

Отзыв официального оппонента, Безрукова Леонида Борисовича, д.ф.-м.н., заведующего лабораторией гамма-астрономии и реакторных нейтрино отдела экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) на диссертацию Белова Владимира Александровича «Исследование космогенных источников фона в эксперименте EXO-200», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.

Диссертация Белова Владимира Александровича посвящена исследованию процессов возникновения космогенных изотопов и их влияния на уровень фона при поиске безнейтринного двойного бета-распада изотопа ^{136}Xe ($0\nu\beta\beta$ распада) в международном эксперименте EXO-200. Поиск этого редкого процесса является одной из центральных задач физики элементарных частиц на протяжении многих лет. Открытие такого распада поможет не только установить шкалу масс нейтрино, но и будет означать обнаружение "новой" физики за пределами Стандартной Модели. В настоящее время именно такие исследования представляют особенную важность.

Изотоп ^{136}Xe является очень перспективным для поиска $0\nu\beta\beta$ распада, потому что обладает уникальной комбинацией свойств, позволяющих создавать высокочувствительные детекторы с большой массой действующего вещества. В планируемых экспериментах речь идет уже о тоннах изотопа, и ксенон - один из немногих изотопов, позволяющих достичь этого уровня с разумными усилиями.

В экспериментах, нацеленных на поиск редких процессов, таких как двойной бета-распад, важнейшим вопросом является уровень фона. При этом, для достижения наилучших результатов, требуется не только обеспечить очень низкий уровень фона, что достигается конструкцией детектора, но и провести всестороннее его исследование, для корректного учета каждой компоненты. Это важно не только для текущих экспериментов, но и для проектируемых будущих установок.

Установка EXO-200 расположена в подземной лаборатории и хорошо защищена от естественной радиоактивности. Мюоны космических лучей обладают высокой энергией, которая позволяет им с легкостью проходить сквозь защиту до самой середины установки. Средняя энергия мюонов растет с глубиной и в случае EXO-200 составляет более 200 ГэВ. Вызываемые мюонами высоких энергий адронные ливни высокоэнергетических частиц приводят к созданию самых разных изотопов в материалах детектора. Особенно ценно, что в данном исследовании был разработан специальный метод и было проведено исчерпывающее изучение списка изотопов

активации. Полученные результаты по активации ксенона и широко используемых конструкционных материалов не только весьма актуальны, но также представляют интерес и для других низкофоновых экспериментов. С практической точки зрения, уточнение модели фона, проведенное в диссертационной работе, позволило улучшить на 17% основной результат эксперимента EXO-200 - чувствительность по периоду полураспада ^{136}Xe относительно $0\nu\beta\beta$ -распада на основной уровень.

Диссертация выполнена в ФГБУ "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова" НИЦ "Курчатовский институт" в рамках международной коллаборации EXO.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 104 ссылок и дополнительных материалов.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы, научная новизна, практическая значимость и личный вклад диссертанта. Также сформулированы положения, которые защищает диссертант, приведены данные по апробации работы.

В первой главе дано описание эксперимента EXO-200. Описана физическая мотивация поиска $0\nu\beta\beta$ распада. Дано описание результатов исследований $2\nu\beta\beta$ распада. Рассмотрены преимущества использования ^{136}Xe для поиска $0\nu\beta\beta$ распада. Описаны конструкция детектора EXO-200, система регистрации сигналов. Описаны также процедура восстановления событий, энергетическая калибровка, моделирование событий методом Монте-Карло и модель фонов, названная процедурой фитирования. Даны основные результаты, полученные коллаборацией EXO-200. Описана модернизация детектора.

Вторая глава посвящена методу расчёта генерации изотопов, производимых при прохождении высокоэнергичных мюонов космических лучей через установку, уделено особое внимание процессам генерации и взаимодействия нейтронов. Описаны процедуры моделирования с использованием программы FLUKA и программы Geant4. Описан метод генерации мюонов космических лучей на глубине установки. Произведена проверка правильности расчётов числа нейтронов, генерируемых мюоном на упрощённом примере. Приведены результаты расчётов процессов активации для реального детектора.

В главе 3 описывается исследование списка изотопов активации. В результате проведения расчёта процессов активации был получен список из примерно 1700 изотопов. И хотя, любой из них потенциально может приводить к событиям в детекторе, далеко не каждый способен создать заметное их количество. В данной главе рассматриваются методы анализа,

позволившие установить, какие из изотопов реально оказывают влияние на низкофоновые данные, набираемые в детекторе. Разработан метод автоматизированной проверки списка изотопов. Получено, что только распад изотопа ^{137}Xe вносит заметный вклад в область поиска $0\nu\beta\beta$ -распада. Отметим, что именно этот изотоп представляет собой очень опасный источник фона

Глава 4 посвящена активации в результате захвата нейтронов на ядрах. Рассмотрены методы анализа, которые позволили измерить скорости активации нескольких изотопов в канале радиационного захвата нейтронов, создаваемых при прохождении мюонов космического излучения. Полученные данные послужили для дополнительной проверки расчётов скоростей активации. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными позволили дать общую оценку точности используемых моделей.

В главе 5 описано применение результатов исследования, полученных в данной диссертации, для поиска $0\nu\beta\beta$ распада ^{136}Xe в эксперименте EXO-200. Для нового анализа был разработан метод подавления фоновых событий, возникающих от распада космогенного ^{137}Xe . Определение событий захвата нейтрона, генерированного мюоном, производилось выделением совпадений сигналов активных счетчиков мюонного вето с событиями регистрации в детекторе мгновенных γ -квантов, сопровождающих захват. Если полная энергия события согласуется со спектром захвата нейтрона на ^{136}Xe , то соответствующая часть TPC блокируется на 19.1 мин. Использование этого отбора позволило уменьшить количество событий распада ^{137}Xe на 23 %, при этом потери экспозиции составили незначительную часть.

В заключении диссертации перечислены основные результаты работы. Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, - достоверны и новы.

Основные результаты диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, одна - в сборниках трудов конференций.

Автореферат диссертации соответствует тексту диссертации.

Замечание:

1. При расчёте характеристик потока мюонов (в частности, энергетического спектра) на глубинах порядка 1 км и более необходимо учитывать, что энергетические потери мюонов на единице пути флюктуируют, особенно тормозные потери. Однако, этот эффект не был учтён (стр. 75 диссертации).

Диссертация Белова Владимира Александровича «Исследование космогенных источников фона в эксперименте EXO-200» демонстрирует успешное решение сложных экспериментальных задач на высоком современном уровне. Результаты, полученные в диссертации, будут использованы при проведении исследований в ФГБУ «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова» НИЦ «Курчатовский институт» и других организациях-участниках эксперимента EXO-200, а также в теоретических работах при исследовании свойств элементарных частиц и атомов.

Можно констатировать, что диссертация Белова Владимира Александровича «Исследование космогенных источников фона в эксперименте EXO-200» соответствует критериям, установленными пунктом 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а диссидент Белов Владимир Александрович достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.

Заведующий лабораторией Гамма-астрономии и реакторных нейтрино отдела экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук, д.ф.-м.н.

Москва, 117312, проспект 60-летия Октября, 7а,
+7(903)729-27-65, bezrukov@inr.ac.ru

Безруков Леонид Борисович

18.11.2018

Подпись Безрукова Леонида Борисовича заверяю
Зам. Директора Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института ядерных исследований Российской академии наук

Рубцов Григорий Игоревич

