

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Рубцова Григория Игоревича
“Диффузное астрофизическое излучение от 10^{-4} эВ до 10^{+20} эВ
и ограничения на новые модели физики элементарных частиц”
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

В последнее десятилетие, благодаря новым экспериментальным установкам, регистрирующим космические лучи и излучение, а также космическим обсерваториям, работающим в разных диапазонах электромагнитного спектра, произошел прорыв в наших знаниях о Вселенной. Такие исследования особенно важны, так как не все физические условия удается воспроизвести на Земле на современных ускорителях, и наиболее нетривиальные компоненты энергетического баланса Вселенной, такие как темная материя и темная энергия, пока не наблюдаются в лабораториях. Диффузное излучение Вселенной, регистрируемое в широком энергетическом диапазоне, как раз предоставляет возможность исследовать многие явления, которые еще не воспроизводятся в “домашних” условиях. Кроме знаний о физике элементарных частиц, исследования в этой области также требуют глубокого развития статистических методов, применяемых при анализе и интерпретации экспериментов на современных регистрационных установках. Поэтому предлагаемая диссертация Григория Игоревича Рубцова, посвященная исследованиям диффузного излучения Вселенной в широком спектральном диапазоне и изучению с помощью него моделей физики элементарных частиц, космологии и астрофизики высоких энергий, несомненно актуальна.

Целями диссертационной работы Г.И.Рубцова являются исследование фонового микроволнового реликтового излучения и оценка с помощью него ограничений на реликтовую плотность частиц с дробным электрическим зарядом и на модели псевдоконформной Вселенной и анизотропной инфляции; исследования гамма-излучения, включающие объяснение прозрачности Вселенной в этом диапазоне частот, а по данным наблюдений затмений блазара 3C 279 Солнцем получение ограничения на размер и поток протяженного гало. Кроме того, среди целей диссертации — проверка гипотезы о сверхтяжелой темной материи и построение ограничений на ее параметры по данным наблюдений высокоэнергичных космических лучей.

Диссертация содержит шесть глав, включая Введение и Заключение, список сокращений и обозначений, список литературы, а также три Приложения.

Во **Введении** дается описание компонент диффузного излучения Вселенной, регистрируемого в разных диапазонах электромагнитного спектра. Особенно детально рассмотрены реликтовое излучение (микроволновый диапазон длин волн), карты которого построены при наблюдениях на космических обсерваториях NASA WMAP и ESA Planck, и гамма-излучение ультравысоких энергий. Описаны проблемы физики космических лучей ультравысоких энергий $E \leq 10^{19}$ эВ, среди которых поиск источников таких частиц, оценка состава частиц и проблемы их регистрации. Кроме того, во Введении обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цели и задачи диссертационной работы, показываются степень достоверности результатов, их научная новизна и теоретическая и практическая значимость. Также во Введении приводятся выносимые на защиту положения работы, список основных публикаций и выступлений с апробацией результатов, указан личный вклад автора.

Глава 1 диссертации посвящена построению ограничений на модели новой физики частиц из наблюдений реликтового излучения. В первом разделе главы описываются особенности проведения наблюдений по измерению микроволнового фона в космической миссии Planck и методы работы с протяженным сигналом с использованием данных обсерватории. Во втором разделе главы рассмотрена модель гипотетических

частиц с дробным электрическим зарядом (МЗЧ или миллизаряженные частицы) и получены ограничения на параметры моделей таких частиц: их реликтовая плотность — $\Omega_{\text{мзр}} h^2 < 0.001 (95\%CL)$ и показано, что плотность МЗЧ частично вырождена с наклоном спектра скалярных возмущений, а их возможное существование расширяет диапазон разрешенных инфляционных сценариев. В третьем разделе главы установлены ограничения на модели псевдоконформной Вселенной из ненаблюдения статистической анизотропии температуры реликтового излучения. Анализ был выполнен для данных Planck в частотных полосах 143 ГГц и 217 ГГц и их кросскорреляции методом максимального правдоподобия в квадратичном приближении. Для константы самодействия скалярного поля в сценарии конформного скатывания получены верхние пределы в случае реализации различных сценариев ранней эволюции Вселенной.

Глава 2 посвящена исследованиям гамма-излучения. В первом разделе главы обсуждаются возможности поиска аксионов как частиц темной материи с помощью астрофизических наблюдений. Во втором разделе рассматривается распространение гамма-излучения в межгалактической среде и обсуждается ее аномальная прозрачность в этом диапазоне частот как свидетельство новых физических явлений. В качестве объяснений этого явления используются модели аксионоподобных частиц либо эффект дополнительного рождения гамма-квантов по пути от источника к наблюдателю. В разделе 4.3 получено (впервые) ограничение на протяженность гало гамма-излучения блазара 3C 279 из наблюдений его затмений Солнцем. При этом, если сигнал реальный, он может быть интерпретирован как гало размером $\sim (0.5^\circ - 1^\circ)$ с потоком $\sim (2 - 3) \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ либо как прозрачность Солнца в аксионном сценарии, предсказывающим что 1/3 исходного потока пройдет сквозь Солнце. В четвертом разделе исследуется поглощение гамма-излучения далеких блазаров в межгалактической среде по данным наземных гамма-телескопов и орбитального телескопа Fermi LAT и рассматриваются возможные объяснения необычных изломов восстановленного спектра на высоких энергиях.

Глава 3 посвящена результатам, полученным по данным подземных мюонных детекторов Якутской установки широких атмосферных ливней (ШАЛ). В разделе 3.1 описывается комплексная установка ШАЛ. Во втором разделе рассмотрены модели происхождения космических лучей сверхвысоких энергий, включая те, что требуют привлечения новой физики. Также проводится сравнение результатов наблюдений космических лучей в разных обсерваториях, где имеются соответствующие установки. Делается вывод, что поиск фотонов ультравысоких энергий позволит выбрать наиболее подходящую среди гипотез, объясняющих происхождение и состав космических лучей, а также ограничить модели новой физики. Ограничениям на поток фотонов с энергией выше 10^{18} эВ на основе мюонных данных посвящен 3-ий раздел данной главы. Описываются процедура отбора данных и методы их анализа. Получены новые ограничения на диффузный поток фотонов на энергиях выше 10^{18} эВ. В разделе 3.4 рассмотрены модели распада топологических дефектов и модели сверхтяжелой темной материи. С учетом данных ШАЛ Якутской установки показано, что предсказания модели распада гипотетических топологических дефектов противоречат установленным ограничениям, а также, что распад частиц гипотетической сверхтяжелой темной материи не может быть ответственным за происхождение всех космических лучей ультравысоких энергий.

В **Главе 4** исследуется космическое излучение ультравысоких энергий по данным обсерватории Telescope Array (ТА). В разделе 4.1 дано краткое описание наземной решетки детекторов и флуоресцентных телескопов, входящих в состав Обсерватории Telescope Array и работающих в гибридном режиме. Раздел 4.2 посвящен процедуре моделирования методом Монте-Карло событий ШАЛ в условиях наземной решетки ТА. В разделе

4.3 исследована анизотропия направлений прихода космических лучей с энергиями выше 5.7×10^{19} эВ по данным наземной решетки ТА за 5 лет наблюдений. В результате анализа данных обнаружено “горячее пятно” в распределении событий на сфере, представляющее из себя область повышенной плотности событий радиусом 20° с центром с экваториальными координатами $R.A. = 146.7^\circ$, $Dec. = 43.2^\circ$. Предложены различные сценарии формирования такого пятна и дальнейшие пути его исследования. Четвертый раздел главы посвящен расчету ограничений на поток фотонов выше 10^{19} эВ, и в разделе 4.5 дана интерпретация этих результатов.

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Одним из основных результатов диссертации, на мой взгляд, является детальная проработка методов анализа диффузного излучения, позволившая получить важные и интересные результаты в физике элементарных частиц из астрофизических наблюдений. Результаты диссертации соответствуют передовым направлениям современной астрофизики и космологии. Особенно отмечу Главу 1, посвященную анализу реликтового излучения и получения ограничений на свойства новых частиц и статистической анизотропии распределения температуры реликтового фона. Считаю эти работы важным вкладом как в методическую часть исследований анизотропии космического микроволнового излучения, так и в астрофизику и космологию.

Научная новизна работы определяется тем, что

- 1) получены наиболее сильные ограничения на реликтовую плотность частиц с дробным электрическим зарядом по данным космической обсерватории Планк;
- 2) впервые установлены наблюдательные ограничения на параметры гипотетического скалярного поля в моделях псевдоконформной Вселенной, альтернативных инфляционной модели;
- 3) впервые получены ограничения на размер протяженного гало блазара 3C 279;
- 4) впервые установлена аномальная прозрачность Вселенной по отношению к гамма-излучению высоких энергий с высоким уровнем статистической достоверности (впервые выше 5σ);
- 5) впервые поставлено ограничение на интегральный поток гамма-квантов с энергиями от 10^{18} эВ;
- 6) впервые установлено, что модель сверхтяжелой темной материи не может объяснить весь наблюдаемый поток космических лучей с энергиями выше 10^{20} эВ;
- 7) впервые в северном полушарии обнаружено указание на “горячее пятно” в распределении космических лучей с энергиями выше 5.7×10^{19} эВ,
- 8) получены наиболее сильные в северном полушарии ограничения на поток фотонов с энергией выше 10^{19} эВ.

Практическая значимость состоит в том, что

- 1) полученные ограничения на реликтовую плотность частиц с дробным электрическим зарядом применяются при построении моделей темной материи, физики элементарных частиц, а также для проектирования экспериментов по прямому поиску новых частиц;
- 2) ограничения на параметры статистической анизотропии Вселенной используются при построении новых космологических моделей;
- 3) ограничения на размер гало 3C 279 могут использоваться при разработке астрофизических моделей, включающих крупномасштабные магнитные поля;
- 4) обнаружение аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения высоких энергий используется при проектировании экспериментов по поиску аксионоподобных частиц;

- 5) обнаружение горячего пятна на карте космических лучей повлияло на развитие моделей астрофизического происхождения нейтрино;
- 6) разработанный метод реконструкции событий Telescope Array с аппроксимацией кривизны фронта используется для исследования химического состава космических лучей;
- 7) полученные ограничения на поток гамма-квантов ультравысоких энергий применяются в разработке новых методик поиска фотонов ультравысоких энергий.

Диссертация нашла полное отражение в 25 публикациях, включая журналы “Physical Review D”, “Astrophysical Journal” “Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” “Письма в ЖЭТФ”, имеющих высокий уровень рецензирования и, соответственно, большой импакт-фактор и признание в физическом и астрофизическом сообществе.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов не вызывают сомнения, поскольку они основаны на адекватном применении математического аппарата, подтверждаются в ряде случаев результатами численного моделирования, а также результатами исследований других авторов. Кроме того, результаты диссертации апробированы в 40 выступлениях на российских и международных конференциях.

Диссертация написана хорошим языком с относительно небольшим числом опечаток и пунктуационных ошибок.

Имеется ряд мелких *замечаний*:

В вводной части Главы 1 говорится о реликтовом излучении (РИ), что его спектр "...близок к спектру абсолютно черного тела...". Но так для спектра реликтового излучения не найдено отличий от спектра абсолютно черного тела, кроме случаев вторичной анизотропии, правильнее было бы говорить, что спектр РИ не "близок к спектру а" полностью соответствует спектру".

В Главе 1, особенно в разделе 1.3, по-видимому, используются данные первого релиза обсерватории Planck. Имело бы смысл обсудить результаты второго релиза в свете того, что при обработке данных был уточнен вклад компонент излучения Галактики и учтен ряд систематических эффектов на различных частотах.

Среди опечаток можно отметить следующие: на странице 12 текста диссертации, строка 5 снизу, опечатка в слове “происхождения” (“просхождения”), аналогичная опечатка на стр.6 автореферата; на странице 13, в первом положении, выносимом на защиту, опечатка в слове “построена” (“пострена”), аналогично в автореферате на стр.7; на странице 16, ссылка 12, опечатка в слове “семинар” (“семинал”), в автореферате ее нет; на странице 68 в названии раздела 2.4.2 опечатка в слове “источников” (“источноков”), имеется также ряд других опечаток. Кроме того, в диссертации часто применяется англоязычная пунктуация, когда обстоятельство как часть предложения, стоящее в начале предложения, отделяется запятой, что не соответствует правилам русского языка. Например, на странице 21 диссертации в первом абзаце в строке 8 (“В настоящей главе,”) или в строке 10 (“В моделях Раздела 1.2,”).

На странице 58 диссертации (начиная со строки 4) используется не совсем удачный оборот речи, в чем-то тавтологический: “Как следствие, в значительной части сценариев с Лоренц-нарушением, атмосфера станет прозрачной для гамма-квантов при энергиях, близких к энергиям, при которых Вселенная станет аномально прозрачной.”

На странице 117 (раздел 4.1) говорится, что “Обсерватория Telescope Array (ТА) - гибридный эксперимент...” и далее, что “эксперимент расположен...”, что неудачно, так как эксперимент — это обычно либо опыт, либо метод.

Необходимо также отметить, что представленное в диссертации и описанное в работах “горячее пятно”, выглядящее как область повышенной плотности событий радиусом

20° с центром с экваториальными координатами R.A. = 146.7°, Dec. = 43.2°, находится недалеко, и, на самом деле, даже пересекается на границе с наиболее прозрачной областью для ряда диапазонов волн (например, рентгеновского) из-за минимального содержания нейтрального водорода. Эта область называется “дыра Локмана” (“Lockman hole”) [см. ссылку: Lockman F.J., Jahoda K., McCammon D. "The structure of galactic HI in directions of low total column density". ApJ **302**, 3 (Mar 1986)]. Координаты области: R.A.=10^h34^m, Dec=+57°40′ на эпоху J2000.0, размер — порядка 15 кв. градусов. Имело бы смысл обсудить возможность связи “горячего пятна” со свойствами прозрачности Галактики в этой области.

Перечисленные замечания носят, скорее, редакционный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение. Считаю, что представленная диссертационная работа является исследованием, имеющим большое научное и практическое значение в задачах физики элементарных частиц, исследований темной материи, в космологии, а также в области методов анализа данных. Диссертант показал свою высокую квалификацию в решении теоретических и практических физических и астрофизических задач, в интерпретации наблюдательных данных и сделал теоретические оценки значений параметров, которые уже активно применяются в современных исследованиях и при проектировании новых наблюдательных установок. Диссертация удовлетворяет всем требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней” ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант Рубцов Григорий Игоревич *несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.16 — “физика атомного ядра и элементарных частиц”.*

Официальный оппонент

докт.физ.-мат.н., вед.н.с. Верходанов Олег Васильевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН)

пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская респ., 369167

т. 8-87878-46329, адрес эл.почты: vo@sao.ru

Подпись Верходанова О.В. заверяю

Ученый секретарь САО РАН, к.ф.-м.н.

/ Е. И. Кайсина /

08.09.2016 г.