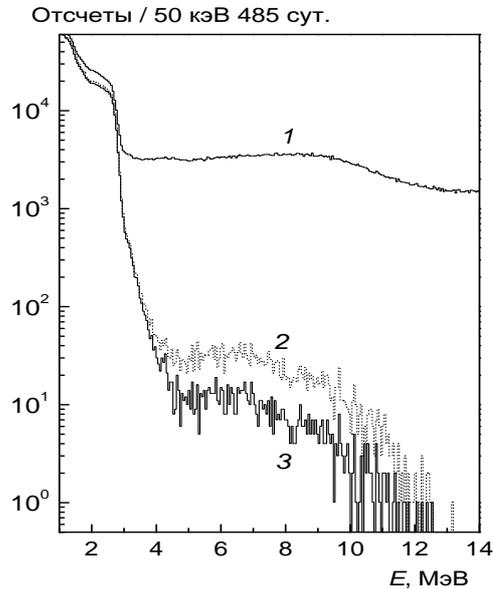


Рис. 6: Энергетические спектры детектора Борексина: 1 — спектр всех зарегистрированных событий; 2 — с вычитанием событий в интервале 2 мс после каждого мюона; 3 — с вычитанием событий в интервале 0.7 с после мюонов, пересекших внутренний объем.

Третий раздел посвящен методике отбора данных. Экспериментальный спектр событий Борексина в диапазоне энергий (1.0 ÷ 14) МэВ за 485 дней набора данных показан на рис. 6. Спектр 1 соответствует всем зарегистрированным событиям. Спектр 2 получен после вычитания событий, которые зарегистрированы во временном окне 2 мс после сигнала мюонного вето и следующих дополнительных требованиях: среднее время прихода сигналов ФЭУ по отношению ко времени срабатывания первого в событии ФЭУ ≤ 100 нс и время, соответствующее максимальной плотности сигналов ФЭУ в событии ≤ 30 нс. Данные ограничения удаляют события от мюонов, прошедших через внутренний объем и не обнаруженных внешним черенковским детектором. Для уменьшения фона от короткоживущих изотопов, производимых мюонами, пропускаются события в интервале 0.7 с после каждого мюона, пересекшего внутренний объем (спектр 3). Данный критерий уменьшает живое время до 467.8 дней.

Энергетический спектр в интервале (0.5 ÷ 8.0) МэВ исследовался для поиска паули-запрещенных переходов с испусканием нуклонов. Для уменьшения внешнего фона были отобраны события, зарегистрированные в центральной части сцинтиллятора массой 100 т ($R \leq 3.02$ м). Удалялись коррелирован-

ные события, зарегистрированные в интервале 2 мс. При этом устраняются главным образом последовательные ^{214}Bi - ^{214}Po распады из семейства ^{238}U . Наконец, для разделения сигналов от электронов, протонов и α -частиц, был применен критерий отбора по форме сигнала, основанный на фильтре Гатти.

Предел на вероятность запрещенных переходов $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{C}} + \gamma$, основывающийся на экспериментальном факте отсутствия событий с энергией выше 12.5 МэВ, получен в четвертом разделе:

$$\tau_{\gamma}(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{C}} + \gamma) \geq 5.0 \cdot 10^{31} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Приводится сравнение с результатами экспериментов NEMO-2, Kamiokande и CTF.

Предел на вероятность непаулевских переходов в ядрах ^{12}C с испусканием протона установлен в пятом разделе:

$$\tau_p(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{B}} + p) \geq 2.1 \cdot 10^{30} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Результат сравнивается с данными детекторов NaI (DAMA/LIBRA, Ejiri).

Отбор парных коррелированных событий — быстрого сигнала от протонов отдачи, возникающих при термализации нейтрона, и задержанного сигнала от 2.2 МэВ γ -квантов от захвата нейтрона, позволил установить предел на вероятность непаулевских переходов в ядрах ^{12}C с испусканием нейтрона, полученный в пятом разделе:

$$\tau_n(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\tilde{\text{C}} + n) \geq 3.4 \cdot 10^{30} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Данный результат на 8 порядков превосходит предел, полученный при поиске нейтронного излучения от природного свинца.

Пределы на вероятности непаулевских β^{\pm} -переходов установлены в шестом разделе из факта отсутствия событий с энергией выше 12.5 МэВ:

$$\tau_{\beta^-}(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{N}} + e^- + \bar{\nu}) \geq 3.1 \cdot 10^{30} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

$$\tau_{\beta^+}(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\tilde{\text{B}} + e^+ + \nu) \geq 2.1 \cdot 10^{30} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Результаты сравниваются с данными детекторов LSD и NEMO-2.

В заключительном разделе вычисляются пределы на относительные интенсивности непаулевских переходов по отношению к нормальным для исследованных каналов, приводится сравнение результатов с данными других экспериментов (таблица 4).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Распад	$\tilde{\lambda}({}^{12}\text{C}),$ (с^{-1})	$\lambda({}^{12}\text{C})$ (с^{-1})	$\delta^2 = \tilde{\lambda}/\lambda$	Предыдущие пределы
γ	$5.0 \cdot 10^{-39}$	$2.3 \cdot 10^{18}$	$2.2 \cdot 10^{-57}$	$2.3 \cdot 10^{-57}$
$\text{N}(n,p)$	$7.4 \cdot 10^{-38}$	$1.8 \cdot 10^{22}$	$4.1 \cdot 10^{-60}$	$3.5 \cdot 10^{-55}$
(e, ν)	$4.1 \cdot 10^{-38}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-35}$	$6.5 \cdot 10^{-34}$

Таблица 4: Верхние пределы на относительные интенсивности непаулевских и нормальных переходов, $\delta^2 = \tilde{\lambda}/\lambda$ (90% у.д.), и результаты предыдущих экспериментов.

Заключение

Впервые предложен и проведен анализ данных сверхнизкофонного детектора Борексина с целью поиска солнечных аксионов и нарушения принципа Паули. В результате проведенного анализа получены новые модельно-независимые ограничения на константы связи аксиона с электроном g_{Ae} , фотоном $g_{A\gamma}$ и нуклонами g_{AN} : $|g_{Ae} \times g_{3AN}| \leq 5.5 \times 10^{-13}$ и $|g_{A\gamma} \times g_{3AN}| \leq 4.6 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$ для массы аксиона $m_A < 1 \text{ МэВ}$ (90% у.д.). Получены новые ограничения на константы связи g_{Ae} и $g_{A\gamma}$ как функций массы аксиона в модели адронного аксиона: $|g_{Ae} \times m_A| \leq 2.0 \times 10^{-5} \text{ эВ}$ и $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 1.7 \times 10^{-12}$ (90% у.д.). Данные результаты исключают большую область возможных значений констант связи $g_{Ae} \in (10^{-11} \dots 10^{-9})$ и $g_{A\gamma} \in (2 \times 10^{-14} \dots 10^{-7}) \text{ ГэВ}^{-1}$ и масс аксиона $m_A \in (0.01 \dots 1) \text{ МэВ}$.

Получены новые, наиболее строгие на настоящий момент пределы на вероятности непаулевских переходов нуклонов с $1P_{3/2}$ -оболочки на $1S_{1/2}$ -оболочку в ядрах ${}^{12}\text{C}$ с испусканием γ , n , p и β^\pm -частиц: $\tau({}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\tilde{\text{C}} + \gamma) \geq 5.0 \times 10^{31}$ лет, $\tau({}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\tilde{\text{B}} + p) \geq 8.9 \times 10^{29}$ лет, $\tau({}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\tilde{\text{C}} + n) \geq 3.4 \times 10^{30}$ лет, $\tau({}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\tilde{\text{N}} + e^- + \bar{\nu}) \geq 3.1 \times 10^{30}$ лет и $\tau({}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\tilde{\text{B}} + e^+ + \nu) \geq 2.1 \times 10^{30}$ лет (все для 90% у.д.). На основании полученных пределов на время жизни непаулевских переходов установлены новые верхние ограничения на относительные интенсивности непаулевских и нормальных переходов: $\delta_\gamma^2 \leq 2.2 \cdot 10^{-57}$, $\delta_N^2 \leq 4.1 \cdot 10^{-60}$ и $\delta_\beta^2 \leq 2.1 \cdot 10^{-35}$ (90% у.д.).

Работы автора по теме диссертации

1. Дербин А. В., Фоменко К. А. Новые экспериментальные ограничения на вероятности непаулевских переходов в ядре ${}^{12}\text{C}$, полученные на детекторе BOREXINO // Ядерная Физика, 2010, том 73, №12, С. 2110.
2. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) New experimental limits on the Pauli forbidden transitions in ${}^{12}\text{C}$ nuclei obtained with 485 days Borexino data // Phys. Rev., 2010, Vol. C81, P. 034317.

3. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Search for solar axions produced in the $p(d, {}^3\text{He})A$ reaction with Borexino detector // Phys. Rev., 2012, Vol. D85, P. 092003.
4. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Study of the rare processes with the Borexino detector // World Scientific, Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 2011, P. 173, doi: 10.1142/9789814436830_0037.
5. Derbin A., Fomenko K. *on behalf of Borexino Coll.* Study of rare processes with the Borexino detector // Mini-Proceedings ECT*: Speakable in quantum mechanics: atomic, nuclear and subnuclear physics tests, arXiv:1112.1273, 2011.

Работы автора в составе коллаборации Борексино

1. Bellini G., ... Fomenko K. ... *et. al.* (Borexino Coll.) Search for solar axions emitted in the M1-transition of ${}^7\text{Li}^*$ with Borexino CTF // Eur. Phys. J. 2008, Vol. C54, P. 61-72.
2. Arpesella C., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) First real time detection of ${}^7\text{Be}$ solar neutrinos by Borexino // Phys. Lett., 2008, Vol. B658, Iss. 4, P. 101-108.
3. Arpesella C., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Direct Measurement of the ${}^7\text{Be}$ Solar Neutrino Flux with 192 Days of Borexino Data // Phys. Rev. Lett., 2008, Vol. 101, Iss. 9, P. 091302.
4. Alimonti G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso // Nucl. Instrum. Methods, 2009, Vol. A600, P. 568.
5. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Observation of Geo-Neutrinos // Phys. Lett., 2010, Vol. B687, Iss. 4-5, P. 299-304.
6. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Measurement of the solar ${}^8\text{B}$ neutrino rate with a liquid scintillator target and 3 MeV energy threshold in the Borexino detector // Phys. Rev., 2010, Vol. D82, P. 033006.
7. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Study of solar and other unknown anti-neutrino fluxes with Borexino at LNGS // Phys. Lett., 2011, Vol. B696, Iss. 3, P. 191-196.
8. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Muon and cosmogenic neutron detection in Borexino // JINST, 2011, Vol. 6, P. 05005.
9. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Precision Measurement of the ${}^7\text{Be}$ Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino // Phys. Rev. Lett., 2011, Vol. 107, P. 141302.

10. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Absence of a day–night asymmetry in the ${}^7\text{Be}$ solar neutrino rate in Borexino // *Phys. Lett.*, 2012, Vol. B707, Iss. 1, P. 22-26.
11. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) First Evidence of *pep* Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino // *Phys. Rev. Lett.*, 2012, Vol. 108, P. 051302.
12. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Cosmic-muon flux and annual modulation in Borexino at 3800 m water-equivalent depth // *JCAP*, 2012, Vol. 12, P. 15.
13. Back H., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Borexino calibrations: hardware, methods, and results // *JINST*, 2012, Vol. 7, P. 10018.
14. Alvarez-Sanchez P., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Measurement of CNGS muon neutrino speed with Borexino // *Phys. Lett.*, 2012, Vol. B716, Iss. 3-5, P. 401-405.
15. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino // *Phys. Lett.*, 2013, Vol. B722, Iss. 4-5, P. 295.
16. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Cosmogenic Backgrounds in Borexino at 3800 m water-equivalent depth // *JCAP*, 2013, Vol. 8, P. 48.
17. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Lifetime measurements of ${}^{214}\text{Po}$ and ${}^{212}\text{Po}$ with the CTF liquid scintillator detector at LNGS // *Eur. Phys. J. A*, 2013, 49:92.
18. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) SOX: Short distance neutrino Oscillations with BoreXino // *JHEP*, 2013, Vol. 8, P. 38.
19. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) Final results of Borexino Phase-I on low energy solar neutrino spectroscopy // *arXiv:1308.0443*, 2013.
20. Bellini G., ... Fomenko K., ... *et. al.* (Borexino Coll.) New limits on heavy sterile neutrino mixing in ${}^8\text{B}$ decay obtained with the Borexino detector // *Phys. Rev.*, 2013, Vol. D88, P. 072010.