

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бахромзода Ризои на тему «**Развитие методов выделения ливней от γ -квантов очень высокой энергии по данным черенковских детекторов высокогорных установок**» по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

1. Соответствие диссертации специальностям и отраслям науки, по которым она представляется к защите

В диссертационной работе Бахромзода Ризои на тему «Развитие методов выделения ливней от γ -квантов очень высокой энергии по данным черенковских детекторов высокогорных установок» представлены теоретические результаты по разработке и физическое обосновании нового метода выделения гамма-квантов на фоне протонных ливней в численном эксперименте. В этой работе акцент делается на регистрации ШАЛ от протонов и гамма-квантов в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 100 ТэВ, методики оценки их параметров и алгоритм выделения ливней от гамма-квантов на фоне протонных. Рассмотрено конкретный вариант метода для практического применения в эксперименте Памир-XXI. В работе содержится аргументированное обоснование целесообразности проведения исследования, включающего как проведение численных расчётов, так и их теоретический анализ. Анализ работы показывает, что по методам численного расчёта и использованному математическому аппарату она соответствует отрасли «физико-математических» и паспорту специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики.

2. Актуальность темы диссертации. Известно, что, изучение высокоэнергичных гамма-квантов дает ответы на вопросы о происхождении и ускорении космических лучей сверхвысокой энергии и указывает на их источники или области ускорения, также вносить ясность в такие проблемы как темная материя; нарушение Лоренц-инвариантности, изучение ранней Вселенной и др.

Сложность изучения гамма-квантов очень высокой энергии заключается в невозможности прямого наблюдения, в силу очень низкого потока и непрозрачности земной атмосферы для этих лучей. Космические частицы и гамма-кванты не доходят до Земли, поскольку взаимодействуют с атомами атмосферы, поэтому и наблюдать их напрямую наземными установками невозможно. Для изучения таких частиц и измерения их энергии приходится использовать специальный метод – регистрировать

ливни из частиц, создаваемые космическими частицами высокой энергии в атмосфере Земли. Первичная частица высокой энергии, взаимодействуя с атомами атмосферы, образует ядерно-электромагнитный каскад, в котором энергия первичной частицы распределяется между вторичными частицами. Число вторичных частиц лавинообразно нарастает, и на уровне моря их число может достигать многих миллионов и миллиардов. Это явление называют широким атмосферным ливнем (ШАЛ). В ШАЛ существуют различные компоненты: электронно-фотонная, адронная, мюонная, излучение Вавилова-Черенкова, ионизационное и радиоизлучение.

Регистрируя различные компоненты ШАЛ, можно оценить параметры первичной частицы, которая создала этот ливень: направление её прихода, энергию и тип (массу). Заряженные частицы из-за отклонения в магнитных полях космического пространства теряют первоначальное направление, и по ним невозможно узнать направление на источник, но гамма-кванты в этом отношении имеют преимущества. Они не отклоняются в магнитных полях и при регистрации прямо указывают на источник излучения. В этом плане задачей гамма-астрономии является точное восстановления параметров первичного гамма-кванта. Это позволяет изучить процессы рождения гамма-квантов и физическое состояние источника гамма-излучения очень высокой энергии. Для всего этого необходимо детально изучать ШАЛ и по регистрации разных компонент правильно восстанавливать первичные параметры.

Характеристики ШАЛ на высотах гор заметно отличаются от таковых на уровне моря, что необходимо учитывать при построении методики оценки параметров первичной частицы. Это особенно важно, если ставится задача усовершенствовать существующие методы регистрации или даже выработать новые, основанные на детальном моделировании развития ШАЛ и использующие детекторы разных типов.

Такая задача была поставлена в рамках проекта «Памир-XXI», предполагавшего создание комплексной установки нового поколения в горах Восточного Памира на высоте ~4250 м над уровнем моря.

Для планировки, проектирования и создания экспериментальных установок необходимо провести тщательное моделирование и нужно разрабатывать способы обработки экспериментальных данных. Данное исследование направлено на решение этих задач.

Такие исследования активно проводятся в ряде крупных научных центров США, Японии, России, Китая и ряде развитых стран Европы. Поэтому разработка способов обработки экспериментальных данных является актуальной задачей, т.к. позволяет научно обосновать выбор места и

расположении детекторов космических лучей для получения новых научных результатов.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что проведенное модельных исследований действительно актуально, поскольку связано с выявлением закономерностей функционирования детекторов гамма излучения в условиях максимально приближенных к реально осуществляемым в высокогорных установках. Значимость и своевременность работы основана на ряде установленных закономерностей, которые проанализированы на основе современных представлений как физического, так и технического характера и дают импульс построения практико-ориентированных методов.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту

В диссертационной работе представлены результаты численного расчета наиболее важных характеристик модельного эксперимента регистрации высокознергетических гамма-квантов в составе космических лучей. Была предложена новая методика для гибридной установки, предназначеннай для регистрации черенковского света, которая позволяет определять первичные параметры ШАЛ (первичная энергия E_0 , направление прихода Θ , положение оси x_0 и y_0) и эффективно выделять γ -кванты из фона протонных событий. Предлагаемый способ анализа черенковского света ШАЛ может быть использован как для совершенствования критерия отбора гамма-ливней в черенковской гамма-астрономии, так и для улучшения разделения ШАЛ по массам первичных ядер при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий.

Выносимые на защиту положения являются новыми. Так на основании установленных при проведении исследований закономерностей автором предложен новый способ регистрации черенковского излучения. К наиболее важным результатам диссертационного исследования можно отнести:

-была предложена новая методика для гибридной установки, предназначеннай для регистрации черенковского света, которая позволяет определять первичные параметры ШАЛ (первичная энергия E_0 , направление прихода Θ , положение оси x_0 и y_0) и эффективно выделять γ -кванты из фона протонных событий.

-были найдены физические причины работоспособности методики отбора γ -квантов на основании анализа данных статистического моделирования;

-был найден алгоритм исключения проскочивших ливней, использующий свойства черенковского света ШАЛ и основывающийся на данных оптических детекторов.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

При проведении исследований использовался ряд современных методик, включающих, в том числе для генерации искусственных событий использовался признанный во всем мире код CORSIKA, для каждого события сохранялась детальная информация о пространственно-временном и пространственно-угловом распределении черенковского света, а также полные стандартные файлы с информацией о вторичных частицах. При обработке использовались данные о фоне ночного неба в горах Восточного Памира. В работе использовались стандартные программные инструменты CERN и процедуры, реализующие общепризнанные численные методы.

Достоверность сформулированных положений косвенно подтверждается их непротиворечивостью существующим литературным данным, полученным на основе других методов. Выводы в диссертационной работе сформулированы корректно, базируются на результатах, неоднократно обсужденных на научных семинарах и конференциях и опубликованных в периодических научных изданиях.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их практическому применению

Научная значимость результатов проведенных соискателем исследований состоит в том, что они представляют собой концептуальное развитием актуального научно-технического направления в физике космических лучей по установлению закономерностей способа анализа черенковского света ШАЛ, которая может быть использован как для совершенствования критерия отбора гамма-ливней в черенковской гамма-астрономии, так и для улучшения разделения ШАЛ по массам первичных ядер при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий. Анализ физических причин работы найденных критериев создает основу для дальнейшего совершенствования критериев отбора гамма-событий. Разработана конкретная гибридная методика анализа угловых и пространственно-временных распределений ЧС ШАЛ для высокогорных установок.

Практическая значимость полученных в работе результатов определяется тем, что в ней на основе установленных закономерностей разработана конкретная гибридная методика анализа угловых и

пространственно-временных распределений ЧС ШАЛ для высокогорных установок.

Экономическая и социальная значимость работы состоит в обосновании комплекса исследований, позволяющих провести анализ черенковского света ШАЛ в оптимальном варианте. Сформулированный комплекс знаний вполне пригоден для внедрения при проектировании высокогорных экспериментальных установок для изучения космических лучей сверхвысоких энергий.

6. Опубликованные результаты диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации были представлены на ряде национальных, всероссийских и Международных конференций, посвященных обсуждению проблем в выбранной соискателем области, а также опубликованы в периодической печати, удовлетворяющей требованиям ВАК при Президенте Республики Таджикистан.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК при Президенте Республики Таджикистан. Она написана хорошим русским и грамотным научным языком. В ней содержится незначительное число несоответствий редакционного плана. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационного исследования.

Кроме замечаний редакционного и оформительского плана по работе требуется уточнение по следующим вопросам:

1. Очень подробно написана обзорная часть, можно было сократить некоторую часть.
2. Известно, что поток космических лучей и гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий очень мал, примерно 1 частица/($m^2 \cdot \text{год}$), в этом плане площадь предлагаемой установки насколько хорошо обеспечивает набора достаточной статистики для анализа и получение выводов?
3. Почему всегда сравниваются результаты расчетов и моделирования только для следующих пар: γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ и γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ? В чем заключается причина выбора этих энергий?
4. Космические лучи и гамма-кванты могут попасть под разными углами на поверхность атмосферы, следовательно над поверхностью наблюдаемого уровня. Почему были рассмотрены только ливни с малыми углами наклона или перпендикулярные ливни?
5. Дальнейшие перспективы этого эксперимента не известны. Но интересно было бы узнать мнение диссертанта по этому поводу.

Отмеченные выше замечания несколько затрудняют чтение диссертации, но нисколько не влияют на ее существенную сторону, в которой

автор попытался исчерпывающе отобразить весь комплекс полученных новых научных результатов в виде практико-ориентированных рекомендаций по новому методу регистрации и анализа важных характеристик гамма-квантов сверхвысоких энергий.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

На основании анализа диссертации в целом, используемых методов исследования и полученных результатов можно сделать заключение, что диссертационная работа Бахромзода Ризои на тему «**Развитие методов выделения ливней от γ -квантов очень высокой энергии по данным черенковских детекторов высокогорных установок**» по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, полностью удовлетворяет критериям приложение 2к постановления Правительства Республики Таджикистан за №267 от 30.06.2023 г. в части, касающейся учёной степени кандидата наук, а ее автор Бахромзод Ризои заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, за концептуальное развитие актуального научно-технического направления в области физики космических лучей с целью улучшения и прогнозирования эксплуатационных параметров высокогорных экспериментальных установок, которое выражлось в установлении закономерностей регистрации гамма излучения сверхвысоких энергий, включающее:

-предложенный вариант оптической части «Памир-XXI» при использовании разработанного нами метода обработки данных имеет: точность определения положения оси составляет 1-2 метра при энергиях 30 ТэВ и более; точность определения направления прихода лучше 0,1 градуса для всех типов частиц и энергий 30 ТэВ и более; точность оценки энергии для γ -квантов составляет порядка 10%, для протонов – 20%;

-подавление протонного фона по результатам анализа углового распределения черенковского света составляет более 99%, при этом сохраняются: для пары γ 30 ТэВ — протон 60 ТэВ 60% γ на расстоянии 50м, 35% γ на расстоянии 100м; для пары γ 50 ТэВ — протон 100 ТэВ 65% γ на расстоянии 50м, 42% γ на расстоянии 100м от оси ливня; дополнительное подавление фона адронных ливней для точечных источников можно получить за счет высокого углового разрешения, обеспеченного сетью быстрых детекторов. Возможно построить критерии для разных энергий, которые зависят только от расстояний;

-предлагаемый способ анализа черенковского света ШАЛ может быть использован как для совершенствования критерия отбора γ -ливней в черенковской γ -астрономии, так и для улучшения разделения ШАЛ по массам первичных ядер при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, доцент,

заведующий кафедрой ядерной физики

Таджикского национального

университета

Махсудов Барот Исломович

Адрес: 734025 город Душанбе, Проспект Рудаки 17.

Телефон: (+992) 907-74-33-83

E-mail: maksudov_barot@mail.ru

Подпись д.ф-м.н., доцента,

Махсудова Б.И. заверяю:

Начальник УК и СЧ ГНУ

Тавкиев Э. Ш.

Дата: 2 « июля » 2023

(Печать организации)

