ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ризои Бахромзода

"Развитие методов выделения ливней от γ-квантов очень высокой энергии по данным черенковских детекторов высокогорных установок ",

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Современная астрофизика исследует космическое излучение, механизмы его образования и распространения в экстремально широком диапазоне энергий от 10^5 до 10^{20} эВ. Во многих астрофизических объектах первостепенную роль играют механизмы нетеплового излучения. Одним из ярких примеров нетепловой природы частиц являются космические лучи – в основном протоны и ядра высоких энергий. Поиск и исследование источников космических лучей по направлениям их прихода, за исключением экстремальных энергий, сильно осложняется отклонением заряженных частиц в магнитных полях, встроенных в межзвездную и межгалактическую плазму. Поэтому, обнаружение мест ускорения космических лучей, а также механизмов ускорения в основном опирается на наблюдения гамма-излучения. Энергетический спектр гамма-лучей тесно связан со спектром первичных частиц и несёт информацию о параметрах как самих ускорителей частиц, локальных или протяженных астрофизических объектах, так и о веществе, с которым эти частицы сталкиваются на своём пути. Поиск и исследование астрофизических источников гамма-излучения, а также решение ряда актуальных проблем современной астрофизики и космологии осуществляется методами гамма-астрономии, основной принцип работы которой состоит в регистрации черенковского излучения, сопровождающего развитие широких атмосферных ливней от космических лучей разной природы, и последующего выделения гамма-ливней из фона ливней космических лучей.

Успешное развитие экспериментальной гамма-астрономии, обусловлено надёжным выделением сигнала – гамма-ливней из превосходящего на 3–4 порядка сигнал фона ливней космических лучей. А создание новых телескопов и установок для исследований в области астрофизики диктуется постоянным стремлением повысить чувствительность к потоку гамма-квантов и требует дальнейшего развития методов регистрации гамма-излучения.

Представленная диссертация посвящена проведению численного эксперимента, нацеленного на разработку нового метода выделения гамма-квантов на фоне протонных ливней для экспериментов, исследующих космическое излучение при сверхвысоких энергиях. Кроме того, в рецензируемой работе рассматривается вариант

метода, специально созданного для практического применения в эксперименте «Памир-XXI».

Диссертация состоит из введения, трёх глав, выводов и списка литературы.

Во Введении обоснована актуальность исследований, обозначается научная проблема, даются теоретическая и методологические основы представляемой работы; сформулированы цели, дано краткое описание полученных результатов, особо отмечена их новизна, а также теоретическая и научно-практическая значимость.

Первая глава содержит изложение основных понятий, проблем и методов гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий. Обозначается круг задач современной астрофизики, предлагаемый к решению методами гамма-астрономии. Приведен краткий обзор основных этапов развития экспериментальной гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий, а также описаны основные проекты и установки, предназначенные для регистрации гамма-излучения с энергиями в диапазоне от нескольких ГэВ до десятков ТэВ. Перечислен ряд проблем астрофизики, решаемых методами гамма-астрономии. Представлены основные принципы и методы выделения гамма-квантов на фоне космических лучей зеркальными черенковскими телескопами. Обоснована необходимость развития гибридного метода регистрации гамма-излучения до ультравысоких энергии.

Вторая глава диссертации посвящена высокогорному эксперименту «Памир-XXI», представлены основные исторические предпосылки к его созданию, описаны основные цели и физические задачи эксперимента. Проект «Памир-XXI» нацелен на комплексное исследование первичного космического излучения, включая гамма-излучение, в широком диапазоне энергий 30 ТэВ – 1 ЭэВ и определение характеристик ядерного взаимодействия при указанных энергиях. В работе описаны основные компоненты и параметры планируемого эксперимента, а также характеристики оптической части проекта, для реализации гибридного метода исследований в области гамма-астрономии при энергиях более 30 ТэВ. Представлено детальные модельные исследования ливней, инициированных первичными гамма-квантами и протонами для регистрации оптической частью проекта «Памир-XXI». Моделирование проводилось с помощью пакета программ CORSIKA. В результате моделирования, сформулированы основные принципы обработки широких атмосферных ливней, полученных в рамках планируемого эксперимента, для определения основных характеристик первичных частиц, а именно их типа, энергии и направления прихода. Исследованы неопределённости определения данных параметров, включающие сопутствующие эксперименту явления, такие как фон ночного неба. Исследована неопределённость определения энергии первичной частицы, возникающая в высокогорном эксперименте «Памир-XXI» из-за регистрации ливней с максимумом развития близким к уровню наблюдения. Предложен критерий для исключения таких ливней из дальнейшего анализа.

В третьей главе описывается выделение ливней, инициированных первичными гамма-квантами на фоне протонных ливней. Исследован отличный от общепринятых критериев Хилласа принцип построения параметров разделения гамма-ливней от протонных при энергиях в несколько десятков ТэВ. А именно, выработаны критерии, построенные как отношение количества черенковских фотонов в разных областях продольного профиля черенковского образа широкого атмосферного ливня, зарегистрированного оптической частью эксперимента «Памир-XXI». Показана надёжность таких критериев в выделении полезных событий от гамма-квантов. Численные оценки режекции фона и доли потерянных после применения критериев ливней от γ-квантов показали высокую эффективность регистрации искомых ливней, что является необходимым условием получения качественной экспериментальной информации. Исследованы физические причины работоспособности построенных критериев отбора. Оценена чувствительность эксперимента «Памир-XXI» к регистрации потоков гамма-излучения сверхвысоких энергий для чего дана оценка времени детектирования десяти источников разной природы при энергии > 30 ТэВ. Кроме того, дано сравнение основных параметров проекта «Памир-XXI» с характеристиками существующих и проектируемых установок, нацеленных на исследования в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий.

В разделе Выводы перечислены основные результаты проведённого численного эксперимента.

В ходе детальных модельных исследований ливней от гамма-квантов и протонов, зарегистрированных предложенной в работе оптической частью проекта Памир XXI, показано, что при использовании разработанного описанного в диссертации метода обработки данных, определение положения оси ливня составляет 1-2 метра при энергиях более 30 ТэВ, а точность определения направления прихода ливня при указанных энергиях лучше 0,1 градуса для всех типов частиц. Точность оценки энергии для γ-квантов составляет порядка 10%, а для протонов – 20%. При этом учёт фона звездного неба, характерного для гор Восточного Памира, и переход к фотоэлектронам не ухудшают полученных оценок.

В модельных исследованиях неопределённости определения энергии первичной частицы, возникающей в высокогорном эксперименте «Памир-XXI» из-за регистрации ливней с максимумом развития близким к уровню наблюдения, предложен критерий для исключения таких ливней из дальнейшего анализа.

Выработаны критерии отбора первичных гамма-квантов от фона протонов космических лучей, построенные как отношение количества черенковских фотонов в разных областях продольного профиля черенковского образа широкого атмосферного ливня, зарегистрированного оптической частью эксперимента «Памир-XXI». Показано, что подавление фона протонных ливней при регистрации событий от гамма-квантов на основе анализа углового распределения черенковского света составляет более 99%.

Проведённый анализ зависимости интенсивности черенковского излучения в ливнях, генерированных гамма-квантами и протонами от высоты показал, что эффективность работы выработанного критерия отбора γ-ливней обусловлен различиями каскадных кривых ливней разной природы.

В результате получено, что предлагаемый способ анализа черенковского света широких атмосферных ливней может быть использован как для совершенствования отбора ливней, генерированных гамма-квантами, в черенковской γ-астрономии, так и для улучшения разделения ливней первичных ядер в зависимости от их массы при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий.

В качестве замечаний к диссертации можно высказать лишь несколько небольших пожеланий по стилю изложения и исправлению описок и опечаток.

С точки зрения стилистики некоторые выражения в диссертации читаются тяжело, так как подобраны неудачно (например, на стр. 25, 39 и 41), что, скорее всего, связано с использованием оригинального английского текста.

Некоторые опечатки, например ссылка на несуществующий Рисунок 13 вместо Рисунка 2.4, могут затруднить понимание текста.

Мелкие досадные опечатки встречаются, но они малосущественны. Например, на стр. 14, 22 и 23 оригинальное написание названий экспериментов Fermi-LAT, MILAGRO, Tibet ASγ перемежается с переведёнными или не совпадают по стилю начертания. На странице 23 в единицы измерения площади м^2 закралась опечатка и, в результате, написано м2. Упоминание проекта ALEGRO на странице 25 в контексте будущих гамма-астрономических экспериментов, нацеленных на исследование при энергиях более 20 ТэВ, не корректно, поскольку планируемый рабочий диапазон энергии данной установки 5 – 50 ГэВ.

Стоит отметить, что можно было бы более основательно подчеркнуть актуальность создания гибридной установки «Памир-XXI» и её большой потенциал в контексте обнаружения от Крабовидной туманности гамма-излучения с энергиями > 100 ТэВ.

Несмотря на высказанные замечания, носящие редакционный характер, диссертационная работа Ризои Бахромзода "Развитие методов выделения ливней от γ-квантов очень высокой энергии по данным черенковских детекторов высокогорных установок " выполнена на высоком профессиональном уровне.

Проведенный автором диссертации работа по проведению численного эксперимента и анализу результатов свидетельствует как о высокой квалификации соискателя, так и о владении им современными методами обработки и интерпретации данных экспериментов по исследованию космического излучения. Диссертация представляет собой ценное и вполне законченное научное исследование.

Достоверность основных результатов и сделанных выводов, а также личный вклад автора не вызывают сомнений.

Автореферат и опубликованные статьи верно отражают содержание диссертации, которая полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК при Президенте Республики Таджикистан, а соискатель – Ризои Бахромзод, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент В.Г. Синицина

к.ф.-м.н., внс, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

6.06.2023

Подпись В.Г. Синициной заверяю.

Ученый секретарь Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН А.В. Колобов
кандидат физико-математических наук

Сведения об оппоненте:

Синицина Вера Георгиевна

кандидат физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник,

заведующий лаборатории Гамма-астрономии сверхвысоких энергий

тел. 8 (499) 135 42 75

E-mail sinits@sci.lebedev.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Российская Федерация,119991 г. Москва, Ленинский проспект, дом 53