

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Рогановой Татьяны Михайловны 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.

В диссертации Н.Ю. Агафоновой в рамках проекта LVD (Large Volume Detector), работающего в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), проведено исследование взаимодействий мюонов космических лучей и выполнено измерение основных характеристик нейтронов, образуемых мюонами в разных веществах под землей и создающих фон в низкофоновых подземных экспериментах. **Актуальность диссертационной работы Н.Ю.Агафоновой** не вызывает сомнений и связана прежде всего с постановкой и проведением масштабных экспериментов по поиску редких процессов в области физики нейтрино, нейтринной астрофизики и физике высоких энергий. Известно, что основными источниками фона являются мюоны космических лучей и нейтроны, возникающие в процессе взаимодействия мюонов с веществом. Для надежного определения фона в низкофоновых подземных экспериментах необходимо хорошо знать зависимости характеристик нейтронов от энергии мюонов и атомного веса вещества. К сожалению, соответствующие экспериментальные данные, полученные до настоящего времени, не достаточны, имеют значительные ошибки, получены в ограниченном энергетическом диапазоне (<100 МэВ). Диссертационная работа Н.Ю.Агафоновой во многом заполняет этот пробел.

Научная новизна диссертации Н.Ю. Агафоновой состоит в следующем:

- с использованием особенностей сцинтилляционного детектора большого объема LVD (подробное описание установки, системы регистрации и сбора данных дано в главе 1) **разработана методика** изучения характеристик мюонов. Получены угловые распределения, кратности мюонных групп и распределение по расстояниям между траекториями мюонов во множественных событиях (глава 2);
- впервые разработан оригинальный метод определения зарядового состава мюонов, направление движения которых близко к вертикали (глава 3);
- впервые прямым методом измерена величина генерации нейтронов, образуемых мюонами со средней энергией 280 ГэВ в железе (глава 4);
- впервые экспериментально получен спектр генерации нейтронов мюонами в диапазоне энергий нейтронов 30 – 450 МэВ (глава 4).

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные в диссертации важные результаты позволят повысить точность определения фона в низкофоновых экспериментах по поиску редких событий.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка цитируемой литературы, списка сокращений и обозначений, списка рисунков и списка публикаций автора по теме диссертации.

В Главе 1 дано подробное описание детектора LVD с указанием его местоположения и конструктивных особенностей. Достаточно подробно описаны характеристики сцинтилляционных счетчиков, системы регистрации и сбора данных, а также энергетическая калибровка в области низких и высоких энергий. Приведены физические характеристики детектора: светосбор, энергетическое разрешение и эффективность регистрации нейтронов.

В главе 2 приводится описание методики реконструкции мюонных событий в эксперименте LVD и проведен анализ характеристик потока мюонов. Автором диссертации разработан метод реконструкции мюонных событий. На статистике $2 \cdot 10^6$ мюонных событий получены **характеристики потока мюонов** на глубине расположения установки LVD: угловое распределение, спектр кратности групп мюонов, кривая раздвижения. Эти характеристики, представленные в табличном и графическом виде, могут быть использованы при анализе экспериментальных данных других экспериментов.

Глава 3 посвящена определению μ^+/μ^- -отношения в потоке мюонов на установке LVD. В диссертации разработан и подробно описан новый оригинальный метод определения зарядового состава (положительного избытка) потока мюонов с углами до $\sim 30^\circ$ с первичной энергией, превышающей 1.8 ТэВ. На статистике $11 \cdot 10^6$ мюонов, зарегистрированных счетчиками LVD, получена величина положительного избытка мюонов $k = 1.26 \pm 0.04$ (стат) ± 0.11 (сис).

В Главе 4 представлены экспериментальные результаты по **основным характеристикам нейтронов от мюонов**. Эти результаты являются фундаментальными и очень важны для оценки фона при проведении низкофоновых экспериментов. Для определения спектра генерации нейтронов обработано $1.5 \cdot 10^5$ мюонных событий. Получен выход нейтронов, генерированных мюонами со средней энергией 280 ГэВ в сцинтилляторе, и дифференциальный энергетический спектр нейтронов в диапазоне 30 – 450 МэВ. С участием автора диссертации спланирован и выполнен эксперимент на LVD по прямому измерению генерации нейтронов в железе. На статистическом материале, полученном в течение 1 года, измерена величина генерации нейтронов в железе от мюонов со средней энергией 280 ГэВ. Определено среднее число нейтронов, испускаемых ядром железа при поглощении отрицательного мюона.

В заключении представлены основные результаты работы и выводы, выносимые на защиту:

Первый и второй выводы представляется обоснованными. Следует отметить, что все полученные в диссертации на установке LVD физические результаты основаны на разработанном автором методе реконструкции мюонных событий. С использованием данного метода с точностью 0.5° были определены направления мюонов, кратности мюонных групп и кривая раздвижения.

Третий вывод диссертации также хорошо обоснован. Предложенный в диссертации метод определения зарядового состава мюонов по распадам отрицательных и положительных мюонов, остановившихся в детекторе LVD, позволил получить величину положительного избытка мюонов $k = 1.26$ при систематической ошибке 9% для близкого к вертикале ($\theta < 40^\circ$) потока мюонов со средней энергией $\sim 1,8$ ТэВ. Соглашусь с мнением автора, изложенным на стр.61 диссертации, что «при значительной систематической ошибке величины k работа ...показала, что детектор, состоящий из легкого вещества (жидкий сцинтиллятор) и тяжелого (Fe), дает возможность определить отношение μ^+/μ^- по зарядовому составу останавливающихся мюонов. Ценность физического результата может быть повышена при уменьшении систематической ошибки и увеличении статистики.»

Интересными и полезными представляются **четвертый и пятый выводы** диссертации. Измеренная автором величина генерации нейтронов в железе $Y_n = (16 \pm 4) \cdot 10^{-4}$ н/м/(г/см²) для потока мюонов со средней энергией $E_\mu = (280 \pm 18)$ ГэВ и измеренная форма спектра $F_n^s(T_n)$ генерации нейтронов в диапазоне 30–450 ГэВ:

$$F_n^s(T_n) \sim T_n^{-1} \text{ при } 30 \leq T_n \leq 90 \text{ МэВ};$$

$$F_n^s(T_n) \sim T_n^{-2} \text{ при } 100 \leq T_n \leq 450 \text{ МэВ}$$

представляются достаточно обоснованными.

Достоверность результатов и методических разработок, полученных в диссертации, обеспечена использованием хорошо апробированных методов расчета (кодов GEANT4, FLUKA), проведением оценок точности полученных результатов и сравнением их с результатами исследований других авторов.

Замечания по работе в целом

1. Диссертационная работа содержит 52 рисунка и 7 таблиц. К сожалению, не всегда выбранный масштаб позволяет отличить друг от друга представленные различными значками результаты (рис.1.10, рис.2.1, рис.3.1, таблица 4.3).

2. В главе 2 на стр. 37 вводится величина δ_0 , которая выражает относительное отклонение полного расчетного энерговыделения от измеренного для первоначально реконструированной группы мюонов. Затем из группы поочередно исключается одна из траекторий и заново определяется δ_1 , а также соответствующая величина $\Delta\delta = \delta_0 - \delta_1$. Граничная величина, с помощью которой удаляются мнимые траектории, выбирается равной $\Delta\delta = 0.045$. Автор диссертации указывает, что это значение «определяется на базе экспериментальных данных с визуальным контролем событий». Что это такое, остаётся не вполне ясным.

3. В главе 3 («Определение зарядового состава атмосферных мюонов») на рис. 3.1 показано, что появление кварк-глюонной плазмы во взаимодействиях частиц первичного космического излучения с ядрами воздуха приводит к уменьшению величины положительного избытка мюонов. К сожалению, в тексте диссертации не приводится обсуждения этого интересного эффекта.

4. В главе 4 диссертации, посвященной генерации мюонами со средней энергией 280 ГэВ в сцинтилляторе и железе нейтронов, не приводится ошибка в определении этой средней энергии. Знание этой ошибки необходимо для представления значимости полученных результатов.

5. В главе 4 разделе 4.3.3 (стр. 82) указывается, что «соответствие между E_d и T_p устанавливалось моделированием прохождения нейтрона через счетчики d-объема методом МК». Для полноты картины хотелось бы представить описание МК моделирования.

Указанные замечания и имеющиеся мелкие неточности не меняют общей высокой оценки работы. Диссертация написана хорошим языком, оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Основные результаты диссертационной работы Агафоновой Натальи Юрьевны известны научной общественности. Сделанные выше замечания призваны, главным образом, стимулировать дальнейшее совершенствование анализа, в том числе и при написании итоговой публикации.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа 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 No 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Агафонова Наталья Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Заведующий лабораторией
отдела ОИВМ НИИЯФ МГУ
доктор физ.-мат. Наук
e-mail : rogam@yandex.ru

Т.М. Роганова

Подпись Рогановой Т.М.
удостоверяю
Директор НИИЯФ МГУ
профессор

М.И. Панасюк

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ)

Тел.: (495)939-18-18

Факс: (495)939-08-96

Электронный адрес администрации института: info@sinp.msu.ru

Роганова Татьяна Михайловна

доктор физико-математических наук,

заведующая лабораторией теории электронно-фотонных ливней,

Отдел излучений и вычислительных методов Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ)

Основные публикации по теме защиты:

1. Деденко Л.Г., Глушков А.В., Кнуренко С.П., Макаров И.Т., Правдин М.И., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Слепцов И.Е., Федорова Г.Ф., Федунин Е.Ю. «Частицы первичного космического излучения, генерирующие в атмосфере широкие атмосферные ливни с энергией выше 10^{20} эВ» Ядерная физика. том 73, н. 12, с. 1-8, 2010.
2. Ракобольская И.В., Роганова Т.М. «РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМУЛЬСИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ» Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. н. 3, с. 4654, 2010.
3. Деденко Л.Г., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф. «Пространственновременная структура импульсов в детекторах черенковского света от широких атмосферных ливней» Вестник Московского университета. н. 2, с. 79-81, 2010.
4. Деденко Л.Г., Глушков А.В., Кнуренко С.П., Макаров И.Т., Правдин М.И., Роганова Т.М., Слепцов И.Е., Федорова Г.Ф. «Об изменении химического состав первичного космического излучения в области сверхвысоких энергий» Известия РАН. Серия физическая. том 75, н. 3, с. 325-327, 2011.
5. Glushkov A.V., Knurenko S.P., Makarov A.K., Makarov I.T., Pravdin M.I., Roganova T.M., Sleptsov I.Ye, Dedenko L.G., Fedorova G.F., Sabourov A. «Estimation of the mass composition of ultra-high energy cosmic rays by muon fraction in extensive air showers» Proc. 32-nd Int. Cosmic Ray Conf. (Beijing), 2011. vol. 1, pp. 213-217, 2011.
6. Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф. «Сигналы в подземных сцинтилляционных детекторах Якутской установки от мюонной компоненты широких атмосферных ливней» Вестник МГУ. Физика. н. 4, с. 37-41, 2011.
7. Антонов Р.А., Бесшапов С.П., Бонвеч Е.А., Галкин В.И., Джатдоев Т.А., Петкун А.С., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Сысоева Т.И., Фингер Мих, Фингер Мир, Чернов Д.В., Шаулов С.Б. «ЭКСПЕРИМЕНТ СФЕРА: БАЙКАЛ 2010 Г» Известия Российской академии наук. Серия физическая. том 75, н. 6, с. 923-925, 2011.
8. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Glushkov A.V., Knurenko S.P., Makarov A.K., Makarov L.T., Pravdin M.I., Roganova T.M., Sabourov A.A., Sleptsov I.Ye «The composition of the primary

particles at energies 3×10^{17} – 3×10^{19} eV observed at the Yakutsk array» Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. vol. 39, n. 9, pp. 095202-095212, 2012.

9. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Glushkov A.V., Knurenko S.P., Makarov A.K., Makarov L.T., Pravdin M.I., Roganova T.M., Sabourov A.A., Sleptsov I.Ye «Possible composition of the primary particles at ultrahigh energies observed at the Yakutsk array» Journal of Physics: Conference Series. vol. 409, pp. 2068-2071, 2013.

10. Antonov R.A., Beschapov S.P., Bonvech E.A., Chernov D.V., Dzhatdov T.A., Finger Mir, Finger Mix, Galkin V.I., Kabanova N.V., Petkun A.S., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Shaulov S.B., Sysoeva T.I. «Results on the primary CR spectrum and composition reconstructed with the SPHERE-2 detector» Journal of Physics. vol. 409, n. 1, pp. 012088-012091, 2013.

11. Antonov R.A., Beschapov S.P., Bonvech E.A., Chernov D.V., Dzhatdov T.A., Finger Mir, Finger M., Galkin V.I., Kabanova N.N., Petkun A.S., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Shaulov S.B., Sysoeva T.I. «Status of the SPHERE experiment» Journal of Physics. vol. 409, n. 1, pp. 012094-012097, 2013.

12. Антонов Р.А., Бесшапов С.П., Бонвеч Е.А., Галкин В.И., Джатдоев Т.А., Кабанова Н.Н., Петкун А.С., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Сысоева Т.И., Мир Фингер, Мих Фингер, Чернов Д.В., Шаулов С.Б. «РЕКОНСТРУКЦИЯ СПЕКТРА ВСЕХ ЯДЕР И ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНОГО СОСТАВА ПКЛ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СФЕРА» Известия РАН. Серия физическая. том 77, н. 11, с. 1564-1567, 2013.

13. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Roganova T.M., «Units of signals in the surface and underground scintillation detectors of the Yakutsk array» Journal of Physics: Conference Series. vol. 409, pp. 2093-2096, 2013.

14. Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф. «Единицы измерения сигналов в наземных и подземных детекторах Якутской установки» Известия РАН. Серия физическая. том 77, н. 11, с. 1561-1563, 2013.

15. Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф. «Тестирование моделей взаимодействия адронов в наиболее важной области энергий вторичных частиц по спектрам атмосферных мюонов» Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". том 100, н. 4, с. 247-251, 2014.