

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор

Московского государственного
университета им М.В. Ломоносова

член-корреспондент РАН

профессор А.А. Федянин

«15 сентября» 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию **ЧЕРНЫШОВА** Дмитрия Олеговича «Самосогласованные модели распространения и ускорения космических лучей», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. — теоретическая физика.

Актуальность темы диссертации

Работа Д.О.Чернышова посвящена анализу определения ключевых параметров при ускорении и распространении космических лучей в Галактике. Автором представлены оригинальные модели максимально согласованные с имеющимися экспериментальными данными. Так как космические лучи играют важную роль в процессах, происходящих в Галактике и межгалактической среде, новые самосогласованные модели, учитывающие взаимовлияние космических лучей и среды, весьма актуальны. Эти модели могут дать теоретическое объяснение неожиданным результатам современных астрофизических экспериментов.

Краткое описание работы

Представленная диссертация объемом 272 страницы содержит введение, четыре нумерованных главы, заключение, список сокращений, список публикаций по теме диссертации, список литературы и список иллюстративного материала.

Во **введении** отражена актуальность темы исследования и степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и

практическая значимость, методы исследования, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, а также степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава посвящена исследованию диссертантом задачи о стохастическом ускорении электронов и протонов из тепловой плазмы за счет взаимодействия данных частиц с турбулентностью среды. В данной главе вычисляется темп разогрева плазмы, связанный с взаимодействием нетепловой компоненты в распределении частиц с частицами, входящими в максвелловское распределение. Демонстрируется, что в зависимости от параметров ускорения возможны разные сценарии эволюции функции распределения заряженных частиц. Так, автор воспроизводит один из частных случаев рассмотренный в литературе, когда взаимодействие турбулентности и заряженных частиц приводит лишь к разогреву плазмы без формирования заметной нетепловой компоненты в распределении частиц. Однако, как показывает автор, при иных значениях параметров перегрев плазмы может быть сведен к минимуму или даже смениться охлаждением. Ключевым параметром, который регулирует поведение плазмы, является значение вязкого масштаба турбулентности, самосогласованному вычислению которого посвящена вторая половина первой главы. Автор показывает, что при самосогласованном решении задачи о стохастическом ускорении охлаждения плазмы не наблюдается, разогрев плазмы происходит за значительное время в сравнении со временем стохастического ускорения, и, как следствие, данное ускорение способно формировать заметную нетепловую компоненту в распределении заряженных частиц.

Вторая глава посвящена применению полученной теоретической модели к пузырям Ферми – объектам в Галактике, наблюдаемым в гамма- и радиодиапазоне, и содержащим большое количество нетепловых частиц – космических лучей. Автор проводит анализ двух моделей происхождения гамма-излучения: за счет обратно-комптоновского излучения релятивистских электронов, а также за счет распада нейтральных пионов, рожденных при взаимодействии релятивистских протонов. При этом демонстрируется, что чисто протонная модель этого процесса невозможно, и как минимум 20% гамма-излучения должны производиться электронами. В качестве источника происхождения релятивистских электронов автор предлагает использовать рассмотренное в первой главе стохастическое ускорение. При этом он демонстрирует, что ускорение из фоновой плазмы в пузырях Ферми малоэффективно, а наиболее вероятным источником является ускорение электронов космических лучей, произведенных остатками сверхновых в Галактике. При этом удастся воспроизвести как спектр излучения пузырей Ферми, так и их пространственную форму. Последний раздел данной главы

применяет модель доускорения космических лучей к протонам, произведенным остатками сверхновых в Галактике. Тем самым предлагается объяснить происхождения космических лучей, наблюдаемых в окрестности Земли, в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 1 ЭэВ.

Третья глава исследует взаимодействие космических лучей с молекулярным газом. Рассматривается рассеяние заряженных частиц, проникающих в молекулярный газ, турбулентностью, которую они сами, за счет потоковой неустойчивости, возбуждают. Анализируется распространение как релятивистских космических лучей, потерями которых можно пренебречь в рассматриваемой автором области молекулярного газа, так и нерелятивистских частиц, которые испытывают значительные энергетические потери. Также показывается, что для решения данной задачи необходимо учитывать вариации плотности газа в облаке, так как в облаках постоянной плотности данная задача не имеет самосогласованного решения. Данная теория применяется для описания гамма- и радиоизлучения отдельных молекулярных облаков, а также гамма-излучения всей Галактики. Автор демонстрирует, что эффект от рассеяния частиц на собственной турбулентности, хоть и небольшой по величине, но может быть обнаружен экспериментально.

В четвертой главе рассматривается модель удержания космических лучей в Галактике за счет возбужденной ими турбулентности. В качестве механизма возбуждения турбулентности предлагается потоковая неустойчивость, вызванная убеганием космических лучей из диска Галактики. Затухание турбулентности обеспечивается за счет ион-нейтрального трения на малых расстояниях от диска и за счет нелинейного затухания Ландау на больших расстояниях. Демонстрируется, что данная модель способна хорошо описать спектры протонов и ядер космических лучей со всеми их особенностями в диапазоне энергий от нескольких ГэВ до нескольких десятков ТэВ.

В заключении приводятся основные результаты диссертации, и обсуждается их дальнейшее возможное развитие.

Таким образом, диссертация содержит **новые научные результаты**, связанные с построением самосогласованных теоретических моделей распространения космических лучей, и по своей теме и содержанию относится к научной специальности 1.3.3. «Теоретическая физика» по физико-математическим наукам.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации обеспечивается корректным использованием методов теоретической физики, сводимостью результатов исследования к известным ранее частным случаям, а также фактом их апробации путем опубликования в ведущих научных журналах.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации, и удовлетворяет требованиям, указанным в действующем Положении о присуждении ученых степеней и действующем ГОСТ.

Значимость результатов диссертации для развития физико-математических наук

Результаты диссертации являются **крупным научным достижением** в теоретической физике и проясняют некоторые процессы, происходящие при ускорении и распространении космических лучей. Данное направление представляет современный интерес, и о его **актуальности** свидетельствует включение его в Перечень приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021 - 2030 годы, утвержденного распоряжением правительства Российской Федерации № 3684-р от 31 декабря 2020 г (1.3.3.4. Физика космических лучей).

Теоретическая значимость результатов диссертации связана с необходимостью построения моделей распространения космических лучей с минимальным набором трудноопределимых параметров. Так, наиболее принятый в настоящее время подход при описании распространения космических лучей в Галактике или в окрестности иных астрофизических объектов меньшего масштаба заключается в том, что коэффициент пространственной диффузии является параметром задачи, и фиксируется, например, исходя из требований наблюдений. Хотя такой подход достаточно обоснован и позволяет получить интересные результаты, он не позволяет объяснить появление особенностей в спектре космических лучей, наблюдаемом у Земли, или установить закономерности, связанные с проникновением космических лучей в астрофизические объекты или убеганием из них. Самосогласованный подход к решению задач о проникновении или убегании космических лучей позволяет вычислить значение коэффициента пространственной диффузии, используя информацию о внешней среде в окрестности того или иного объекта. Соответственно, данный подход допускает простую экспериментальную проверку, поскольку поведение космических лучей в окрестности астрофизических объектов является предсказуемым.

Модель стохастического ускорения заряженных частиц из фоновой плазмы решает важную задачу теории ускорения космических лучей – проблему инжекции. Она показывает, что стохастическое ускорение может непосредственно ускорять частицы, входящие в максвелловское распределение, и при этом не требует никаких дополнительных механизмов «предускорения». Модель проникновения космических лучей в молекулярные облака позволяет продвинуться как в теоретических задачах, связанных, например, с описанием процессов коллапса молекулярных облаков и звездообразования, так и в экспериментальных исследованиях в области космических лучей. Данная модель позволяет более аккуратно установить спектры космических лучей по спектрам их излучения в молекулярном газе. Это особенно актуально при нерелятивистских энергиях космических лучей, где источников информации об их спектре крайне мало. Самосогласованная модель гало позволяет установить природу турбулентности в гало нашей Галактики и ее роль в транспорте космических лучей.

Результаты диссертации найдут свое применение в научных организациях, занимающихся исследованием космических лучей, а также смежными тематиками.

Работа, в целом, выполнена на высоком уровне, но содержит ряд недостатков, в частности:

1. В первой главе автор воспроизводит один из частных случаев, рассмотренный в литературе, когда взаимодействие турбулентности среды и заряженных частиц приводит лишь к разогреву плазмы без формирования заметной нетепловой компоненты в распределении частиц. Однако, как показывает автор, при иных значениях параметров перегрев плазмы может быть сведен к минимуму или даже смениться охлаждением. Последняя возможность кажется контринтуитивной и парадоксальной, так как, на первый взгляд, входит в противоречие с вторым началом термодинамики. Однако более внимательный анализ показывает, что никакого противоречия тут нет, так как мы, по сути, имеем дело с открытой системой, содержащей потоки энергии, а в такой системе могут идти спонтанные процессы самоорганизации — в данном случае это перекачка энергии из тепловой энергии в нетепловое распределение ускоренных частиц. В качестве пожелания можно предложить автору дать расширенный комментарий обнаруженного явления.

2. Во второй главе автор применяет модель доускорения космических лучей к протонам, произведенным остатками сверхновых в Галактике. Тем самым предлагается объяснить происхождения космических лучей, наблюдаемых в окрестности Земли, в диапазоне от 1 ПэВ т.е. после “колена”. Это, конечно, прорывное решение загадки происхождения космических лучей таких

энергий. И по времени оно совпадает с экспериментальным достижением последних трех лет – регистрацией гамма-квантов очень высоких энергий более (100 ТэВ) от 42 источников в эксперименте LHAASO. Что в случае адронного происхождения этого излучения свидетельствует о наличии источников адронов в области 1-10 ПэВ, Пэватронов. Большинство этих источников не точечные, и в некоторых из них не наблюдается излучения в других диапазонах волн. Допускаем, что предложенная автором модель и должна приводить к указанным экспериментальным результатам. Однако, на наш взгляд не хватает анализа пространственного распределения доускоренных частиц, хотя бы грубой оценки анизотропии. Это не является замечанием, а лишь пожеланием провести расчеты в этом очень актуальном направлении.

4. В четвертой главе при сравнении предсказаний модели с экспериментальными спектрами космических лучей, автор, на наш взгляд, несколько переоценивает результаты проведенного моделирования. Рассмотренная модель иллюстрирует эффекты, связанные с взаимодействием космических лучей со средой. В модели принимается предположение, что космические лучи вообще не рассеиваются в плоскости галактического диска, и всё их удержание в объеме Галактики осуществляется исключительно за счет магнитного гало. Это является очень сильным упрощением. Тем не менее, модель является осмысленной и полезной в том отношении, что она, в принципе, показывает, что, во-первых, одних только космических лучей действительно достаточно для генерации сильной турбулентности магнитного поля гало Галактики, которая уже сама по себе может удерживать космические лучи; во-вторых, модель показывает, что рассмотренный механизм может генерировать сложные структуры в спектре космических лучей, поэтому должен рассматриваться наряду с другим возможными механизмами для объяснения особенностей спектра космических лучей вроде «малого» колена вблизи магнитной жесткости 10ТВ или прогиба вблизи 500ГВ.

5. На стр.113 сказано: «Толща определяется по химическому составу космических лучей, и для энергий до нескольких ГэВ она оценивается в указанной работе [278] как...». Однако насколько применима экстраполяция этой зависимости на высокие энергии? Последние эксперименты (например, НУКЛОН) показали изменение зависимости отношения потоков первичных и вторичных ядер на высоких энергиях. Нам представляется, что этот факт следует учитывать.

6. На стр.114-115 обсуждается диффузия в пузырях Ферми. Возникает вопрос, является ли эта диффузия изотропной? И как предположение об анизотропии может повлиять на результат расчетов? Это не является замечанием, а, скорее, предложением автору продолжить работы в этом направлении.

7. На Рис. 2.12 на стр. 117 использованы результаты очень старых экспериментов. На данный момент в данном энергетическом диапазоне доступны гораздо более точные данные, например AMS 2, CREAM, НУКЛОН, CALET, DAMPE, TAIGA, LHAASO, и др.

8. На Рис. 4.4 на стр. 221 в данных эксперимента НУКЛОН не показано наличия малого «колена» в спектре ядер космических лучей.

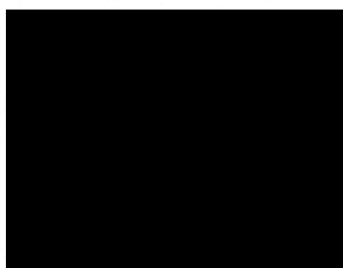
Перечисленные пожелания и замечания ни в коей мере не умаляют высокой ценности выполненной диссертантом работы.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация «Самосогласованные модели распространения и ускорения космических лучей» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым действующим Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Чернышов Дмитрий Олегович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. «Теоретическая физика».

Отзыв составил

Заведующий Лабораторией
галактических космических лучей
ОКН НИИЯФ МГУ
к.ф.-м.н.



Д.М.Подорожный

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на семинаре Отдела космических наук 02 июля 2025 г.

Заведующий Отделом космических наук
НИИЯФ МГУ

д.ф.-м.н.



В.В.Калегаев

Директор НИИЯФ МГУ
чл.-корр. РАН, профессор

Э.Э.Боос

Основные работы сотрудников НИИЯФ МГУ за последние 5 лет

- 1) Podorozhny D. et al. Review of the results from the NUCLEON space mission // *Advances in Space Research*. – 2022. – Т. 70. – №. 5. – С. 1529-1538.
- 2) Kurganov A. et al. Fragmentation of Cosmic Ray Nuclei and Its Experimental Study // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 637-649.
- 3) Podorozhny D. M. et al. Experimental Study of Galactic Cosmic Ray Fluxes in the Solar Modulation Energy Range // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2025. – Т. 89. – №. 6. – С. 933-938.
- 4) Kudryashov I. A. et al. Fluxes and Spectral Indices of Rare and Abundant Nuclei in Cosmic Rays, According to Data from the NUCLEON Satellite Experiment // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2023. – Т. 87. – №. 7. – С. 870-873.
- 5) Panov A. D., Podorozhnyi D. M., Turundaevskii A. N. Direct observations of cosmic rays: state of the art // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. – 2024. – Т. 194. – №. 7. – С. 681-710.
- 6) Kudryashov I. A. et al. Interpreting the Knee of Cosmic Rays near 10 TV as the Contribution from a Close Source // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2021. – Т. 85. – №. 4. – С. 379-382.
- 7) Kuzmichev L. A. et al. Cosmic Ray Study at the Astrophysical Complex TAIGA: Results and Plans // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2021. – Т. 84. – №. 6. – С. 966-974.
- 8) Kalegaev V. et al. Medium-term prediction of the fluence of relativistic electrons in geostationary orbit using solar wind streams forecast based on solar observations // *Advances in Space Research*. – 2023. – Т. 72. – №. 12. – С. 5376-5390.
- 9) Shugay Y. et al. Modeling of solar wind disturbances associated with coronal mass ejections and verification of the forecast results // *Universe*. – 2022. – Т. 8. – №. 11. – С. 565.
- 10) Vlasova N. A., Kalegaev V. V. On Consistent Dynamics of the Magnetic Field and Relativistic Electron Fluxes in the Geostationary Orbit Region // *Cosmic Research*. – 2024. – Т. 62. – №. 4. – С. 339-349.
- 11) Kalegaev V. et al. Solar Energetic Particles and Trapped Radiation in the Near-Earth Space: Space Experiments and Modelling // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2021. – Т. 84. – №. 6. – С. 1105-1113.