

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Петрухина Анатолия Афанасьевича
на диссертацию 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

Актуальность тематики диссертации не вызывает никаких сомнений в связи с бурным развитием экспериментальных работ по поиску и исследованию редких процессов и новых частиц в подземных лабораториях. При проведении таких экспериментов нейтроны являются основным источником трудноустраняемого фона, который может имитировать результаты взаимодействия нейтрино, распад протона, регистрацию частиц темной материи и т.п. Поэтому наличие возможности точно оценивать нейтронный фон может уберечь от некорректных результатов и скоропалительных выводов. А именно достижению этой цели посвящена диссертационная работа Мальгина А.С.

Результаты, полученные в диссертации можно разделить на три части.

Первая часть посвящена оценкам выхода космогенных нейтронов в зависимости от средней энергии мюонов E_μ и массового числа вещества A . После тщательного и всестороннего анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных по оценке этой величины впервые получена универсальная формула для выхода космогенных нейтронов, которая является безусловно полезной для оценки нейтронного фона в любых подземных лабораториях. Весьма важными представляются результаты рассмотрения механизмов генерации космогенных нейтронов, включая их образование в адронных и электромагнитных каскадах. По результатам этой части можно сделать следующие замечания.

В качестве доказательства хорошего согласия результатов, полученных по универсальной формуле, с экспериментальными данными приведен рис. 1.7 (стр. 62). Но представленные на нем величины являются функциями глубины расположения лаборатории, массового состава грунта над ней и рассчитанной на этой основе средней энергии мюонов. Поэтому по оси абсцисс должна откладываться глубина стандартного грунта, в которой учитывается массовый состав Земли над установкой, а по оси ординат результаты измерений и расчетов с учетом соответствующих погрешностей и неопределенностей, как это сделано, например, на рис. 1.6 (стр. 61). При этом расчет должен быть независимым, без использования данных эксперимента.

Сопоставление универсальной формулы с результатами расчетов по Geant4 приведено на рис. 3.3 (стр. 83), из которого видно, что полученная зависимость от A подтверждается моделированием, хотя и имеется систематический сдвиг. В то же время утверждение автора, что полученная универсальная формула позволяет вычислять выход нейтронов для любого вещества на любой глубине с точностью не хуже 20%,

противоречит результатам моделирования, которые свидетельствуют о том, что выход нейтронов для близких по атомной массе веществ может отличаться в несколько раз.

При обсуждении вопроса о величинах средней энергии мюонов в подземных лабораториях автор подробно разбирает результаты соответствующих расчетов, но почему-то проигнорировал результаты измерения этой величины в эксперименте NUSEX на глубине 5000 м.в.э. (С. Castagnoli et al. *Astroparticle Physics* 6 (1997) 187), которая, кстати, хорошо соответствует модели 2 на рис. 1.4 (стр. 49).

Вторая часть полученных результатов описывает такие характеристики космогенных нейтронов, как энергетический спектр и пространственное распределение. Эти характеристики также важны для оценки нейтронного фона. Зная энергетический спектр, можно установить энергетический порог, который отсекает значительную часть фоновых событий. Аналогичная ситуация с пространственным распределением космогенных нейтронов, зная которое можно оценить, когда нейтроны становятся изолированными и когда вероятность их обнаружения становится существенно меньше 1. Автором предложено разбиение энергетического спектра космогенных нейтронов на три области (или три компоненты) в зависимости от процессов их образования. В целом такой подход представляется достаточно убедительным.

При этом остается непонятным, почему спектр космогенных нейтронов ограничивается сверху величиной 1 ГэВ (см. выводы к главе 4 на стр. 127). Что, нейтроны больших энергий не генерируются вообще или их вклад в нейтронный фон пренебрежимо мал? Вопрос интересный, тем более, что на стр. 129 указано, что спектры космогенных нейтронов, полученные методом Монте-Карло, не демонстрируют резкого изменения формы в районе энергий выше 1 ГэВ.

Полученная в диссертации функция пространственного распределения в виде $R^{-2.3}$ сравнивается с результатами различных экспериментов (рис. 5.11, стр. 147) и занижение нейтронного фона в данных экспериментов *Vorexino* и *Daya Bay* объясняется действием краевого эффекта. К сожалению, в диссертации не приводится сравнение этой аппроксимации с хорошо статистически обеспеченными данными *KamLAND* (рис. 5.9а на стр. 145).

Третья часть полученных результатов посвящена сезонным вариациям нейтронного фона. Показано, что амплитуда вариаций потока космогенных нейтронов в шесть раз превышает амплитуду вариаций генерирующих их мюонов, и сопоставление рисунков 6.2 (стр. 152) и рис. 6.4-6.5 (стр. 155-156) это подтверждает. Однако утверждение автора диссертации об обнаружении нового эффекта в физике атмосферных мюонов (выводы к 6 главе, стр. 170) – сезонных вариациях средней энергии мюонов на поверхности Земли в ТэВ-ной области (а также наклона спектра) следовало бы подкрепить детальными расчетами на современной базе. Так, широко используемая в физике космических лучей программа моделирования методом Монте-Карло широких атмосферных ливней *CORSIKA* позволяет задавать параметры атмосферы (например, в

летний или зимний период) и оценить их влияние как на интенсивность мюонов ТэВ-ных энергий, так и на их среднюю энергию.

Достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена, во-первых, тщательным и скрупулезным анализом практически всех имеющихся экспериментальных и теоретических данных по космогенным нейтронам, а во-вторых, хорошим согласием результатов расчетов по формулам, полученным в диссертации, с имеющимися экспериментальными данными.

Научная новизна. Формулировки научной новизны, приведенные в диссертации и автореферате, оставляют желать лучшего. Действительно, из шести пунктов научной новизны – в четырех написано «получено выражение», в одном «установлена форма» и лишь в последнем «обнаружен эффект». На мой взгляд научная новизна большинства полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений, так как они впервые получены автором и закреплены в соответствующих публикациях. К таким результатам необходимо отнести получение универсальной формулы для выхода космогенных нейтронов и пионов, данные по форме энергетического спектра и пространственного распределения космогенных нейтронов, а также результаты исследования их сезонных вариаций.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что она представляет собой серьезный научный труд, свидетельствующий о высокой квалификации автора. Диссертация хорошо структурирована и логически выстроена, написана хорошим языком и содержит небольшое количество стилистических погрешностей. Тем не менее диссертационная работа не лишена отдельных недостатков, среди которых необходимо отметить следующие.

На многих рисунках, на которых приводятся результаты расчетов и даже измерений, не указаны погрешности (см., например, рис. 1.7, рис. 3.2 и 3.3, рис. 3.8, рис. 4.13 и 4.14, рис. 5.11).

На стр. 90 утверждается, что формула (3.1) для оценки средней энергии мюонов на некоторой глубине грунта с учетом спектра взята из работы [76] D.E. Groom et al. *Atom. Data and Nucl. Data Tables* 78 (2001) 183, однако в указанной работе такой формулы нет.

На стр. 149 увеличение вероятности распада мюонов вследствие летнего расширения атмосферы объясняется барометрическим эффектом (!?), хотя автор диссертации ссылается на работу [130] P.M.S. Blackett. *On the instability of the barytron and the temperature effect of cosmic rays.* *Phys. Rev.* 54 (1938) 973, в которой обсуждается температурный эффект.

Иногда в тексте диссертации появляются и такие "шедевры": "ввиду ортогональности и подобия формы ЖС и контейнера (прямоугольный параллелепипед) ..." (стр. 43), "... взаимодействиями в ядре вещества" (стр. 127), "... связь характеристик LVD-мюонов ..." (стр. 160).

Основные результаты диссертации представлялись на различных российских и международных конференциях, опубликованы в большом количестве журнальных статей и хорошо известны научной общественности.

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 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Мальгин Алексей Семенович, за решение комплекса вопросов, связанных с проблемой нейтронного фона в подземных экспериментах, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в физике космических лучей, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 "Физика атомного ядра и элементарных частиц".

Официальный оппонент,

главный научный сотрудник Научно-образовательного центра НЕВОД,

д.ф.-м.н., профессор

А.А. Петрухин

тел.: +7(499)788-56-90, доб. 99-29

11.12.2018

e-mail: aapetrukhin@mephi.ru

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

115409, Москва, Каширское шоссе, д.31

Подпись Петрухина А.А. заверяю.

Начальник отдела кадрового
делопроизводства и
администрирования
Л.В. Васильченко

Петрухин Анатолий Афанасьевич

доктор физико-математических наук (шифр специальности - 01.04.16 "Физика атомного ядра и элементарных частиц"), профессор, главный научный сотрудник, руководитель Научно-образовательного центра НЕВОД Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"

aapetrukhin@mephi.ru;

тел. +7 (495) 788-56-99, доб. 9929, факс +7 (499) 324-87-80;

115409, г. Москва, Каширское ш., 31, НИЯУ "МИФИ".

Список избранных публикаций Петрухина А.А. за 2014-2018 гг.:

1. A.G. Bogdanov, R.P. Kokoulin, G. Mannocchi, A.A. Petrukhin, O. Saavedra, V.V. Shutenko, G. Trinchero, I.I. Yashin "Investigation of very high energy cosmic rays by means of inclined muon bundles". *Astroparticle Physics* 98 (2018) 13-20.
2. A.A. Petrukhin, A.G. Bogdanov, R.P. Kokoulin "Cosmic Ray Muons of High and Ultrahigh Energies". *Physics of Particles and Nuclei* 49 (2018) 639-651.
3. D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, A.A. Lakhonin, A.A. Petrukhin, Y.V. Stenkin, O.B. Shchegolev, K.O. Yurin, I.I. Yashin. "Low-background EN-detector for the investigation of the neutron component of EASs". *Physics of Particles and Nuclei* 49 (2018) 47-50.
4. A.A. Petrukhin, I.I. Yashin "Cherenkov Water Detectors in Particle Physics and Cosmic Rays. *Physics of Atomic Nuclei*". 80 (2017) 1557-1566.
5. Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Khokhlov S.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Petrukhin A.A., Shulzhenko I.A., Stenkin Y.V., Yashin I.I., Yurin K.O. "The array of scintillation detectors with natural boron for EAS neutrons investigations", *Journal of Instrumentation* 12 (2017) C07029.
6. D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, A.A. Petrukhin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, I. I. Yashin and K.O. Yurin "Temporal and lateral distributions of EAS neutron component measured with PRISMA-32". *Journal of Physics: Conf. Series* 798 (2017) 012202.
7. Д.М. Громушкин, В.И. Волченко, А.А. Петрухин, Ю.В. Стенькин, В.И. Степанов, О.Б. Щеголев, И.И. Яшин "Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ". *Ядерная физика* 78 (2015) 379-382.
8. А.А. Петрухин "Черенковский водный детектор НЕВОД". *УФН* 185 (2015) 521-530.
9. A.A. Petrukhin, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, I.I. Yashin "EAS spectrum in thermal neutrons measured with PRISMA-32". 34th International Cosmic Ray Conference 2015, Hague, Netherlands. *Proceedings of Science (ICRC-2015)* 427.
10. A.A. Petrukhin "Muon puzzle in cosmic ray experiments and its possible solution" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 742 (2014) 228-231.