

ОТЗЫВ

официального оппонента **Быкова Андрея Михайловича** о диссертации 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

Большой объем наблюдательных данных высокого качества, полученный в последние годы многоканальной астрономией от радио до гамма лучей, наземными и орбитальными детекторами космических лучей, требует развития моделей ускорения и распространения частиц в источниках космических лучей, галактиках и межгалактической среде. Диссертационная работа Д.О. Чернышова посвящена исследованию преимущественно аналитических моделей взаимодействия космических лучей с МГД турбулентностью, генерируемой энергичными нетепловыми заряженными частицами. Такой подход в ряде случаев позволяет выделять ключевые параметры систем и получать удобные аналитические их оценки. Ограниченность возможностей аналитического рассмотрения нелинейных процессов, тем не менее позволяет изучать качественные особенности динамики сложных многомасштабных систем в интересных областях параметров и дополняет нелинейные компьютерные модели. В работе исследуются классы самосогласованных моделей, в которых предполагается, что МГД волны возбуждаются или поглощаются исключительно самими космическими лучами. Несмотря на то, что реальные физические объекты содержат также дополнительные источники и процессы поглощения МГД волн, вышеуказанный подход обладает определенным достоинством: он позволяет оценить связь характеристик МГД турбулентности и спектров космических лучей, используя хорошо определенные и поддающиеся измерениям параметры, такие как температура среды, ее плотность, а также величина магнитного поля. Подобные модели исследуются с 70х годов XX века и, в частности в ФИАН группами А.В.Гуревича и В.А.Догеля, однако, ввиду сложности проблемы построение новых моделей сохраняет бесспорную актуальность в настоящее время. Совершенствование экспериментальных установок по исследованию спектров космических лучей и производимого ими излучения позволяет выявлять новые детали, связанные с распространением и ускорением космических лучей, что, в свою очередь, требует развития теоретических моделей, описывающих данные процессы. Таким образом, создание теоретических моделей для космических лучей, содержащих минимальное количество свободных параметров, но при этом хорошо воспроизводящих особенности наблюдаемых спектров частиц, является одной из **актуальных** задач современной астрофизики космических лучей.

Текст диссертации состоит из введения, 4 глав и заключения. Список использованной литературы содержит 314 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы. Дан краткий обзор современного состояния исследований в данной области, обоснована цель и сформулированы решаемые в диссертации задачи.

Первая глава посвящена исследованию затухания изотропно распределенных МГД волн в тепловой плазме и связанному с этим процессом ускорения заряженных частиц – так называемому фермиевскому ускорению второго порядка или стохастическому ускорению. В данной главе исследуется, как энергия МГД волн распределяется между двумя частями спектра частиц: нетепловой частью, состоящей из ускоренных частиц, и максвелловской частью. Показано, что результат сильно зависит от положения вязкого масштаба в спектре турбулентности. Так, если вязкий масштаб слишком мал, то вся энергия волн будет идти

исключительно на разогрев тепловой компоненты распределения частиц, и при этом количество нетепловых частиц будет ничтожно мало. При больших значениях вязкого масштаба темп разогрева плазмы снижается, и в какой-то момент может смениться охлаждением. Количество нетепловых частиц при больших значениях вязкого масштаба становится значительным. Последний раздел данной главы посвящен самосогласованному вычислению значения вязкого масштаба. Демонстрируется, что при решении самосогласованной задачи формируются ярко выраженные нетепловые хвосты, а темп разогрева плазмы, как правило, не превышает темпа ее радиационного охлаждения.

Во **второй главе** теоретическая модель стохастического ускорения заряженных частиц применяется к актуальной астрофизической проблеме, вопросу происхождения излучения из так называемых пузырей Ферми – протяженных ярких в гамма-излучении областей, расположенных над и под галактическим центром. Рассматриваются два механизма формирования гамма-излучения: за счет распада нейтральных пионов, рожденных при взаимодействии релятивистских протонов с веществом, а также за счет комптоновского рассеяния мягких фотонов релятивистскими электронами. Демонстрируется, что протонный механизм не может обеспечить одновременного объяснения спектров гамма- и радиоизлучения. Применение самосогласованной модели к данной задаче демонстрирует, что ускорение электронов из фоновой плазмы также не способно адекватно воспроизвести спектры частиц. Однако если рассматривать дополнительное ускорение электронов космических лучей стохастическим механизмом, то удастся воспроизвести как спектры наблюдаемого гамма- и радиоизлучения, так и пространственное распределение гамма-излучения.

Третья глава рассматривает возбуждение МГД волн за счет потоковой неустойчивости, возникающей при поглощении космических лучей плотным газом, входящим в состав молекулярных облаков. Последовательно рассматривается несколько моделей распространения космических лучей с учетом их рассеяния на возбужденной турбулентности: начиная с простейшей модели с однородным распределением газа и отсутствием энергетических потерь, заканчивая моделью с неоднородной плотностью и наличием потерь для космических лучей. Демонстрируется, что учет дополнительного рассеяния на возбужденной турбулентности приводит к уменьшению спектральной плотности космических лучей в плотном молекулярном газе. В частности, для достаточно массивных молекулярных облаков этот эффект может повлиять на наблюдаемое из них гамма-излучение на энергиях ниже 1 ГэВ. Обсуждается также возможность обнаружения данного явления при наблюдении молекулярных облаков в радиодиапазоне.

Четвертая глава решает задачу, аналогичную задаче из третьей главы, но в контексте удержания космических лучей в Галактике. Предполагается, что МГД волны, возбужденные космическими лучами, покидающими Галактику, рассеивают данные космические лучи и способствуют их удержанию в протяженной зоне над галактическим диском – в так называемом гало Галактики. Приводится как аналитическое, так и численное решение данной задачи. Демонстрируется, что возбужденные МГД волны способны, без привлечения дополнительных источников турбулентности, обеспечить наблюдаемые в окрестности Земли спектры протонов и ядер. В том числе хорошо воспроизводятся отношения спектров вторичных ядер к первичным, а также нестабильных к стабильным, что свидетельствует об адекватности данной модели.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертации.

Новизна диссертации определяется получением результатов, ранее не описанных в литературе. В частности, было обнаружено возможное явление охлаждения плазмы при стохастическом ускорении, развиты новые подходы к вычислению спектров частиц в молекулярных облаках, предложены модели связи изломов в спектрах протонов и ядер космических лучей с вариациями температуры, и плотности газового гало Галактики.

Достоверность результатов диссертации подтверждается тем, что они используют достаточно апробированные методы теоретической физики и воспроизводят ранее известные результаты в качестве частных случаев. Результаты полностью опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых изданиях, апробированы на конференциях и семинарах, цитируются в международных изданиях.

Полученные результаты могут быть использованы для построения теоретических моделей происхождения космических лучей, а также для исследования влияния космических лучей на состояние межзвездного вещества и его эволюцию. Результаты диссертационного исследования также важны для интерпретации наблюдательных данных о спектрах космических лучей низких энергий. Это определяет **теоретическую и практическую значимость** диссертационной работы.

В целом, содержание диссертации можно характеризовать как заметное **научное достижение** в астрофизике космических лучей.

К работе имеются следующие **замечания**:

1. В первой главе диссертации автор подробно обсуждает полуаналитический подход к проблеме формирования надтепловых распределений частиц, мотивированный наблюдениями рентгеновского излучения скопления галактик Coma. Модель основана на квазилинейном приближении для описания процессов в **слабо турбулентной** горячей плазме. Такой подход позволил получить аналитические оценки для различных возможных режимов инжекции частиц в процесс ускорения Ферми, но имеет серьезные ограничения применимости к реальным объектам. Соотношения 1.61 и 1.62 используют выражения для изотропного колмогоровского каскада турбулентности, генерируемой космическими лучами. С другой стороны турбулентные каскады в слабо возмущенных МГД системах, вероятно, анизотропны и каскад вдоль среднего поля в стандартных моделях типа Голдрайха-Шриджара подавлен. Насколько оправдано использование выражения 1.62 в слабо турбулентной системе, и что может изменить анизотропный каскад?

2. Рост турбулентных полей при рассмотрении моделей гало или распространения космических лучей в молекулярных облаках определяется резонансной неустойчивостью (в частности, Глава 3, стр. 126, уравнение 3.3 и далее в Главе 4, уравнение 4.13). Усиление полей резонансной неустойчивостью, как правило, имеет заметные ограничения уровня генерированного магнитного поля. До какого уровня может быть усилено турбулентное поле относительно постоянного резонансной неустойчивостью? Какую роль могут играть нерезонансные неустойчивости и, в частности, неустойчивость Белла?

3. В диссертации (Глава 4, стр 191) предполагается, что вне диска Галактики (в гало) постоянное магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости Галактики. Наблюдения меры вращения внегалактических радиоисточников и галактических пульсаров (см., например, Рис. 6 в обзоре J.L. Han, Observing Interstellar and Intergalactic Magnetic Fields, Annual. Rev. Astron. Astroph. т.55. стр. 123, 2017) указывают на наличие тороидальной компоненты магнитного поля в гало Галактике, наряду с вертикальной

компонентой с напряженностью около 0.2 мкГс. Тороидальная компонента гало заметно присутствует также в основных моделях распространения космических лучей сверхвысоких энергий. Насколько изменятся результаты модели гало космических лучей в Главе 4, если тороидальная компонента магнитного поля сравнима или больше вертикальной?

4. В тексте диссертации присутствует некоторое число небольших опечаток, в частности:

а) В абзаце после выражения (2.40): «Наилучшее согласие с экспериментальными данными достигается при $v_0 = 10-15 \text{ с}^{-1}$ », обозначение v_0 ранее не встречается (возможно это ζ_0).

б) В выражении (4.8) альвеновская скорость обозначается разными буквами.

Указанные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертации и не снижают ее высокой оценки.

Все результаты диссертации опубликованы в 13 статьях в изданиях, индексируемых в международных библиографических базах Web of Science и Scopus. Они докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Самосогласованные модели распространения и ускорения космических лучей» представляет законченное исследование, обладающее научной новизной и имеющее теоретическую и практическую ценность. Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней №842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Чернышов Дмитрий Олегович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН

Быков А.М

Контактные данные:

тел.: +7(812) 2927160; e-mail: byk@astro.ioffe.ru

Адрес места работы:

194223, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26,
ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,

Подпись Быкова А.М. заверяю,
ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе
кандидат физ.-мат. наук

Патров М.И.

19.09.2025

Основные работы Быкова А.М. за последние 5 лет:

- 1) Bykov A. M. et al. High-energy particles and radiation in star-forming regions //Space Science Reviews. – 2020. – Т. 216. – №. 3. – С. 42.
- 2)Padovani M. et al. Impact of low-energy cosmic rays on star formation //Space Science Reviews. – 2020. – Т. 216. – №. 2. – С. 29.
- 3)Rankin, J. S., Bindi, V., Bykov, A. M., Cummings, A. C., Della Torre, S., Florinski, V., ... & Zhang, M. (2022). Galactic cosmic rays throughout the heliosphere and in the very local interstellar medium. //Space Science Reviews. – 2020. – Т. 218. – №. 5. – С. 42
- 4)Bykov A. M. et al. PeV photon and neutrino flares from galactic gamma-ray binaries //The Astrophysical Journal Letters. – 2021. – Т. 921. – №. 1. – С. L10.
- 5)Bykov A. M. et al. Antistars as possible sources of antihelium cosmic rays //Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2023. – Т. 2023. – №. 08. – С. 027.
- 6)Bykov A. M. et al. Uncovering magnetic turbulence in young supernova remnants with polarized X-ray imaging //The Astrophysical Journal. – 2020. – Т. 899. – №. 2. – С. 142.
- 7)Bykov A. M. et al. X-ray polarization: A view deep inside cosmic ray driven turbulence and particle acceleration in supernova remnants //Physical Review D. – 2024. – Т. 110. – №. 2. – С. 023041.
- 8)Badmaev D. V., Bykov A. M., Kalyashova M. E. Inside the core of a young massive star cluster: 3D MHD simulations //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Т. 517. – №. 2. – С. 2818-2830.
- 9)Bykov A. M. et al. PeV proton acceleration in gamma-ray binaries //Advances in Space Research. – 2024. – Т. 74. – №. 9. – С. 4276-4289.
- 10)Bykov A. M., Kalyashova M. E. Modeling of GeV-TeV gamma-ray emission of Cygnus Cocoon //Advances in Space Research. – 2022. – Т. 70. – №. 9. – С. 2685-2695.
- 11)Bykov A. M. et al. Sources of high-energy cosmic radiation //Uspekhi Fizicheskikh Nauk. – 2024. – Т. 194. – №. 4. – С. 384-403.
- 12)Bykov A. M. et al. PeV particle acceleration and nonthermal emission in the minimalist model of the extended jets in W50/SS433 //Physical Review D. – 2025. – Т. 112. – №. 6. – С. 063017.
- 13)Bykov A. M., Petrov A. E., Levenfish K. P. Relativistic Astrospheres of Pulsars and Gamma-Ray Binaries: Modeling of Non-thermal Processes //Fluid Dynamics. – 2024. – Т. 59. – №. 8. – С. 2377-2391.
- 14)Kropotina J. A. et al. Weibel-dominated quasi-perpendicular shock: hybrid simulations and in situ observations //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – Т. 524. – №. 2. – С. 2934-2944.
- 15)Bykov A. M., Osipov S. M., Romanskii V. I. Acceleration of Cosmic Rays to Energies above 1015 eV by Transrelativistic Shocks //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2022. – Т. 134. – №. 4. – С. 487-497.