

ОТЗЫВ

официального оппонента Деришева Евгения Владимировича на диссертацию Долгих Константина Александровича «Построение модели горячих пятен космических лучей предельно высоких энергий с учётом межгалактических магнитных полей», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Диссертационная работа К.А. Долгих посвящена численному исследованию распространения космических лучей предельно высокой энергии (КЛПВЭ) в турбулентном межгалактическом и галактическом магнитном поле. Основные полученные в диссертации результаты относятся к режиму, в котором неприменимо диффузионное приближение, а единственным практически работоспособным методом является численная трассировка траекторий отдельных частиц. При этом диссертантом предложен и использован алгоритм прицеливания, позволяющий многократно ускорить вычисления за счёт предварительного отбора тех траекторий, конечная точка которых имеет наибольшие шансы оказаться рядом с наблюдателем. Изучаемый в диссертационной работе режим распространения КЛПВЭ характеризуется неоднозначностью связи между направлением вылета КЛПВЭ и направлением на наблюдателя, что приводит к формированию каустик, свойства и статистические характеристики которых впервые исследованы в диссертации. На основе полученных результатов дана интерпретация одного из так называемых "горячих пятен" (наиболее статистически значимого) в распределении КЛПВЭ по направлениям прихода.

Актуальность и значимость проведенных исследований обусловлены необходимостью интерпретации данных обсерваторий Пьера Оже и Telescope Array, в которых имеется анизотропия КЛПВЭ на угловых масштабах порядка 10 градусов, до сих пор не имеющая однозначного объяснения.

Практическая значимость работы заключается разработке метода прицеливания, позволяющего оптимизировать расчёты потока КЛПВЭ, получении новых ограничений на плотность источников КЛПВЭ во внегалактическом пространстве в окрестности Млечного Пути, использовании предложенного метода трассировки в смоделированном внегалактическом и галактическом магнитном поле для вычисления вероятности ассоциации локального избытка потока КЛПВЭ с галактиками Центавр А и М83.

Диссертация Константина Долгих состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы (93 позиции) и двух приложений. Объём диссертации составляет 88 страниц. В диссертации есть 24 иллюстрации.

Введение посвящено обоснованию актуальности диссертации, перечисляются цели, научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведённых исследований, сформулированы выносимые на защиту положения. Там же приводится обзор современного состояния дел в области наблюдения КЛПВЭ, а также методов моделирования их распространения в межгалактическом и галактическом магнитных полях.

В первой главе рассмотрена задача о распространении КЛПВЭ от точечного изотропного источника через турбулентное магнитное поле с колмогоровским спектром мощности. Вычисляется плотность потока КЛПВЭ на воображаемой сфере произвольного радиуса, имеющей источник в своём центре. Показано, что индуцированная отклонением в магнитном поле анизотропия потока по мере увеличения

расстояния от источника сначала увеличивается, затем формирует каустикоподобные структуры с большим контрастом потока, и, наконец, спадает с одновременным уменьшением контраста. Показано, что в первом и третьем режимах результаты численного моделирования хорошо согласуются с аналитическими выражениями, известными для предельных случаев малых отклонений (т.е., малого расстояния) и диффузии по углам (т.е., большого расстояния).

Вторая глава посвящена моделированию изображений источников космических лучей. В ней подробно описаны используемые методы, в том числе предложенный диссертантом для ускорения вычислений алгоритм прицеливания. Далее рассматривается статистика изменения потоков КЛПВЭ: вычисляются амплитуда вариаций и соответствующие вероятности увеличения и уменьшения потоков. Затем вычисляются регистрируемые наблюдателем размер и форма изображений источников КЛПВЭ.

В третьей главе проводится анализ и моделирование траекторий КЛПВЭ в приближении, когда каждая траектория вычисляется с независимой от других реализацией магнитного поля (приближение, часто используемое для аналитических исследований), после чего результаты сравниваются со случаем, когда КЛПВЭ распространяются через одну и ту же реализацию магнитного поля. В последнем случае появляется ненулевое смещение изображения источника — эффект, который диссертант использует для интерпретации избытка потока КЛПВЭ в области Центавра А как вклада от источников Центавр А и М83.

В заключении дан краткий обзор полученных результатов.

Приложение 1 содержит описание программы, реализующей веб-интерфейс для компоновки изображений источников КЛПВЭ по результатам заранее проведённого моделирования траекторий.

В приложении 2 поясняется вывод аналитических выражений для среднеквадратичного угла отклонения КЛПВЭ и углового размера изображения источника после распространения в турбулентном магнитном поле, которые используются в диссертации для верификации численных моделей.

По представленной диссертационной работе можно сформулировать следующие **вопросы и замечания.**

Вопросы:

- 1) Для задания спектра мощности турбулентного магнитного поля используется приближение Колмогорова, то есть изотропный спектр с показателем $-5/3$. Вместе с тем, существуют и другие приближения для описания МГД-турбулентности в межзвездной (и межгалактической) среде, например, приближения Голдрейха-Шридхара или Крейчнана. В диссертации вопрос о зависимости результатов от конкретного выбора спектра турбулентности исследован ограниченно, только для магнитного поля, представленного в виде совокупности хаотически ориентированных доменов одного размера, при этом утверждается неизменность появления каустикоподобных структур. Сохраняется ли при этом размер структур и статистика ослабления/усиления потока? Насколько мог бы повлиять на результат выбор другого приближения для спектра мощности турбулентного магнитного поля?
- 2) При численном моделировании спектр гармоник магнитного поля ограничивается со стороны больших и малых волновых чисел и утверждается, что результаты слабо меняются при дальнейшем расширении диапазона. Какие из результатов наиболее требовательны к ширине спектра при моделировании?

Можно ли оценить необходимый диапазон волновых чисел аналитически?

- 3) В диссертации используется приближение изотропного и стационарного источника космических лучей. Это приближение может нарушаться, если частицы вылетают преимущественно вдоль открытых силовых линий поля и с сохранением адиабатического инварианта. Задержка при распространении космических лучей, которые отклоняются на угол порядка нескольких градусов (как получается из моделирования) может достигать до миллиона лет и применимость стационарного приближения может быть ограничена.
- 4) В диссертации не обсуждается, к каким количественным изменениям в фактически наблюдаемой картине может привести то обстоятельство, что реальные инструменты обладают ограниченной точностью определения энергии космических лучей и их химического состава.
- 5) Для вычисления типичной картины отклонения космических лучей в разных местах используются разные значения индукции межгалактического магнитного поля и его длины корреляции. Почему?
- 6) В диссертации на стр. 14 и 34 приводятся численно различающиеся величины, характеризующие вероятность и величину отклонения распределения космических лучей от изотропного. Относятся ли разные числа к разным модельным ситуациям?

Замечания:

- 1) стр. 10: "изначально параллельных космических лучей" — пропущено слово "траекторий"
- 2) стр. 10: "каустикоподобных структур в пространственном распределении" — по-видимому имеется в виду "каустикоподобных структур в **угловом** распределении"
- 3) стр. 11: "Разработка алгоритма прицеливания для эффективного моделирования попадания определения направлений" — слова "моделирования попадания" лишние
- 4) стр. 11: "усиление потока в 10 раз имеет вероятность порядка 10%". По-видимому, это опечатка, так как в противном случае не сохранялся бы средний поток.
- 5) стр. 14: "в большинстве случаев не совпадает с направлением на сам источник как следует из диффузионной теории" — по-видимому должно быть "в большинстве случаев не совпадает с направлением на сам источник, **в отличие от того что следует** из диффузионной теории"
- 6) стр. 14: в положении, выносимом на защиту, "M83 может являться источником горячего пятна", имело смысл указать вероятность такой интерпретации, которая в диссертации рассчитана
- 7) стр. 17: непонятно, что такое "сферический наблюдатель"
- 8) стр. 23 и 24: на рис. 5 и 6 не указаны единицы измерения
- 9) стр. 26: "Весь объём вокруг источника заполнен однородным турбулентным магнитным полем" — по-видимому должно быть "**статистически** однородным магнитным полем"
- 10) стр. 43: непонятно, откуда взята оценка длины когерентности магнитного поля (в данном случае 1 Мпк, в дальнейшем — другие значения)
- 11) стр. 43: "наблюдать 'горячее пятно' в спектре КЛПВЭ" — по-видимому должно быть "наблюдать 'горячее пятно' в **потоке** КЛПВЭ"

Диссертационная работа Константина Александровича Долгих выполнена на высоком профессиональном уровне и отвечает всем требованиям ВАК. Полученные результаты представляют несомненный научный интерес. Сформулированные вопросы относятся главным образом к более точному позиционированию полученных в диссертации результатов в рамках существующих представлений о задаче распространения космических лучей. Замечания касаются опечаток и стилистических неточностей. И те, и другие не имеют принципиального значения и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3. – Теоретическая физика. Все полученные диссертантом результаты являются новыми. Достоверность и обоснованность выносимых на защиту положений обеспечивается использованием апробированных методов численного моделирования, причём результаты оригинальных программ, где возможно, сравнивались с результатами моделирования с помощью сторонних программных пакетов. Кроме того, результаты численного моделирования сверялись с аналитическими выражениями, известными для некоторых предельных случаев. Надёжной апробацией результатов служат 5 докладов, сделанных на международных и российских конференциях. По теме диссертации опубликовано 5 работ в рецензируемых высокорейтинговых научных журналах, входящих в список ВАК. **Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.**

Диссертация К.А. Долгих «Построение модели горячих пятен космических лучей предельно высоких энергий с учётом межгалактических магнитных полей», удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Константин Александрович Долгих, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика.

9.02.2026

Официальный оппонент

доцент, кандидат физ.-мат. наук,

старший научный сотрудник

отдела астрофизики и физики космической плазмы

Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

/ Е.В. Деришев /

derishev@ipfran.ru,

+7 (831) 416-48-94

603951, г. Нижний Новгород,

ул. Ульянова, 46

Институт прикладной физики РАН

*Подпись Е.В. Деришева заверяю:
зав. отделом кадров*

/ А.В. Городецкая /

Сведения об официальном оппоненте

Деришев Евгений Владимирович

Кандидат физико-математических наук по специальностям 01.04.08 — физика и химия плазмы и 01.03.02 — астрофизика, радиоастрономия (соответствует специальности «1.3.9 — физика плазмы» по новой номенклатуре),

тел. +7 (831) 416-48-94, адрес электронной почты: derishev@ipfran.ru

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», отдел астрофизики и физики космической плазмы, старший научный сотрудник, доцент.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. **Derishev E.**, Piran T., THE CONTEMPORANEOUS PHASE OF GRB AFTERGLOWS – APPLICATION TO GRB 221009A // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2024. - T. 530. -№ 1. -С. 347-359.
2. **Derishev E.**, PROPERTIES OF MAGNETIC TURBULENCE IN GRB AFTERGLOWS // Publications of the Astronomical Society of Australia. 2024. -T. 41. -С. e081.
3. Кочаровский В.В., Гарасёв М.А., **Деришев Е.В.**, Нечаев А.А., Степанов А.Н. // ВЛИЯНИЕ ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ СИЛЬНЫХ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ С ГОРЯЧИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В НЕОДНОРОДНЫЙ СЛОЙ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2023. -Т. 510. -№ 1. -С. 22-29.
4. **Derishev E.**, RELATING QUASI-STATIONARY ONE ZONE EMISSION MODELS TO EXPANDING RELATIVISTIC SHOCKS // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. -Т. 519. -№ 1. -С. 377-383.
5. **Derishev E.V.**, NUMERICAL MODEL OF SYNCHROTRON-SELF-COMPTON RADIATION SOURCES // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. -Т 63. -С 862-875.
6. Garasev M.A., **Derishev E.V.**, NUMERICAL SIMULATION OF NONLINEAR EFFECTS IN THE WEIBEL INSTABILITY // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. -Т 63. -С 909-920.
7. **Derishev E.**, Piran T., GRB AFTERGLOW PARAMETERS IN THE ERA OF TEV OBSERVATIONS: THE CASE OF GRB 190114C // The Astrophysical Journal. 2021. -Т. 923. -№ 2. -С. 135.