

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Чернышова Дмитрия Олеговича «Самосогласованные модели распространения и ускорения космических лучей», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

Диссертация Д.О. Чернышова содержит результаты многолетних исследований автора по распространению космических лучей в межзвездной плазме — важнейшей задачи, позволяющей выяснить источники частиц и механизмы их ускорения до высоких энергий. Разработанные автором модели используются для получения физических результатов о процессах рассеяния космических лучей при их распространении в Галактике и влияния на среду, о процессах, которые отвечают за удержание космических лучей в гало Галактики, а также об ускорении космических лучей высоких энергий от «колена» до «лодыжки» за счет стохастического ускорения в пузырях Ферми. Эти и другие модели, а также полученные на их основе результаты, являются, безусловно, актуальными, вносят заметный вклад в понимание процессов влияния космических лучей на среду при их распространении за пределами зон активных областей ускорения и интерпретацию наблюдательных данных в районе Земли.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, списка иллюстративного материала и списка работ, опубликованных по теме диссертации. Объем диссертации составляет 272 страницы, включая 30 рисунков и список использованной литературы из 314 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, дан краткий обзор литературы, сформулированы цели и задачи, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию формированию спектра надтепловых частиц под действием ускорения космических лучей за счет взаимодействия с турбулентностью. В работе показано, что в зависимости от величины порогового импульса отсечки, который соответствует масштабу, на котором спектр турбулентности обрывается, поведение плазмы с течением времени может существенно различаться. Установлено, что при низких его значениях наблюдается лишь разогрев плазмы, тогда как при очень больших значениях, помимо формирования степенного спектра частиц высокой энергии, также будет наблюдаться охлаждение плазмы. В данной главе также приводятся оценки величины порогового импульса.

Во **второй главе** обсуждаются механизмы формирования гамма-излучения крупномасштабными источниками Галактики — пузырями Ферми. Рассматриваются два механизма формирования излучения (взаимодействия быстрых протонов с веществом и релятивистских электронов с фоновыми фотонами) и два механизма ускорения (из фоновой плазмы и из нетеплового распределения космических лучей). Показывается, что протоны не способны воспроизвести наблюдаемый спектр излучения, и с большой долей вероятности гамма-излучение создано электронами. Ускорение электронов из фоновой плазмы оказывается менее эффективным, чем доускорение космических лучей. Последнее означает, что темп разогрева плазмы турбулентностью в пузырях Ферми минимален и не вызовет проблем при ускорении частиц. В данной главе предлагается интересная модель ускорения космических лучей высоких энергий от «колена» до «лодыжки» за счет стохастического ускорения в пузырях Ферми.

В **третьей главе** строится самосогласованная модель, описывающая взаимодействие космических лучей с молекулярными облаками. Исследуются роль потерь энергии частицами, вклад ядер в возбуждение волн, а также структуры (однородной и неоднородной) оболочки на потоки космических лучей. В главе получены универсальные аналитические

выражения для спектров космических лучей в молекулярных облаках с учетом экранировки. Автор показывает, как в неоднородной среде молекулярного облака формируется зона диффузии, и демонстрирует, что ее свойства не зависят от распределения газа в облаке. Указывается на роль ядер гелия и более тяжелых элементов при описании процесса экранировки.

Четвертая глава рассматривает вытекание космических лучей из диска Галактики в межгалактическую среду. В рамках простой одномерной задачи показывается, что возникающей из-за потоковой неустойчивости турбулентности достаточно, чтобы удерживать космические лучи в галактическом гало. При этом хорошо воспроизводятся экспериментальные данные по изотопному составу космических лучей. Следует отметить, что в модели предполагается, что коэффициент пространственной диффузии в диске очень большой в сравнении с гало Галактики, в силу чего распределение космических лучей в диске является однородным. Другими словами, в модели космические лучи внутри галактического диска могут свободно распространяться без рассеяния на большие расстояния, при этом изредка захватываясь турбулентностью молекулярных облаков.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Основные научные положения и выводы работы обоснованы, подтверждены теоретическими расчетами и экспериментальными результатами. Они обсуждались на международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 13 статьях в изданиях, индексируемых в международных библиографических базах Web of Science и Scopus.

Оценка новизны и практической значимости. Публикация результатов диссертационного исследования в высокорейтинговых международных журналах, а также доклады на российских и международных конференциях подтверждают новизну и значимость данных результатов. О научной и практической ценности работ говорит их хорошая цитируемость.

Полученные Д. О. Чернышовым результаты могут быть использованы в ИКИ РАН, ФТИ им. Иоффе РАН, ФИАН, ИЗМИРАН, МГУ им. М.В. Ломоносова и в ряде других организаций.

Диссертация написана ясным языком с использованием принятой в данном направлении исследований терминологии. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Оформление диссертации существенных замечаний не вызывает. Основные результаты работы полностью отражены в публикациях автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В качестве **замечаний и пожеланий** к представленной диссертации можно указать следующее.

1. При рассмотрении природы гамма-излучения пузырей Ферми предполагалось, что электроны ускоряются стохастическим механизмом. Почему не было рассмотрено, казалось бы, гораздо более эффективное ускорение ударными волнами?
2. Наличие сильного затухания волн, возбуждаемых космическими лучами в молекулярном газе, должно приводить к разогреву молекулярного газа. Тем не менее, в работе никак не обсуждается это явление.
3. Предсказанный спектр галактических космических лучей, описываемый формулой (4.37) достаточно сильно (сильнее, чем прямая пропорциональность) зависит от мощности источников. Вместе с тем, экспериментальные данные по радиальному распределению плотности космических лучей в Галактике говорят об обратном. Чем можно объяснить данное расхождение?
4. При решении ряда задач работы используется численный метод – метод установления. Автору следовало бы дать его краткое описание, указать погрешности.

Однако, сделанные замечания не меняют общей высокой оценки работы. Диссертация Д.О. Чернышова является законченным оригинальным научным

исследованием, вносящим существенный вклад в понимание процессов влияния космических лучей на среду, имеющим важное значение для астрофизики космических лучей.

По уровню и объёму выполненных исследований, степени научной новизны и ценности полученных результатов диссертационная работа **«Самосогласованные модели распространения и ускорения космических лучей»** полностью отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Чернышов Дмитрий Олегович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

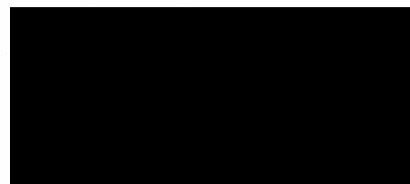
Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой радиофизики и теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Алтайский государственный университет»,

пр. Ленина, 61, Барнаул, 656049, Россия, тел. +7 (3852) 296668, e-mail: lagutin@theory.asu.ru,

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц, профессор

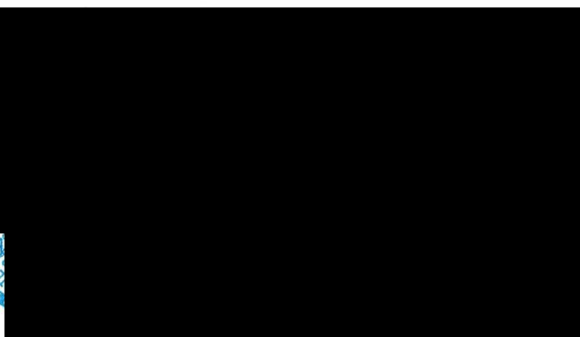


Лагутин Анатолий Алексеевич

23.09.2025 г.

Подпись удостоверяю:

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ: НАЧАЛЬНИК УПРАВЛЕНИЯ
ДОКУМЕНТАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШЕХТМАНТ



Основные работы Лагутина А. А. за последние 5 лет:

- 1) Lagutin A. A., Volkov N. V. Spectra of Protons and Helium Nuclei from Tevatrons Recorded in Satellite Experiments: Indication of Nonclassical Nature of Cosmic Ray Diffusion //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Т. 89. – №. 6. – С. 928-932.
- 2) Lagutin A. A., Volkov N. V. Non-classical Diffusion of the cosmic Rays in the Galaxy: Retrieval of Primary Nuclei spectra in sources //Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Т. 84. – №. 6. – С. 975-984.
- 3) Lagutin A. A., Volkov N. V., Raikin R. I. Interpretation of Fluxes of Cosmic-Ray Nuclei and Electrons within a Nonclassical Diffusion Model //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Т. 87. – №. 7. – С. 878-883.
- 4) Lagutin A. A., Volkov N. V. Where are the Pevatrons that Form the Knee in the Spectrum of the Cosmic Ray Nucleon Component around 4 PeV? //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 6. – С. 1076-1082.
- 5) Lagutin A. A., Volkov N. V. New Break Near 10 TeV in the Energy Spectrum of Protons According to Data from Space-Based Instruments: Astrophysical Interpretation //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 6. – С. 1069-1075.
- 6) Lagutin A. A., Volkov N. V. Features of the energy spectra of primary and secondary nuclei of cosmic rays: A consistent astrophysical interpretation //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2021. – Т. 85. – №. 4. – С. 375-378.
- 7) Raikin R. I. et al. Cosmic ray mass composition problem: toward model-independent evaluation based on the analysis of the spatial structure of EAS charged components //Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Т. 84. – №. 6. – С. 995-1006.