

На правах рукописи

Долгих Константин Александрович

**Построение модели горячих пятен космических
лучей предельно высоких энергий с учётом
межгалактических магнитных полей**

1.3.3 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

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, член-корреспондент РАН, ИЯИ РАН, заместитель директора по научной работе.

Официальные оппоненты:

Румянцев Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», кафедра теоретической физики, профессор.

Деришев Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», сектор плазменной астрофизики отдела астрофизики и физики космической плазмы, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (г. Москва, г. Троицк).

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Самыми энергичными частицами, известными во Вселенной, являются космические лучи предельно высоких энергий (КЛПВЭ). Это элементарные частицы и ядра, которые достигают Земли из пока неизвестных источников и обладают энергией до нескольких сотен ЭэВ. В данной работе КЛПВЭ будут называться космические лучи с энергиями частиц $E > 1$ ЭэВ.

КЛПВЭ встречаются очень редко: при самых высоких энергиях за последние десятилетия было обнаружено всего несколько тысяч таких событий с помощью детекторов, охватывающих площади от сотен до тысяч квадратных километров. Двумя крупнейшими детекторами являются обсерватория Пьера Оже [1], расположенная в Аргентине, и обсерватория (Telescope Array, ТА) [2] в США, штате Юта. Обсерватория работает с 2004 года и занимает площадь около 3000 км². ТА занимает площадь около 700 км² и работает с 2008 года [3]. Также в настоящее время строится расширение установки ТАх4, плановая площадь которого составляет 2800 км² [4], из которых построена и введена в эксплуатацию часть площадью 1700 км².

Известно, что фотоны и нейтрино составляют незначительную часть от общего потока космических лучей [5, 6, 7, 8, 9], и космические лучи предельно высоких энергий (КЛПВЭ) являются заряженными частицами, и они неизбежно отклоняются в галактических и межгалактических магнитных полях (МГМП). Ожидаемое большое количество источников космических лучей во Вселенной вместе с большими отклонениями космических лучей от положения источников не позволяют нам заниматься астрономией, за исключением самых высоких энергий $E > 6 \cdot 10^{19}$ эВ, где спектр имеет обрезание из-за взаимодействия с реликтовым излучением (РИ). Это так на-

зыываемое обрезание ГЗК было предсказано Грейзеном, Зацепиным и Кузьминым в 1966 году [10, 11]. В обеих оригинальных статьях [10] и [11] приводятся расчёты фотопроизводства пионов первичными протонами и в то же время указывается на эффект фоторазрушения, который имеет место в случае первичных ядер при почти такой же энергии, см. [12] для исторического обзора.

Ограничение в спектре космических лучей было обнаружено 40 лет спустя в ходе эксперимента High Resolution Fly's Eye (HiRes) в 2007 году [13] и вскоре после этого было подтверждено обсерваторией Пьера Оже в 2008 году [14]. Позднее, в 2013 году, это ограничение было подтверждено результатами исследования Telescope Array (ТА) [15]. Недавние измерения обсерватории Пьера Оже показывают, что наблюдаемое подавление спектра может быть результатом сочетания воздействия максимально возможной энергии ускорения тяжёлых ядер в источниках и эффекта ГЗК [16]. В некоторых моделях (см., например, [17]) в спектре космических лучей предельно высоких энергий преобладают локальные источники. В последнем случае максимальная энергия ускорения определяет максимальную энергию космических лучей. Существование эффекта ГЗК гарантирует, что космические лучи с энергиями $E > 6 \cdot 10^{19}$ эВ происходят из локальной Вселенной со значительным вкладом источников, расположенных в близлежащей части крупномасштабной структуры (LSS) на расстоянии от Млечного пути $R < 200$ Мпк. По последним данным плотность источников КЛПВЭ может быть ограничена снизу как $\rho > 10^{-4}$ Мпк⁻³ (Рис. 1) [18].

Поскольку крупномасштабная структура Вселенной на этих расстояниях значительно неоднородна, это дает надежду увидеть отдельные источники КЛПВЭ. Астрономия с использованием КЛПВЭ при самых высоких энергиях $E > 6 \cdot 10^{19}$ эВ была одной из главных

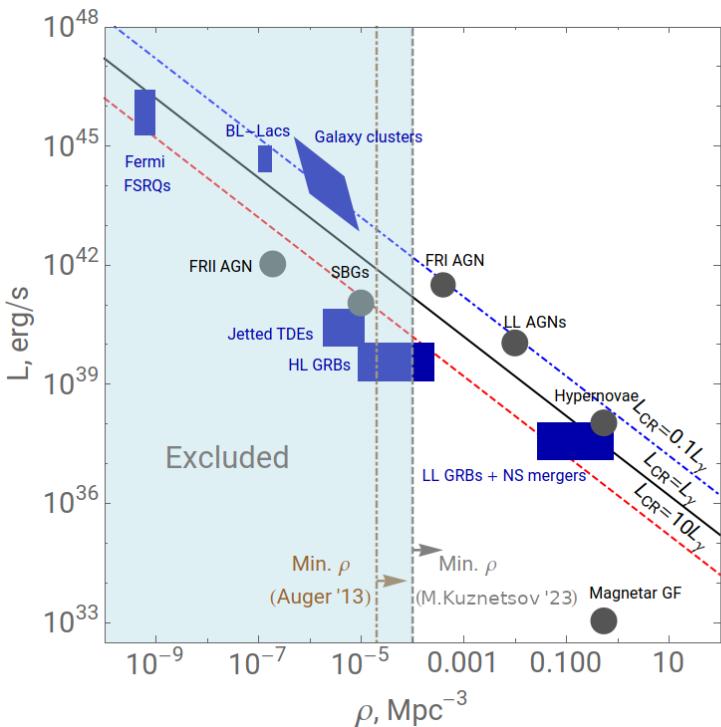


Рис. 1: Зависимость эффективной яркости источников КЛПВЭ от их плотности. Чёрная сплошная линия показывает наилучшее соответствие общей плотности светимости КЛПВЭ $L_{CR} = 5 \cdot 10^{44}$ эрг Мпк $^{-3}$ г $^{-1}$ (см. [19]). Вертикальные линии обозначают ограничения на концентрацию источников КЛПВЭ коллаборацией Оже [20] в приближении 30° отклонения от источников в крупномасштабной структуре Вселенной [18]. Иллюстрация взята из работы М.Кузнецова [18].

мотиваций для проведения экспериментов Оже и ТА.

Для протонов космических лучей отклонение в магнитном поле галактики $B_{\text{Gal}} \sim \text{мкГ}$ составляет всего несколько градусов при $E > 6 \cdot 10^{19}$ эВ в зависимости от направления. Помимо галактического магнитного поля (ГМП), на распространение КЛПВЭ также может влиять межгалактическое магнитное поле (МГМП), при условии, что его напряжённость близка к текущим верхним пределам, составляющим примерно $B \sim 0.1 - 1$ нГс. Эти верхние пределы, полученные из измерения вращения Фарадея [21] внегалактических источников, справедливы для объёмно-заполняющего магнитного поля, находящегося в видах крупномасштабной структуры Вселенной (LSS) [22, 23]. Группа авторов сообщает об открытии магнитных полей в направлении одного из источников с величиной $B \sim 1.5 \cdot 10^{-6}$ нГс [24]. Существующие результаты не накладывают прямых ограничений на магнитное поле в местной Вселенной, где оно может быть сильнее. Это могло бы естественно произойти, если Млечный Путь находится в филаменте крупномасштабной структуры [25], или если локальное магнитное поле было усилено обратной связью от, например, Совета Гигантов (CoG), группы близких крупных галактик [26, 27].

В то же время даже самые сильные из возможных межгалактических магнитных полей (МГМП) с интенсивностью порядка $B \leq 1$ нГ снова неэффективны для отклонения направления протонов КЛПВЭ от точечных источников. Таким образом, можно ожидать, что в данных КЛПВЭ будут видны точечные или слегка протяженные источники протонов с энергией $E > 6 \cdot 10^{19}$ эВ. Однако даже при большой экспозиции Оже и ТА не обнаружили признаков точечных источников. Это наблюдение согласуется с утверждением Оже о том, что большинство КЛПВЭ с $E > 6 \cdot 10^{19}$ эВ являются промежуточ-

ными и тяжёлыми ядрами. В случае тяжёлых ядер магнитное поле Галактики нарушает и даже стирает изображения источников космических лучей предельно высоких энергий [28, 29, 30, 31].

На самых больших угловых масштабах Оже обнаружил диполь в направлениях прихода КЛПВЭ, значимость которого превысила 5σ для энергий $E > 8$ EeV [32, 33]. Его наличие было подтверждено с помощью объединённых данных Оже и ТА [34, 35, 36]. Кроме того, на промежуточных угловых масштабах Оже и ТА наблюдают несколько областей размером примерно 20-25 градусов [37], в направлении которых поток космических лучей значительно выше среднего. Такие области мы будем называть горячими пятнами (англ. hotspot). Наиболее значительный избыток потока КЛПВЭ наблюдается в направлении радиогалактики Центавр А, обнаруженный Оже с уровнем значимости 4σ при энергиях $E > 40$ EeV [38, 39]. Горячее пятно ТА, расположенное вблизи области Большой Медведицы, имеет уровень значимости 3.4σ сигма при аналогичных энергиях (Рис. 2) [40]. Кроме того, в данных ТА есть признаки дополнительного горячего пятна вблизи сверхскопления Персия-Рыб [41, 42]. Эти горячие пятна могут быть изображениями близлежащих точечных источников, размытые как галактическими, так и межгалактическими магнитными полями.

В предыдущих исследованиях изучалось влияние межгалактических магнитных полей на траектории предельно высоких космических лучей. В одном из таких исследований [43] изучался избыток КЛПВЭ от галактики Центавр А и его потенциальная связь с местным межгалактическим магнитным полем. Это исследование показывает, что при наличии протонов в составе напряжённость межгалактического магнитного поля должна составлять не менее 20 нГ. Это значение противоречит существующим наблюдательным огра-

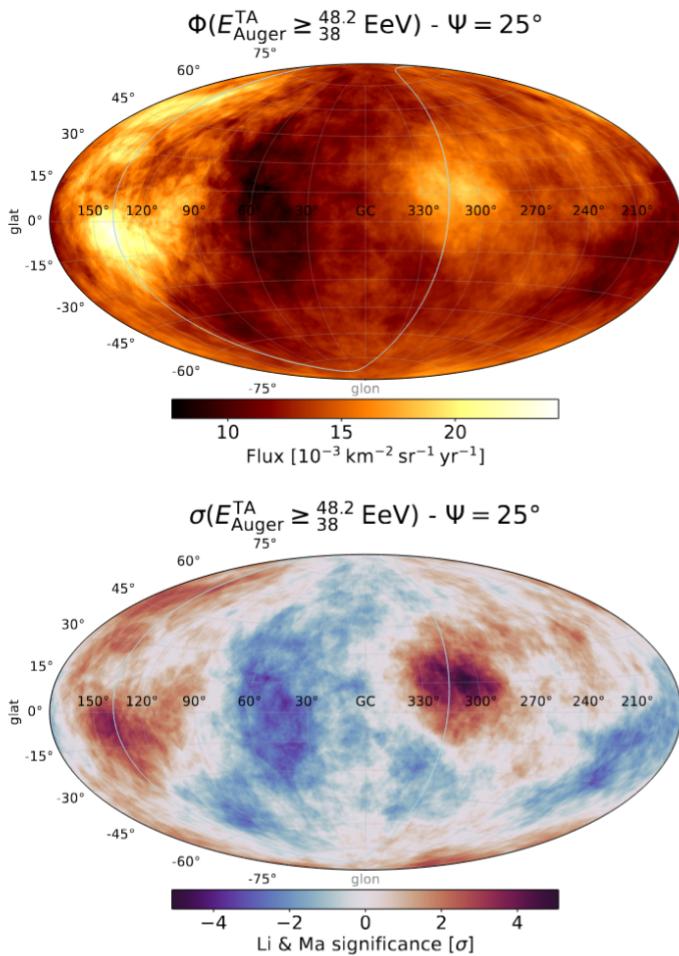


Рис. 2: Карта потока (наверху) и карта значимости (внизу) КЛПВЭ в галактических координатах. Горячее пятно в правой части выглядит менее ярко, но имеет большую значимость за счёт более длительного наблюдения и обычно ассоциируется с радиогалактикой Центавр А. Иллюстрация взята из доклада коллаборации Оже на конференции ICRC2023 [3].

ничениям [22, 44, 45].

Распространение космических лучей в турбулентном магнитном поле в диффузионном режиме уже изучалось ранее[46, 47, 48]. Однако распространение космических лучей сверхвысокой энергии в режиме малоуглового рассеяния привлекало меньше внимания. Этот режим обычно считается тривиальным, и в отсутствие регулярного поля ожидается, что космические лучи просто сформируют размытое изображение источника, если он находится на расстоянии, намного превышающем длину когерентности $D \gg \lambda_C$. Среднее распределение КЛПВЭ по их источникам в этом случае было получено и описано в работах Диего Харари с соавторами [49, 50, 51].

Нетривиальные эффекты линзирования при распространении КЛПВЭ в магнитном поле Галактики были обнаружены в работах [50, 51]. В частности, в работе [51] эти эффекты были изучены для случая изначально параллельных космических лучей, проходящих через турбулентное магнитное поле Галактики. Аналогичные эффекты линзирования для магнитного поля в скоплении галактик были изучены в работе [52].

Актуальность диссертационного исследования связана с астрономией заряженных частиц, для развития которой принципиально важно решение задач, поставленных в настоящей диссертации.

Цели и задачи диссертации

Целью данного диссертационного исследования является изучение влияния турбулентного межгалактического магнитного поля с колмогоровским спектром на распространение космических лучей ультравысоких энергий в режиме малого угла рассеяния, количественный и качественный анализ формирования каустикоподобных

структур в пространственном распределении КЛПВЭ и разработка методов интерпретации наблюдаемых данных по анизотропии КЛПВЭ в данных обсерваторий Пьера Оже и Telescope Array.

Основные задачи исследования:

- Численное моделирование распространения КЛПВЭ в МГМП с колмогоровским спектром турбулентности с использованием кодов **CRbeam** [53] и **CRPropa** [54];
- Исследование зависимости потока КЛПВЭ от положения наблюдателя на сфере, в центре которой находится источник;
- Разработка алгоритма прицеливания для эффективного моделирования попадания определения направлений испускания частиц источником для попадания в область наблюдателя;
- Анализ систематического смещения изображений источников КЛПВЭ в МГМП и его взаимодействия с галактическим магнитным полем (ГМП);
- Исследование диффузии на промежуточных масштабах между приближением постоянного магнитного поля и изотропной диффузии.
- Применение результатов к интерпретации горячего пятна в направлении Центавра А и проверка гипотез о возможных источниках этого избытка: M83, Центавра А.

Научная новизна диссертации

Все основные результаты, выдвигаемые на защиту, являются новыми. Так, впервые проведено детальное моделирование двумерного распределения КЛПВЭ на сфере вокруг источника с обнаружением нетривиальных каустикоподобных структур [55, 56], эти структуры были названы магнитными узлами, филаментами и войдами. Впервые проведены количественные оценки усиления и ослабления

потока в магнитных узлах и войдах в зависимости от расстояния и энергии. Показано, что в широком диапазоне параметров магнитных полей наиболее вероятным является ослабление наблюдаемого потока в 10 и более раз, в то время как усиление потока в 10 раз имеет вероятность порядка 10% [57]. Также были впервые обнаружены эффекты смещения изображений источников в МГМП, сопоставимого по величине с угловым размером изображения. В данной работе предлагается согласованная модель формирования горячего пятна Центавр А с учётом совместного влияния МГМП и ГМП в модели Дженсон-Фаррар 2012 (JF12) [58] [59]. Возможность того, что M83 является источником горячего пятна рассматривалась ранее [60, 61, 27, 62]. В диссертации впервые систематически исследована зависимость данной интерпретации от величины и корреляционной длины внегалактического магнитного поля.

Для достижения этих результатов были разработаны новые алгоритмы прицеливания, ускоряющие вычисления более чем в 50 раз. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая анализировать результаты распространения КЛПВЭ и изображения, наблюдаемые источником на основе предвычисленной базы данных симуляции в различных условиях.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Все результаты, полученные в диссертации имеют теоретическое значение и показывают, что обнаружен новый режим, который должен учитываться в исследованиях, проводимых в данной области при учёте межгалактического магнитного поля. Многие исследователи учитывают межгалактическое магнитное поле исключительно как размазывание изображения источника в соответствии с диффузионной теорией по распределению фон Мизеса–Фишера, однако при некоторых параметрах эффекты линзирования приводят к

сильным отклонениям от этого приближения. Это позволит улучшить ограничения на параметры межгалактического магнитного поля и количество источников космических лучей на расстояниях до 50 Мпк. Улучшения программного кода и алгоритма прицеливания позволяют получать больше информации об изображении источника космических лучей и рассматривать больше возможных моделей и интерактивно взаимодействовать с полученными результатами, тратя на это во много раз меньше ресурсов, чем ранее.

Результаты диссертации уже сейчас применяется в работах по исследованию космических лучей. В частности результат о смещении положении источника на небе использован в работе Т. Бистер [63] для исследования возможных параметров МГМП, совместных с различными интерпретациями наблюдаемого избытка космических лучей в области Центавра А. Этот же результат оказался важен для интерпретации корреляций КЛПВЭ, наблюдаемых Оже, с положениями галактик с активным звёдообразованием [64]. Пере распределение потока космических лучей с вероятным наблюдением значительного избытка было отмечено в репортерском докладе Т. Фуджии на 38-й международной конференции по космическим лучам ICRC2023 в Нагое [65].

Методология диссертационного исследования

В данной диссертационной работе используются как численные, так и аналитические методы, успешно применяемые для различных задач теоретической физики и астрофизики. В ходе работы для определенных вычислений применялось такое программное обеспечение CRbeam¹ [53], CRPropa 3² [54] и HealPy и HEALPix³ [66]. Для ускорения вычислений использовалась технология распараллели

¹<https://github.com/okolo/mcray>

²<https://crpropa.github.io/>

³<http://healpix.sf.net>

вания программ OpenMP. Все указанные программные пакеты уже много лет применяются в астрофизике, а полученные результаты проверялись аналитически, если такое возможно. Для большинства задач диссертационного исследования были написаны собственные программные коды, в том числе и собственный механизм прицеливания, позволяющий оптимизировать вычисления на основе предыдущих похожих симуляций.

Положения, выносимые на защиту

1. При малых углах отклонения в турбулентном магнитном поле существует режим, при котором космические лучи, испущенные источником, образуют на сфере нетривиальные каустико-подобные структуры: магнитные узлы, магнитные ворота, магнитные филаменты.
2. В каустикоподобном режиме имеет место перераспределение потока космических лучей, причём с вероятностью 55% поток на наблюдателе ослабляется в 10 и более раз, а усиление потока хотя бы в 2 раза наблюдается в 10% случаев.
3. Изображения источников качественно зависят от того, в какой структуре: магнитный ворота, узел или филамент – находится наблюдатель.
4. Центр изображений источников в большинстве случаев не совпадает с направлением на сам источник как следует из диффузационной теории.
5. Вероятность, что источником горячего пятна Центавра А является радиогалактика Центавр А, низкая и, в частности, при величине межгалактического магнитного поля $B = 3$ нГ и корреляционной длине $L_c = 0.3$ Мпк составляет примерно

0.5% в предположении модели галактического магнитного поля Дженсон-Фаррар.

6. M83 может являться источником горячего пятна Центавра А при условии $L_c \leq 0.05$ Мпк в предположении модели галактического магнитного поля Дженсон-Фаррар.

Достоверность и обоснованность результатов

Результаты диссертации были опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также доложены на научных конференциях (в том числе международных) и семинарах. Достоверность результатов обеспечивается перепроверкой результатов разными подходами. Численное моделирование частично проверялось с помощью CRPropa, если это возможно. Там, где это возможно, было проведено сравнение промежуточных результатов с работами других авторов и продемонстрировано их хорошее согласие.

Апробация результатов

Основные результаты, изложенные в диссертации, были представлены на следующих конференциях и семинарах:

1. 38-я Международная конференция по космическим лучам (ICRC-2023), Нагоя, Япония, 26 июля - 3 августа 2023.
2. Международная конференция КВАРКИ-2024, Переславль-Залесский, Россия, 19 – 24 мая 2024.
3. Первое рабочее совещание «Машинное обучение в ТА-2024», Тайбей, Тайвань, 21 – 26 октября 2024.
4. Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова, Москва, Россия, 17 – 21 февраля 2025.
5. 15-е Зацепинские чтения, Москва, Россия, 6 июня 2025.

Результаты также были представлены 28 апреля 2025 г. на семинаре отдела теоретической физики Института ядерных исследований Российской академии наук.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приводятся мотивация и актуальность исследования КЛПВЭ. Обсуждаются предшествующие исследования по теме и известные ограничения на межгалактическое магнитное поле.

В **первой главе** проверяется, что симуляции согласуются с известной диффузионной теорией, и исследуются общие свойства распространения космических лучей через турбулентное магнитное поле. Рассматривается следующая задача: пусть у нас есть точечный источник космических лучей предельно высоких энергий, который находится в турбулентном магнитном поле с колмогоровским спектром [67] и который испускает частицы изотропно во всех направлениях. Зададимся следующим вопросом: каково будет распределение космических лучей на воображаемой сфере, которая окружает источник КЛПВЭ?

Обнаруживается каустикоподобный режим, вводятся понятия магнитного войда, магнитного филамента и магнитного узла, а также обсуждаются и проверяются механизмы его возникновения и как такой режим оказывается на потоке космических лучей для наблюдателя.

На Рис. 3 представлена эволюция анизотропии промежуточного масштаба в распределении космических лучей на сфере в зависимости от расстояния до источника для ларморовского радиуса $R_L = 10$ Мпк (при $B = 1$ нГс и $E = 10$ ЭэВ) и длины когерентности $\lambda_C = 0.3$ Мпк. Левая верхняя панель показывает почти изотропное распределение для $D = 1$ Мпк от источника. На расстоянии 10 Мпк (правая

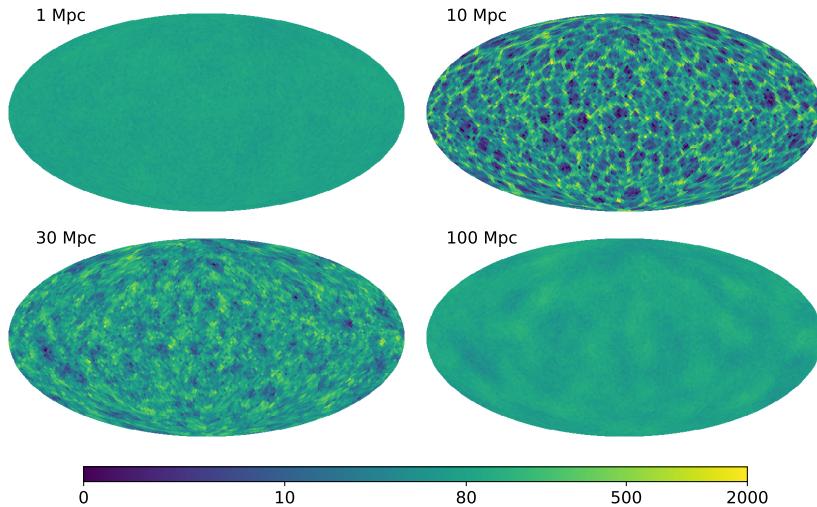


Рис. 3: Распределение космических лучей по сфере вокруг источника. Можно видеть, что анизотропия среднего масштаба сначала увеличивается, а затем размывается. Разные панели представляют разные радиусы сферы: 1 Мпк, 10 Мпк, 30 Мпк и 100 Мпк соответственно. Напряжённость магнитного поля $B = 1$ нГ, длина корреляции $\lambda_C = 0.3$ Мпк, энергия протона $E = 10$ ЭэВ. Карты неба построены в логарифмическом масштабе, а среднее число частиц на пиксель равно 80.

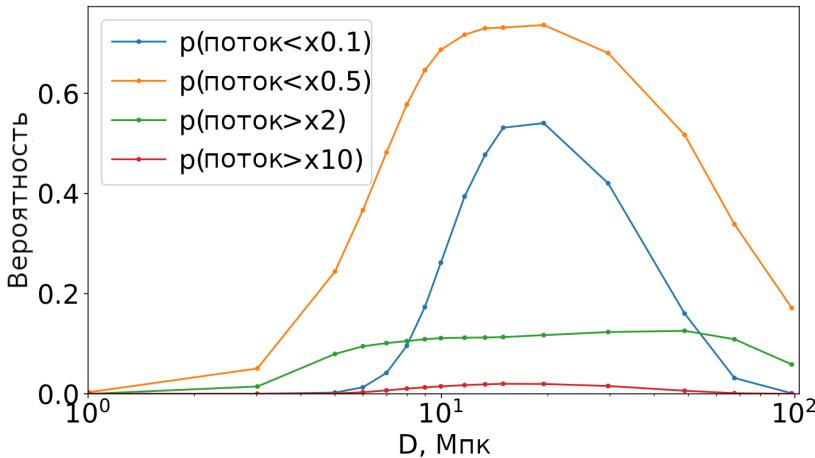


Рис. 4: Вероятность нахождения наблюдателя в области с потоком выше или ниже среднего в зависимости от расстояния до источника для частиц с жёсткостью $R = 10$ ЭВ.

верхняя панель) анизотропия наиболее сильна и четка, затем к 100 Мпк она затухает (см. нижние панели).

Вторая глава посвящена более детальному исследованию эффектов, вызванных каустикоподобным режимом, для наблюдателя. При численном моделировании обнаружилось, что в некоторых случаях для получения результата нужно много времени, поэтому был разработан способ ускорения моделирования за счёт прицеливания на наблюдателя на основе предыдущих симуляций.

Мы изучили распространение протонов КЛПВЭ с энергиями $E > 10^{19}$ эВ в турбулентном межгалактическом магнитном поле с напряжённостью $B = 1$ нГс и длиной когерентности $\lambda_c = 1$ Мпк. Для таких параметров магнитного поля нетривиальная структура КЛПВЭ существует на всех расстояниях в ближних крупномасштабных структурах (LSS) до 100 Мпк, откуда большая часть КЛПВЭ

наивысших энергий приходит на Землю.

Сначала мы исследуем свойства наблюдаемого сигнала в зависимости от энергии КЛПВЭ и расстояния до источника. На Рис. 4 показана вероятность того, что на заданном расстоянии от источника поток КЛПВЭ отличается от среднего в 2 или 10 раз. Видно, что наиболее вероятно, что поток от данного источника будет ниже среднего. Для 10 % источников он как минимум в два раза выше, а в 75% случаев он в 2 раза ниже. Только в нескольких процентах случаев (расположенных в магнитных узлах относительно наблюдателя) поток может быть усилен в 10 раз и более. С другой стороны, в 55 % случаев поток может быть уменьшен в 10 раз в магнитных впадинах. Это означает, что для большинства источников поток КЛПВЭ останется прежним или будет снижен, в то время как только для небольшой доли источников он будет значительно увеличен, давая возможность наблюдать «горячее пятно» в спектре КЛПВЭ. Средний поток через сферу остается одинаковым на всех расстояниях. Частицы не взаимодействуют при распространении в магнитном поле.

Мы изучили три случая расположения наблюдателя на Рис.5: наблюдатель в филаменте, наблюдатель в узле и наблюдатель в войде. Относительно наблюдателя это выглядит как три разные среды межгалактического магнитного поля. Случай узла дает яркое размытое пятно, но этот случай наименее вероятен. Таким образом, если у нас есть много источников КЛПВЭ вокруг нас на расстоянии десятков Мпк, мы видим лишь немногие из них. Относительно большинства источников мы окажемся в пустотах. Источники на больших расстояниях (более 100 Мпк) дают изотропный вклад, который уменьшается с расстоянием и создает однородный фон.

После прохождения галактического магнитного поля могут образовываться размытые пятна, как на нижних панелях Рис.5. Более конкретно, положения источников на небе были выбраны таким

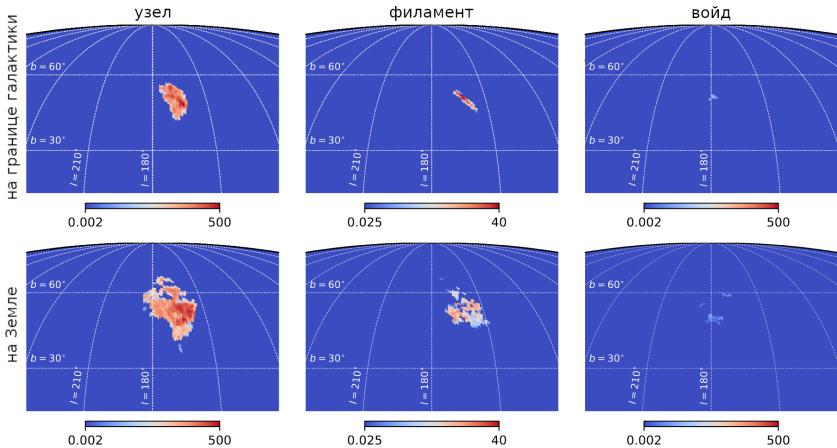


Рис. 5: Изображения источников, видимые наблюдателем, расположенным в узле и филаменте, рассчитанные на краю Галактики и после прохождения ГМП. Цвет кодирует количество попаданий в данный пиксель. В обоих случаях собственная светимость источника подобрана так, чтобы общее число событий от источника, наблюдаемых на Земле, соответствовало кумулятивному числу событий ТА, попадающих внутрь круга горячего пятна радиусом 25° (44 события для 15-летних данных ТА SD [68]). Синий цвет соответствует уровню фона, который для наглядности показан равномерным.

образом, чтобы соответствовать направлению горячего пятна ТА до линзирования ГМП. Количественное предсказание, безусловно, будет зависеть от конкретной используемой модели ГМП, но общая картина останется прежней. Неопределенность отклонений КЛПВЭ в ГМП недавно анализировалась в [58] (в частности, см. Рис. 18 в [58]).

Далее, в **третьей главе** обсуждаются особенности приближений, в которых выведена диффузионная теория, и объясняется, почему эти приближения нереалистичны. Диффузионная теория предполагает распространение космических лучей полностью независимо друг от друга, но в реальности у них общее турбулентное магнитное поле. Это различие между теорией и реальностью приводит к ненулевому смещению изображения источника от направления на него.

В конце главы это знание применяется для предложении вариантов объяснения горячего пятна в таких наблюдаемых данных как космические лучи от радиогалактики Центавра А и M83. Поскольку предложенная идея основывается на взаимном сокращении смещений, индуцированных ГМП и МГМП, полезно оценить вероятность того, что это произойдёт случайно для данной модели ГМП. Угловое расстояние между M83 и центром Центавром А составляет приблизительно 12° . Согласно результатам нашего моделирования, вероятность смещения изображения изображения на угол, превышающий 10° , составляет около 13% для МГМП с $B = 3$ нГс и $L_c = 0.3$ Мпк. Дополнительная степень свободы обеспечивается вращением МГМП вокруг прямой линии, соединяющей наблюдателя и источник, и вероятность того, что смещение произойдёт в требуемом направлении, составляет приблизительно $15^\circ/360^\circ \approx 4\%$, где 15° — это приблизительно половина размера избытка Центавра А. Таким образом, общая вероятность для описанного случая составляет примерно 0.5%.

Заключение содержит краткую формулировку результатов ис-

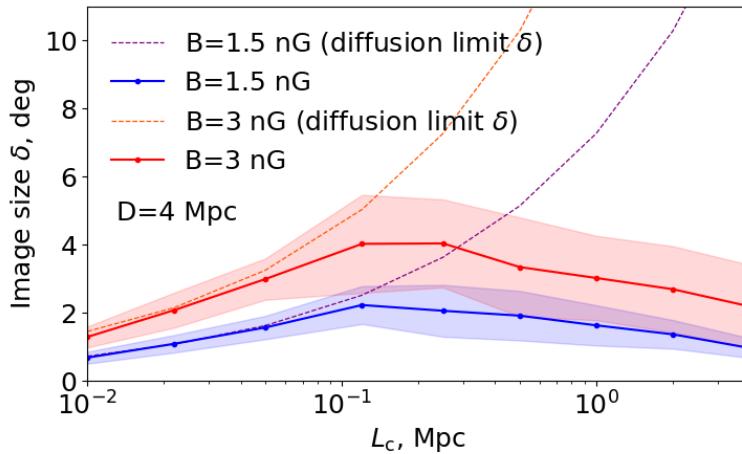


Рис. 6: Угловой размер δ изображения источника КЛПВЭ как функция корреляционной длины МГМП для реалистичного случая, когда частицы испускаются в одну и ту же реализацию МГМП. Сплошные линии указывают средний размер изображения, а затененные области - его стандартное отклонение. И среднее, и стандартное отклонение были рассчитаны по 30 различным реализациям МГМП. Для сравнения пунктирные линии показывают аналитическое ожидание для случая некоррелированных траекторий. Расстояние до источника было установлено $D = 4$ Мпк.

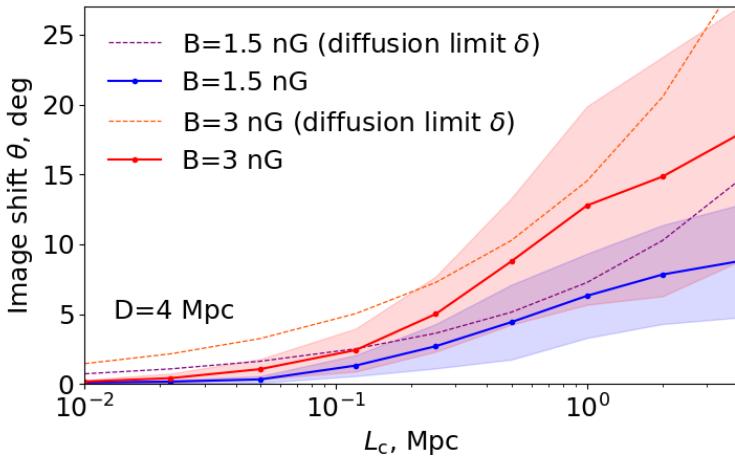


Рис. 7: То же, что и Рис. 6, но здесь сплошные линии и затененные области представляют среднее и стандартное отклонение смещения изображения θ . Пунктирные линии такие же, как на Рис. 6, и показывают аналитическое ожидание размера изображения δ для некоррелированных траекторий.

следований, представленных в данной диссертации, а также благодарности и список сокращений и условных обозначений. Основные результаты состоят в следующем:

1. Даже если КЛПВЭ испускаются источником изотропно, они распределяются анизотропно на расстоянии порядка ларморовского радиуса и снова изотропно на расстоянии в 10 раз большем. В анизотропной области космические лучи фокусируются в нитевидную, каустикоподобную структуру на сфере. Угловое расположение этих областей определяется структурой магнитного поля на нескольких длинах когерентности от источника.
2. Для малых отклонений распределение космических лучей на сфере может быть описано аналитически и поток космических лучей прямо пропорционально интегралу от ротора магнитного поля вдоль направления от источника до наблюдателя.
3. Окончательные изображения источников в случае каустикоподобного режима после распространения качественно и количественно зависят от положения наблюдателя и, если наблюдатель находится в магнитном узле, то источник выглядит как размытое пятно, при нахождении в филаменте источник приобретает вытянутую форму. Если же наблюдатель находится в магнитном войде, то вклад данного источника в наблюдаемый поток КЛПВЭ сильно снижен.
4. Вопреки предсказаниям теории диффузии, наблюдаемые изображения источников КЛПВЭ оказываются как меньше ожидаемых, так и могут быть значительно смещены относительно фактических положений источников.
5. В модели JF12 ядра углерода КЛПВЭ с энергией $E = 60$ ЭэВ, пришедшие от Центавра А, отклоняются в сторону галактической плоскости, в результате чего распределение направлений

их прихода на Земле не согласуется с наблюдаемым избытком вблизи Центавра А.

6. Если вместо Центавра А рассматривать галактику M83 как источник тех же КЛПВЭ, распространение через ГМП отклоняет частицы в сторону наблюдаемого положения избытка Центавра А. Если же МГМП имеет длину корреляции, сравнимую с расстоянием до источника или меньшую на порядок величины, возникает режим фокусировки. В этом режиме Центавра А всё ещё может быть истинным источником КЛПВЭ при некоторых реализациях МГМП, наблюдаемых в его окрестности: а именно, КЛПВЭ сначала отклоняются МГМП в направление положения вблизи M83, а затем перенаправляются ГМП обратно в сторону Центавра А.

Приложение содержит описание программы для ЭВМ для визуализации рассчитанных заранее симуляций и вывод выражений для углов отклонения частиц и размера изображения источника в турбулентном магнитном поле.

Основные публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz, I. Tkachev. Caustic-Like Structures in UHECR Flux after Propagation in Turbulent Intergalactic Magnetic Fields // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2023. — Vol. 136. — P. 704–710. DOI: 10.1134/S1063776123060031
2. K.A. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz and I. Tkachev. Caustic-like Structures in UHECR Flux after Propagation in Turbulent Intergalactic Magnetic Fields and the

caused distortions of the image of a source // Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC-2023). — 2023. — P. 452. DOI: 10.22323/1.444.0452

3. Арбузова Е.В., Долгих К.А., Долгов А.Д., Калашев О.Е., Корочкин А.А., Панасенко Л.А., Поздняков Н.А., Рубцов Г.И., Руденко А.С., Ткачев И.И. Открытие новых окон в раннюю Вселенную с помощью многоканальной астрономии (Мини-обзор) // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2024. - Vol. 119. - N. 7-8. - P. 481-491. DOI: 10.31857/S1234567824070024
4. K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz, I. Tkachev. Images of the Ultra-High Energy Cosmic Rays from Point Sources // Advances in Space Research. — 2024. — Vol. 74. — Iss. 10. — P. 5295–5301.
DOI: 10.1016/j.asr.2024.07.081
5. K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz, I. Tkachev. Displacement of ultra-high-energy cosmic ray source images by the intergalactic magnetic field: the cases of Cen A and M83 // International Journal of Modern Physics A. — 2025. — Vol. 40 — No. 30 — P. 2540012. DOI: 10.1142/S0217751X25400123

Также зарегистрирована программа для ЭВМ: «Веб-сервер для компоновки и отображения изображений источников космических лучей после линзирования межгалактическим и (опционально) галактическим магнитным полем» (свидетельство №2025667031 от 02.07.2025 г.).

Список литературы

- [1] The Pierre Auger Cosmic Ray observatory // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2015. — Vol. 798. — P. 172–213. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215008086>.
- [2] The surface detector array of the Telescope Array experiment / T. Abu-Zayyad, R. Aida, M. Allen et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2012. — Vol. 689. — P. 87–97. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212005931>.
- [3] Update on the searches for anisotropies in UHECR arrival directions with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array / Adila Abdul Halim, Pedro Abreu, Marco Aglietta et al. // PoS. — 2023. — Vol. ICRC2023. — P. 521.
- [4] Kido E. Current status of the tax4 surface detectors // EPJ Web of Conferences. — 2023. — 04. — Vol. 283. — P. 06003.
- [5] Abdul Halim A. et al. Search for photons above 10^{18} eV by simultaneously measuring the atmospheric depth and the muon content of air showers at the Pierre Auger Observatory // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 110, no. 6. — P. 062005. — 2406.07439.
- [6] Abreu P. et al. Search for Photons above 10^{19} eV with the Surface Detector of the Pierre Auger Observatory // JCAP. — 2023. — Vol. 05. — P. 021. — 2209.05926.
- [7] Abbasi R. U. et al. Constraints on the diffuse photon flux with energies above 10^{18} eV using the surface detector of the Telescope

Array experiment // *Astropart. Phys.* — 2019. — Vol. 110. — P. 8–14. — 1811.03920.

[8] Aab A. et al. Probing the origin of ultra-high-energy cosmic rays with neutrinos in the EeV energy range using the Pierre Auger Observatory // *JCAP.* — 2019. — Vol. 10. — P. 022. — 1906.07422.

[9] Alvarez-Muñiz J. Searches for UHE neutrinos and upward-going showers at the Pierre Auger Observatory // *PoS.* — 2025. — Vol. UHECR2024. — P. 025.

[10] Greisen K. End to the cosmic ray spectrum? // *Phys. Rev. Lett.* — 1966. — Vol. 16. — P. 748–750.

[11] Zatsepin G. T., Kuzmin V. A. Upper limit of the spectrum of cosmic rays // *JETP Lett.* — 1966. — Vol. 4. — P. 78–80. — [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 4, 114 (1966)].

[12] Kampert K.-H., Watson A. A., Watson A. A. Extensive Air Showers and Ultra High-Energy Cosmic Rays: A Historical Review // *Eur. Phys. J. H.* — 2012. — Vol. 37. — P. 359–412. — 1207.4827.

[13] Abbasi R. U. et al. First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin suppression // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 100. — P. 101101. — astro-ph/0703099.

[14] Abraham J. et al. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 101. — P. 061101. — 0806.4302.

[15] Abu-Zayyad T. et al. The Cosmic Ray Energy Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 768. — P. L1. — 1205.5067.

- [16] Aab A. et al. Features of the Energy Spectrum of Cosmic Rays above 2.5×10^{18} eV Using the Pierre Auger Observatory // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 125, no. 12. — P. 121106. — 2008.06488.
- [17] Eichmann B., Kachelrieß M., Oikonomou F. Explaining the UHECR spectrum, composition and large-scale anisotropies with radio galaxies // JCAP. — 2022. — Vol. 07, no. 07. — P. 006. — 2202.11942.
- [18] Kuznetsov M. Y. A nearby source of ultra-high energy cosmic rays // JCAP. — 2024. — Vol. 04. — P. 042. — 2311.14628.
- [19] Aab A. et al. Combined fit of spectrum and composition data as measured by the Pierre Auger Observatory // JCAP. — 2017. — Vol. 04. — P. 038. — [Erratum: JCAP 03, E02 (2018)]. 1612.07155.
- [20] Abreu P. et al. Bounds on the density of sources of ultra-high energy cosmic rays from the Pierre Auger Observatory // JCAP. — 2013. — Vol. 05. — P. 009. — 1305.1576.
- [21] Magnetic fields and faraday rotation in clusters of galaxies / M. Murgia, F. Govoni, L. Feretti et al. // Astronomy & Astrophysics. — 2004. — Aug. — Vol. 424, no. 2. — P. 429–446. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20040191>.
- [22] Pshirkov M. S., Tinyakov P. G., Urban F. R. New limits on extragalactic magnetic fields from rotation measures // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 116, no. 19. — P. 191302. — 1504.06546.
- [23] Revision of upper bound on volume-filling intergalactic magnetic fields with LOFAR / A. Neronov, F. Vazza, S. Mtchedlidze, E. Carretti // arXiv e-prints. — 2024. — Dec. — P. arXiv:2412.14825. — 2412.14825.
- [24] Webar M. S., Abed Y., Horns D. Discovery of femto gauss intergalactic magnetic fields towards mkn 501. — 2025. — 2509.11996.

- [25] Discovery of magnetic fields along stacked cosmic filaments as revealed by radio and X-ray emission / T. Vernstrom, G. Heald, F. Vazza et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2021. — Aug. — Vol. 505, no. 3. — P. 4178–4196. — 2101.09331.
- [26] McCall M. L. A Council of Giants // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2014. — May. — Vol. 440, no. 1. — P. 405–426. — 1403.3667.
- [27] Taylor A. M., Matthews J. H., Bell A. R. UHECR echoes from the Council of Giants // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2023. — Vol. 524, no. 1. — P. 631–642. — 2302.06489.
- [28] Ultrahigh Energy Nuclei in the Galactic Magnetic Field / G. Giacinti, M. Kachelriess, D. V. Semikoz, G. Sigl // *JCAP*. — 2010. — Vol. 08. — P. 036. — 1006.5416.
- [29] Ultrahigh Energy Nuclei in the Turbulent Galactic Magnetic Field / G. Giacinti, M. Kachelriess, D. V. Semikoz, G. Sigl // *Astropart. Phys.* — 2011. — Vol. 35. — P. 192–200. — 1104.1141.
- [30] Farrar G. R. The Galactic Magnetic Field and Ultrahigh-Energy Cosmic Ray Deflections // *Comptes Rendus Physique*. — 2014. — Vol. 15. — P. 339–348. — 1405.3680.
- [31] di Matteo A., Tinyakov P. How isotropic can the UHECR flux be? // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 476, no. 1. — P. 715–723. — 1706.02534.
- [32] Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} eV / Pierre Auger Collaboration, A. Aab, P. Abreu et al. // *Science*. — 2017. — Sep. — Vol. 357, no. 6357. — P. 1266–1270. — 1709.07321.
- [33] Large-scale Cosmic-ray Anisotropies with 19 yr of Data from the Pierre Auger Observatory / A. Abdul Halim, P. Abreu, M. Aglietta

et al. // *Astrophys.J.* — 2024. — Nov. — Vol. 976, no. 1. — P. 48. — 2408.05292.

- [34] The UHECR dipole and quadrupole in the latest data from the original Auger and TA surface detectors / P. Tinyakov, J. Kim, M. Kuznetsov et al. // 37th International Cosmic Ray Conference. — 2022. — Mar. — P. 375. — 2111.14593.
- [35] Abdul Halim A. et al. Update on the searches for anisotropies in UHECR arrival directions with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array // PoS. — 2023. — Vol. ICRC2023. — P. 521.
- [36] Abdul Halim A. et al. Update on full-sky searches for large- and medium-scale anisotropies in the UHECR flux using the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array // PoS. — 2025. — Vol. UHECR2024. — P. 009.
- [37] Arrival directions of cosmic rays above 32 EeV from phase one of the Pierre Auger Observatory / P. Abreu, M. Aglietta, J. M. Albury et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2022. — aug. — Vol. 935, no. 2. — P. 170. — Access mode: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7d4e>.
- [38] Abreu P. et al. Arrival Directions of Cosmic Rays above 32 EeV from Phase One of the Pierre Auger Observatory // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 935, no. 2. — P. 170. — 2206.13492.
- [39] Abdul Halim A. et al. An update on the arrival direction studies made with data from the Pierre Auger Observatory // PoS. — 2023. — Vol. ICRC2023. — P. 252.
- [40] 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. Lett.* — 2014. — Vol. 790. — P. L21. — 1404.5890.

- [41] Indications of a Cosmic Ray Source in the Perseus-Pisces Supercluster / Telescope Array Collaboration, R. U. Abbasi, T. Abu-Zayyad et al. // arXiv e-prints. — 2021. — Oct. — P. arXiv:2110.14827. — 2110.14827.
- [42] Telescope Array Surface Detector Medium-scale Anisotropy Analyses / Jihyun Kim, Dmitri Ivanov, Kazumasa Kawata et al. // PoS. — 2025. — Vol. UHECR2024. — P. 097.
- [43] The Centaurus A ultrahigh-energy cosmic-ray excess and the local extragalactic magnetic field / Hasan Yüksel, Todor Stanev, Matthew D. Kistler, Philipp P. Kronberg // *Astrophys. J.* — 2012. — sep. — Vol. 758, no. 1. — P. 16. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/758/1/16>.
- [44] Katz H. et al. Introducing SPHINX-MHD: the impact of primordial magnetic fields on the first galaxies, reionization, and the global 21-cm signal // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 507, no. 1. — P. 1254–1282. — 2101.11624.
- [45] Jedamzik K., Saveliev A. Stringent Limit on Primordial Magnetic Fields from the Cosmic Microwave Background Radiation // *Phys. Rev. Lett.* — 2019. — Vol. 123, no. 2. — P. 021301. — 1804.06115.
- [46] Casse F., Lemoine M., Pelletier G. Transport of cosmic rays in chaotic magnetic fields // *Phys. Rev. D*. — 2002. — Vol. 65. — P. 023002. — astro-ph/0109223.
- [47] Giacinti G., Kachelriess M., Semikoz D. V. Filamentary Diffusion of Cosmic Rays on Small Scales // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Vol. 108. — P. 261101. — 1204.1271.

- [48] Giacinti G., Kachelriess M., Semikoz D. V. Reconciling cosmic ray diffusion with Galactic magnetic field models // *JCAP*. — 2018. — Vol. 07. — P. 051. — 1710.08205.
- [49] Harari D., Mollerach S., Roulet E. Angular distribution of cosmic rays from an individual source in a turbulent magnetic field // *Phys. Rev. D*. — 2016. — Vol. 93, no. 6. — P. 063002. — 1512.08289.
- [50] Harari D., Mollerach S., Roulet E. Magnetic lensing of extremely high-energy cosmic rays in a galactic wind // *JHEP*. — 2000. — Vol. 10. — P. 047. — astro-ph/0005483.
- [51] Lensing of ultrahigh-energy cosmic rays in turbulent magnetic fields / Diego Harari, Silvia Mollerach, Esteban Roulet, Federico Sanchez // *JHEP*. — 2002. — Vol. 03. — P. 045. — astro-ph/0202362.
- [52] Dolag K., Kachelrieß M., Semikoz D. V. UHECR observations and lensing in the magnetic field of the Virgo cluster // *JCAP*. — 2009. — Vol. 01. — P. 033. — 0809.5055.
- [53] Modeling the propagation of very-high-energy γ -rays with the CRbeam code: Comparison with CRPropa and ELMAG codes / O. Kalashev, A. Korochkin, A. Neronov, D. Semikoz // *Astron. Astrophys.* — 2023. — Vol. 675. — P. A132. — 2201.03996.
- [54] Alves Batista R. et al. CRPropa 3.2 — an advanced framework for high-energy particle propagation in extragalactic and galactic spaces // *JCAP*. — 2022. — Vol. 09. — P. 035. — 2208.00107.
- [55] Caustic-Like Structures in UHECR Flux after Propagation in Turbulent Intergalactic Magnetic Fields / K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov et al. // *J. Exp. Theor. Phys.* — 2023. — Vol. 136, no. 6. — P. 704–710. — 2212.01494.

- [56] Opening of new windows to the early universe by means of multi-messenger astronomy (brief review) / E. V. Arbuzova, K. A. Dolgikh, A. D. Dolgov et al. // JETP Lett. — 2024. — Vol. 119. — P. 485. — [Pisma v ZhETF 119, 481 (2024)]. Access mode: <http://jetpletters.ru/ps/dx/10.31857/S1234567824070024>.
- [57] Images of the ultra-high energy cosmic rays from point sources / Konstantin Dolgikh, Alexander Korochkin, Grigory Rubtsov et al. // Advances in Space Research. — 2024. — Vol. 74, no. 10. — P. 5295–5301. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117724008007>.
- [58] Unger M., Farrar G. R. The Coherent Magnetic Field of the Milky Way // Accepted for publication in *Astrophys.J.* — 2023. — 11. — 2311.12120.
- [59] Displacement of ultra-high-energy cosmic ray source images by the intergalactic magnetic field: The cases of Cen A and M83 / K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov et al. // International Journal of Modern Physics A. — 2025. — Vol. 40, no. 33. — P. 2540012. — <https://doi.org/10.1142/S0217751X25400123>.
- [60] Fornax A, Centaurus A, and other radio galaxies as sources of ultrahigh energy cosmic rays / James H. Matthews, Anthony R. Bell, Katherine M. Blundell, Anabella T. Araudo // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2018. — Vol. 479, no. 1. — P. L76–L80. — 1805.01902.
- [61] Aab A. et al. An Indication of anisotropy in arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays through comparison to the flux pattern of extragalactic gamma-ray sources // *Astrophys. J. Lett.* — 2018. — Vol. 853, no. 2. — P. L29. — 1801.06160.
- [62] What can be learnt from UHECR anisotropies observations - II. Intermediate-scale anisotropies / Denis Allard, Julien Aublin,

Bruny Baret, Etienne Parizot // *Astron. Astrophys.* — 2024. — Vol. 686. — P. A292. — 2305.17811.

[63] Bister T. The source of the cosmic-ray excess in the Centaurus region – constraints on possible candidates, mass composition and cosmic magnetic fields. — 2025. — 9. — 2509.06594.

[64] Constraining the Extragalactic Magnetic Field: Auger Data Meet UHECR Propagation Modeling / Ala'a AL-Zetoun, Arjen van Vliet, Andrew M. Taylor, Walter Winter. — 2025. — 6. — 2506.16169.

[65] Fujii T. Rapporteur Talk: CRI // *PoS*. — 2024. — Vol. ICRC2023. — P. 031. — 2401.08952.

[66] HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere / K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday et al. // *Astrophys.J.* — 2005. — Apr. — Vol. 622. — P. 759–771. — arXiv:astro-ph/0409513.

[67] Giacalone J., Jokipii J. R. The Transport of Cosmic Rays across a Turbulent Magnetic Field // *Astrophys.J.* — 1999. — Jul. — Vol. 520, no. 1. — P. 204–214.

[68] Anisotropies in the arrival direction distribution of ultra-high energy cosmic rays measured by the Telescope Array surface detector / Jihyun Kim, Dmitri Ivanov, Kazumasa Kawata et al. // *PoS*. — 2023. — Vol. ICRC2023. — P. 244.

Научное издание

Долгих Константин Александрович

Построение модели горячих пятен космических лучей

предельно высоких энергий

с учётом межгалактических магнитных полей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Принято в печать 16.12.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,3 Зак. № 042/25 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