

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт»
Е.Б. Яцишина

«16» ноября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Мальгина Алексея Семеновича «Космогенные нейтроны в низкофоновых подземных экспериментах», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Диссертация посвящена комплексным исследованиям характеристик космогенных нейтронов, которые образуются в веществе под действием мюонов космических лучей.

Актуальность темы исследования

Сегодня развитие неускорительной экспериментальной физики частиц происходит, главным образом, за счет крупномасштабных, низкофоновых детекторов, которые решают задачи в области нейтринной астро- и гео-физики, ведут поиск частиц темной материи и других редких процессов. В таких детекторах основным источником трудноустраняемого фона являются производимые космическими мюонами в веществе детекторов космогенные нейтроны. Трудности при определении характеристик таких нейтронов возникают из-за взаимосвязи процессов в области высоких энергий (генерация мюонами адронных и электромагнитных ливней) с ядерно-физическими явлениями в области низких энергий, сопровождающимися выходом нейтронов из ядер. Для учета фона от космогенных нейтронов в подземных экспериментах и его минимизации необходимо знать их характеристики: удельный выход в зависимости от вещества и энергии мюонов, энергетический спектр, пространственное распределение и др. Таким образом, актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

Научная новизна исследования и полученных результатов

Автором диссертационной работы получены новые результаты, относящиеся к разделу «проникающая компонента» физики космических лучей:

1. На основе экспериментальных данных впервые получено выражение для выхода космогенных нейтронов, связывающее энергетические потери мюонов со средней энергией потока мюонов и массовым числом; установлено выражение для потока космогенных нейтронов в стандартном грунте.
2. Получено выражение для выхода заряженных пионов, образуемых мюонами, в зависимости от средней энергии потока мюонов и массового числа среды.
3. Установлена форма энергетического спектра генерации и спектра изолированных космогенных нейтронов с энергиями выше 30 МэВ на базе аддитивной кварковой модели глубоконеупругих процессов.
4. Установлено выражение, описывающее пространственное распределение космогенных нейтронов, объяснены несоответствия в результатах имеющихся измерений.
5. Определены характеристики сезонных вариаций потока космогенных нейтронов и обнаружен новый эффект – сезонные вариации средней энергии мюонов под землей.

Практическая значимость

Решавшиеся в диссертации задачи продиктованы потребностями низкофоновых подземных экспериментов. Совокупность полученных в работе результатов позволяет производить количественные оценки характеристик потока космогенных нейтронов в различных детектирующих средах и на различных глубинах. В работе также указывается направление совершенствования пакетов Монте-Карло моделирования (GEANT4, FLUKA), без которых сегодня не обходится ни один крупный эксперимент в физике частиц.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации результаты несомненно будут востребованы при планировании и анализе данных будущих подземных низкофоновых экспериментов, нацеленных на поиск редких процессов (изучение нейтрино от Солнца, гео-нейтрино, нейтрино от Сверхновых, поиск частиц темной материи).

Апробация научных результатов и положений

Основные положения диссертационной работы и полученные в ней результаты опубликованы в реферируемых журналах из списка рекомендованных ВАК (всего 17 работ) и неоднократно представлялись на международных конференциях и симпозиумах.

Оформление диссертации и автореферата

Диссертация содержит шесть глав, оптимально структурирована, написана блестящим языком. В конце каждой главы даются основные выводы, что существенно облегчает восприятие работы. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации и в полной мере соответствует требованиям паспорта специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Общие замечания

Впечатляет многосторонность и полнота рассмотрения предмета диссертационного исследования – космогенных нейтронов, а также стройность изложения материала. Очевидно, что взгляд автора на тему исследования, вылившийся в настоящую диссертацию, сложился в результате его многолетней работы в этой области.

В то же время, к содержанию диссертации можно сделать следующие комментарии и замечания:

1. В работе на основе всестороннего анализа имеющихся экспериментальных данных получена универсальная формула для выхода космогенных нейтронов в зависимости от средней энергии потока мюонов и массового числа среды, при этом утверждается, что точность универсальной формулы не хуже 20%. Точность определяется погрешностями измерений выхода, которые, в свою очередь, зависят от точности установления средней энергии мюонов. Поскольку на разных глубинах и в разных экспериментах эта точность различна, для дальнейших практических применений было бы полезно привести точность универсальной формулы, как функцию средней энергии мюонов (глубины подземной лаборатории).
2. В работе обсуждаются измерения энергетического спектра космогенных нейтронов по протонам отдачи при помощи секционированного, жидко-сцинтилляционного детектора LVD. Измерения энергии в жидких

сцинтилляторах требуют учета квенчинг-эффекта для протонов. В работе, однако, не сказано, как определялся квенчинг протонов в сцинтилляторе LVD?

3. В числе крупномасштабных подземных установок, наблюдавших сезонные вариации потока космических мюонов (стр. 151), также можно упомянуть детектор GERDA в лаборатории Гран-Сассо (Италия). Соответствующие результаты были опубликованы: M. Agostini *et al.* (GERDA collab.), Flux modulations seen by the muon veto of the Gerda Experiment, *Astropart. Phys.* **84** (2016) 29.
4. При рассмотрении эффекта сезонных вариаций потока космогенных нейтронов разностным методом для относительной амплитуды вариаций получено $(\delta N_n / N_n^0) = 0.077 \pm 0.002$ (стат.) ± 0.016 (сис.). В оценке точности измерений доминирует систематическая погрешность, однако ее источники в работе не указаны.
5. Текст диссертации содержит ряд опечаток («интервал» на стр. 63, «глубкоупругого» на стр. 67, «июонов» на стр. 161 и др.). Помимо этого, имеется несоответствие указанных в тексте интервалов наблюдений вариаций нейтронов в эксперименте LVD: на стр. 154 и рис. 6.4 а, б указан интервал 16 лет, в то время как в выводах к главе 6 на стр. 171 фигурирует интервал 15 лет.

Заключение

Отмеченные недостатки не снижают достоинств диссертации, которая представляет собой законченное исследование и имеет высокую научную и практическую значимость для физики атомного ядра и элементарных частиц. Выполненные в диссертации исследования соответствуют областям «физика космических лучей» и «нейтронная физика» из паспорта специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц». В диссертации разработаны феноменологические и теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение. Диссертация в полной мере является научно-квалификационной работой, в которой, на основании проведенных автором теоретических и экспериментальных исследований, решается комплекс важных научных проблем в области физики элементарных частиц. Ее результаты будут востребованы при планировании и анализе данных будущих низкофоновых экспериментов, нацеленных на поиск частиц темной материи, безнейтринный двойной бета-распад и др. задачи.

Таким образом, диссертация Мальгина Алексея Семеновича «Космогенные нейтроны в низкофоновых подземных экспериментах» соответствует

требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации «24» сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Отзыв составил:

кандидат физико-математических наук,
начальник лаборатории физики нейтрино
Отделения физики нейтрино
НИЦ «Курчатовский институт»
Литвинович Евгений Александрович

Диссертация и автореферат рассмотрены, а отзыв обсужден и одобрен в Отделении физики нейтрино НИЦ «Курчатовский институт» «31» октября 2018 г., протокол №115-7.

Руководитель Отделения физики нейтрино
НИЦ «Курчатовский институт»,
доктор физико-математических наук
Скорохватов Михаил Дмитриевич

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»
Стремоухов Сергей Юрьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

123182, Россия, г.Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
Телефон: +7 (499) 196-9539

e-mail: nrcki@nrcki.ru

сайт: www.nrcki.ru

Сведения о ведущей организации по диссертационной работе

Мальгина Алексея Семеновича

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

<p>Полное и сокращенное наименование организации</p>	<p>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)</p>
<p>Место нахождения (город, область)</p>	<p>Москва</p>
<p>Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, адрес официального сайта организации в сети Internet (при наличии)</p>	<p>123182, Россия, г.Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Телефон: +7 (499) 196-9539 Эл. почта: nrcki@nrcki.ru Официальный сайт: www.nrcki.ru</p>
<p>Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющих отзыв, за последние 5 лет по теме диссертации</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Atroshchenko V., Litvinovich E., Lukyanchenko G., Lukyanchenko L., Machulin I., Orekhov V., Raikov G., Skorokhvatov M., Toropova M. <i>et al.</i>, Comprehensive measurement of <i>pp</i>-chain solar neutrinos, <i>Nature</i> 562, 505 (2018). 2. Machulin I., Nozdrina A., Pugachev D., Skorokhvatov M., Suvorov Y., Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment, <i>Phys. Rev. Lett.</i> 121, 081307 (2018). 3. Atroshchenko V., Borodikhina L., E. Litvinovich, G. Lukyanchenko, I. Machulin, M. Skorokhvatov, M. Toropova <i>et al.</i>, The Monte Carlo simulation of the Borexino detector, <i>Astropart. Phys.</i>, 97, 136 (2018). 4. Atroshchenko V., E. Litvinovich, G. Lukyanchenko, L. Lukyanchenko, I. Machulin, V. Orekhov, G. Raikov, M. Skorokhvatov, M. Toropova <i>et al.</i>, A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino detector, <i>Astrophys. J.</i>, 850:21 (2017).

5. Etenko A., Skorokhvatov M., Sukhotin S. *et al.*, Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors, JCAP 2, 17 (2017).
6. Litvinovich E., Lukyanchenko G., Lukyanchenko L., Machulin I., Skorokhvatov M., Toropova M. *et al.*, Borexino: geo-neutrino measurement at Gran Sasso, Italy, Annals of Geophysics, 60, 1 (2017) S0114.
7. Atroshchenko V., E. Litvinovich, G. Lukyanchenko, L. Lukyanchenko, I. Machulin, V. Orekhov, G. Raikov, M. Skorokhvatov, M. Toropova *et al.*, Limiting neutrino magnetic moments with Borexino Phase-II solar neutrino data, Phys. Rev. D 96, 091103(R) (2017).
8. Atroshchenko V., Borodikhina L., Litvinovich E., Lukyanchenko G., Machulin I., Skorokhvatov M., Toropova M. *et al.*, Seasonal modulation of the Be-7 solar neutrino rate in Borexino, Astropart. Phys. 92, 21, (2017).
9. Atroshchenko V., Etenko A., Litvinovich E., Lukyanchenko G., Machulin I., Skorokhvatov M., Sukhotin S., M. Toropova *et al.*, Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts, Astropart. Phys. 86, 11 (2017).
10. Etenko A., Skorokhvatov M., Sukhotin S. *et al.*, Muon capture on light isotopes measured with the Double Chooz detector, Phys. Rev. C93 (2016) 054608.
11. Etenko A., Litvinovich E., Lukyanchenko G., Machulin I., Skorokhvatov M., Sukhotin S., Toropova M. *et al.*, Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data, Phys. Rev. D 92, 031101(R) (2015).
12. Litvinovich E., Lukyanchenko G., Machulin I., Skorokhvatov M., Sukhotin S., Toropova M. *et al.*, Test of Electric Charge Conservation with Borexino, Phys. Rev. Lett. 115, 231802 (2015).