

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»

НИЦ «Курчатовский институт»

д. т. н., профессор,

_____ Ю.Ф. Козлов

“ ___ ” _____ 2015 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения "Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт Теоретической и Экспериментальной Физики" ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ" Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" на диссертацию **Агафоновой Натальи Юрьевны «Изучение мюонов космических лучей и нейтронов генерированных ими под землей в детекторе LVD»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация Агафоновой Натальи Юрьевны посвящена исследованию мюонов космических лучей и измерению основных характеристик нейтронов, образуемых мюонами в различных материалах. Работы в области астрофизики, нейтринной физики, поиски редких процессов и темной материи требуют создания низкофоновых подземных лабораторий. Одним из основных источников фона под землей являются мюоны космических лучей. Среди продуктов взаимодействия мюонов с веществом нейтроны занимают особое место, как наиболее трудно устранимый фон. Основными характеристиками нейтронов, производимых мюонами, являются скорость генерации нейтронов и их спектр в зависимости от глубины и места расположения установки. Знание этих величин дает возможность моделировать и оценивать фон с помощью программных пакетов FLUKA и GEANT. Недостаточность точных экспериментальных данных, особенно в области высоких энергий мюонов ($200 \text{ ГэВ} < E_{\mu} < 400 \text{ ГэВ}$) не позволяет полностью доверять модельным оценкам.

Целью данной работы является изучение взаимодействий мюонов космических лучей и

получение данных по генерации нейтронов с энергией выше 100 МэВ.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во Введении сформулированы основные проблемы подземной физики и задачи, которые предстоит решить.

В первой главе описан детектор LVD – Детектор большого объема, представлены его основные характеристики и конструкционные особенности. Основным структурным элементом детектора является сцинтилляционный счетчик объемом 1.5 м^3 , заполненный сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Описаны его физические характеристики.

Вторая глава посвящена реконструкции мюонных событий, зарегистрированных детектором. Описана программа восстановления траектории (угла прихода мюонов) и множественности мюонов. Приведены виды событий и получены некоторые характеристики мюонов, такие как декогерентная кривая (кривая распределений расстояний между треками мюонов во множественных событиях), угловая зависимость пришедших мюонов, распределение по множественности мюонов в событиях.

В третьей главе представлен результат по измерению зарядового состава мюонов космических лучей, останавливающихся в детекторе LVD. Положительный избыток атмосферных мюонов определялся измерением доли положительных мюонов в полном числе остановок мюонов в сцинтилляторе. Характеристики системы регистрации и конструкционные особенности установки LVD дают возможность установить только количество распадов мюонов в сцинтилляторе и железе. В сцинтиляторе регистрировались распады и положительных и отрицательных мюонов. Число распадов в железе использовалось для определения числа положительных мюонов. Зарядовое отношение получено для потока мюонов околоректального направления ($\theta < 40^\circ$) на уровне моря в диапазоне 1 – 3 ТэВ со средней энергией $\sim 1.8 \text{ ТэВ}$ и составляет $k = 1.26 \pm 0.11 \text{ (сист.)} \pm 0.04 \text{ (стат.)}$.

В четвертой главе описаны методы и результаты определения характеристик нейтронов, генерируемых мюонами под землей: числа нейтронов в г/см^2 вещества, энергетического спектра нейтронов. Измерена величина генерации нейтронов мюонами с энергией 280 ГэВ в сцинтиляторе и железе. Приводятся новые данные по генерации нейтронов одиночными мюонами и группами мюонов с сопровождающими их электромагнитными и адронными ливнями. Показано, что выход нейтронов прямой генерации (образуемых мюоном в прямой реакции фоторождения полем виртуальных фотонов) практически не зависит от энергии мюона в области $E_\mu > 50 \text{ ГэВ}$ и что подавляющая доля нейтронов образуется в адронных и

электромагнитных ливнях при доминировании вклада адронных ливней. Измеренные величины генерации нейтронов увеличивают статистический материал для уточнения закономерностей генерации нейтронов мюонами в различных веществах.

Измерение энергетического спектра нейтронов от 20 МэВ и более представляет собой достаточно сложную экспериментальную задачу. Энергия нейтрона определялась по энерговоделению протонов отдачи, а также вторичных частиц, образуемых во взаимодействии нейтрона с ядрами вещества детектора. Переход от спектра регистрируемых энерговоделений к спектру нейтронов требовало дополнительного комплексного расчета и устанавливалось моделированием прохождения нейтрона методом Монте-Карло. Расчет учитывал все реакции, дающие энерговоделение посредством протонов отдачи, гамма-квантов, продуктов расщепления ядра углерода при наличии квантинга. Форма полученного спектра нейтронов, следуя закону Tn^{-1} , согласуется с измерениями в других экспериментах в общем для них диапазоне от 30 до 80 МэВ. Спектр генерации нейтронов мюонами в диапазоне 100 – 450 МэВ измерен впервые. Его можно описать зависимостью Tn^{-2} .

Основные результаты диссертации приведены в **заключении**.

Новизна проведенных исследований.

- Идея прямого измерения числа нейтронов, генерируемых в железе, оригинальна. Впервые таким методом измерена величина генерации нейтронов, образуемых мюонами со средней энергией 280 ГэВ, впервые определена форма энергетического спектра нейтронов в диапазоне энергий от 30 до 450 МэВ.

- Предложен метод определения зарядового состава мюонов по продуктам распада остановившихся в веществе детектора μ^+ и μ^- . Измерено зарядовое отношение k для потока мюонов со средней энергией ~ 1.8 ТэВ. Несмотря на значительную систематическую ошибку величины k , работа имеет методическую ценность. В случае продолжения работы и увеличения точности результат может оказаться полезным для установлении зависимости k от энергии мюона в области энергии выше 1 ТэВ.

Актуальность диссертации не вызывает сомнений. Подтверждением этому является интерес к измерению генерации нейтронов, образующих фон в экспериментах по поиску редких событий, увеличение числа публикаций по моделированию процессов рождения и распространения нейтронов с помощью программ GEANT, FLUKA.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании особенностей детектора LVD, его гранулярности, возможности измерять временные, пространственные и энергетические характеристики всех частиц, зарегистрированных в детекторе. Разработана методика измерения углового распределения мюонов и кратности мюонных групп. Использована современная аппаратура, проводились калибровочные измерения.

Практическая ценность данной работы состоит в том, что полученные результаты расширяют набор данных для уточнения закономерностей генерации нейтронов мюонами. Это позволит повысить точность определения фона в низкофоновых настоящих и планируемых экспериментах по поиску редких процессов.

В качестве **замечаний** по диссертации можно отметить следующее.

1. Калибровка энергетической шкалы проводится по 3 гамма линиям (2.23 , 2.5, 9.0 МэВ) и широкому пику средних потерь мюонов в счетчиках (185+-5) МэВ. Причем, экспериментальное положение пика определяется с точностью в два раза хуже (Рис. 1.13, 30+-2 канала). Интервал калибровочных энергий широкий - 3 точки близкие, одна далекая. Насколько автор уверен в правильности шкалы, тем более, что измеренный спектр нейтронов простирается до 400 МэВ.

2. Появление больших интервалов $t > 3000$ сек (Рис. 2.4) для групп мюонов объясняется отключением установки или плохими данными. Почему эти интервалы нельзя было убрать из обработки и "живого времени"?

3. Мелкая придирка, подписи к рисункам могли бы быть более развернутыми.

Данные замечания не влияют на общую высокую оценку работы Н.Ю.Агафоновой и не ставят под сомнение основные результаты и выводы, полученные в диссертации. Личный вклад автора в работу LVD детектора, включенного в мировую сеть слежения за появлением сверхновых, очень велик.

Оформление рукописи соответствует принятым правилам и стандартам. Автореферат полно и точно отражает содержание диссертации. В опубликованных автором работах полно отражены основные результаты и положения диссертации.

Диссертация Натальи Юрьевны Агафоновой «Изучение мюонов космических лучей и нейтронов, генерируемых ими под землей в детекторе LVD» выполнена на высоком научном

уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16- Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв составила нач. лаб.

"Сильных взаимодействий"

ФГБУ "ГНЦ РФ - ИТЭФ"

НИЦ "Курчатовский институт"

_____ к.ф.-м.н. О.Я. Зельдович

г. Москва " _____ " _____ 2015 г.

Почтовый адрес:

117218, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, д. 25

тел. +7-495-1274742, e-mail: olga.zeldovich@itep.ru

Результаты диссертации обсуждались и были одобрены на научном заседании секции №2 Ученого Совета ИТЭФ. Протокол № 53 от 26.02.2015 г.

Председатель секции Ученого Совета _____

член-корр. П.Н. Пахлов

Секретарь секции Ученого Совета _____

к.ф.-м.н. Е.И. Тарковский

Подпись О.Я. Зельдович удостоверяю,

ученый секретарь ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ"

НИЦ "Курчатовский институт"

_____ к.ф.-м.н. В.В. Васильев

Данные об организации

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение

"Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт Теоретической и Экспериментальной Физики" ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ"

2. Москва

3. 117218 Россия, Москва ул. Большая Черемушкинская, 25. ФГБУ

"ГНЦ РФ ИТЭФ"; Факс +7 (499) 127-08-33 (канцелярия) тел. +7 (499)

123-80-93 E-mail: director@itep.ru Официальный сайт ИТЭФ:

<http://www.itep.ru>

4. Основные публикации по теме защищаемой диссертации за 5 лет:

1. В.А.Белов, Э.В.Брахман, О.Я.Зельдович, и др.

«Измерение нейтронного фона в эксперименте "ДЕВИЗ"», ПТЭ, 2010, №5, с.13-18

2. В.А.Белов, Э.В.Брахман, О.Я.Зельдович, и др.

"Исследование 2 β -распада ^{136}Xe на трековой установке ДЕВИЗ", ПТЭ, 2012, №5, с. 24-33

3. В.А.Белов, Э.В.Брахман, О.Я.Зельдович, и др., "Измерение периода полураспада ядра ^{214}Po на трековой установке ДЕВИЗ", ЯФ, 76, №4, с. 397- 403, 2013

4. M.Auger, V. Belov, et al., EXO-coll., "The EXO-200 detector, part I: Detector design and construction", JINST 7, 2012, P05010

5. N.Ackerman, ...V.Belov,.. O.Zeldovich, et al., EXO-coll., "Observation of two-neutrino double-beta decay in ^{136}Xe with EXO-200", Phys. Rev. Lett. 107, 2011, 212501

6. M.Auger, ...V.Belov,.. O.Zeldovich, EXO-coll., "Search for Neutrinoless Double-Beta Decay in ^{136}Xe with EXO-200", Phys.Rev.Lett. 109, 2012, 032505

7. A.Dobi,..A Karelin, et al., EXO-coll., "A xenon gas purity monitor for EXO-200", NIMA, 659, 2011, 215

8. A.Dobi,..A Karelin, et al., EXO-coll., "Xenon purity analysis for EXO-200 via mass spectrometry", NIM A 675 (2012) 40

9. J.B. Albert,..V.Belov,..O.Zeldovich, EXO-coll, "An improved measurement of the 2 β 2 ν half-life of ^{136}Xe with EXO-200", Phys. Rev. C 89, (2014) 015502

10. J.B. Albert,..V.Belov,.. O.Zeldovich, EXO-coll, "Search for Majorana neutrinos with the first

two years of EXO-200 data", Nature, vol. 510, 229, (2014)

11. J.B. Albert,...V.Belov,...O.Zeldovich, EXO-coll, "Search for Majoron-emitting modes of double-beta decay of ^{136}Xe with EXO-200", Phys.Rev. D, 90, 092004, (2014)

12. B.Mong, ..., A.Karelin, et al., EXO-Coll, "Spectroscopy of Ba and Ba⁺ deposits in solid xenon for barium tagging in nEXO", Phys. Rev. A, 91, 02205 (2015)

13. K. Twelker,...,A.Karelin, et al., EXO-Coll, "An apparatus to manipulate and identify individual Ba ion from bulk liquid Xe", Rev. Scien. Instr. (2014), 85, 0955114

14. T.Brunner,...,V.Varentsov, A.Karelin et al., EXO-Coll, "An RF- only ion-funnel for extraction from high pressure gases", published at Int. Jour. Mass Spec., IJMS-D-14-00330R1

15. D.Yu. Akimov, I.S. Alexandrov,..O.Ya.Zeldovich, RED-coll, "Perspectives to measure neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase emission detector", JINST 8, 2013, P10023