

На правах рукописи

Корочкин
Александр Алексеевич

Новая модель
межгалактического фонового излучения
и ее приложения к аксионоподобным частицам
и внегалактическим магнитным полям

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Рубцов Григорий Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), заместитель директора по научной работе.

Официальные оппоненты:

Наумов Дмитрий Вадимович, доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), лаборатория ядерных проблем им. В.П. Дзелепова, заместитель директора по научной работе.

Сазонов Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, лаборатория экспериментальной астрофизики отдела астрофизики высоких энергий, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург.

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01
канд. физ.-мат. наук

С.В. Демидов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия достигнут существенный прогресс в области астрофизики высоких энергий. Тем не менее, нерешенными остаются множество вопросов, связанных с рождением, распространением и детектированием фотонов высоких энергий. Данная тема является очень обширной и составляет отдельную ветвь астрофизики, поэтому в настоящей работе мы, в основном, сконцентрируемся на проблемах распространения гамма-квантов сквозь межзвездную среду, а также на интерпретации наблюдаемых данных.

Гамма кванты с энергией выше 30 ГэВ не могут свободно распространяться во Вселенной из-за поглощения, при котором исходный высокоэнергичный фотон взаимодействует с низкоэнергичным фоновым фотоном межгалактического фонового излучения (МФИ) и рождает электрон-позитронную пару. Степень поглощения зависит от энергии фотона, расстояния до источника и от интенсивности МФИ. Основная проблема состоит в том, что спектр МФИ не может быть измерен напрямую из-за доминирующих вкладов Галактики и Солнечной системы. Был построен ряд моделей МФИ, которые согласуются с локальными измерениями и учитывают астрофизические ограничения на эволюцию МФИ, в том числе ограничения на темп звездообразования в зависимости от красного смещения. Начиная с работ [1] и [2], все последующие модели предсказывают примерно одинаковый спектр МФИ, причем интенсивность излучения в большинстве этих моделей отличается между собой не более чем в два раза. Тем не менее, существует известная проблема «аномальной прозрачности» Вселенной. Она проявляется в наблюдении фотонов с энергией в области ТэВ от удаленных источников, которые, как ожидалось, должны были быть поглощены в соответствии с современными моделями МФИ. Та же проблема существует при энергиях 100 ГэВ для более удаленных источников, измеренных телескопом

Fermi LAT. В частности, в работе [3] сообщалось об обнаружении высокоэнергичного гамма-излучения от 13 блазаров с красными смещениями $z > 0.5$. Несколько из этих блазаров позже были обнаружены черенковскими телескопами.

Недавнее исследование [4] и последующее за ним исследование [5] указывают на нефизические изломы вверх в реконструированных с учетом поправки на поглощение спектрах блазаров. Детальный анализ показал, что положение излома соответствует энергии, для которой поглощение становится значительным, а величина излома увеличивается для более удаленных источников. При этом эффект наблюдался даже для наиболее консервативных моделей МФИ. Эти наблюдения могут указывать на существование новой аксионоподобной частицы (АПЧ), которая может смешиваться с фотонами. Действительно, если часть пути фотон преодолевает в форме АПЧ, которая не поглощается, то наблюдаемый поток будет выше, что приведет к изломам вверх в спектре после введения простой поправки на поглощение без учета существования АПЧ.

Представляет значительный интерес проверка данных эффектов с учетом появления большого количества новых данных по наблюдениям блазаров. Также требует выяснения вопрос о том, возможно ли согласование данных по высокоэнергичному излучению блазаров и наблюдений МФИ без привлечения «новой физики».

С другой стороны, наблюдение ТэВ-ных источников гамма-излучения может быть использовано для изучения внегалактических магнитных полей (ВМП). Метод определения свойств ВМП по особенностям спектров блазаров был предложен в [6] и затем развит в серии работ [7, 8, 9]. В этом методе используется тот факт, что вторичные электроны и позитроны, которые рождаются при поглощении гамма-кванта, могут отклоняться локально в межгалактическом пространстве, прежде чем они произведут вторичные гамма-кванты путем обратного комптоновского рассеяния (ОКР) на фотонах реликтового излучения (РИ). При этом спектральная, временная и угловая

структура потока первичных и вторичных гамма-квантов позволяет определить свойства ВМП. Применение этого метода к реальным данным позволило обнаружить внегалактические магнитные поля [10] и ограничить их параметры. Тем не менее ограниченная чувствительность современного поколения телескопов не позволяет определить точные значения напряженности и других параметров магнитного поля в межгалактическом пространстве.

Ограничения на модели ВМП и МФИ сильно связаны, как было показано, в статье [11], где использовались объединенные данные телескопов Fermi LAT и HESS для блазара 1ES 0229+200. Например, увеличение интенсивности МФИ приводит к более сильному поглощению и усиливает поток вторичного излучения, что в свою очередь влияет на ограничения на ВМП. Таким образом измерение МФИ, возможное проявление эффектов АПЧ и определение параметров ВМП образует набор взаимосвязанных проблем, которые требуют совместного решения.

Актуальность описанных вопросов возрастает в связи с введением в строй в ближайшем будущем нового гамма-телескопа Cherenkov Telescope Array (СТА), который позволит измерять потоки гамма-излучения блазаров в диапазоне энергий от 30 ГэВ до 100 ТэВ с чувствительностью, в 10 раз превосходящей чувствительность нынешнего поколения телескопов. Вместе с улучшенным угловым разрешением, СТА будет способен пролить свет на многие из указанных задач.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является моделирование эффектов внегалактических магнитных полей и гипотетических аксионоподобных частиц в спектрах источников гамма-излучения, а также построение модельных прогнозов для будущих наблюдений СТА.

Для достижения поставленных целей были выделены следующие задачи:

- Создание новой модели межгалактического фонового излучения, позволяющей модифицировать ее параметры и сравнивать результат с наблюдательными ограничениями.
- Оценка значимости эффекта «аномальной прозрачности» Вселенной для гамма-излучения высоких энергий с использованием наиболее полной выборки блазаров с точно измеренными красными смещениями.
- Определение ограничений на положение, ширину и интенсивность узкой добавки на фоне теоретически рассчитанного спектра межгалактического фонового излучения с помощью наблюдений высокоэнергичного излучения блазаров.
- Получение ограничений на константу взаимодействия с фотонами g гипотетических аксиоподобных частиц на основе наблюдений блазаров в области высоких энергий.
- Расчет чувствительности гамма-телескопа нового поколения СТА к внегалактическим магнитным полям.
- Оценка влияния пузырей магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик на наблюдаемый поток вторичных гамма-квантов.
- Проверка точности моделирования электромагнитных каскадов в межгалактическом пространстве, посчитанных с помощью публично доступных Монте-Карло программ CRbeam, CRPro и ELMAG.

Научная новизна

1. Впервые построена модель межгалактического фонового излучения с изменяемыми параметрами.
2. Получена оценка значимости эффекта «аномальной прозрачности» Вселенной на основе наиболее полной выборки блазаров с точно измеренными красными смещениями.
3. Впервые установлены ограничения на положение, ширину и интенсивность небольшой добавки на фоне теоретически рас-

считанного спектра межгалактического фонового излучения.

4. Впервые получены ограничения на константу взаимодействия с фотонами g гипотетических аксионоподобных частиц с массой в области 1 эВ на основе наблюдений блазаров в области высоких энергий.
5. Впервые рассчитана чувствительность гамма-телескопа нового поколения СТА к сильным внегалактическим магнитным полям.
6. Впервые установлено, что типичные пузыри магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик вызывают подавление потока вторичных гамма-квантов в среднем на уровне 10%.
7. Впервые проведено полное сравнение электромагнитных модулей публично доступных Монте-Карло программ CRbeam, CRProa и ELMAG.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана новая модель межгалактического фонового излучения, позволяющая модифицировать параметры астрофизических процессов, лежащих в ее основе. На основе данной модели установлены ограничения на скорость звездообразования во Вселенной.
2. Показано, что эффект «аномальной прозрачности» Вселенной для гамма-излучения высоких энергий слабее, чем считалось ранее, и его значимость составляет 1.3σ для наиболее консервативной модели поглощения.
3. Установлены ограничения на положение, ширину и интенсивность небольшой, локализованной в области длин волн порядка микронов, добавки на фоне теоретически предсказанного спектра межгалактического фонового излучения.
4. На основе наблюдений высокоэнергичного излучения блазаров установлены ограничения на константу взаимодействия с фотонами g гипотетических аксионоподобных частиц с массой в

- области 1 эВ при условии, что они составляют большую часть темной материи.
5. Рассчитана чувствительность гамма-телескопа нового поколения СТА к внегалактическим магнитным полям. Было показано, что метод измерения гамма-излучения позволяет детектировать сильные первичные магнитные поля с напряженностью в области 10^{-12} Гс – 10^{-11} Гс.
 6. Установлено, что типичные пузыри магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик, соответствующие модели IllustrisTNG, вызывают энергонезависимое подавление потока вторичных гамма-квантов на уровне около 10%.

Теоретическая и практическая значимость

Построенная модель МФИ может использоваться для проверки различных сценариев эволюции звездного населения и пыли во Вселенной. Ограничения на дополнительную компоненту в МФИ могут применяться для разработки новых теоретических моделей МФИ.

Установленные ограничения на константу взаимодействия с фотонами аксионоподобных частиц могут быть использованы при построении новых теоретических моделей с участием аксионоподобных частиц.

Полученная оценка чувствительности телескопа СТА к внегалактическим магнитным полям может использоваться для планирования будущих наблюдений блазаров. Полученные результаты о подавлении потока вторичных гамма квантов в пузырях магнитного поля должны учитываться при интерпретации данных во время поисков проявлений внегалактических магнитных полей методами гамма-астрономии.

Факт согласия результатов трех Монте-Карло программ может рассматриваться как гарантия точности численного расчета характеристик электромагнитных каскадов.

Методология и методы диссертационного исследования

Результаты, полученные в диссертации, основаны на аналитических расчетах, численном моделировании различных физических эффектов, а также на сравнении модельных предсказаний с наблюдаемыми данными.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты проведенных исследований были доложены автором лично на следующих российских и международных семинарах и конференциях:

1. Международный семинар «XXth International Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2018)», Валдай, Россия, 27 мая–2 июня 2018 года.
2. 14-ое международное рабочее совещание «Axions, WIMPs and WISPs», Гамбург, Германия, 18 – 22 июня 2018 года.
3. Студенческая научная конференция, Париж, Франция, 25–29 марта 2019 года.
4. Встреча группы лаборатории Вселенной и теории, Медон, Франция, 18 июня 2019 года.
5. Семинар аспирантов Парижского института астрофизики, Париж, Франция 20 июня 2019 года.
6. Встреча группы отдела астрофизики высоких энергий лаборатории APC, Париж, Франция, 24 июня 2019 года.
7. 54-я Зимняя школа Петербургского Института ядерной физики, пос. Рощино, Россия, 10–15 марта 2020 года.
8. Семинар теоретического отдела лаборатории APC, Париж, Франция, июнь 2020 года (виртуальное участие).
9. Семинар отдела астрофизики высоких энергий лаборатории APC, Париж, Франция, октябрь 2020 года (виртуальное участие).
10. 37-ая международная конференция по космическим лучам (ICRC-2021), Берлин, Германия, 12–23 июля 2021 года (виртуальное участие).

Список публикаций по теме диссертации

По материалам диссертации опубликовано 8 работ в рецензируемых международных изданиях, рекомендованных ВАК [[12](#), [13](#), [14](#), [15](#), [16](#), [17](#), [18](#), [19](#)], а также один электронный препринт [[20](#)].

Личный вклад автора

Основные положения, представленные в диссертации и выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии. В первой главе автором построена новая гибкая модель МФИ, а также выполнен отбор источников и моделирование их спектров для постановки ограничений на параметры небольшой, узкой добавки на фоне теоретически предсказанного спектра МФИ. Во второй главе автор выполнил расчет спектров блазаров и установил ограничения на константу связи с фотонами g гипотетической аксионоподобной частицы на основе отобранных и промоделированных автором спектров. В третьей главе автором выполнено подробное сравнение электромагнитных модулей публично доступных Монте-Карло программ CRbeam, CRProa и ELMAG. В четвертой главе автором выполнено численное моделирование электромагнитных каскадов, оценена чувствительность телескопа СТА к сильным внегалактическим магнитным полям и определено влияние пузырей магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик на подавление потока вторичных гамма квантов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и библиографии. Общий объем работы 127 страниц, включая 34 рисунка и 7 таблиц. Библиография включает 207 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость исследований, представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена межгалактическому фоновому излучению. В **разделе 1.1** описаны методы измерения и моделирования спектра МФИ, известные на данный момент. Обсуждается существующее противоречие в наблюдениях, заключающееся в том, что прямые измерения МФИ приводят к значительно более высоким значениям интенсивности излучения, чем все остальные методы. Далее в данной главе рассматриваются две возможных интерпретации данного факта.

В **разделе 1.2** построена новая модель МФИ и явно выписаны все астрофизические параметры, лежащие в ее основе. В данной модели спектр МФИ представлен как сумма излучения звезд и космической пыли за все время эволюции Вселенной. Суммарное излучение звезд определяет спектр МФИ в ультрафиолетовом и видимом диапазонах и определяется начальным распределением звезд по массе и скоростью звездообразования, зависящей от красного смещения. С другой стороны, основной вклад в спектр МФИ в инфракрасном диапазоне вносит излучение пыли. Частицы пыли, нагретые излучением молодых звезд, излучают в инфракрасном диапазоне. Предполагается, что наибольший вклад вносит пыль, находящаяся в гигантских молекулярных облаках, в которых происходит активное звездообразование. Таким образом, длинноволновая часть спектра МФИ зависит от параметров гигантских молекулярных облаков, таких как размер, время жизни и т.д.

В **разделе 1.3** построенная модель используется для постановки ограничений на входящие в нее астрофизические параметры на основе существующих изменений МФИ. Для этого предполагается, что прямые измерения являются ограничениями сверху на интен-

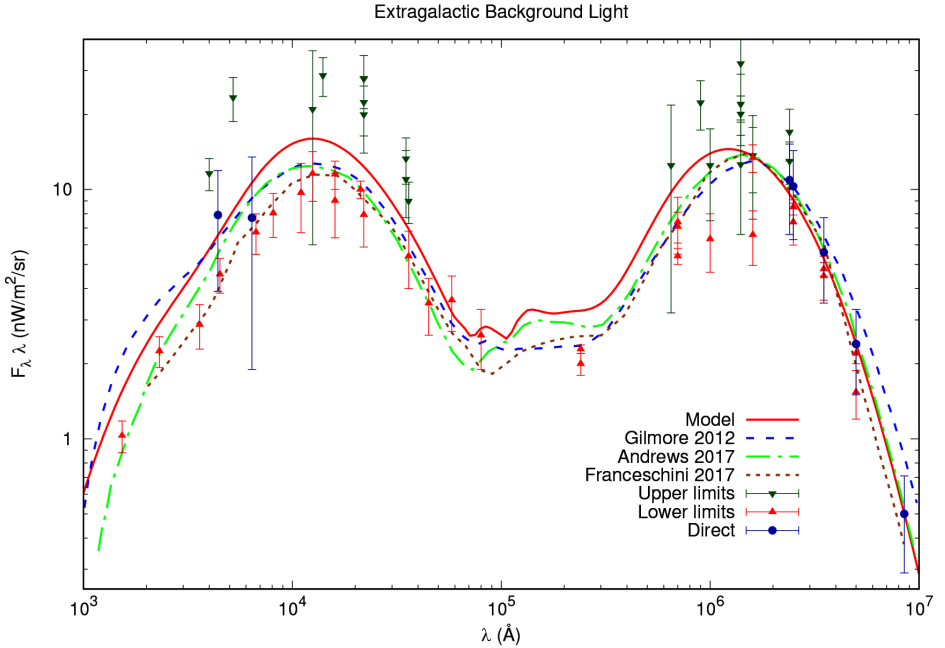


Рис. 1: Спектр межгалактического фонового излучения. Красная линия соответствует наиболее вероятным параметрам свободной модели. Синяя линия — модель Гилмора и др. [2]. Зеленая и коричневая линии — модели [21] и [22] соответственно. Стрелки вверх и вниз указывают на ограничения сверху и снизу, кружки показывают прямые измерения для которых считается, что потенциальное влияние фона мало

сивность излучения МФИ (см. Рисунок 1). Данное предположение допустимо, если точность методов прямого измерения МФИ падает из-за неучтенных систематических эффектов. В таком случае, учитывая пределы снизу из метода подсчета галактик, определена допустимая область возможных значений интенсивности МФИ. Наличие ограничений как снизу так и сверху позволяет рассчитать предпочтительные значения и доверительные интервалы для каждого параметра модели МФИ. Для этого используется метод Монте-Карло марковских цепей, при этом цепь Маркова строится по алгоритму Метрополиса со стандартной функцией правдоподобия. В результа-

те впервые получены ограничения на скорость звездообразования и другие астрофизические параметры на основе наблюдений МФИ. Спектр МФИ с набором параметров, соответствующим максимуму функции правдоподобия, показан на Рисунке [1](#).

В **разделе 1.4** исследуется вопрос согласования прямых измерений МФИ с ограничениями из наблюдений блазаров. Было показано, что в спектре МФИ может существовать дополнительная узкая компонента, соответствующая минимальным прямым измерениям МФИ инструментом CIBER. Наличие такой компоненты не противоречит ограничениям на основе наблюдений гамма-излучения. Показана возможность обнаружения таких особенностей в спектре МФИ посредством прецизионных измерений спектров блазаров, которые будут возможны с помощью телескопа СТА. С другой стороны, установлены ограничения на положение, ширину и интенсивность дополнительной компоненты в спектре МФИ на основе уже существующих наблюдений блазаров.

Во **второй главе** проводится поиск проявлений аксионоподобных частиц в спектрах блазаров. В разделе 2.1 приводится обзор текущих ограничений на массу аксионоподобных частиц и константу связи с фотонами, см. Рисунок [2](#).

В первой главе было показано, что наличие дополнительной узкой компоненты в спектре МФИ не противоречит известным на данный момент наблюдениям. В **разделе 2.2** проведен расчет возможного вклада распадающихся аксионоподобных частиц в спектр МФИ. Рассматривается модель, в которой дополнительная компонента в МФИ возникает в результате двухфотонного распада аксионоподобных частиц составляющих темную материю. В рамках данной модели, в **разделе 2.3**, полученные в первой главе ограничения на параметры дополнительной компоненты пересчитаны в ограничения на константу связи АПЧ с фотонами $g_{\alpha\gamma}$. Наилучшие ограничения установлены на основе наблюдений блазара 1ES 1218+304 телескопами Fermi LAT и VERITAS. Результаты показаны на Рисунке [2](#).

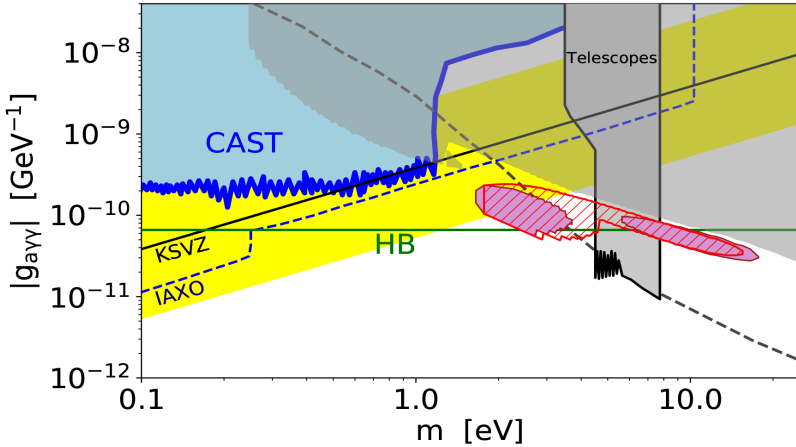


Рис. 2: Ограничения на параметры АПЧ. Желтая полоса и черная сплошная линия соответствуют моделям аксиона КХД (23, 24, 25, 26). Синяя область — ограничения CAST из ненаблюдения солнечных аксионов [27]. Серая вертикальная область получена в результате спектроскопии высокого разрешения внутрикластерной среды с помощью оптического телескопа [28]. Черная пунктирная линия — оценка ограничений на АПЧ из наблюдений МФИ [29]. Зеленая горизонтальная линия — ограничения на основе наблюдений эволюции звезд [30]. Светло-серая заштрихованная область показывает исключенный диапазон параметров с уровнем достоверности 95% на основе наблюдения блазара 1ES 1218+304 телескопами Fermi LAT и VERITAS. Заштрихованные эллипсы фиолетового цвета показывают предпочтительный диапазон параметров (уровень достоверности 68%), полученный с помощью анализа спектра 1ES 1218+304. Область, заштрихованная красным цветом, показывает предпочтительную область, если не учитывать первую спектральную точку VERITAS

В разделе 2.4 была исследована проблема «аномальной прозрачности» Вселенной для фотонов высоких энергий. Установлено, что значимость данного эффекта ниже, чем сообщалось ранее и составляет 1.9σ для модели МФИ, построенной в первой главе [12], и 1.3σ для наиболее консервативной модели МФИ Гилмора и др. [2].

В третьей главе проводится сравнение точности моделирования электромагнитных каскадов в межгалактическом пространстве публично доступными Монте-Карло программами CRbeam [31], CRProra [32] и ELMAG [33]. Модульная структура CRbeam и CRProra позволяет тестировать все соответствующие процессы не-

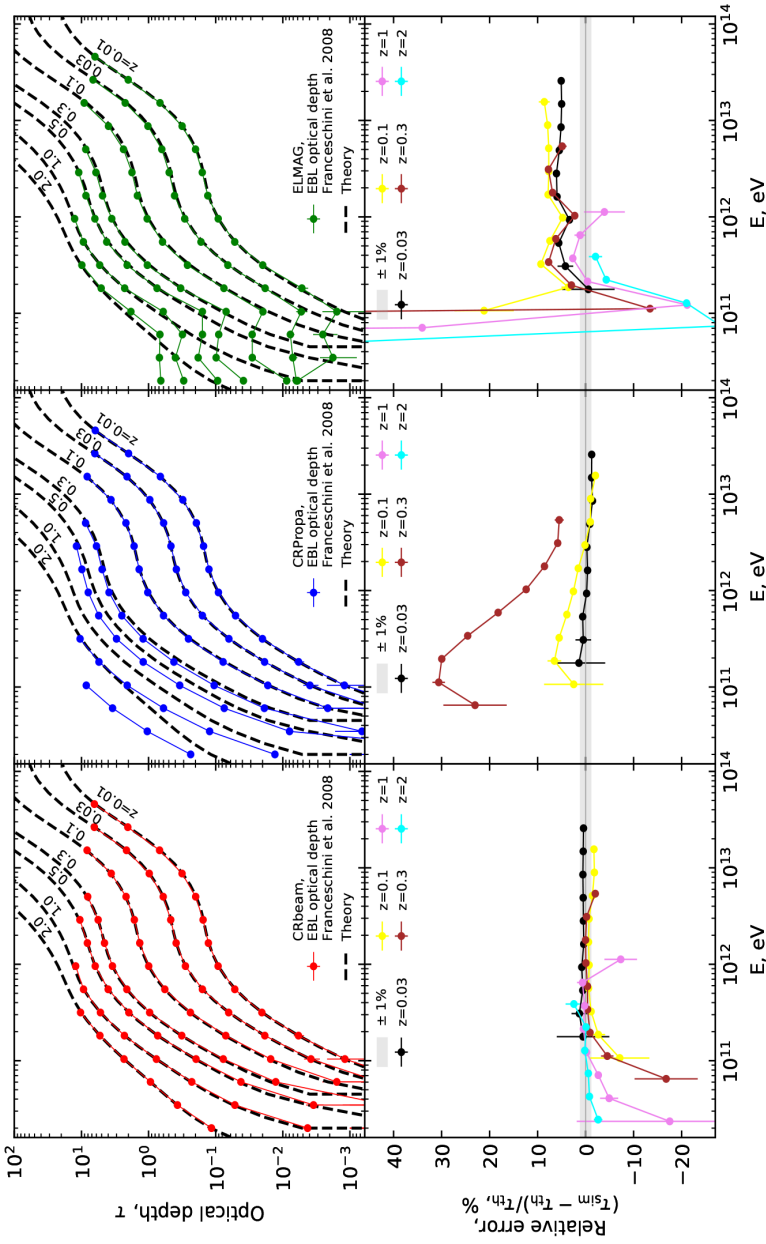


Рис. 3: Сравнение оптической толщины МФИ для первичных гамма-квантов, рассчитанной с помощью CRbeam, CRPropa и ELMAG. Во всех случаях используется модель МФИ [1]. Верхние панели показывают оптическую толщину как функцию энергии гамма-кванта для различных красных смещений. На нижних панелях показаны расхождения между расчетами с помощью Монте-Карло программ и аналитической моделью. Для CRPropa различия с аналитической моделью не показаны для красных смещений > 0.3 , поскольку они превышают 50%

зависимо друг от друга. Было рассмотрено рождение электрон-позитронных пар (**раздел 3.1**) и обратное комптоновское рассеяние электронов и позитронов на МФИ и РИ (**раздел 3.2**). Для каждого процесса интенсивность взаимодействия и распределение по энергии вторичных частиц, полученные в результате моделирования, сравниваются с теоретическими предсказаниями (см. Рисунок 3). Отключение всех взаимодействий позволяет проверить распространение электронов в магнитном поле (**раздел 3.3**). Для ELMAG, наоборот, такая независимая проверка взаимодействий невозможна, поэтому результаты моделирования с помощью ELMAG используются при сравнении свойств каскадного сигнала при включении всех актуальных взаимодействий (**раздел 3.4**).

В результате сравнения было обнаружено, что предсказания спектральных, угловых и временных свойств каскадного сигнала могут различаться примерно на 50% в диапазоне энергий, доступном для телескопа СТА. Было установлено происхождение некоторых из этих несоответствий. После устранения найденных ошибок, все три кода демонстрируют согласие с точностью 10% при моделировании близких источников с красными смещениями $z \sim 0.1$. Тем не менее, различия в реализации космологической эволюции в CRProa и CRbeam и упрощенное вычисление оптической толщины МФИ в CRProa приводят к существенным различиям между модельными расчетами для источников на больших красных смещениях (см. Рисунок 3).

Четвертая глава посвящена исследованию межгалактических магнитных полей методами гамма-астрономии. В **разделе 4.1** приводится обзор установленных на данный момент ограничений на напряженность и корреляционную длину ВМП, а также описана техника для измерения таких магнитных полей, основанная на наблюдениях далеких блазаров.

В **разделе 4.2** вычисляется чувствительность телескопа следующего поколения СТА к протяженному излучению вокруг

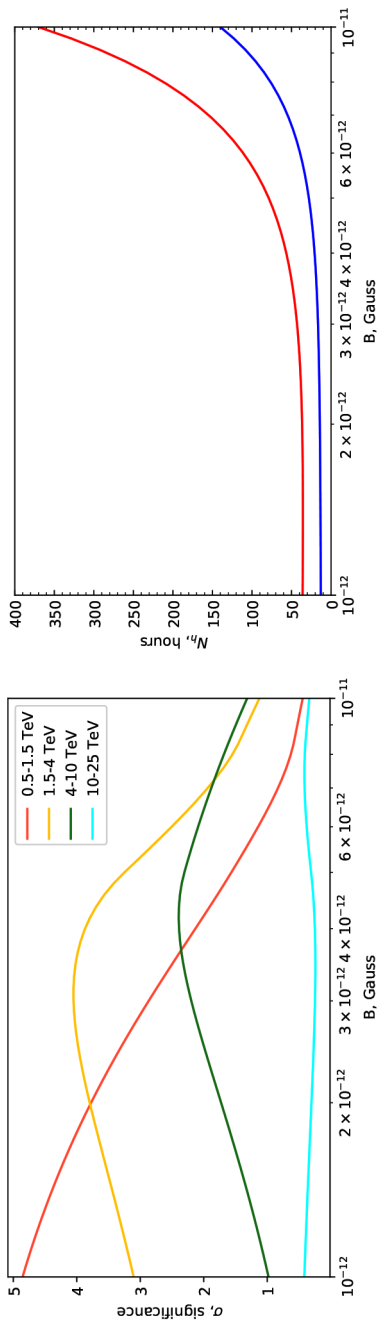


Рис. 4: Левый график: значимость детектирования протяженного сигнала в различных диапазонах энергий в зависимости от предполагаемой напряженности ВМП. Предполагаемое время наблюдения СТА составляет $T = 50$ часов. Правый график: время наблюдения с помощью СТА, необходимое для детектирования протяженного излучения с уровнем достоверности 3σ (нижняя кривая) и 5σ (верхняя кривая), в зависимости от напряженности ВМП

изначально точечных источников, возникающему из-за сильных внегалактических магнитных полей с напряженностью в диапазоне 10^{-12} Гс– 10^{-11} Гс. Актуальность данного вопроса возрастает, так как несколько независимых аргументов указывают на существование космологических магнитных полей с напряженностью порядка $B \sim 10^{-12}$ Гс [34, 35, 36]. Результаты анализа чувствительности на основе моделирования наблюдений источника Mrk 501 показаны на Рисунке 4. Если напряженность ВМП ниже 3×10^{-12} Гс, протяженный сигнал обнаруживается со значимостью выше 3σ в диапазонах энергий 0.5–1.5 ТэВ и 1.5–4 ТэВ. Более сильное магнитное поле, $3 \times 10^{-12} < B < 6 \times 10^{-12}$ Гс, все еще обнаруживается по протяженному излучению более высокой энергии за время наблюдения, равное 50 часам. Протяженное излучение от ВМП с напряженностью 10^{-11} Гс не детектируется за 50 часов и требует более длительных наблюдений.

В разделе 4.3 исследуется чувствительность телескопа СТА к ВМП с большой корреляционной длиной (> 100 Мпк). На основе моделирования наблюдений трех ярких, близких источников (Mrk 501, Mrk 421, 1ES 1959+650) показано, что телескоп СТА способен обнаруживать ВМП с большой корреляционной длиной и напряженностью в области 10^{-14} Гс– 10^{-12} Гс.

В разделе 4.4 рассматривается влияние пузырей магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик на каскадный сигнал от далеких источников. Пустоты крупномасштабной структуры Вселенной могут быть загрязнены магнитным полем, которое распространяется из галактик в межгалактическую среду. Галактические ветры, вызванные активностью сверхновых и активными ядрами галактик, скорее всего, ионизированы и несут с собой магнитные поля. Неопределенность деталей данного процесса не позволяет ответить на вопрос, может ли распространяемое из галактик магнитное поле заполнять пустоты и тем самым скрывать первичное магнитное поле. Были использованы результаты космологической симуляции IllustrisTNG для оценки загрязнения межгалактической

среды магнитными полями, распространяемым галактическими ветрами.

Было установлено, что высокая напряженность магнитного поля ($B > 10^{-12}$ Гс) в пузырях, соответствующих магнитогидродинамической модели IllustrisTNG, приводит к сильному отклонению образующихся в пузырях заряженных частиц, что вызывает подавление вторичного потока гамма-квантов во всем диапазоне энергий. Это изменяет общую интенсивность вторичного излучения, но не влияет на его форму. Установлено, что типичные пузыри магнитного поля вокруг галактик и скоплений галактик вызывают энергонезависимое подавление потока вторичных гамма-квантов на уровне около 10%. В связи с этим, необходимо учитывать намагниченные пузыри как дополнительный источник систематических неопределенностей при анализе ВМП в пустотах методами гамма-астрономии.

В **заклучении** диссертации перечислены основные результаты работы и выражены благодарности автора.

Список литературы

- [1] Alberto Franceschini, Giulia Rodighiero и Mattia Vaccari. “The extragalactic optical-infrared background radiations, their time evolution and the cosmic photon-photon opacity”. в: *Astron. Astrophys.* (2008) 487, с. 837. arXiv: [0805.1841 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/0805.1841).
- [2] R.C. Gilmore и др. “Semi-analytic modeling of the EBL and consequences for extragalactic gamma-ray spectra”. в: *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* (2012) 422, с. 3189. arXiv: [1104.0671 \[astro-ph.CO\]](https://arxiv.org/abs/1104.0671).
- [3] A. Neronov и др. “Very high-energy γ -ray emission from high-redshift blazars”. в: *Astron. Astrophys.* (2015) 575, A21, A, 21. arXiv: [1207.1962 \[astro-ph. HE\]](https://arxiv.org/abs/1207.1962).
- [4] D. Horns и M. Meyer. “Indications for a pair-production anomaly from the propagation of VHE gamma-rays”. в: *JCAP* (2012) 1202, с. 033. arXiv: [1201.4711 \[astro-ph.CO\]](https://arxiv.org/abs/1201.4711).

- [5] G.I. Rubtsov и S.V. Troitsky. “Breaks in gamma-ray spectra of distant blazars and transparency of the Universe”. в: *JETP Lett.* (2014) 100.6. [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.100,no.6,397(2014)], с. 355-359. arXiv: [1406.0239 \[astro-ph. HE\]](#).
- [6] A. Neronov и Dmitry V. Semikoz. “A method of measurement of extragalactic magnetic fields by TeV gamma ray telescopes”. в: *JETP Lett.* (2007) 85, с. 473-477. arXiv: [astro-ph/0604607](#).
- [7] A. Elyiv, A. Neronov и D.V. Semikoz. “Gamma-ray induced cascades and magnetic fields in the intergalactic medium”. в: *Phys. Rev. D* (2009) 80.2, 023010, с. 023010. arXiv: [0903.3649 \[astro-ph. CO\]](#).
- [8] A. Neronov и D.V. Semikoz. “Sensitivity of γ -ray telescopes for detection of magnetic fields in the intergalactic medium”. в: *Phys. Rev. D* (2009) 80.12, 123012, с. 123012. arXiv: [0910.1920 \[astro-ph. CO\]](#).
- [9] A. Neronov и др. “Degree-scale GeV “Jets” from Active and Dead TeV Blazars”. в: *Astrophys. J. Lett.* (2010) 719.2, с. L130-L133. arXiv: [1002.4981 \[astro-ph. HE\]](#).
- [10] Andrii Neronov и Ievgen Vovk. “Evidence for Strong Extragalactic Magnetic Fields from Fermi Observations of TeV Blazars”. в: *Science* (2010) 328.5974, с. 73. arXiv: [1006.3504 \[astro-ph. HE\]](#).
- [11] Ie. Vovk и др. “Fermi/LAT Observations of IES 0229+200: Implications for Extragalactic Magnetic Fields and Background Light”. в: *Astrophys. J. Lett.* (2012) 747.1, L14, с. L14. arXiv: [1112.2534 \[astro-ph. CO\]](#).
- [12] A. A. Korochkin и G. I. Rubtsov. “Constraining the star formation rate with the extragalactic background light”. в: *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* (2018) 481.1, с. 557-565. arXiv: [1712.06579](#).
- [13] Alexander Korochkin, Grigory Rubtsov и Sergey Troitsky. “Search for anomalous features in gamma-ray blazar spectra corrected for the absorption on the extragalactic background light”. в: *JCAP* (2019) 1912.12, с. 002. arXiv: [1810.03443 \[astro-ph. HE\]](#).

- [14] A. Korochkin, A. Neronov и D. Semikoz. “Search for spectral features in extragalactic background light with gamma-ray telescopes”. в: [*Astron. Astrophys.* \(2020\) 633, A74](#). arXiv: [1906.12168 \[astro-ph.HE\]](#).
- [15] A. Korochkin, A. Neronov и D. Semikoz. “Search for decaying eV-mass axion like particles using gamma-ray signal from blazars”. в: [*JCAP* \(2020\) 2003.03, с. 064](#). arXiv: [1911.13291 \[hep-ph\]](#).
- [16] Alexander Korochkin и др. “Sensitivity reach of gamma-ray measurements for strong cosmological magnetic fields”. в: [*Astrophys. J.* \(2021\) 906.2, с. 116](#). arXiv: [2007.14331 \[astro-ph.CO\]](#).
- [17] Alexander Korochkin и др. “Detectability of large correlation length inflationary magnetic field with Cherenkov telescopes”. в: [*Письма в ЖЭТФ* \(нояб. 2021\) 161.4, с. 583](#). arXiv: [2111.10311 \[astro-ph.HE\]](#).
- [18] Alexander Korochkin и др. “Sensitivity of the gamma-ray method for strong primordial magnetic fields”. в: [*PoS* \(2021\) ICRC2021, с. 919](#).
- [19] Kyrylo Bondarenko и др. “Account of baryonic feedback effect in the 1-ray measurements of intergalactic magnetic fields”. в: [*Astron. Astrophys.* \(июнь 2021\) 660, A80](#). arXiv: [2106.02690 \[astro-ph.CO\]](#).
- [20] Oleg Kalashev и др. “Modelling of propagation of very-high-energy gamma rays with CRbeam code. Comparison with CRPropa and ELMAG codes”. в: [submitted to *Astron. Astrophys.* \(\)](#). arXiv: [2201.03996 \[astro-ph.HE\]](#).
- [21] Stephen K. Andrews и др. “Modelling the cosmic spectral energy distribution and extragalactic background light over all time”. в: [*Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* \(2018\) 474.1, с. 898-916](#). arXiv: [1710.11329 \[astro-ph.GA\]](#).
- [22] Alberto Franceschini и Giulia Rodighiero. “The extragalactic background light revisited and the cosmic photon-photon opacity”. в: [*Astron. Astrophys.* \(2017\) 603, A34](#). arXiv: [1705.10256 \[astro-ph.HE\]](#).

- [23] Jihn E. Kim. “Weak-Interaction Singlet and Strong CP Invariance”. в: *Phys. Rev. Lett.* (2 июль 1979) 43, с. 103–107. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.43.103>.
- [24] M.A. Shifman, A.I. Vainshtein и V.I. Zakharov. “Can confinement ensure natural CP invariance of strong interactions?” в: *Nuclear Physics B* (1980) 166.3, с. 493–506. ISSN: 0550-3213. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321380902096>.
- [25] Michael Dine, Willy Fischler и Mark Srednicki. “A simple solution to the strong CP problem with a harmless axion”. в: *Physics Letters B* (1981) 104.3, с. 199-202. ISSN: 0370-2693. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269381905906>.
- [26] A.R. Zhitnitsky. “On Possible Suppression of the Axion Hadron Interactions. (In Russian)”. в: *Sov. J. Nucl. Phys.* (1980) 31. [Yad. Fiz.31,497(1980)], с. 260.
- [27] Arik, M. and others. “Search for Solar Axions By the CERN Axion Solar Telescope with ^3He Buffer Gas: Closing the Hot Dark Matter Gap». в: *Phys. Rev. Lett.* (2014) 112.9, с. 091302. arXiv: [1307.1985 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1307.1985).
- [28] Daniel Grin и др. “A Telescope Search for Decaying Relic Axions”. в: *Phys. Rev.* (2007) D75, с. 105018. arXiv: [astro-ph/0611502 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0611502).
- [29] Paola Arias и др. “WISPy Cold Dark Matter”. в: *JCAP* (2012) 1206, с. 013. arXiv: [1201.5902 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1201.5902).
- [30] Oscar Straniero и др. “Axion-Photon Coupling: Astrophysical Constraints”. в: Proceedings, 11th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (Axion WIMP 2015): Zaragoza, Spain, June 22-26, 2015. 2015, с. 77–81.
- [31] V. Berezhinsky и O. Kalashev. “High energy electromagnetic cascades in extragalactic space: physics and features”. в: *Phys. Rev. D* (2016) 94.2, с. 023007. arXiv: [1603.03989 \[astro-ph.HE\]](https://arxiv.org/abs/1603.03989).
- [32] Rafael Alves Batista и др. “CRPropa 3-a public astrophysical simulation framework for propagating extraterrestrial ultra-high

energy particles”. в: *JCAP* (май 2016) 2016.5, 038, с. 038. arXiv: [1603.07142 \[astro-ph.IM\]](#).

- [33] M. Blytt, M. Kachelrieß и S. Ostapchenko. “ELMAG 3.01: A three-dimensional Monte Carlo simulation of electromagnetic cascades on the extragalactic background light and in magnetic fields”. в: *Computer Physics Communications* (июль 2020) 252, 107163, с. 107163. arXiv: [1909.09210 \[astro-ph.HE\]](#).
- [34] Karsten Jedamzik и Levon Pogosian. “Relieving the Hubble tension with primordial magnetic fields”. в: *Phys. Rev. Lett.* (2020) 125.18, с.181302. arXiv: [2004.09487 \[astro-ph.CO\]](#).
- [35] Pravin Kumar Natwariya и Jitesh R. Bhatt. “EDGES signal in the presence of magnetic fields”. в: *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* (2020) 497.1, с. L35-L39. arXiv: [2001.00194 \[astro-ph.CO\]](#).
- [36] M. Giovannini и M. E. Shaposhnikov. “Primordial hypermagnetic fields and the triangle anomaly”. в: *Phys. Rev. D* (февр. 1998) 57.4, с. 2186–2206. arXiv: [hep-ph/9710234 \[hep-ph\]](#).

Научное издание
Корочкин Александр Алексеевич
Новая модель
межгалактического фонового излучения
и ее приложения к аксионоподобным частицам
и внегалактическим магнитным полям

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,0 Зак. № 22482 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а