

На правах рукописи

**Рубцов
Григорий Игоревич**

**Диффузное астрофизическое излучение
от 10^{-4} эВ до 10^{+20} эВ и ограничения
на новые модели
физики элементарных частиц**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Верходанов Олег Васильевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, лаборатория радиоастрофизики, ведущий научный сотрудник.

Кузнецов Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ярославский государственный Университет им. П.Г. Демидова», профессор кафедры теоретической физики.

Стожков Юрий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Лаборатория физики Солнца и космических лучей (Долгопрудненская научная станция), главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина Российской академии наук

Защита состоится «__» _____ 2016 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 при Объединенном институте ядерных исследований, расположенном по адресу: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайте www.jinr.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



А.Б. Арбузов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Развитие ускорительных экспериментов по физике частиц позволило обнаружить последнюю из частиц, предсказанных Стандартной моделью физики частиц (СМ)-скалярный бозон [26, 27]. Однако, Стандартная модель остается феноменологически неполной. В частности, в СМ нет механизма для наделения нейтрино массой и, как следствие, нет объяснений для нейтринных осцилляций. Кроме того, в СМ нет частиц для описания темной материи. Введение дополнительных частиц может также оказаться необходимым для описания феноменологии ранней Вселенной. Так, генерация первичных возмущений требует новых полей за единственным исключением модели инфляции на потенциале скалярного бозона СМ [28]. Барионная асимметрия Вселенной также относится к числу проблем, неразрешенных в рамках СМ. Все это мотивирует продолжение поисков проявлений новой физики. В результате таких поисков на первом этапе работы Большого адронного коллайдера (БАК), поставлен ряд ограничений на модели расширения СМ, в том числе на минимальное суперсимметричное расширение СМ [29].

Многие интересные для исследования физические процессы протекают в естественном порядке в звездах, в межгалактическом пространстве или протекали ранее, в течение прошедших эпох развития Вселенной. Диффузное астрофизическое излучение может быть непосредственным участником или свидетелем протекающих во Вселенной процессов. Так, реликтовое излучение (РИ), с одной стороны несет информацию о составе Вселенной в эпоху рекомбинации и об эволюции на более поздних стадиях, а с другой стороны, содержит отпечаток эпохи, в которую сформировались первичные возмущения плотности.

Один из кандидатов на роль темной материи — аксионоподобные частицы — могут быть обнаружены по особенностям рассеяния энергичных гамма-квантов на диффузном межгалактическом фоновом излучении. Существенное влияние на распространение также оказывают крупномасштабные магнитные поля, в которых может происходить конверсия фотонов в аксион и обратно.

Гамма-кванты и заряженные частицы ультравысоких энергий позволяют исследовать физические процессы, протекающие при недостижимых в земных экспериментах энергиях в системе отсчета, связанной с РИ. Энергии указанных процессов в системе центра масс, в настоящий момент, являются также рекордными. Исследование диффузного излучения в этом диапазоне открывает возможность поиска сверхтяжелой темной материи, гравитации на масштабах энергии ТэВ и других проявлений новой физики.

Актуальность темы диссертации определяется тем, что наблюдение астрофизического излучения дает возможность исследовать процессы на недоступных в лаборатории пространственных и энергетических масштабах.

Цели и задачи диссертационной работы:

Настоящая работа посвящена исследованию моделей физики элементарных частиц, космологии и астрофизики высоких энергий на основании наблюдений диффузного астрофизического излучения в широком спектральном диапазоне.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- Получены ограничения на реликтовую плотность частиц с дробным электрическим зарядом из наблюдений реликтового излучения.
- Из наблюдений реликтового излучения установлены ограничения на модели псевдоконформной Вселенной и анизотропной инфляции.

- Из наблюдения затмений блазара 3C 279 Солнцем получены ограничения на размер и поток протяженного гало в диапазоне гамма-лучей.
- Обнаружена аномальная прозрачность Вселенной по отношению к гамма-излучению высоких энергий.
- Получены ограничения на поток гамма-квантов с энергией выше 10^{18} эВ по данным мюонных детекторов Якутской установки и с энергией выше 10^{19} эВ по данным Обсерватории Telescope Array.
- Установлены ограничения на параметры сверхтяжелой темной материи.
- Обнаружено указание на анизотропию космических лучей с энергиями выше 5.7×10^{19} эВ на средних угловых масштабах.

Научная новизна. В ходе выполнения работы впервые было получено несколько важных результатов:

- Получены наиболее сильные ограничения на реликтовую плотность частиц с дробным электрическим зарядом по данным космической обсерватории Планк.
- Впервые установлены наблюдательные ограничения на параметры гипотетического скалярного поля в моделях псевдоконформной Вселенной, альтернативных инфляционной модели.
- Впервые получены ограничения на размер протяженного гало блазара 3C 279.
- Впервые установлена аномальная прозрачность Вселенной по отношению к гамма-излучению высоких энергий с высоким уровнем статистической достоверности (впервые выше 5 стандартных отклонений).
- Впервые поставлено ограничение на интегральный поток гамма-квантов с энергиями от 10^{18} эВ. Полученные по данным Якутской установки ограничения — лучшие на момент публикации и лучшие в северном полушарии в настоящее время.

- Впервые установлено, что модель сверхтяжелой темной материи не может объяснить весь наблюдаемый поток космических лучей с энергиями выше 10^{20} эВ.
- Впервые в северном полушарии обнаружено указание на «горячее пятно» космических лучей с энергиями выше 5.7×10^{19} эВ.
- Получены наиболее сильные в северном полушарии ограничения на поток фотонов с энергией выше 10^{19} эВ по данным Обсерватории Telescope Array.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные ограничения на реликтовую плотность частиц с дробным электрическим зарядом применяются при построении моделей темной материи [30–33], физики элементарных частиц [34, 35], а также для проектирования экспериментов по прямому поиску новых частиц [36–38].

Ограничения на параметры статистической анизотропии Вселенной используются при построении новых космологических моделей, альтернативных стандартной инфляции [39, 40].

Ограничения на размер гало ЗС 279 могут использоваться при разработке астрофизических моделей, включающих крупномасштабные магнитные поля.

Факт обнаружения аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения высоких энергий используется при проектировании экспериментов, способных прямо или косвенно обнаружить аксионы и аксионоподобные частицы (IAХО, СТА и другие) [41–43].

Обнаружение горячего пятна на карте космических лучей повлияло на развитие моделей астрофизического происхождения нейтрино [44, 45] и отразилось в научной программе будущих космических экспериментов [46].

Разработанный метод реконструкции событий Telescope Array с аппроксимацией кривизны фронта используется для исследования химического состава космических лучей по данным наземной ре-

шетки детекторов [47].

Полученные ограничения на поток гамма-квантов ультравысоких энергий используются при исследовании астрофизических сценариев [48], разработке новых методик поиска фотонов ультравысоких энергий [49] и экспериментов следующего поколения [50].

Положения, выносимые на защиту:

1. Построена система кинетических уравнений плазмы эпохи рекомбинации и рассчитан спектр реликтового излучения в присутствии гипотетических частиц с дробным электрическим зарядом. На основании данных спутника Планк по анизотропии микроволнового излучения получено ограничение на реликтовую плотность таких частиц. Показано, что в широком классе моделей реликтовая плотность частиц с дробным электрическим зарядом не может составлять более 1% от плотности холодной темной материи.
2. Из данных спутника Планк установлены наблюдательные ограничения на параметры гипотетического скалярного поля в моделях псевдоконформной Вселенной. Показано на уровне достоверности 95%, что параметр самодействия скалярного поля в модели конформного скатывания с промежуточной стадией не превышает $1.3 \cdot 10^{-3}$, а в модели без промежуточной стадии не превышает 0.52.
3. На основе данных спутника Fermi исследовано гамма-излучение с энергией выше 100 МэВ от блазара 3C 279 во время его семи затмений Солнцем. Получены ограничения на размер и поток протяженного гамма-излучения блазара.
4. Из наблюдений гамма-излучения далеких блазаров наземными гамма-телескопами и орбитальным телескопом Fermi LAT установлена аномальная прозрачность Вселенной для фотонов с энергиями выше 100 ГэВ. Эффект обнаружен с высокой статистической значимостью и указывает на новые физические

или астрофизические явления. Результат может быть интерпретирован в модели физики частиц с новыми аксионоподобными частицами.

5. На основании мюонных данных Якутской установки ШАЛ получены ограничения на поток фотонов с энергиями выше 10^{18} эВ, $2 \cdot 10^{18}$ эВ и $4 \cdot 10^{18}$ эВ. Показано, что доля фотонов при этих энергиях не превышает 0.4%, 0.8% и 4.1%, соответственно, с уровнем достоверности 95%. Результат противоречит предсказаниям моделей распада топологических дефектов.
6. Получены ограничения на параметры сверхтяжелой темной материи из ненаблюдения фотонов ультравысоких энергий и формы спектра космических лучей. Показано, что модель сверхтяжелой темной материи не может описать весь поток космических лучей при энергиях порядка 10^{20} эВ. Установлены ограничения на допустимую долю потока, связанную с такой темной материей.
7. По данным 5 лет наблюдений наземной решетки Telescope Array на карте космических лучей с энергиями выше $5.7 \cdot 10^{19}$ эВ обнаружен избыток событий из определенной области неба («горячее пятно»). В круг радиуса 20 градусов попадают 19 из 72 событий при ожидании 4.5 для изотропного распределения.
8. Разработан метод поиска первичных фотонов ультравысоких энергий по данным наземной решетки сцинтилляционных детекторных станций установки Telescope Array. Разработана и применена к событиям Telescope Array методика реконструкции, включающая оценку параметра кривизны Линсли для каждого события.
9. Установлены ограничения на поток первичных фотонов с энергиями выше 10^{19} эВ, $10^{19.5}$ эВ и 10^{20} эВ по данным трех лет наблюдения наземной решетки Telescope Array. Установлено, что поток фотонов при этих энергиях не превышает $1.9 \cdot 10^{-2}$, $0.97 \cdot 10^{-2}$ и $0.71 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, соответственно, с уровнем

достоверности 95%. Результаты согласуются с астрофизическим происхождением космических лучей с энергиями выше 10^{19} эВ.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались автором лично на следующих семинарах и конференциях:

1. 4-ое Международное рабочее совещание «Космические лучи высших энергий и их источники», Москва, 20-22 мая 2008 г.
2. 15-ый Международный семинар по физике высоких энергий Кварки-2008, Сергиев Посад, 23-29 мая 2008 г.
3. Семинар физического факультета Университета Тулейн, Новый Орлеан, США, 23 июля 2008 г.
4. 31-ая Международная конференция по космическим лучам (ICRC-2009), Лодзь, Польша, 7-15 июля 2009 г.
5. Семинар лаборатории JEM-EUSO, RIKEN, Сайтама, Япония, 4 сентября 2009 г.
6. Рабочее совещание Японского физического общества, Окаяма, Япония, 21-23 марта 2010 г.
7. 377-е, 400-е, 410-е и 421-е заседания Семинара лаборатории Нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН, Москва, 28 мая 2010 г., 18 ноября 2011 г., 24 февраля 2012 г. и 15 февраля 2013 г.
8. 16-ый Международный семинар по физике высоких энергий Кварки-2010, Коломна, 6-12 июня 2010 г.
9. 31-ая Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 5-9 июля 2010 г.
10. 19-ое Международное рабочее совещание QFTHEP-2010, Голицыно, 8-15 сентября 2010 г.
11. Международный симпозиум по последним результатам в области космических лучей сверхвысоких энергий, Нагоя, Япония, 10-12 декабря 2010 г.

12. Семинар отдела теоретической физики Свободного Университета Брюсселя, 4 февраля 2011 г.
13. 1034-й и 1065-й семинары «Нейтронная и ядерная астрофизика» имени академика Г.Т. Зацепина, ИЯИ РАН, 15 октября 2010 г. и 16 ноября 2012 г.
14. Семинар по астрофизике частиц, Университет Гамбурга, 4 мая 2011 г.
15. Семинар DESY, Цойтен, 6 мая 2011 г.
16. Рабочее совещание «Крупномасштабные эксперименты, регистрирующие космические лучи во втором десятилетии 21 века», Москва, 16-18 мая 2011 г.
17. 32-ая Международная конференция по космическим лучам (ICRC-2011), Пекин, Китай, 11–18 августа 2011 г.
18. Рабочее совещание Россия-Испания, Барселона, Испания, 8–11 ноября 2011 г.
19. Международное рабочее совещание по перспективам развития совместных российско-германских проектов в области астрофизики, Дубна, 8–9 декабря 2011 г.
20. Международный симпозиум по направлениям будущего развития физики космических лучей ультравысоких энергий, ЦЕРН, 13-16 февраля 2012 г.
21. Семинар кафедры физики колебаний физического факультета МГУ, 13 апреля 2012 г.
22. 17-ый Международный семинар по физике высоких энергий Кварки-2012, Ярославль, 4–10 июня 2012 г.
23. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», Москва, 24-27 декабря 2012 г.
24. 23-й Европейский симпозиум по космическим лучам ECRS-2012, Москва, 2-6 июля 2012 г.
25. Семинар Научно-исследовательского института прикладной физики Иркутского Государственного Университета, 11 октября 2012 г.

26. Семинар ЛТФ ОИЯИ, 14 марта 2013 г.
27. Семинары отдела частиц сверхвысоких энергий НИИЯФ МГУ 14 февраля 2013 г., 23 мая 2013 г.
28. Международная конференция «25-ая встреча в Блуа по физике частиц и космологии», Блуа, Франция, 26–31 мая 2013 г.
29. Международное рабочее совещание «Актуальные темы современной космологии», Каржез, Франция, 6–11 мая 2013 г.
30. 21-ое Международное рабочее совещание QFTNER-2013, г. Репино, 23–30 июня 2013 г.
31. 33-ая Международная конференция по космическим лучам (ICRC-2013) Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2-9 июля 2013 г.
32. 18-ый Международный семинар по физике высоких энергий Кварки-2014, Суздаль, 2-8 июня 2014 г.
33. 33-ая Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, 11-15 августа 2014 г.
34. 16-ое Международное рабочее совещание по вычислительным методам (ACAT-2014), Прага, Чехия, 1-5 сентября 2014 г.
35. Семинар «Астрофизика космических лучей и физика космоса» НИИЯФ МГУ, Москва, 10 сентября 2014 г.
36. Семинар обсерватории Туорла, Турку, Финляндия, 23 и 26 сентября 2014 г.
37. Международное рабочее совещание по перспективам физики частиц «Физика нейтрино и астрофизика», Валдай, 1-8 февраля 2015 г.
38. 34-ая Международная конференция по космическим лучам (ICRC-2015) Гаага, Нидерланды, 30 июля – 6 августа 2015 г.
39. 17-ая Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, 20–26 августа 2015 г.
40. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 60-летию ОИЯИ, Дубна, 12–15 апреля 2016 г.

Результаты диссертации легли в основу специального курса «Обработка данных астрофизических экспериментов» для аспирантов физического факультета МГУ им М.В. Ломоносова.

Список публикаций по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 25 работ, из них 12 статей в рецензируемых научных журналах [1–12], 13 статей в сборниках трудов конференций [13–25].

Личный вклад автора. Диссертация основана на работах, выполненных автором в ИЯИ РАН (Москва) в 2003–2015 гг. Часть работ выполнена в обсерватории Telescope Array (Юта, США) в рамках международной коллаборации в 2008–2015 гг. Основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, библиографии и трех приложений. Она содержит 44 рисунка и 7 таблиц. Общий объем диссертации 200 страниц. Библиография включает 360 наименований.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе с помощью измерений температуры реликтового излучения (РИ), выполненных космической обсерваторией Планк, исследованы два класса моделей физики частиц.

В Разделе 1.1 описана миссия и научные задачи космической обсерватории Планк, выполнявшей задачи научной миссии с 12 августа 2009 года по 23 октября 2013 года [51]. Приведено описание научных приборов на борту Планк и данных, открыто доступных в результате работы Планк.

В Разделе 1.2 рассмотрена модель гипотетических частиц с дробным электрическим зарядом (МЗЧ). Такие частицы могут рождаться в ранней Вселенной и составлять сегодня часть холодной темной материи. Несмотря на малый заряд, взаимодействие МЗЧ с электронами и протонами плазмы эпохи рекомбинации может приводить к наблюдаемым изменениям в спектре мощности РИ. В эпоху рекомбинации могут происходить процессы рассеяния МЗЧ на электронах и протонах плазмы. Было показано, что если темп передачи скорости в этих процессах превышает темп расширения Вселенной, поведение компоненты плазмы, связанной с МЗЧ, подобно поведению барионной компоненты вплоть до рекомбинации [52]. В отличие от барионов, частицы с дробным электрическим зарядом не вносят вклад в непрозрачность плазмы в момент рекомбинации, так как комптоновское рассеяние подавлено четвертой степенью заряда. Как следствие, длина свободного пробега фотона увеличивается, если часть барионов заменена МЗЧ. Эффект МЗЧ выражается в дополнительном размывании возмущений на малых масштабах и соответствующему подавлению спектра мощности РИ при больших мультипольных моментах. Взаимодействие электронов и протонов с МЗЧ приводит к модификации стандартных уравнений для барионной компоненты и дополнительным уравнениям для компоненты, связанной с МЗЧ.

Пространство параметров космологической Λ CDM-модели с дополнительной компонентой МЗЧ, имеющей реликтовую плотность $\Omega_{\text{мзч}}$, исследовано методом Монте-Карло марковских цепей (МКМЦ). Частная функция правдоподобия для данных Планк в плоскости $\Omega_{\text{мзч}} h^2 - \Omega_b h^2$ показана на Рис. 1. Получено следующее ограничение на реликтовую плотность МЗЧ по данным Планк:

$$\Omega_{\text{мзч}} h^2 < 0.001 \text{ (95\%CL)} \quad (1)$$

В Разделе 1.3 исследованы наблюдательные следствия моделей псевдоконформной Вселенной, являющихся альтернативой инфля-

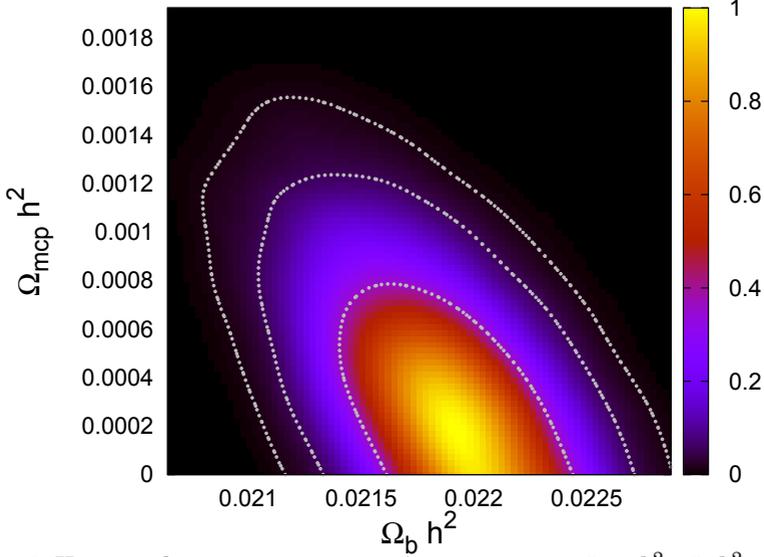


Рис. 1. Частная функция правдоподобия в плоскости $\Omega_{\text{мсп}} h^2 - \Omega_b h^2$ по данным Планка. Контуры ограничивают области, соответствующие вероятностям 68%, 95% и 99%

ционной модели Вселенной. Показано, что статистические свойства карты температуры РИ чувствительны к свойствам частиц и полей на самых ранних этапах развития Вселенной — до так называемого Большого взрыва.

Одним из предсказаний модели космологической инфляции в режиме медленного скатывания является статистическая изотропия скалярных возмущений. Следовательно, стандартная космологическая модель должна быть нетривиально расширена, если в наблюдениях РИ или крупномасштабных структур Вселенной будет обнаружено отклонение от изотропии. Такое расширение обычно предполагает присутствие новых полей и взаимодействий. Недавно были предложены модели инфляции с векторными полями, см. обзор [53, 54], в которых Вселенная является анизотропной, а статистическая анизотропия (СА) потенциально детектируема. Оказалось, что во многих моделях такого типа присутствуют духи

[55, 56] или требуется тонкая настройка пространства параметров [57]. Указанных проблем нет в альтернативных инфляции моделях псевдоконформной Вселенной [58–60], которые будут рассмотрены в настоящем Разделе.

В сценарии псевдоконформной Вселенной существует два альтернативных предсказания величины СА. Одно из них получено в моделях, в которых к концу скатывания космологические моды уже вышли за горизонт (Сценарий А), а другое для сценариев, в которых интересующие космологические моды в конце скатывания находятся под горизонтом (Сценарий Б).

Для оценки параметров статистической анизотропии q_{LM} использован метод максимального правдоподобия в квадратичном приближении (QML). Оптимальная оценка параметров в рамках метода QML дается квадратичной формой в пространстве карт температуры РИ. В настоящей работе оценка записана в виде билинейной функции от двух карт по аналогии с построением кросс-спектра мощности WMAP [61]. Анализ проведен с использованием карт температуры Планк в частотных полосах 143 ГГц и 217 ГГц, соответствующим первым 15.5 месяцам наблюдения [62–64]. Технические детали, относящиеся к выводу аналитического выражения матрицы Фишера для оптимальной оценки приведены в Приложении А.

На Рис. 2 показаны коэффициенты спектральной мощности статистической анизотропии

$$C_L^q = \frac{1}{2L+1} \sum_M |q_{LM}|^2 \quad (2)$$

вычисленные с помощью кросс-корреляции карт температуры РИ в частотных полосах 143 ГГц и 217 ГГц. Как видно из рисунка, данные Планк совместны с гипотезой статистической изотропии. Результаты получения оценки параметра самодействия h^2 в Сценарии Б показаны на Рис. 3. Значения h^2 получены с использованием 7 диапазонов мультиполей, которые начинаются с квадруполя $L = 2$, а заканчиваются на $L_{\max} = 2, \dots, 14$. Итоговые ограничения на пара-

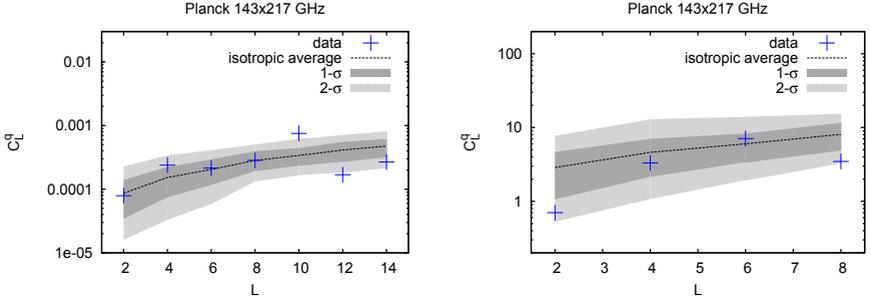


Рис. 2. Коэффициенты C_L^q , заданные Уравнением (2), восстановленные из данных Планк. Левый и правый рисунки соответствуют зависимостям СА от волнового вектора $a(k) = 1$ и $a(k) = H_0 k^{-1}$, соответственно. Доверительные интервалы 68% и 95% нанесены темно-серым и светло-серым цветом, соответственно

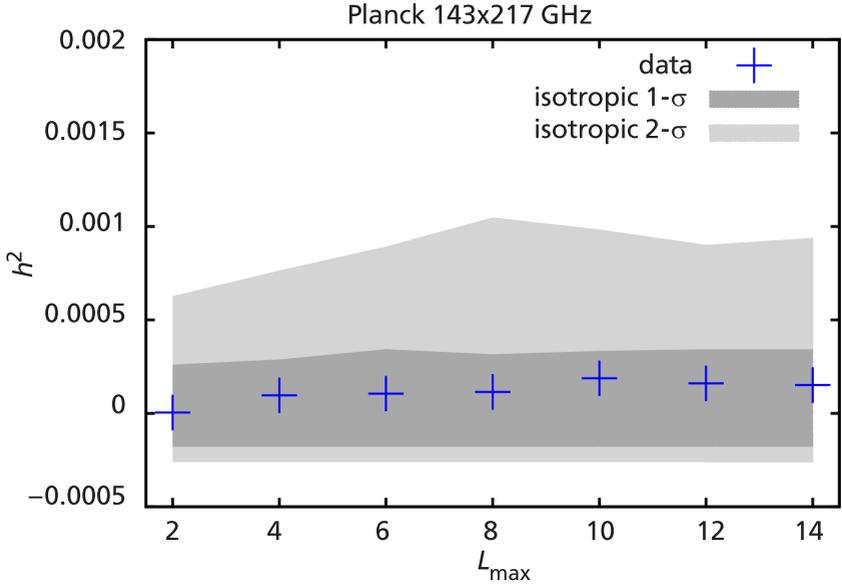


Рис. 3. Оценка параметра h^2 в моделях псевдоконформной Вселенной с промежуточной стадией из данных Планк. Доверительные интервалы 68% и 95% нанесены темно-серым и светло-серым цветом, соответственно метры самодействия скалярного поля в моделях псевдоконформной Вселенной представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Ограничения на параметр псевдоконформной Вселенной h^2 и амплитуду осесимметричной квадрупольной анизотропии на уровне достоверности 95%

Модель / полоса	143 ГГц	217 ГГц	143 × 217 ГГц
Сценарий А (ЛП)	$h^2 < 8.8$	$h^2 < 8.0$	$h^2 < 3.0$
Сценарий А (СЛП)	$h^2 \ln \frac{H_0}{\Lambda} < 0.34$	$h^2 \ln \frac{H_0}{\Lambda} < 0.30$	$h^2 \ln \frac{H_0}{\Lambda} < 0.52$
Сценарий Б	$h^2 < 0.0011$	$h^2 < 0.0090$	$h^2 < 0.0013$
Инфляции	$ g_* < 0.020$	$ g_* < 0.020$	$ g_* < 0.026$

В Разделе 1.4 приведены выводы к первой главе. Результаты первой главы опубликованы в работах [1– 4, 13].

Во второй главе выполнен поиск проявлений новой физики на основании данных космической обсерватории Fermi LAT и наземных гамма-телескопов.

В разделе 2.1 дано краткое описание роли аксионов и аксионоподобных частиц (АПЧ) в физике частиц и астрофизике. Эти гипотетические частицы, с одной стороны, являются одним из кандидатов на роль темной материи. С другой стороны, аксионы и АПЧ могут привлекаться для объяснения других астрофизических явлений, не описываемых сегодня в рамках СМ. В частности, корреляции космических лучей ультравысоких ($E > 10^{19}$ эВ) энергий, зарегистрированных установкой HiRes, с положением лацертид (подкласса блазаров) [65, 66] не могут быть описаны с помощью частиц СМ [67]. Отсутствие описания связано с тем, что заряженные частицы СМ отклоняются в магнитном поле Галактики, а нейтральные частицы (фотон, нейтрон) поглощаются в процессе распространения от далекого источника до Земли. Корреляции можно объяснить присутствием аксионоподобных частиц [68]. В этом сценарии блазары окружены крупномасштабными магнитными полями, в которых и происходит конверсия гамма-квантов в АПЧ.

Одним из предсказаний этой модели является протяженное гало гамма-излучения вокруг источника.

В разделе 2.2 описано распространение гамма-квантов в межгалактической среде. Гамма-излучение высоких энергий может рассеиваться на мягких фотонах внегалактического фонового излучения, рождая электрон-позитронные пары. Эти процессы существенно влияют на наблюдаемые спектры далеких объектов, а в ряде случаев и на наблюдаемую протяженность источников. Исследуемые в настоящей работе гамма-кванты с энергиями от 100 ГэВ до нескольких ТэВ взаимодействуют преимущественно с фотонами инфракрасного спектрального диапазона. Поток внегалактического инфракрасного излучения не может быть точно измерен из-за доминирующего вклада зодиакального света. Тем не менее, установлен ряд нижних ограничений на этот поток, основанных на счете видимого числа галактик, неизбежно вносящих свой вклад в этот поток и построены модели фонового излучения, согласующиеся с наблюдениями [69–72]. Из указанных ограничений следует, что длина свободного пробега фотона с энергией ТэВ должна составлять десятки мегапарсек. Однако, фотоны с такими энергиями были зарегистрированы от многочисленных источников, расположенных на существенно больших расстояниях [73]. В случае каждого конкретного источника, эффект можно объяснить увеличением жесткости спектра источника, вызванным пока неизвестным астрофизическим механизмом [74]. Если же аномальная прозрачность наблюдается для ансамбля источников, ее объяснение потребует рассмотрения новых физических явлений. Опишем три таких сценария, различающиеся величиной внегалактических магнитных полей.

Два сценария основаны на расширении СМ с помощью аксиоподобных частиц. Во внешних магнитных полях эти гипотетические частицы могут превращаться в фотоны и обратно. Такие превращения возможны во внегалактических магнитных полях [75],

если поля достаточно велики ($> 10^{-9}$ Гс). В этом режиме фотоны высоких энергий будут конвертироваться в АПЧ и назад на всем пути от источника до наблюдателя подобно тому, как происходят нейтринные осцилляции.

Во втором сценарии, внегалактические магнитные поля предполагаются более слабыми $\lesssim 10^{-10}$ Гс и недостаточными для конверсии. Вместо этого, превращение фотонов в АПЧ происходит в областях с более сильными магнитными полями вблизи источника, а обратный переход — вблизи наблюдателя. Такой сценарий может быть реализован на магнитных полях галактик [76], скоплений и сверхскоплений галактик [68].

Третий рассматриваемый сценарий [77] не требует новой физики за пределами СМ, а опирается на нестандартные астрофизические предположения. В этом сценарии происходит дополнительное рождение гамма-квантов по пути от источника к наблюдателю, которое конкурирует с поглощением гамма-квантов. Дополнительные фотоны рождаются во взаимодействиях с фоновым излучением космических протонов ультравысоких энергий, которые, согласно предположению модели, рождаются в том же источнике, что и гамма-кванты. Сценарий требует очень слабых межгалактических магнитных полей $\lesssim 10^{-14}$ Гс, так как в противном случае траектория протонов будет отличаться от прямолинейной.

В Разделе 2.3 установлены ограничения на размер и поток излучения протяженного гало блазара 3С 279. Этот источник характерен тем, что ежегодно испытывает солнечные затмения. Во время затмения, поток точечного источника полностью поглощается, а все наблюдаемые гамма-кванты относятся либо к Солнцу либо к гало источника. Анализ проведен для семи затмений в 2008–2014 гг. с помощью набора утилит Solar System Tools, детали использования которых описаны в Приложении Б. Полученные ограничения представлены в двумерном пространстве параметров поток–размер.

В разделе 2.4 в рамках модели инфракрасного фона с наименьшей оптической толщиной [72] восстановлен спектр гамма-квантов, испущенный блазарами, зарегистрированными Fermi LAT и наземными черенковскими телескопами. Показано, что восстановленные спектры испытывают излом вверх ровно на тех энергиях, на которых становятся существенными эффекты поглощения. Так как энергии различны для источников, расположенных на различных расстояниях, эффект может быть вызван лишь некорректным учетом поглощения. Исследована зависимость амплитуды излома восстановленного спектра от красного смещения и показано на уровне достоверности 12σ , что амплитуда излома растет с красным смещением, см. Рис. 4. Показано, что оптическая толщина Вселенной по отношению к гамма-излучению переоценена даже в самой консервативной модели не менее, чем в 2 раза. Объяснение аномального поглощения требует новых физических или астрофизических явлений. Наблюдаемый эффект полностью описывается в рамках модели новой физики, включающей конверсию фотонов в аксионоподобные частицы в окрестности источника и обратно в нашей Галактике.

В Разделе 2.5 приведены выводы ко второй главе. Результаты второй главы опубликованы в работах [5, 6].

В третьей главе с помощью данных мюонных детекторов Якутской установки проведен поиск фотонов ультравысоких энергий.

Спектр наблюдаемого в настоящее время электромагнитного излучения ограничен сверху величиной около 100 ТэВ. Зарегистрировать гамма-кванты более высоких энергий пока не удалось из-за того, что падающий с энергией поток фотонов дополнительно подавлен процессами поглощения на межгалактическом фоновом излучении и реликтовом излучении. Таким образом, сегодня сохраняется темная спектральная полоса протяженностью в шесть порядков — от 10^{14} эВ до 10^{20} эВ, представляющая для исследовате-

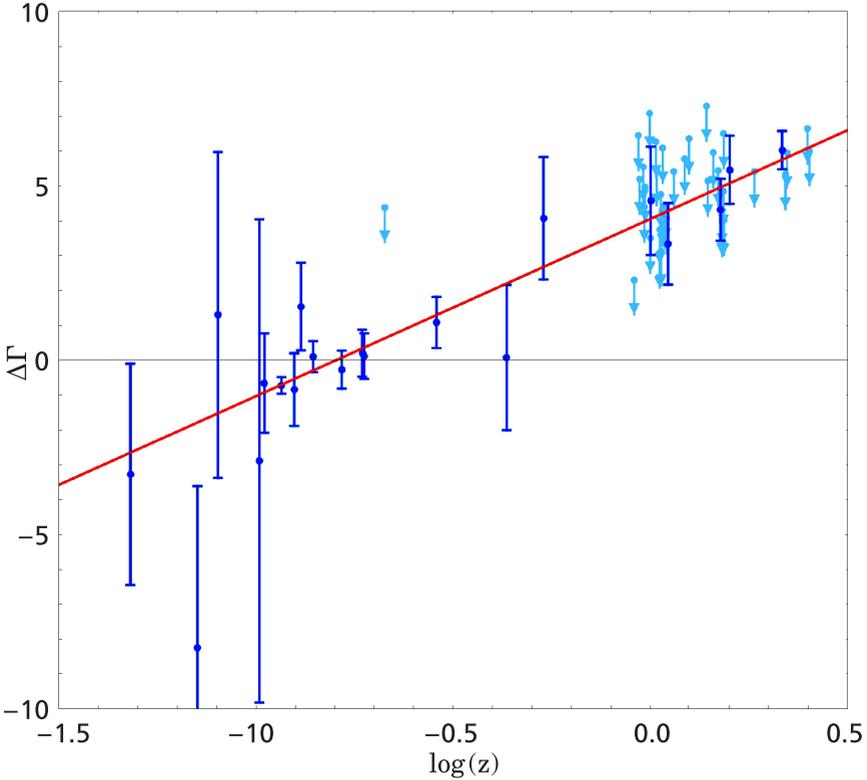


Рис. 4. Амплитуда излома $\Delta\Gamma$ в спектре, восстановленном в рамках наиболее консервативной модели поглощения, как функция красного смещения. Положение излома зафиксировано при $E = E_0$. Здесь E_0 — энергия, при которой эффекты поглощения становятся существенными, то есть оптическая толщина принимает значение $\tau = 1$. Линия — наилучшая аппроксимация прямой линией; ее наклон отличается от нуля на уровне достоверности 12σ

лей огромный интерес. Наблюдение электромагнитного излучения рекордных энергий позволит расширить границы применимости фундаментальных физических законов или обнаружить отклонения, предсказываемые многими моделями физики частиц. Кроме того, фотоны с такими энергиями могут раскрыть природу наиболее мощных астрофизических явлений. Высокие ожидания исследователей также опираются на исторический опыт: измерение свойств

излучения в каждом новом энергетическом диапазоне приводило к открытиям новых физических или астрофизических явлений.

Поиск фотонов с энергиями в указанном диапазоне проводится на черенковских телескопах, на наземных решетках детекторов частиц и на гибридных установках. В настоящее время собирают данные эксперименты HAWC, TAIGA, IceCube, Якутская установка ШАЛ, Обсерватория им. Пьера Оже, Telescope Array и проектируются обсерватории CTA и LHAASO. Предметом исследований третьей и четвертой Глав является излучение в высшей части темного энергетического диапазона, с энергиями выше 10^{18} эВ.

Результаты третьей главы основаны на данных подземных мюонных детекторов Якутской установки ШАЛ, описание которой приведено в Разделе 3.1. Якутская установка стала первым экспериментом, способным одновременно исследовать все аспекты физики космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ). В настоящее время установка содержит 59 станций наземной решетки сцинтилляционных детекторов, в большинстве из которых установлен оптический приемник излучения Вавилова-Черенкова, а также 6 подземных мюонных станций.

Происхождение космических лучей ультравысоких энергий $\lesssim 10^{18}$ эВ остается загадкой в течение многих лет. В Разделе 3.2 рассмотрены основные модели, описывающие существование таких частиц, которые можно условно разделить на два класса. Первый класс — астрофизические модели или модели ускорения — предполагает ускорение заряженных частиц в электрических полях источников. Ускорение до ультравысоких энергий требует, чтобы ларморовский радиус частицы не превышал размера области, в которой происходит ускорение. Это условие, называемое критерием Хилласа [78], должно быть дополнено рассмотрением потерь ускоримой частицы в источнике [79]. Все физические условия ускорения выполняются лишь для нескольких классов астрофизических источников, среди которых активные ядра галактик и сверхмас-

сивные черные дыры. Второго класса моделей — модели распада объектов новой физики. Одна из таких моделей — модель распада частиц гипотетической сверхтяжелой темной материи (СТТМ). Другой пример моделей этого типа — распад или аннигиляция гипотетических топологических дефектов, таких как, например, космические струны. Для результатов третьей Главы существенным является тот факт, что модели происхождения космических лучей различаются в своих предсказаниях относительно потока гамма-квантов ультравысоких энергий.

В Разделе 3.3 представлены результаты анализа мюонной компоненты ШАЛ, зарегистрированных Якутской установкой. Получены ограничения на поток фотонов с энергиями выше 10^{18} эВ, 2×10^{18} эВ и $E > 4 \times 10^{18}$ эВ. Ограничения на поток гамма-квантов в сравнении с полученными ранее результатами приведены на Рис. 5. Ограничения Якутской установки сильнее, чем полученные ранее ограничения Обсерватории им. Пьера Оже за счет того, что использована наиболее чувствительная к гамма-квантам наблюдаемая — плотность мюонов.

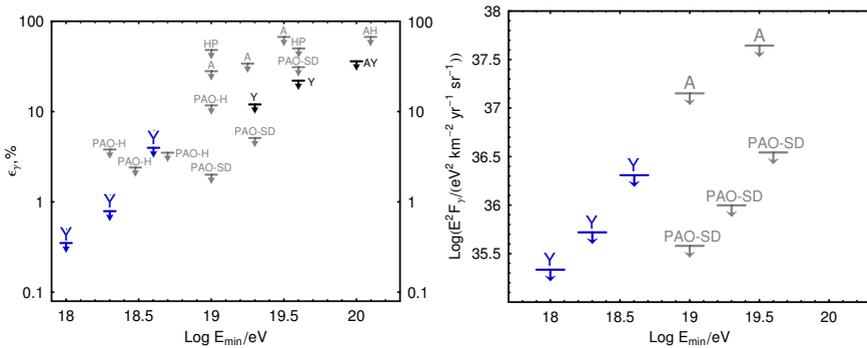


Рис. 5. Ограничения на уровне достоверности 95% на долю (слева) интегральный поток (справа) первичных гамма-квантов с энергией $E_0 > E_{\text{min}}$ полученные в настоящей диссертации по данным Якутской установки (Y), полученные ранее по данным наземной решетки Обсерватории им. Пьера Оже (PAO-SD) [80] и по данным AGASA (A) [81]

Интерпретация полученных ограничений в рамках моделей распада гипотетических топологических дефектов и сверхтяжелой темной материи выполнена в Разделе 3.4. На основании измеренных спектров и ограничений на поток фотонов ультравысоких энергий показано, что весь поток космических лучей предельно высоких энергий не может быть объяснен распадом СТТМ. Кроме того, полученные ограничения на поток фотонов противоречат предсказаниям модели распада гипотетических топологических дефектов, Рис. 6. В то же время все спектры могут быть объяснены астрофизическим происхождением КЛ, если допустить возможность систематических различий масштабов энергий в разных экспериментах.

В Разделе 3.5 приведены выводы к третьей главе. Результаты третьей главы опубликованы в работах [7–9, 14–17]

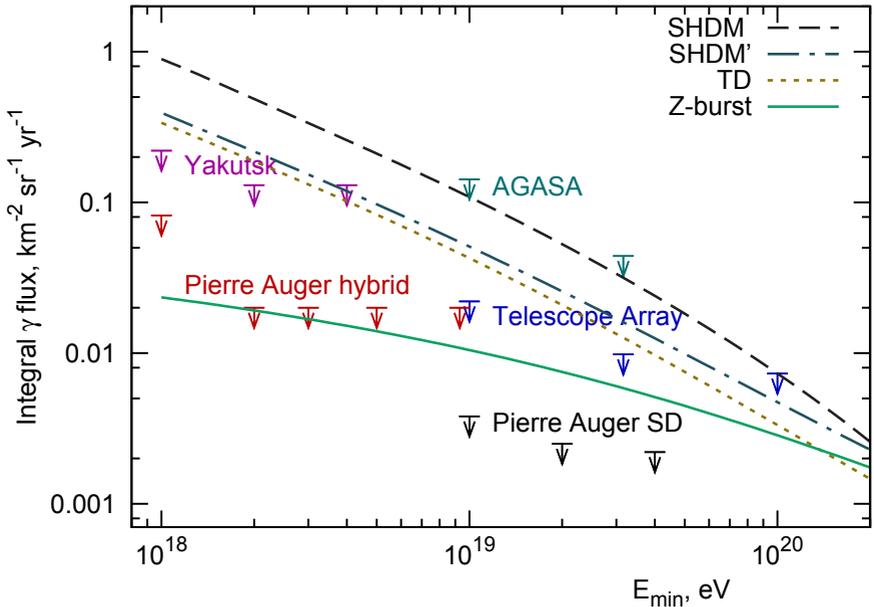


Рис. 6. Поток фотонов ультравысоких энергий, предсказанный в двух моделях СТТМ, модели распада топологических дефектов и модели Z-вспышек в сравнении с экспериментальными ограничениями [16]

В четвертой главе исследование проблемы происхождения космических лучей ультравысоких энергий продолжено на основании данных одной из новейших установок ШАЛ большой площади — 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. Результаты настоящей Главы основаны на событиях, зарегистрированных наземной решеткой. При этом данные флуоресцентных телескопов используются для определения абсолютного масштаба энергии адронных ШАЛ. В Разделе 4.2 описано Монте-Карло моделирование событий ШАЛ в условиях наземной решетки ТА. Моделирование учитывает данные калибровки реального времени, а модельные события записываются в файлы того же формата, в котором хранятся откалиброванные данные ТА. Как следствие, вызов программ реконструкции осуществляется одинаковым образом для данных и результатов Монте-Карло. Процедура реконструкции событий наземной решетки описана в Приложении В.

В Разделе 4.3 проведен поиск анизотропии направлений прихода космических лучей с энергиями выше 5.7×10^{19} эВ по данным наземной решетки Telescope Array за 5 лет наблюдения. Обнаружено «горячее пятно» — область повышенной плотности событий радиусом 20° с центром $R.A. = 146.7^\circ$, $Dec. = 43.2^\circ$, Рис. 7. Центр горячего пятна отстоит от плоскости сверхгалактики на 19° . Вероятность случайного обнаружения «горячего пятна» в случае изотропного распределения космических лучей составляет 3.7×10^{-4} , что соответствует статистической достоверности на уровне 3.4 стандартных отклонений.

В Разделе 4.4 описан статистический метод поиска фотонов ультравысоких энергий по данным наземной решетки ТА. Метод основан на анализе кривизны фронта ШАЛ и использует Монте-Карло моделирование ШАЛ, вызванных первичными фотонами. Установлены ограничения на поток гамма-квантов с энергиями

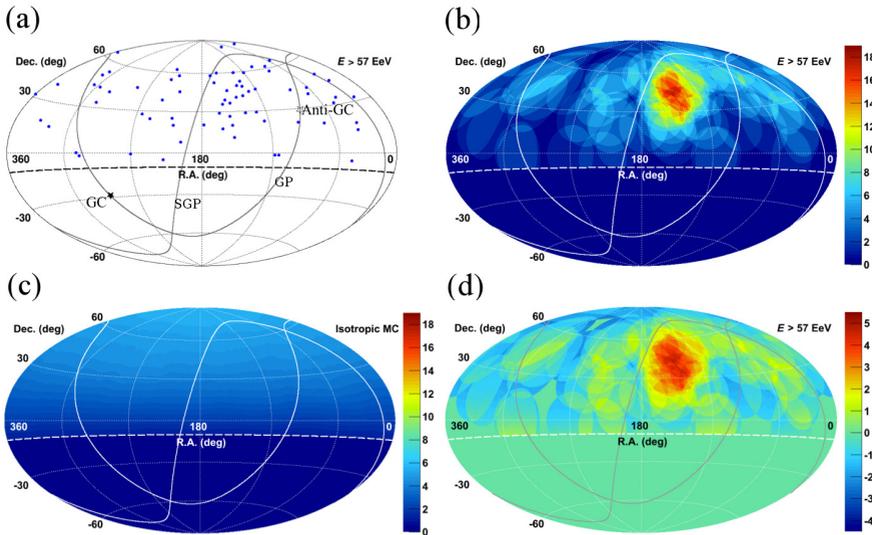


Рис. 7. Карта КЛУВЭ в экваториальных координатах в проекции Аитова. Сплошные линии — галактическая плоскость (GP) и плоскость Местного сверхскопления галактик (SGP). Поле зрения ТА — область над штриховой линией $\text{Dec.} = -10^\circ$. (a) Точки — направления прихода КЛУВЭ с энергиями выше $E > 5.7 \times 10^{19}$ эВ, зарегистрированные наземной решеткой Обсерватории Telescope Array, звездочки — галактический центр (GC) и антицентр (Anti-GC); (b) цвет соответствует числу наблюдаемых событий в круге радиусом 20° с центром в данной точке; (c) количество ожидаемых фоновых событий в круге радиусом 20° ; (d) Карта статистической значимости, рассчитанная методом Ли и Ма

выше 10^{19} , $10^{19.5}$ и 10^{20} эВ по данным трех лет наблюдения Обсерватории Telescope Array.

В Разделе 4.5 дана интерпретация наблюдения горячего пятна и полученных ограничений на поток фотонов в терминах моделей происхождения космических лучей. Показано, что ограничения на поток фотонов указывают на астрофизическое происхождение космических лучей, а горячее пятно может быть связано с ближайшим источником. В этой интерпретации, протяженность горячего пятна может быть вызвана отклонениями ядер промежуточной массы (C,N,O) в магнитном поле Галактики.

В Разделе 4.6 приведены выводы к четвертой главе. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [10–12, 18–25]

В **Заключении** приводится краткий обзор результатов работы.

Список публикаций

1. Dubovsky S.L., Gorbunov D.S., Rubtsov G.I. Narrowing the window for millicharged particles by CMB anisotropy // Письма в ЖЭТФ. 2004. Vol. 79. P. 3–7. [hep-ph/0311189](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0311189).
2. Dolgov A.D., Dubovsky S.L., Rubtsov G.I., Tkachev I.I. Constraints on millicharged particles from Planck data // Phys. Rev. 2013. Vol. D88, no. 11. P. 117701. [arXiv:hep-ph/1310.2376](https://arxiv.org/abs/hep-ph/1310.2376).
3. Libanov M., Rubakov V., Rubtsov G. Towards conformal cosmology // Письма в ЖЭТФ. 2015. Vol. 102. P. 630–640. [arXiv:hep-th/1508.07728](https://arxiv.org/abs/hep-th/1508.07728).
4. Rubtsov G.I., Ramazanov S.R. Revisiting constraints on the (pseudo)conformal universe with Planck data // Phys. Rev. 2015. Vol. D91, no. 4. P. 043514. [arXiv:astro-ph.CO/1406.7722](https://arxiv.org/abs/astro-ph.CO/1406.7722).
5. Kotelnikov E., Rubtsov G., Troitsky S. Constraining the extension of a possible gamma-ray halo of 3C 279 from 2008–2014 solar occultations // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2015. Vol. 450, no. 1. P. L44–L47. [arXiv:astro-ph.HE/1412.1435](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1412.1435).
6. Rubtsov G. I., Troitsky S. V. Breaks in gamma-ray spectra of distant blazars and transparency of the Universe // Письма в ЖЭТФ. 2014. Vol. 100. P. 397–401. [arXiv:astro-ph.HE/1406.0239](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1406.0239).
7. Glushkov A. V., Makarov I. T., Pravdin M. I. et al. Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies $E > 10^{18}$ eV from Yakutsk muon data // Phys. Rev. 2010. Vol. D82. P. 041101. [arXiv:astro-ph.HE/0907.0374](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/0907.0374).
8. Kalashev O. E., Rubtsov G. I., Troitsky S. V. Sensitivity of cosmic-ray experiments to ultra-high-energy photons: reconstruction of the spectrum and limits on the superheavy dark matter // Phys. Rev. 2009. Vol. D80. P. 103006. [arXiv:astro-ph/0812.1020](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0812.1020).

9. Rubtsov G. I., Tkachev I. I., Dolgov A. D. Ultra-high energy cosmic ray correlations with Active Galactic Nuclei in the world dataset // [Письма в ЖЭТФ](#). 2012. Vol. 95. P. 569–571. [arXiv:astro-ph.HE/1204.2499](#).
10. Abu-Zayyad T. et al. Upper limit on the flux of photons with energies above 10^{19} eV using the Telescope Array surface detector // [Phys. Rev.](#) 2013. Vol. D88, no. 11. P. 112005. [arXiv:astro-ph.HE/1304.5614](#).
11. Abu-Zayyad T. et al. The Cosmic Ray Energy Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment // [Astrophys. J.](#) 2013. Vol. 768. P. L1. [arXiv:astro-ph.HE/1205.5067](#).
12. Abbasi R. U. et al. Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment // [Astrophys. J.](#) 2014. Vol. 790. P. L21. [arXiv:astro-ph.HE/1404.5890](#).
13. Ramazanov S., Rubtsov G. Primordial scalar perturbations via conformal mechanisms: statistical anisotropy // [EPJ Web Conf.](#) 2014. Vol. 70. P. 00042.
14. Glushkov A., Gorbunov D., Makarov I. et al. Search for photons of energy $E > 1018\text{eV}$ with Yakutsk muon data // Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz. 2009. P. 558.
15. Kalashev O. E., Rubtsov G. I., Troitsky S. V. Sensitivity of cosmic-ray experiments to ultra-high-energy photons: reconstruction of the spectrum and limits on the superheavy dark matter // Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz. 2009. P. 1080.
16. Alvarez-Muniz J., Risse M., Rubtsov G. I., Stokes B. T. Review of the Multimessenger Working Group at UHECR-2012 // [EPJ Web Conf.](#) 2013. Vol. 53. P. 01009. [arXiv:astro-ph.HE/1306.4199](#).
17. Rubtsov G. I. The highest energy cosmic rays: Observations and search for new physics // PoS. 2010. Vol. QFTHEP2010. P. 008.

18. Rubtsov G., Ivanov D., Stokes B. et al. Search for ultra-high energy photons in the Telescope Array surface detector first-year data // Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz. 2009. P. 718.
19. Stokes B., Cady R., Ivanov D. et al. Using CORSIKA to quantify Telescope Array surface detector response // Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz. 2009. P. 1328.
20. Rubtsov G. I., Ivanov D., Stokes B. T. et al. Search for ultra-high energy photons using Telescope Array surface detector // [AIP Conf. Proc.](#) 2011. Vol. 1367. P. 181–184.
21. Rubtsov G. I., Fukushima M., Ivanov D. [Search for ultra-high energy photons and neutrinos using Telescope Array surface detector](#)//Proceedings, 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011). Vol. 2. P. 242.
22. Rubtsov G. I., Fukushima M., Ivanov D. et al. Search for ultra-high energy photons and neutrinos using Telescope Array surface detector // [EPJ Web Conf.](#) 2013. Vol. 53. P. 05001.
23. Rubtsov G. I., Fukushima M., Ivanov D. et al. Search for Ultra-High Energy Photons and Neutrinos using the Telescope Array Scintillator Array Data // Proceedings, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013): Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013. 2013. P. 0149.
24. Karg T., Alvarez-Muniz J., Kuempel D. et al. Report from the Multi-Messenger Working Group at UHECR-2014 Conference // 2014 Conference on Ultrahigh Energy Cosmic Rays (UHECR2014) Springdale, USA, October 12-15, 2014. 2015. [arXiv:astro-ph.HE/1510.02050](#).
25. Rubtsov G. I., Fukushima M., Ivanov D. et al. Telescope Array search for photons and neutrinos with the surface detector data // PoS. 2015. Vol. ICRC2015. P. 331.

Цитируемая литература

26. Aad G. et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // [Phys. Lett.](#) 2012. Vol. B716. P. 1–29. [arXiv:hep-ex/1207.7214](#).
27. Chatrchyan S. et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC // [Phys. Lett.](#) 2012. Vol. B716. P. 30–61. [arXiv:hep-ex/1207.7235](#).
28. Bezrukov F. L., Shaposhnikov M. The Standard Model Higgs boson as the inflaton // [Phys. Lett.](#) 2008. Vol. B659. P. 703–706. [arXiv:hep-th/0710.3755](#).
29. Melzer-Pellmann I., Pralavorio P. Lessons for SUSY from the LHC after the first run // [Eur. Phys. J.](#) 2014. Vol. C74. P. 2801. [arXiv:hep-ex/1404.7191](#).
30. McDermott S. D., Yu H.-B., Zurek K. M. Turning off the Lights: How Dark is Dark Matter? // [Phys. Rev.](#) 2011. Vol. D83. P. 063509. [arXiv:hep-ph/1011.2907](#).
31. Kouvaris C., Shoemaker I. M. Daily modulation as a smoking gun of dark matter with significant stopping rate // [Phys. Rev.](#) 2014. Vol. D90. P. 095011. [arXiv:hep-ph/1405.1729](#).
32. Buckley M. R., Zavala J., Cyr-Racine F.-Y. et al. Scattering, Damping, and Acoustic Oscillations: Simulating the Structure of Dark Matter Halos with Relativistic Force Carriers // [Phys. Rev.](#) 2014. Vol. D90, no. 4. P. 043524. [arXiv:astro-ph.CO/1405.2075](#).
33. Escudero M., Mena O., Vincent A. C. et al. Exploring dark matter microphysics with galaxy surveys // [JCAP.](#) 2015. Vol. 1509, no. 09. P. 034. [arXiv:astro-ph.CO/1505.06735](#).
34. Abel S. A., Goodsell M. D., Jaeckel J. et al. Kinetic Mixing of the Photon with Hidden U(1)s in String Phenomenology // [JHEP.](#) 2008. Vol. 07. P. 124. [arXiv:hep-ph/0803.1449](#).
35. Goodsell M., Jaeckel J., Redondo J., Ringwald A. Naturally Light Hidden Photons in LARGE Volume String Compactifications // [JHEP.](#) 2009. Vol. 11. P. 027. [arXiv:hep-ph/0909.0515](#).

36. Gninenko S. N., Redondo J. On search for eV hidden sector photons in Super-Kamiokande and CAST experiments // [Phys. Lett.](#) 2008. Vol. B664. P. 180–184. [arXiv:hep-ex/0804.3736](#).
37. Langacker P., Steigman G. Requiem for an FCHAMP? Fractionally CHarged, Massive Particle // [Phys. Rev.](#) 2011. Vol. D84. P. 065040. [arXiv:hep-ph/1107.3131](#).
38. Haas A., Hill C. S., Izaguirre E., Yavin I. Looking for milli-charged particles with a new experiment at the LHC // [Phys. Lett.](#) 2015. Vol. B746. P. 117–120. [arXiv:hep-ph/1410.6816](#).
39. Ito A., Soda J. Designing Anisotropic Inflation with Form Fields // [Phys. Rev.](#) 2015. Vol. D92, no. 12. P. 123533. [arXiv:hep-th/1506.02450](#).
40. Li X., Wang S., Chang Z. Anisotropic inflation in the Finsler spacetime // [Eur. Phys. J.](#) 2015. Vol. C75, no. 6. P. 260. [arXiv:gr-qc/1502.02256](#).
41. Tavecchio F., Roncadelli M., Galanti G. Photons to axion-like particles conversion in Active Galactic Nuclei // [Phys. Lett.](#) 2015. Vol. B744. P. 375–379. [arXiv:astro-ph.HE/1406.2303](#).
42. Meyer M., Conrad J. Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to the detection of axion-like particles at high gamma-ray opacities // [JCAP](#). 2014. Vol. 1412, no. 12. P. 016. [arXiv:astro-ph.HE/1410.1556](#).
43. Graham P. W., Irastorza I. G., Lamoreaux S. K. et al. Experimental Search es for the Axion and Axion-Like Particles // [Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.](#) 2015. Vol. 65. P. 485–514. [arXiv:hep-ex/1602.00039](#).
44. Anchordoqui L. A., Paul T. C., da Silva L. H. M. et al. What IceCube data tell us about neutrino emission from star-forming galaxies (so far) // [Phys. Rev.](#) 2014. Vol. D89, no. 12. P. 127304. [arXiv:astro-ph.HE/1405.7648](#).
45. Sahu S., Miranda L. S. Some possible sources of IceCube TeV-PeV neutrino events // [Eur. Phys. J.](#) 2015. Vol. C75. P. 273. [arXiv:astro-ph.HE/1408.3664](#).

46. Semikoz D., Tinyakov P., Zotov M. Detection prospects of the Telescope Array hotspot by space observatories // [Phys. Rev.](#) 2016. Vol. D93, no. 10. P. 103005. [arXiv:astro-ph.HE/1601.06363](#).
47. Rubtsov G. I., Troitsky S. V. Statistical methods for cosmic ray composition analysis at the Telescope Array Observatory // [J. Phys. Conf. Ser.](#) 2015. Vol. 608, no. 1. P. 012067.
48. Sarkar B., Kampert K.-H., Kulbartz J. [Ultra-High Energy Photon and Neutrino Fluxes in Realistic Astrophysical Scenarios](#) // Proceedings, 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011). Vol. 2. P. 198. URL: http://inspirehep.net/record/1352272/files/v2_1087.pdf.
49. Ros G., Supanitsky A. D., Medina-Tanco G. A. et al. Improving photon-hadron discrimination based on cosmic ray surface detector data // [Astropart. Phys.](#) 2013. Vol. 47. P. 10–17. [arXiv:astro-ph.HE/1305.7439](#).
50. Aab A. et al. The Pierre Auger Observatory Upgrade - Preliminary Design Report. 2016. [arXiv:astro-ph.IM/1604.03637](#).
51. Ade P. A. R. et al. Planck early results. I. The Planck mission // [Astron. Astrophys.](#) 2011. Vol. 536. P. A1. [arXiv:astro-ph.IM/1101.2022](#).
52. Dubovsky S. L., Gorbunov D. S. Small second acoustic peak from interacting cold dark matter? // [Phys. Rev.](#) 2001. Vol. D64. P. 123503. [arXiv:astro-ph/0103122](#).
53. Soda J. Statistical Anisotropy from Anisotropic Inflation // [Class. Quant. Grav.](#) 2012. Vol. 29. P. 083001. [arXiv:hep-th/1201.6434](#).
54. Maleknejad A., Sheikh-Jabbari M. M., Soda J. Gauge Fields and Inflation // [Phys. Rept.](#) 2013. Vol. 528. P. 161–261. [arXiv:hep-th/1212.2921](#).
55. Himmetoglu B., Contaldi C. R., Peloso M. Instability of the ACW model, and problems with massive vectors during inflation // [Phys. Rev.](#) 2009. Vol. D79. P. 063517. [arXiv:astro-ph/0812.1231](#).
56. Himmetoglu B., Contaldi C. R., Peloso M. Ghost instabilities of

- cosmological models with vector fields nonminimally coupled to the curvature // [Phys. Rev.](#) 2009. Vol. D80. P. 123530. [arXiv:astro-ph.CO/0909.3524](#).
57. Bartolo N., Matarrese S., Peloso M., Ricciardone A. Anisotropic powerspectrum and bispectrum in the $f(\phi)F^2$ mechanism // [Phys. Rev.](#) 2013. Vol. D87, no. 2. P. 023504. [arXiv:astro-ph.CO/1210.3257](#).
 58. Rubakov V. A. Harrison-Zeldovich spectrum from conformal invariance // [JCAP](#). 2009. Vol. 0909. P. 030. [arXiv:hep-th/0906.3693](#).
 59. Creminelli P., Nicolis A., Trincherini E. Galilean Genesis: An Alternative to inflation // [JCAP](#). 2010. Vol. 1011. P. 021. [arXiv:hep-th/1007.0027](#).
 60. Hinterbichler K., Khoury J. The Pseudo-Conformal Universe: Scale Invariance from Spontaneous Breaking of Conformal Symmetry // [JCAP](#). 2012. Vol. 1204. P. 023. [arXiv:hep-th/1106.1428](#).
 61. Hinshaw G. et al. First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: The angular power spectrum // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2003. Vol. 148. P. 135. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0302217](#).
 62. Ade P. A. R. et al. Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results // [Astron. Astrophys.](#) 2014. Vol. 571. P. A1. [arXiv:astro-ph.CO/1303.5062](#).
 63. Ade P. A. R. et al. Planck 2013 results. VIII. HFI photometric calibration and mapmaking // [Astron. Astrophys.](#) 2014. Vol. 571. P. A8. [arXiv:astro-ph.CO/1303.5069](#).
 64. Planck Legacy Archive. URL: <http://pla.esac.esa.int/pla/>.
 65. Gorbunov D. S., Tinyakov P. G., Tkachev I. I., Troitsky S. V. Testing the correlations between ultra-high-energy cosmic rays and BL Lac type objects with HiRes stereoscopic data // [JETP Lett.](#) 2004. Vol. 80. P. 145–148. [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.80,167(2004)]. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0406654](#).
 66. Abbasi R. U. et al. Search for cross-correlations of ultrahigh-energy cosmic rays with BL Lacertae objects // [Astrophys. J.](#) 2006.

- Vol. 636. P. 680–684. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0507120](#).
67. Tinyakov P. G., Tkachev I. I. Is astronomy possible with neutral ultrahigh energy cosmic ray particles existing in the Standard Model? // [J. Exp. Theor. Phys.](#) 2008. Vol. 106. P. 481–487. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0612359](#).
 68. Fairbairn M., Rashba T., Troitsky S. V. Photon-axion mixing and ultra-high-energy cosmic rays from BL Lac type objects - Shining light through the Universe // [Phys. Rev.](#) 2011. Vol. D84. P. 125019. [arXiv:astro-ph.HE/0901.4085](#).
 69. Stecker F. W., Malkan M. A., Scully S. T. Intergalactic photon spectra from the far IR to the UV Lyman limit for $0 < Z < 6$ and the optical depth of the universe to high energy gamma-rays // [Astrophys. J.](#) 2006. Vol. 648. P. 774–783. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0510449](#).
 70. Franceschini A., Rodighiero G., Vaccari M. The extragalactic optical-infrared background radiations, their time evolution and the cosmic photon-photon opacity // [Astron. Astrophys.](#) 2008. Vol. 487. P. 837. [arXiv:astro-ph/0805.1841](#).
 71. Kneiske T. M., Dole H. A lower-limit flux for the extragalactic background light // [A&A](#). 2010. Vol. 515. P. A19. [1001.2132](#).
 72. Gilmore R. C., Somerville R. S., Primack J. R., Dominguez A. Semi-analytic modeling of the EBL and consequences for extragalactic gamma-ray spectra // [Mon. Not. Roy. Astron. Soc.](#) 2012. Vol. 422. P. 3189. [arXiv:astro-ph.CO/1104.0671](#).
 73. Wakely S. P., Horan D. TeVCat: An online catalog for Very High Energy Gamma-Ray Astronomy // International Cosmic Ray Conference. 2008. Vol. 3. P. 1341–1344.
 74. Archambault S. et al. Deep broadband observations of the distant gamma-ray blazar PKS 1424+240 // [Astrophys. J.](#) 2014. Vol. 785. P. L16. [arXiv:astro-ph.HE/1403.4308](#).
 75. De Angelis A., Mansutti O., Roncadelli M. Axion-like particles, cosmic magnetic fields and gamma-ray astrophysics // [Phys. Lett.](#)

2008. Vol. B659. P. 847–855. [arXiv:astro-ph/0707.2695](#).
76. Simet M., Hooper D., Serpico P. D. The Milky Way as a Kiloparsec-Scale Axionscope // [Phys. Rev.](#) 2008. Vol. D77. P. 063001. [arXiv:astro-ph/0712.2825](#).
77. Essey W., Kusenko A. A new interpretation of the gamma-ray observations of active galactic nuclei // [Astropart. Phys.](#) 2010. Vol. 33. P. 81–85. [arXiv:astro-ph.HE/0905.1162](#).
78. Hillas A. M. The Origin of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays // [Ann. Rev. Astron. Astrophys.](#) 1984. Vol. 22. P. 425–444.
79. Ptitsyna K. V., Troitsky S. V. Physical conditions in potential sources of ultra-high-energy cosmic rays. I. Updated Hillas plot and radiation-loss constraints // [Phys. Usp.](#) 2010. Vol. 53. P. 691–701. [arXiv:astro-ph/0808.0367](#).
80. Abraham J. et al. Upper limit on the cosmic-ray photon flux above 10^{19} eV using the surface detector of the Pierre Auger Observatory // [Astropart. Phys.](#) 2008. Vol. 29. P. 243–256. [arXiv:astro-ph/0712.1147](#).
81. Shinozaki K. et al. Upper limit on gamma-ray flux above 10^{19} -eV estimated by the Akeno Giant Air Shower Array experiment // [Astrophys. J.](#) 2002. Vol. 571. P. L117–L120.

Научное издание
Рубцов Григорий Игоревич
Диффузное астрофизическое излучение от 10^{-4} эВ до 10^{+20} эВ
и ограничения на новые модели физики элементарных частиц
Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,6 Зак. № 22391 Тираж 100 экз. Бесплатно
Печать цифровая
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а