

Отзыв официального оппонента главного научного сотрудника ФГБУН
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В.Пушкова Российской Академии Наук (ИЗМИРАН)

Зиракашвили Владимира Николаевича

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

Диссертационная работа Д.О.Чернышова посвящена астрофизике космических лучей (КЛ), в особенности задачам, связанным с влиянием частиц КЛ на среду, в которой частицы распространяются. Внимание к этой теме в первую очередь связано с проблемой происхождения КЛ. Данное исследование позволяет судить о процессах, связанных с ускорением и распространением КЛ, что является важной астрофизической задачей.

В последнее время в экспериментах по регистрации КЛ обнаружены особенности в спектрах различных компонент КЛ, таких как более жесткие, чем спектры протонов, спектры ядер, уплощение спектров КЛ при энергиях выше 100 ГэВ на нуклон и др. Эти особенности могут оказаться важными для понимания происхождения галактических КЛ, а также использованы для проверки различных моделей ускорения и распространения КЛ в Галактике. Кроме того, в наблюдательной астрофизике в последние десятилетия также были сделаны важные открытия, связанные с КЛ, такие как гигантские галактические пузыри гамма-излучения (пузыри Ферми), открытие астрофизических нейтрино, наблюдение диффузного гамма-излучения с энергиями больше 100 ТэВ от галактического диска и т.д.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и приводятся основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается стохастическое ускорение КЛ и исследуется влияние ускоренных частиц на плазму, что обычно сводится к перегреву плазмы за счет кулоновских столкновений ускоренных частиц с тепловыми частицами. В начале рассматривается упрощенная задача, когда темп ускорения и минимальный импульс ускорения являются свободными параметрами. Показано, что в этом случае возможен как нагрев, так и охлаждение плазмы. Последний случай реализуется, когда темп ускорения достаточно высок, а минимальный импульс сравним с тепловым. Далее рассматривается более реалистичный случай, учитывающий эволюцию спектра волн, определяющих стохастическое ускорение. Для этого случая,

когда минимальный импульс не является свободным параметром, показано, что всегда имеет место только разогрев плазмы.

Во второй главе рассматривается стохастическое ускорение КЛ в пузырях Ферми. Исследуются несколько моделей. Наиболее реалистичная модель подразумевает доускорение электронов КЛ на границе пузырей Ферми и конвективный перенос доускоренных частиц. При этом удается получить хорошее согласие с наблюдаемыми радио и гамма-излучением, произведенным электронами в пузырях Ферми. Похожая модель доускорения протонов более высоких энергий ансамблем ударных волн в пузырях Ферми позволяет объяснить непрерывность наблюдаемых спектров КЛ в области «колена» при энергии в несколько ПэВ.

В третьей главе исследуется проникновение КЛ в молекулярные облака. Рассматривается упрощенная одномерная задача. Проникновение частиц КЛ определяется конвективным переносом с альфвеновской скоростью, диффузией и энергетическими потерями. Показано, что проникновение КЛ с энергиями меньше нескольких ГэВ в молекулярные облака затруднено. Модель применяется для анализа гамма-излучения от нескольких галактических молекулярных облаков.

В четвертой главе рассматривается самосогласованная модель распространения КЛ в гало Галактики. Частицы КЛ возбуждают альфвеновские волны за счет потоковой неустойчивости и рассеиваются на этих волнах. Перенос частиц сводится к конвекции и диффузии. Учтены нелинейное затухание волн и затухание волн из-за присутствия в среде нейтральных атомов. Получены приближенное аналитическое решение и численное решение для протонов и ядер КЛ. Полученные результаты находятся в неплохом согласии с экспериментальными данными.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и новизна

Диссертация написана кратко и ясно, использованные подходы и методы изложены подробно и являются хорошо обоснованными. Кроме численного моделирования, часто используются приближенные аналитические решения уравнений. Все результаты, полученные автором, являются новыми.

Из интересных результатов следует отметить более сильный эффект по подавлению проникновения КЛ в молекулярные облака (3-я Глава) по сравнению с результатами работы Cesarsky & Volk (1978).

Замечания

- 1) Из текста не ясно, учитывается ли адиабатическое изменение энергии частиц в уравнении (3.1) в 3-й Главе. Этот эффект может быть важен на границе облака, где плотность газа увеличивается.
- 2) Как и отмечено автором, результаты расчетов самосогласованной модели распространения КЛ в Галактике (Глава 4) сильно зависят от формы нелинейного затухания Ландау альфвеновских волн. К сожалению, в настоящее время нет полной ясности в этом вопросе. В одномерном случае, рассмотренном автором, такое затухание действительно имеет место. Однако в более общем 3-х мерном случае волны, распространяющиеся в одной полусфере волновых векторов не взаимодействуют друг с другом (см. В.Н.Зиракашвили ЖЭТФ Т. 117, С. 93 (2000)). В ионизированном газе гало может также играть роль затухание альфвеновских волн из-за присутствия фоновой анизотропной МГД турбулентности (Farmer & Goldreich 2004).

Указанные замечания никоим образом не снижают ценность проделанной работы. Диссертация Д.О.Чернышова выполнена на высоком научном уровне, получены несколько новых интересных результатов. Диссертация полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Д.О.Чернышов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Главный научный сотрудник

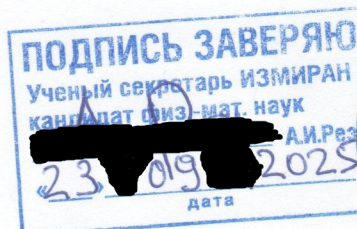
Лаборатории астрофизических исследований ИЗМИРАН

д.ф.-м.н.

Зиракашвили Владимир Николаевич

23.09.2025

Федеральное государственное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской Академии Наук (ИЗМИРАН), 108840 Москва, Троицк, Калужское шоссе д.4, ИЗМИРАН
тел. (495)8510925, e-mail:zirak@izmiran.ru



Основные работы Зиракашвили В.Н. за последние 5 лет:

- 1) Zirakashvili V. N., Ptuskin V. S., Rogovaya S. I. Galactic origin of ultrahigh energy cosmic rays //Physical Review D. – 2024. – Т. 110. – №. 2. – С. 023016.
- 2)Zirakashvili V. N., Ptuskin V. S., Rogovaya S. I. Ultra high energy cosmic rays from past activity of Andromeda galaxy //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2023. – Т. 519. – №. 1. – С. L5-L9.
- 3)Prosin V. V. et al. Spectrum and Composition of Primary Cosmic Rays, According to Data from the TAIGA-HiSCORE Array //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Т. 89. – №. 6. – С. 907-912.
- 4)Zirakashvili V. N., Ptuskin V. S. Role of the radiative stage for cosmic ray acceleration in SNRs //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Т. 510. – №. 2. – С. 2790-2796.
- 5)Zirakashvili V. N., Ptuskin V. S., Rogovaya S. I. Combined Diffusive Shock and Shear Acceleration in Astrophysical Jets //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 6. – С. 1232-1234.
- 6)Zirakashvili V. N., Ptuskin V. S., Rogovaya S. I. Contribution from Nearby Sources to the Observed Spectra and Anisotropy of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Т. 87. – №. 7. – С. 890-892.
- 7)Ptuskin V. S., Zirakashvili V. N. On the Diffusion of Cosmic Rays with a Back Reaction on the Cascade of Magnetosonic Waves in the Interstellar Medium //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2021. – Т. 85. – №. 4. – С. 363-365.