

## ОТЗЫВ

официального оппонента А.А.Смольникова  
на диссертационную работу Белова Владимира Александровича  
«Исследование космогенных источников фона в эксперименте ЕХО-200»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика  
высоких энергий.

Основная цель диссертационной работы Белова Владимира Александровича – это исследование космогенных изотопов как возможных составляющих фона при поиске безнейтринного двойного бета распада  $^{136}\text{Xe}$  в международном эксперименте ЕХО-200. Хотя сразу необходимо отметить, что полученные результаты являются также весьма актуальными и могут служить уникальным справочным материалом для правильной оценки фоновых составляющих и других мод и механизмов двойного распада  $^{136}\text{Xe}$ , а также и для других низкофоновых экспериментов, использующих в качестве конструкционных материалов низкорadioактивные медь, свинец, сталь, жидкие и пластмассовые органические сцинтилляторы и т.д. Что же касается обширного полученного и представленного в диссертации материала по активации изотопов ксенона, то эти оценки также важны для проведения экспериментов по поиску небарионной темной материи с использованием ксенона в качестве основного вещества детектора, например, таких как XENON-1T и др.

Поэтому важен не столько частный результат по данной конкретной установке и по данной конкретной моде двойного бета распада, сколько проведенное широкое и тщательное исследование короткоживущих космогенных изотопов, наработанных в Хе с различным изотопным составом. Поскольку в настоящее время проводятся и проектируются новые крупномасштабные эксперименты с тоннами Хе в качестве рабочего вещества (например, nЕХО, XENON 10 ton, и др.), то полученные в диссертации результаты по наработке космогенных изотопов в Хе безусловно важны для будущих экспериментов. Несмотря на то, что все эти эксперименты будут проводиться глубоко под землей, для достижения сверхнизкого фона учет каждой хорошо изученной компоненты фона будет играть решающее значение. Кроме того, в диссертации также дается информация, которая важна и для других низкофоновых экспериментов, так, например, получена весьма полезная информация относительно активации изотопов азота ( $^{16}\text{N}$ ,  $^{18}\text{N}$ , ...), поскольку жидкий азот часто используется в качестве хладоагента, например, для германиевых гамма-спектрометров.

Чтобы не возвращаться к этому вопросу ниже, сразу хочется выразить некоторое сожаление о том, что основные результаты по вкладу космогенных изотопов в фон детектора ЕХО-200 приводятся только для безнейтринной моды ( $0\nu\beta\beta$ ). Понятно, что нельзя объять необъятное, но поскольку ЕХО-200 многонаправленный эксперимент, в котором также ведется набор в широком диапазоне энергий для регистрации двухнейтринной моды распада ( $2\nu\beta\beta$ ), двойного бета распада с участием майоронов ( $\chi\beta\beta$ ), ( $2\nu\beta\beta$ ) и ( $0\nu\beta\beta$ )- распадов на возбужденные уровни и др., а из-за того, что ожидаемые спектры таких распадов имеют широкие энергетические спектры с более низкой средней энергией по сравнению с ( $0\nu\beta\beta$ )-распадом, ожидаемый вклад от таких космогенных изотопов с широкими спектрами как  $^{137}\text{Xe}$  и других изотопов с более низкой энергией безусловно должен учитываться, поэтому было бы

совсем не лишним представить в данной диссертации хотя бы одну сводную таблицу с оценками вкладов от различных космогенных изотопов в фоновую скорость для различных мод и механизмов  $\beta\beta$ -распада  $^{136}\text{Xe}$ .

Актуальность проведенных в рамках этой диссертационной работы исследований не вызывает сомнений, так как поиск  $0\nu\beta\beta$ -распада является одной из наиболее интересных и актуальных задач современной экспериментальной физики. Эта задача связана с возможным нарушением закона сохранения лептонного числа, с определением типа нейтрино (Дираковское или Майорановское), массовой шкалы нейтрино, и др. Решение этих задач имеет фундаментальное значение для физики частиц и космологии.

Большой низкофоновый ТРС-детектор ЕХО-200, содержащий около 200 кг жидкого ксенона успешно функционирует в подземной лаборатории WIPP (США), начиная с 2010 г. Полная масса ксенона, который является одновременно источником радиоактивных распадов и детектирующей средой, в активном объеме детектора равна 175 кг с содержанием 80,6% изотопа  $^{136}\text{Xe}$ . Для регистрации событий одновременно определяются как ионизационные, так и сцинтилляционные сигналы, что позволяет получить высокое энергетическое разрешение, приближающееся к 1 %. События двойного бета-распада выделяются как локализованные события, происходящие в области порядка нескольких миллиметров, и хорошо отделяются от многоточечных фоновых событий, которые возникают преимущественно от гамма-квантов. Хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных дает возможность правильно оценить систематические ошибки.

Основная цель данной диссертации – это расчёт взаимодействия мюонов космических лучей с материалами установки ЕХО-200 и определения фонового вклада от таких взаимодействий в экспериментальный энергетический спектр детектора в районе  $Q_{0\nu\beta\beta}^{136}\text{Xe}$  (2,458 МэВ). Диссертация хорошо структурирована по главам, в Главе 1 дается подробное описание эксперимента ЕХО-200, в Главе 2 подробно изложены 2 метода расчета с использованием усовершенствованных и доработанных автором для данных целей программ Geant4 FLUKA, Глава 3 в основном посвящена разработанному автором методу автоматизированной проверки изотопов активации и их отбору по фоновому фактору, в Главе 4 приводятся исследования захвата нейтронов генерируемых мюонами к.л. в материалах установки ЕХО-200, в заключительной Главе 5 суммируются основные результаты исследования в их применении для анализа экспериментальных данных ЕХО-200 и извлечения предела на период полураспада  $^{136}\text{Xe}$  относительно  $0\nu\beta\beta$ -распада.

В диссертации также приводятся оценки ожидаемой чувствительности второй фазы эксперимента ЕХО-200  $T > 5.7 \cdot 10^{25}$  лет, которая может быть достигнута за планируемое время измерений. Эти прогнозы сравнимы по чувствительности с экспериментами GERDA-Phase2 и KamLand-Zen, лидирующими на сегодняшний день в данной области исследований.

В Приложении А1 приведена расширенная таблица 11 со списком многочисленных изотопов активации, которая сама по себе представляет весьма обширную и ценную информацию.

Не буду более подробно описывать содержание каждой отдельной главы, и тем более параграфов, отмечу лишь, что в диссертации дается вполне исчерпывающее описание как установки ЕХО-200, так и методов, разработанных и использовавших для проведения данных исследований. Тем не менее, необходимо отметить, что для данных исследований такую же важную роль, как и основной ТРС детектор, играет мюонное вето вокруг установки, а вот его

характеристики, связанные со скоростью счета прямых и задержанных совпадений, в диссертации приведены недостаточно полно.

В результате проведенных исследований получен качественный и количественный состав изотопов, способных давать вклад в фон установки и влиять на чувствительность эксперимента по поиску распада  $^{136}\text{Xe}$ . Расчет процессов активации и моделирование прохождения космических мюонов привели к очень большому списку из почти 1 700 изотопов, в том числе получено, что непосредственно в детекторе (TRC + ксенон) за счет взаимодействия мюонов к.л. может возникнуть 81 изотоп активации. В результате применения автоматизированной проверки изотопов активации по их отбору по фоновому фактору и дальнейшему тщательному анализу их спектров энерговыделений в качестве основного и практически неустраняемого источника фона был выделен  $^{137}\text{Xe}$ , с периодом полураспада 3.8 минут и энергией перехода 4.2 МэВ. Расчетным путем показано, что спектр от распада  $^{137}\text{Xe}$  дает вклад 23% в фон в области искомого пика  $0\nu\beta\beta$ -распада  $^{136}\text{Xe}$ . Здесь надо особо отметить, что вклад от данного опасного источника фона был не только определен, но, что еще более важно, был предложен и реализован весьма эффективный способ как с ним бороться. В результате, и по мнению оппонента, это наиболее важный практический выход диссертационной работы, чувствительность эксперимента ЕХО-200 по периоду полураспада  $^{136}\text{Xe}$  относительно  $0\nu\beta\beta$ -распада на основной уровень улучшилась на 17%.

Таким образом, поставленные в диссертационной работе цели выполнены на высоком научном уровне и полученные результаты без сомнений представляют большой научный и практический интерес, а сама диссертация представляется законченным научным трудом, выполненным на хорошем профессиональном уровне.

Конечно, как впрочем и в любой диссертационной работе, не обошлось без некоторых шероховатостей, так, например, нововведенный автором и никак не объясненный им термин «Параметры ширины для мягких ограничений» (стр.121) заставил оппонента засомневаться в собственной компетентности, а утверждение о том, что «По сути своей  $^{137}\text{Xe}$  является ксеноном ...» (стр.53) застало оппонента врасплох, так как до сих пор у него не возникало сомнений в том, что изотоп  $^{137}\text{Xe}$  не может как по сути, так и без сути являться аргоном, или неоном, или еще чем-то, кроме ксенона. Также интересно было узнать о том, что «многие изотопы сильно возбуждены» (стр.85) и т.д. Во многих местах текста (стр.5, 10, 11, 19, ...) нет различия между терминами «двойной бета распад», «двухнейтринный двойной бета распад», и «безнейтринный двойной бета распад», что вносит определенную путаницу в понимании о какой моде распада идет речь в каждом конкретном случае.

Из более существенных замечаний следует отметить следующие:

1. Довольно часто основные количественные конечные результаты в диссертации приводятся без ошибок, как, например, в результирующей Таблице 9 «Вклад основных источников фона в область поиска  $2\beta 0\nu$ -распада»(стр.124), на стр.69 сравниваются расчетная эффективность мюонного вето 97,9% с экспериментальным значением 96,4%, очевидно, что по крайней мере любая экспериментально измеренная величина обязана быть с ошибками (стат. и сист.) и сравнение должно проводиться в пределах ошибок, и т.д.

2. Описание мюонного вето слишком кратко и не приведены такие его основные характеристики как скорость счета, порог регистрации, мертвое время и т.д. – то есть не

приводятся важные данные по мюонному вето, которые, безусловно, использовались для расчетов и получения конечных результатов.

3. На стр.97 приведено следующее обоснование отбраковки событий:

«...в основном отборе события в течении 60 с после прохождения мюона отбрасываются..» . Однако в диссертации нигде не дается определения, что означает основной отбор событий? Если есть основной отбор, значит есть еще и неосновной? Тогда в чем он обличается от основного и для чего служит?

Подводя итог, необходимо отметить, что работа в целом производит хорошее впечатление, большой личный вклад диссертанта в проведенные исследования и полученные результаты не вызывает сомнений. Полученные результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Нелишним будет отметить, что В.А.Белов активно участвует в постановке и поведении не только эксперимента ЕХО-200, но также принимает участие в экспериментах СОHERENT и РЭД-100.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на международных конференциях и научных семинарах. По материалам диссертации опубликованы статьи в реферируемых журналах.

Несмотря на указанные замечания, которые в большей мере относятся к стилю и форме изложения, считаю, что данная работа вполне соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Белов Владимир Александрович, безусловно заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Старший научный сотрудник  
Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований,  
к.ф.-м.н.

Смольников Анатолий Алексеевич

141980 г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6,  
тел. +7 (496) 2163205, e-mail: smoln@jinr.ru

Подпись А.А.Смольникова заверяю:  
Ученый секретарь  
Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных

Титкова Ирина Викторовна

