

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Рогановой Татьяны Михайловны на диссертацию Пятовского Сергея Евгеньевича на тему: «Природа гало в стволах широких атмосферных ливней и доля легких ядер в первичном космическом излучении при $E_0=10$ ПэВ (эксперимент ПАМИР)» по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация Пятовского Сергея Евгеньевича на тему «Природа гало в стволах широких атмосферных ливней и доля легких ядер в первичном космическом излучении при $E_0=10$ ПэВ (эксперимент ПАМИР)» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук. Диссертация посвящена исследованию природы гало, которое наблюдалось в гамма-адронных семействах, зарегистрированных рентген-эмульсионными камерами на высоте гор и в стратосферных экспериментах, и на основе этого исследования разработке методов определения доли легких ядер в стволах широких атмосферных ливней (ШАЛ) при энергиях $E_0=10$ ПэВ. Исследование проведено на основе данных, полученных в эксперименте ПАМИР.

Международный эксперимент ПАМИР проводился с начала 70-х годов прошлого века в горах Памира в течение более 20 лет сотрудничеством советских и польских научных институтов и имел своей целью исследование адрон-ядерных взаимодействий при энергиях 10^{14} - 10^{17} эВ. Этот эксперимент не имел себе равных как по длительности экспозиции, так и по площади проэкспонированных рентген-эмульсионных камер (РЭК). Накопленный экспериментальный материал до сих пор представляет несомненную ценность, о чем свидетельствует представленная к защите диссертация. Использование базы данных по зарегистрированным в эксперименте гало для определения доли легких ядер в стволах широких атмосферных ливней **безусловно является актуальным..**

Эта задача является одной из первостепенных среди задач астрофизики космических лучей в настоящее время. Она непосредственно связана с происхождением космических лучей и формированием их степенного спектра, особенности которого были обнаружены в ряде экспериментов за последние годы. В то же время определение массового состава первичных космических лучей является одной из самых сложных задач, решаемых с использованием широких атмосферных

ливней. Поэтому разработка новых независимых подходов и их применение для определения доли легких ядер представляет несомненный интерес.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций автора с результатами диссертации, списка цитируемой литературы (178 ссылок) и одного приложения. Полный объем диссертации с приложением — 139 страниц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, её научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость её результатов, обозначены цели и задачи исследования, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Во введении также обозначен вклад автора в результаты диссертации, который состоит в:

- 1) Разработке программного комплекса (ПК) ШАЛ+РЭК моделирования гало, состоящего из моделирования ШАЛ в атмосфере с использованием программного комплекса MC0-FANSY и последующего моделирования развития электромагнитных каскадов в Г-блоке РЭК.
- 2) Получении количественного вклада в формирование площадей гало подпороговых γ -квантов ($E_{0\gamma} < 1$ ТэВ) и в доказательстве того, что основной вклад в образование гало больших площадей вносят γ -кванты с энергиями $E_{0\gamma} = 100$ ГэВ – 1 ТэВ.
- 3) Демонстрации того, что статистика экспериментальных гало может быть использована для оценки доли легких ядер.
- 4) Выполнении оценки минимальной доли легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ, которая составляет $(39 \pm 6)\%$.
- 5) Демонстрации того, что в диапазоне $E_{0\gamma} = 1\text{--}100$ ПэВ массовый состав ПКИ утяжеляется. Для этого автором диссертации был использованы данные эксперимента KASCADE-Grande и метод возраста ШАЛ $S_{\min\text{-}\max}$.

В первой главе приводится обзор экспериментов по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ и выполнен их сравнительный анализ. Показано, что оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ и её зависимости от энергии E_0 в разных экспериментах существенно различаются. Наибольшее расхождение результатов экспериментов в оценке доли легких ядер наблюдается при $E_0 = 10$ ПэВ. Автор связывает это расхождение с использованием для получения результатов различных моделей ШАЛ и указывает на необходимость более точной и слабо зависящей от модели оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ. Заключение автора диссертации о необходимости изучения стволов ШАЛ, где максимально сохранена информация о характеристиках первых актов взаимодействий ядер ПКИ с

атомами атмосферы, представляется обоснованным. Следует отметить, что автор диссертации демонстрирует хорошее знание экспериментов и литературы по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ, приводя их сравнительный анализ.

В первой главе приводятся также данные эксперимента ПАМИР по характеристикам экспериментальных семейств γ -квантов и полученным в эксперименте 61 гало, соответствующие суммарной экспозиции $ST=3000 \text{ м}^2 \text{ год стер}$. Представленные в диссертации сканы гало используются автором диссертации для решения задач объяснения природы гало и оценки массового состава ПКИ.

В диссертации рассмотрены характеристики различных моделей ШАЛ и модели, используемой для эксперимента ПАМИР. Приведено обоснование применения для описания эксперимента ПАМИР модели ШАЛ МСО-FANSY. Сделан вывод о чувствительности характеристик семейств γ -квантов и статистики гало к массовому составу ПКИ и возможности надежной оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ при наличии статистически значимого количества гало, полученного в эксперименте.

Во второй главе обсуждается и обосновывается моделирование гало для оценки массового состава ПКИ, приводится описание модели ШАЛ+РЭК, используемой для описания данных эксперимента ПАМИР, и её тестирование. Даны характеристики искусственных гало. Представлены этапы моделирования гало и процедуры их обработки. Программный комплекс ШАЛ+РЭК, разработанный для моделирования семейств γ -квантов в РЭК ПАМИР, позволил изучить вклад в образование гало больших площадей γ -квантов с энергиями $E_{0\gamma} < 1 \text{ ТэВ}$. Показано, что учет таких γ -квантов увеличивает площади искусственных гало в 2-3 раза.

Автор приходит к выводу, что гало не являются экзотическими событиями и что модель ШАЛ+РЭК с применением разработанных для эксперимента ПАМИР функций пространственного распределения (ФПР) позволяет количественно согласовать характеристики искусственных гало для легких ядер ПКИ и экспериментальных гало (средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$, статистику гало и долю структурных гало). Проведенное в диссертации рассмотрение приводит автора к заключению, что регистрируемые в РЭК эксперимента ПАМИР события образованы протонами ПКИ и, в меньшей степени, ядрами атомов Не.

В третьей главе приведена оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Предложен метод количественной оценки доли легких ядер с использованием гало, основанный на выполненных автором расчетах гало и числе экспериментально

зарегистрированных гало эксперимента ПАМИР. Проанализирована также доля легких ядер в массовом составе ПКИ по многоцентровым гало. Эти оценки в принципе согласуются с оценками по всем гало, хотя оценка по многоцентровым гало снижает нижнюю границу оценки доли протонов и увеличивает оценку доли ядер атомов Не в массовом составе ПКИ относительно оценок доли протонов и ядер гелия, полученных по всем гало.

В этой главе (в §§ 3.4.1 и 3.4.2) представлены также оценки изменения массового состава ПКИ по характеристикам индивидуальных ШАЛ, таким как S и N_μ , полученным с использованием открытых данных эксперимента KASCADE-Grande. Статистика проанализированных событий 100 млн. Были получены спектры самых легких и самых тяжелых групп ядер в диапазоне $E_0=1-100$ ПэВ ПКИ, обсуждается вопрос о существовании изломов и нерегулярностей в этих спектрах.. Анализ экспериментальных данных ШАЛ KASCADE-Grande показал, что в диапазоне $E_0=1-100$ ПэВ массовый состав ПКИ утяжеляется, однако доля легких ядер остается существенной при $E_0=10$ ПэВ, что не противоречит оценке доли легких ядер, выполненной методом гало по экспериментальным данным ПАМИР. Эти параграфы представляются очень интересными в плане развития дальнейших исследований массового состава, кроме того они демонстрируют хорошее понимание автором методов исследования в смежных областях..

В заключении автор приводит основные результаты диссертационной работы, которые состоят из 3-х пунктов:

1. Прежде всего, на основе анализа современного состояния экспериментов по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0=3-5$ ПэВ показано, что полученные в различных экспериментах результаты существенно различаются;
2. Далее делается вывод о возможности использования для анализа данных эксперимента ПАМИР модели ШАЛ+РЭК, учитывающей прохождение ШАЛ через РЭК ПАМИР. С использованием моделирования автором получены гало с характеристиками, соответствующими экспериментальным (долей структурных гало и спектром площадей гало), показан также количественный вклад подпороговых по энергии ($E_{0\gamma}<1$ ТэВ) γ -квантов в формирование площадей гало.
3. И, наконец, третий результат работы — показано, что статистика экспериментальных гало позволяет оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ. Экспериментальная

статистика гало соответствует доле легких ядер в массовом составе ПКИ ($39\pm6\%$) при $E_0=10$ ПэВ.

В приложении А представлены примеры гало, полученных в результате моделирования. Приведенная информация представляется полезной для возможного дальнейшего анализа.

Актуальность избранной темы проведенного исследования по определению доли легких ядер подтверждается развитием в мире интереса к измерениям с высокой точностью спектров и массового состава ПКИ.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на материалах научных работ автора, на основании которых написана диссертация, и результатах работы участников коллaborации ПАМИР. В обоснованности результатов работы сомнений не возникает. Автор использует хорошо апробированные методы расчета (программный комплекс ШАЛ+РЭК). Все детали создания «метода гало» подробно изложены в тексте и снабжены иллюстративным материалом.

Новизна подхода заключается в разработанном автором методе гало для исследования доли легких ядер в массовом составе ПКИ при энергиях $E_0=1-100$ ПэВ.

Новым также является сопоставление результатов метода гало и метода $S_{min-max}$, использованного для анализа экспериментальных данных ШАЛ KASCADE-Grande.

Практическая ценность диссертации состоит в возможности дальнейшего использования приведенного в диссертации экспериментального материала по характеристикам 61 гало с $S_{gal} \geq 4 \text{ мм}^2$.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается результатами сравнения с данными эксперимента KASCADE-Grande, а также тщательным тестированием использованного для моделирования программного комплекса ШАЛ+РЭК.

К недостаткам работы можно отнести :

1. Изложение материала иногда страдает от краткости и отсутствия указания на конкретный источник используемых данных. Например, на стр 47 нет ссылок на работы В.С.Пучкова по оценке связи E_0 и $\Sigma E\gamma$, в которых показано, « что для семейств γ -квантов, образованных протонами, $k=10$, для семейств γ -квантов, образованных ядрами Fe, $k=70$ »

2. В работе на стр.48 приводится описание «ФПР $e\pm$ и γ квантов в свинце в Г-блоке РЭК ПАМИР», полученные В.В.Учайкиным в работе «Концепция стохастической ценности в прикладных задачах теории переноса: дис....д.физ.-мат.наук: 01.04.12, 01.04.16. – Барнаул. – 1988. – 313 с». Никакого сравнения с результатами других авторов, которыми был выполнен расчет каскадных кривых для эксперимента ПАМИР (например, Ю.Г.Лютовым в кандидатской диссертации 1986 года), что было бы полезным, не приводится.
3. Для оценки выполненной автором работы по моделированию гало в Г-блоке эксперимента ПАМИР следовало бы, на мой взгляд, более четко указать в диссертации и автореферате статистику полученных модельных событий и затраченное на их получение машинное время.
4. Затрудняет чтение автореферата нестандартное использование ссылок (в сносках и в ссылках к литературе).

Указанные замечания не меняют общей высокой оценки работы.

Диссертация Пятовского Сергея Евгеньевича на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи использования данных уникального детектора эксперимента ПАМИР для исследования спектра по E_0 легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ. Диссертация имеет существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно астрофизики частиц высоких энергий.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года. Основные результаты диссертационной работы Пятовского С.Е. докладывались на международных конференциях и совещаниях, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI. Материалы диссертации со всей полнотой изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат отражает содержание диссертации.**

Диссертация Пятовского Сергея Евгеньевича «Природа гало в стволах широких атмосферных ливней и доля легких ядер в первичном космическом излучении при $E_0=10$ ПэВ (эксперимент ПАМИР)» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней,

утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Пятовский Сергей Евгеньевич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв составила заведующая лабораторией теоретических и экспериментальных исследований взаимодействий и переноса излучений в различных средах

Отдела космических наук НИИЯФ МГУ, доктор физико-математических наук

Roganova

Роганова Татьяна Михайловна

15 марта 2021 года

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Тел. +7(495)9393553

e-mail rogatm@yandex.ru

Подпись Рогановой Татьяны Михайловны удостоверяю

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ кандидат физико-математических наук



Сигаева Екатерина Александровна

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Тел. +7(495)9391818

info@sinp.msu.ru