

ОТЗЫВ

официального оппонента Старкова Николая Ивановича,

доктора физико-математических наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН г. Москва)

на диссертационную работу Мальгина Алексея Семеновича

«Космогенные нейтроны в низкофоновых подземных экспериментах»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертационная работа Мальгина посвящена изучению характеристик космогенных нейтронов – нейтронов, образуемых мюонами космических лучей. Актуальность данной работы в том, что в подземных экспериментах по исследованию редких процессов, в том числе связанных с эффектами за рамками Стандартной модели, космогенные нейтроны являются основным источником трудноустраняемого фона. Поэтому задача подавления фона экспериментальными методами и минимизации его вклада в результаты измерений расчетным путем стоит перед всеми низкофоновыми экспериментами, проводящимися в подземных лабораториях глубоко под землей, число которых в мире уже около десяти.

В то же время решение задачи подавления фона, связанного с космогенными нейтронами, невозможно без знания их характеристик. Несмотря на довольно обширный экспериментальный и теоретический материал, накопленный за шестьдесят лет исследований, базовые процессы генерации космогенных нейтронов, обуславливающие количественные, энергетические, пространственные и временные характеристики потока этих нейтронов, в деталях до сих пор не были описаны. Это может приводить к появлению дополнительных ошибок при анализе и интерпретации данных подземных экспериментов.

Установление механизмов, определяющих характеристики космогенных нейтронов, а именно: связи выхода нейтронов с энергопотерями мюонов и массовым числом вещества A , формирования

энергетического спектра и пространственного распределения нейтронов, а также связи временного поведения потока нейтронов с сезонными вариациями мюонов под землей, явилось центральной задачей диссертации.

Решение этой задачи увеличивает наше знание о космогенных нейтронах как физического феномена (нейтронного сопровождения жесткой компоненты вторичного космического излучения - мюонов), а также открывает дополнительные возможности минимизации фона в низкофоновых подземных экспериментах.

Таким образом, тема диссертации актуальна для «подземной физики», включающей в себя низкофоновые исследования редких процессов. Следует отметить следующие новые физические результаты, полученные в диссертации:

- выражение для выхода космогенных нейтронов, связывающее энергетические потери мюонов со средней энергией потока мюонов и массовым числом вещества;
- выражение для выхода заряженных пионов, связывающее ядерные энергопотери мюонов со средней энергией потока мюонов и массовым числом вещества;
- установлена форма энергетического спектра генерации и спектра изолированных космогенных нейтронов с энергиями выше 30 МэВ на базе аддитивной кварковой модели глубоконеупругих адронных процессов;
- выражение для пространственного распределения космогенных нейтронов;
- определены характеристики сезонных вариаций потока космогенных нейтронов и обнаружен новый эффект – сезонные вариации средней энергии мюонов под землей.

Диссертация включает в себя Введение, шесть глав, Заключение и библиографию из 150 наименований; она содержит 50 рисунков и 6 таблиц, список сокращений и обозначений. Полный объем работы – 193 страницы.

Во Введении дана мотивация диссертационной работы, описаны каналы создания космогенными нейтронами фона в экспериментах по обнаружению редких процессов. Указаны цель, актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертации. Сформулированы положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора в полученные результаты и описана их апробация.

Главы 1, 2, 3 посвящены основной количественной характеристике космогенных нейтронов – выходу. В Главе 1 на базе экспериментальных данных получена универсальная формула – эмпирическое выражение, позволяющее вычислять величину выхода для любого вещества на любой глубине под землей. С использованием универсальной формулы определена погрешность измерений величины выхода в различных экспериментах, которая составила 20%. В Главе 2 проведен феноменологический анализ выхода космогенных нейтронов и показано, что универсальная формула следует из общих закономерностей электромагнитных и ядерных взаимодействий ультрарелятивистских мюонов и развития в веществе электромагнитных и адронных ливней, производимых мюонами. В третьей Главе проанализированы результаты немногочисленных аналитических расчетов выхода и гораздо большего числа расчетов методом Монте-Карло с использованием пакетов FLUKA и Geant4. Установлено, что аналитические расчеты согласуются с экспериментальными данными, в то время как результаты монтекарловских расчетов систематически занижены и имеют погрешность, превышающую экспериментальную в ~ 2 раза.

Четвертая Глава посвящена энергетическим характеристикам космогенных нейтронов. Показано, что спектр нейтронов должен иметь трехкомпонентный вид, причем спектр нейтронов низкоэнергетической компоненты до ~ 30 МэВ описывается максвелловским распределением, а при более высоких энергиях спектр состоит из двух компонент и его форма находит объяснение в рамках аддитивной кварковой модели глубоконеупругого рассеяния адронов. Получено указание, что подавляющая часть нейтронов не превышает энергии ~ 1 ГэВ. Предсказанная форма спектров генерации и изолированных нейтронов согласуется с измерениями, достигающими энергии 400 МэВ в спектре генерации и 90 МэВ – в спектре изолированных нейтронов.

В Главе 5 рассматривается поперечное распределение космогенных нейтронов. Небольшое число имеющихся измерений и их противоречивость не дают возможности установить форму поперечного распределения по экспериментальным данным. То же самое можно сказать и о Монтекарловских расчетах. Диссертантом показано, что проблема может быть решена также в рамках аддитивной кварковой модели. С ее использованием получено выражение для поперечного распределения и объяснены особенности экспериментальных распределений.

В шестой Главе анализируется временное поведение потока космогенных нейтронов. Так, по данным установки LVD за 16 лет наблюдений установлены характеристики сезонных вариаций нейтронов в зависимости от вариаций мюонов на глубине ~ 3 км в.э. Определены амплитуда и фаза вариаций космогенных нейтронов и сделан вывод о существовании нового эффекта в мюонной физике – 10% вариациях средней энергии мюонов на глубине ~ 3 км в.э.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Результаты и положения диссертации Мальгина опубликованы в рецензируемых отечественных и международных журналах, рекомендованных ВАК (17 работ), были представлены на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

Текст диссертации хорошо организован. Каждой характеристике космогенных нейтронов посвящена отдельная глава, поэтому при прочтении возникает цельная картина данного физического явления. Полученные диссертантом выводы о свойствах космогенных нейтронов являются новыми. Они базируются практически на всём имеющемся экспериментальном материале и результатах обширного круга публикаций, что обеспечивает обоснованность и достоверность положений диссертации и, в конечном счете, ее ценность как фундаментального научного исследования.

Следует также отметить детальное описание и учёт механизмов, приводящих к генерации космогенных нейтронов, что позволяет представить более полную картину происходящих процессов.

Результаты, полученные в диссертации, представлены в виде, допускающем их непосредственное использование при планировании экспериментов и оценке возможного фона, что повышает их ценность.

Следует, однако, сделать несколько замечаний.

При оценке количества генерированных космогенных нейтронов используются довольно значительные энергии, превышающие 10 ГэВ. В то же время в спектре мюонов на любой глубине будут присутствовать частицы с меньшей энергией, в том числе порядка сотен МэВ и менее. Здесь не применимо приближение тонкой мишени как при больших энергиях. В то же время они могут приводить к появлению нейтронов с энергией десятки кэВ, что создаёт фон для экспериментов по прямому поиску галактических

WIMP'ов таких, как DAMA, NEWSdm и других. Защита от таких мюонов не существует, поэтому их учёт важен.

Возможно, этот недостаток приводит также к расхождениям между результатами моделирования и экспериментом, отмеченные в диссертации.

Указанные замечания не снижают в целом высокую научную и практическую ценность диссертации Мальгина и не влияют на положения, выносимые на защиту.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Мальгин Алексей Семенович**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 "Физика атомного ядра и элементарных частиц".

Главный научный сотрудник Лаборатории
Элементарных частиц ФИАН,
доктор физ.-мат. наук

Старков Н.И.
5 декабря 2018

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН г. Москва)

адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

тел. 8(499)135-42-64

e-mail: office@lebedev.ru

Подпись Старкова Н.И. удостоверяю,

Доктор физ.-мат. наук
зам. директора ФИАН

С.Ю. Савинов

М.П.

СВЕДЕНИЯ ОБ ОППОНЕНТЕ:

Старков Николай Иванович

Ученая степень: доктор физико-математических наук;

Ученое звание: без звания;

Должность: главный научный сотрудник;

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН г. Москва);

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53;

Телефон: +7(499) 132-64-39;

Адрес электронной почты: starkov@lebedev.ru

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

1. Victor Alexeev et al., Charge spectrum of heavy and super heavy components of galactic cosmic rays: results of the OLIMPIYA experiment, 2016, Astrophysical Journal, v. 829, p. 120
2. А.Б. Александров и др., Метод мюонной радиографии для фундаментальных и прикладных исследований *УФН*, 2017, том 187, т. 12, стр. 1375–1392
3. В.Дубинина и др., Применение ядерной фотоэмульсии для поиска лёгкой тёмной материи, 2016 г., ФИАН, Краткие сообщения по физике, №. 4, стр..52-58
4. Akmete, A., et al. The active muon shield in the SHiP experiment, 2017, Journal of Instrumentation, v. 12, May 2017
5. N. Konovalova et al., Large Industrial and Natural Objects Investigation by the Muon Radiography on the Basis of Track Detectors, 2016, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 7, 12229-12236
6. С. Г. Земскова, Н.И. Старков, Результаты модельного эксперимента по просвечиванию горы космическими мюонами, 2015 г., ФИАН, Краткие сообщения по физике, №. 6, стр..3-14
7. Starkov, N., The Software Peculiarities of Pattern Recognition in Track Detectors, 2015, International conference of computational methods in sciences and engineering, т. 1702,
8. Starkov, N., Use of Pattern Recognition Methods in Track Analysis of Solid Detectors, 2017, International Conference on Particle Physics and Astrophysics, v. 798, p.