



Взаимодействие космических лучей с ударными волнами в межпланетной среде, Галактике и скоплениях галактик

Аспирант : Дорошева Дина Николаевна

Научный руководитель: Кумпан Александр Вячеславович

1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика
высоких энергий

19.01.2026

Актуальность



- Одной из проблем диффузного ускорения частиц является эффект Форбуша — понижение интенсивности галактических космических лучей ГэВ-ных энергий за фронтом межпланетных ударных волн, возбуждаемых корональными выбросами массы. Наблюдаемое подавление потока высокоэнергичных частиц противоречит ожиданиям стандартной теории диффузионного ускорения, которая предсказывает увеличение плотности ускоренных частиц вблизи ударного фронта.
- Аналогичные противоречия возникают и при интерпретации свойств радио-реликтов в скоплениях галактик, где спектры радиоизлучения указывают на сильные ударные волны с большими числами Маха, тогда как рентгеновские наблюдения, как правило, дают существенно меньшие значения.
- Одним из возможных объяснений является эффект магнитного отражения Паркера. В отличие от стандартной теории диффузионного ускорения, магнитное отражение приводит к уменьшению числа частиц, проникающих за фронт ударной волны, и может естественным образом объяснять наблюдаемое снижение интенсивности космических лучей за ударом. Несмотря на физическую наглядность этого механизма, он, как правило, либо полностью игнорируется, либо учитывается лишь приближённо в современных моделях ускорения и распространения космических лучей.
- Кроме того, процессы доускорения КЛ ударными волнами в межпланетной среде широко используются в современных моделях переноса частиц в Галактике, однако в большинстве случаев описываются без строгого аналитического обоснования.

Цели и задачи



Цель исследования заключается в количественном анализе механизмов ускорения и доускорения заряженных частиц на ударных волнах в космической плазме с учётом эффектов магнитного отражения, а также в проверке применимости соответствующих теоретических моделей к наблюдаемым спектрам космических лучей в межпланетной, межзвёздной и внегалактической средах.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение следующих задач:

- исследовать влияние магнитного отражения заряженных частиц от фронта ударной волны на формирование энергетических спектров ускоренных частиц и определить условия, при которых данный механизм приводит к существенным отклонениям от предсказаний стандартной теории диффузионного ускорения;
- провести анализ возможности объяснения эффекта Форбуша в рамках модели магнитного отражения, и установить связь между наблюдаемой амплитудой эффекта и физическими параметрами ударных волн, возбуждаемых корональными выбросами массы;
- проверить применимость различных сценариев ускорения электронов для интерпретации наблюдаемых свойств радио-реликтов в скоплениях галактик, включая оценку роли силы ударной волны и предварительного спектра частиц;
- объяснить расхождения между числами Маха, получаемыми из радио- и рентгеновских наблюдений ударных волн в скоплениях галактик, в рамках модифицированных моделей ускорения частиц.

Диффузное ускорение. Классическая теория



$$u(x) \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa(p) \frac{\partial f}{\partial x} \right] + \frac{1}{3} p \frac{\partial f}{\partial p} \frac{du}{dx},$$

где $u(x)$ – скорость плазмы, зависящая от координаты x , $f(x, p)$ – стационарное распределение частиц по импульсу и координате, $\kappa(p)$ – коэффициент диффузии, предполагаемый изотропным и зависящим только от импульса.

Рассматривая движение частиц в фазовом импульсном пространстве и условия непрерывности потока частиц, Крымский находит функцию распределения частиц по разным сторонам от фронта. Часть потока увеличивает импульс вследствие адиабатического ускорения частиц.

Крымский делает вывод о том, что ускорение частицы становится регулярным, при достаточной энергии она может неоднократно пересекать фронт и доускоряться. Поэтому данный процесс является статистическим и может быть описан аналитически.

Горячая корона после вспышки рассматривается как источник гидродинамической ударной волны, уходящей в межпланетную среду со скоростями порядка $\sim 10^3$ км/с. Эта волна:

1. сжимает/сдвигает “тихую” компоненту солнечного ветра;
2. создаёт область усиленного Вза фронтом ударной волны;
3. действует как магнитный барьер для галактических КЛ, наблюдается падение интенсивности за фронтом (Forbush decrease).

Существенный вывод: за фронтом ударной волны азимутальная компонента может сильно возрасти, а полный модуль B должен иметь скачок на фронте.

Для низких энергий (условно $\lesssim 10$ ГэВ) используется приближение ведущего центра: частица в среднем следует магнитной силовой линии, а фронт рассматривается как резкая граница (почти разрыв).

Ключевой геометрический фактор у Паркера:

$$\cos \theta = \frac{B_r}{B},$$

где θ – угол между силовой линией и радиус-вектором, B_r – нормальная (радиальная) компонента, B – полный модуль поля.

Он определяет, какая доля потока космических лучей реально проходит через фронт ударной волны в радиальном направлении.

Современные работы пересматривают классическую нелинейную теорию диффузионного ускорения космических лучей. Было показано, что ранние модели переоценивали влияние ускоренных частиц на структуру ударной волны и приводили к чрезмерно жёстким спектрам, плохо согласующимся с наблюдениями.

Дальнейшее развитие было связано с выходом теории за рамки отдельных источников. Работы, посвящённые скоплениям галактик, показали, что стандартный механизм диффузионного ускорения, успешно применяемый к остаткам сверхновых, сталкивается с серьёзными ограничениями в межгалактической среде. Численные MHD-симуляции и наблюдения Fermi-LAT указывают на преобладание слабых и умеренных ударных волн и отсутствие ожидаемого гамма-излучения от pp-взаимодействий. Это означает низкую эффективность инжекции протонов и сильную зависимость ускорения от геометрии магнитного поля, что требует альтернативных или модифицированных сценариев.

Современные обзоры (2019–2023 гг.) рассматривают диффузионное ускорение как часть более широкой картины, включающей транспорт космических лучей, эволюцию магнитных полей и обратную связь с плазмой. Подчёркивается, что в скоплениях галактик ускорение электронов и протонов принципиально различается, а космические лучи выступают не только как ускоряемая, но и как динамически активная компонента, вносящая вклад в давление и термодинамику среды.

В современных исследованиях диффузного радиоизлучения в скоплениях галактик показано, что оно связано с релятивистскими электронами и магнитными полями. Среди различных типов протяжённых радиоисточников особое внимание привлекают радио-реликты, которые рассматриваются как наиболее прямое наблюдательное проявление ударных волн, возникающих при динамических процессах, прежде всего при слияниях скоплений галактик.

Радио-реликты

Радио-реликты обладают следующими характерными свойствами:

- расположение на периферии скоплений галактик;
- высокая степень линейной поляризации (до 50–60%), указывающая на упорядоченное магнитное поле;
- крутые радио-спектры ($\alpha \sim -1$ и круче).

В рамках DSA спектральный индекс радиоизлучения α связан с числом Маха ударной волны \mathcal{M} :

$$\alpha_{\text{inj}} = -\frac{\mathcal{M}^2 + 3}{2(\mathcal{M}^2 - 1)}.$$

Соответственно, по наблюдаемым радио-спектрам можно восстановить эффективное число Маха ударной волны. Для большинства радио-реликтов такие оценки дают

$$\mathcal{M}_{\text{radio}} \sim 3-5,$$

что указывает на относительно сильные ударные волны.

Однако, рентгеновские данные, как правило, дают:

$$\mathcal{M}_x \lesssim 2,$$

то есть существенно более слабые ударные волны, чем требуется для объяснения наблюдаемых радио-спектров в рамках стандартного DSA.

Во введении формулируются цель и задачи исследования, обосновывается актуальность работы, рассматривается её научная новизна, а также кратко описываются используемые подходы и структура работы.

Первая глава будет посвящена эффекту Форбуша как одному из ключевых наблюдательных проявлений взаимодействия галактических космических лучей с ударными волнами в межпланетной среде. В главе будут рассматриваться основные наблюдательные свойства эффекта Форбуша, его энергетическая зависимость и связь с корональными выбросами массы. Будут обсуждаться существующие теоретические модели интерпретации эффекта, их ограничения и противоречия с наблюдениями.

Вторая глава будет посвящена физике межпланетных ударных волн и процессам ускорения и доускорения частиц в гелиосфере. Будут рассматриваться основные параметры ударных волн, их классификация и условия формирования. В главе проведется сопоставление теоретических предсказаний с результатами наблюдений межпланетных ударных волн и будет обсуждаться вклад различных физических механизмов в формирование наблюдаемых спектров частиц.

Третья глава будет посвящена ударным волнам в скоплениях галактик и проблеме интерпретации наблюдаемых радио-реликтов. Будут рассматриваться основные свойства ударных волн в межгалактической среде, методы определения их параметров по радио- и рентгеновским наблюдениям, а также существующие сценарии ускорения электронов.