



# **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

# 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.

# Теория Паркера

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  $V$  за 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.

$$\Delta\mu \sim \mu_0 \frac{4(1-\Psi)}{\lambda\Psi} \frac{r}{\omega t} \left\{ 1 - \frac{4(4-\lambda)r}{3\lambda\Psi\omega t} + \dots \right\}$$

Ключевой геометрический фактор у Паркера:

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

где  $\theta$  – 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.

# Теория Вебба

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{\kappa} \nabla f) - \mathbf{V} \cdot \nabla f + \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{V}) p \frac{\partial f}{\partial p} + Q,$$
$$\left\langle \frac{dp}{dt} \right\rangle = \frac{1}{3} p \mathbf{V} \cdot \mathbf{G}$$

Использовалась упрощённая форма результата Вебба:

$$N_1 - N_2 = -\frac{2\mu_0^3}{1 - \mu_0^2} \frac{j_1}{v \cos \psi_1},$$
$$j_1 = -\frac{Vp}{3} \frac{\partial N}{\partial p}$$

$N_1 - N_2$ — скачок плотности КЛ;

$\mu_0$ — критический питч-угол;

$\psi_1$ — угол между магнитным полем и нормалью к фронту;

формула используется как приближённая оценка.

$$\mu_0^2 = 1 - B_1/B_2$$

Полагаем, что спектр галактических КЛ степенной по импульсам  $N(p) \sim p^{-(\gamma+2)}$ , где  $\gamma=2.5$  – показатель энергетического спектра

# Отбор событий

Отбор событий:

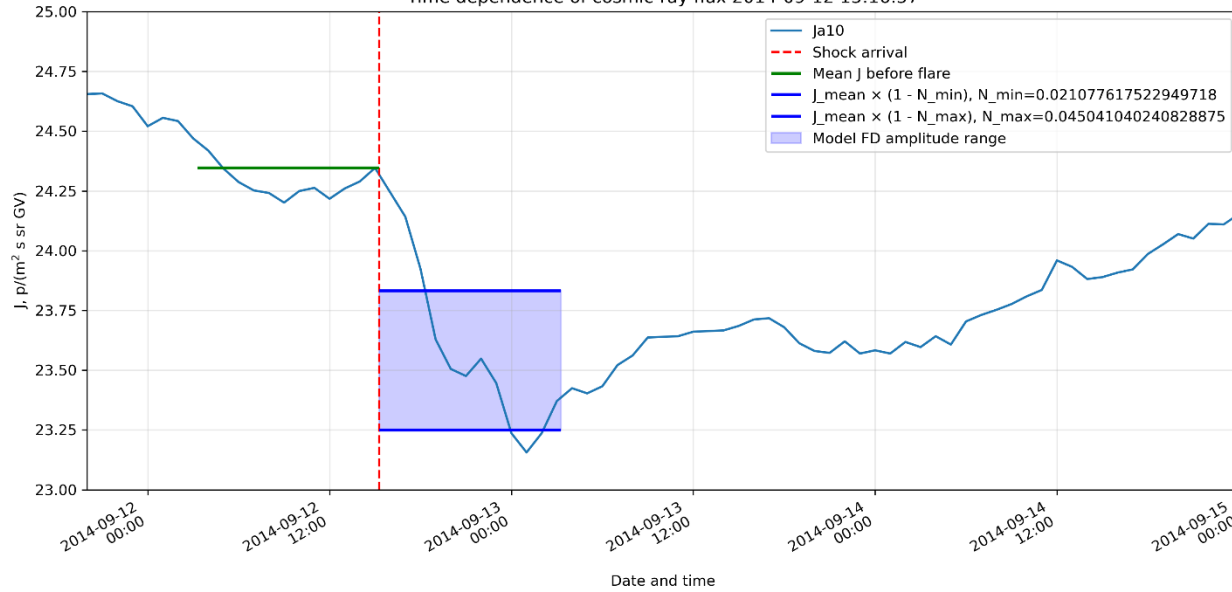
- 5 межпланетных ударных волн;
- данные Wind и ACE;
- каталог IPshocks;
- скачок скорости солнечного ветра  $> 100$ ;
- хорошо определенный угол  $\theta$ ;
- одиночные ударные волны.

Данные КЛ:

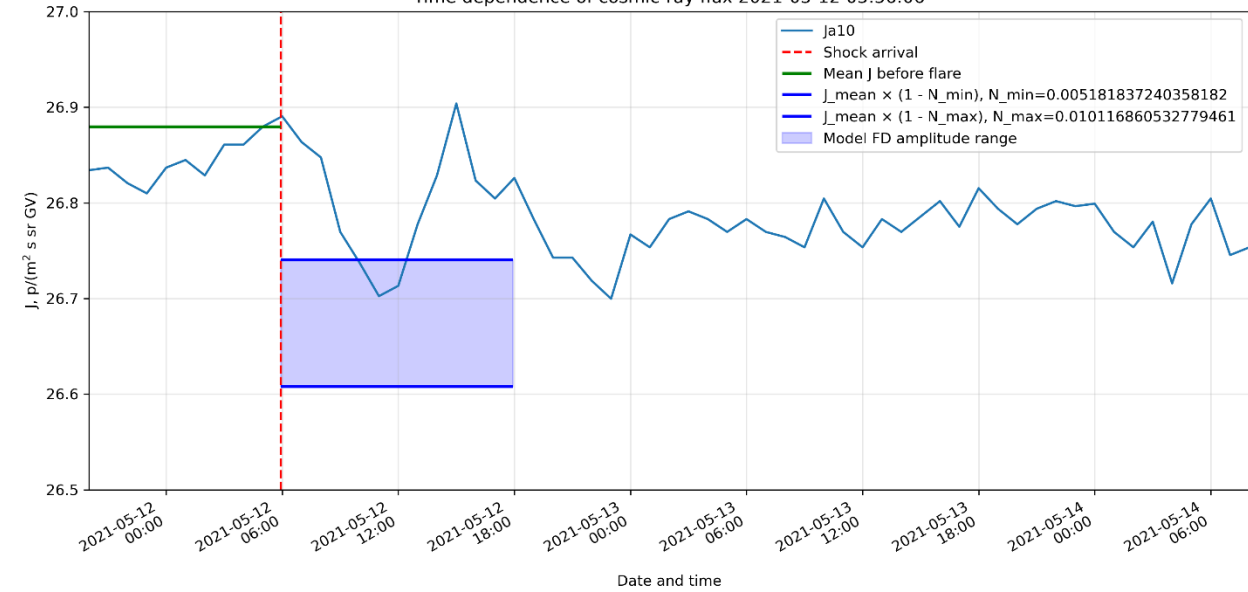
- Московский нейтронный монитор ИЗМИРАН;
- построены временные профили интенсивности;
- рассчитан диапазон амплитуд по модели

# Результаты

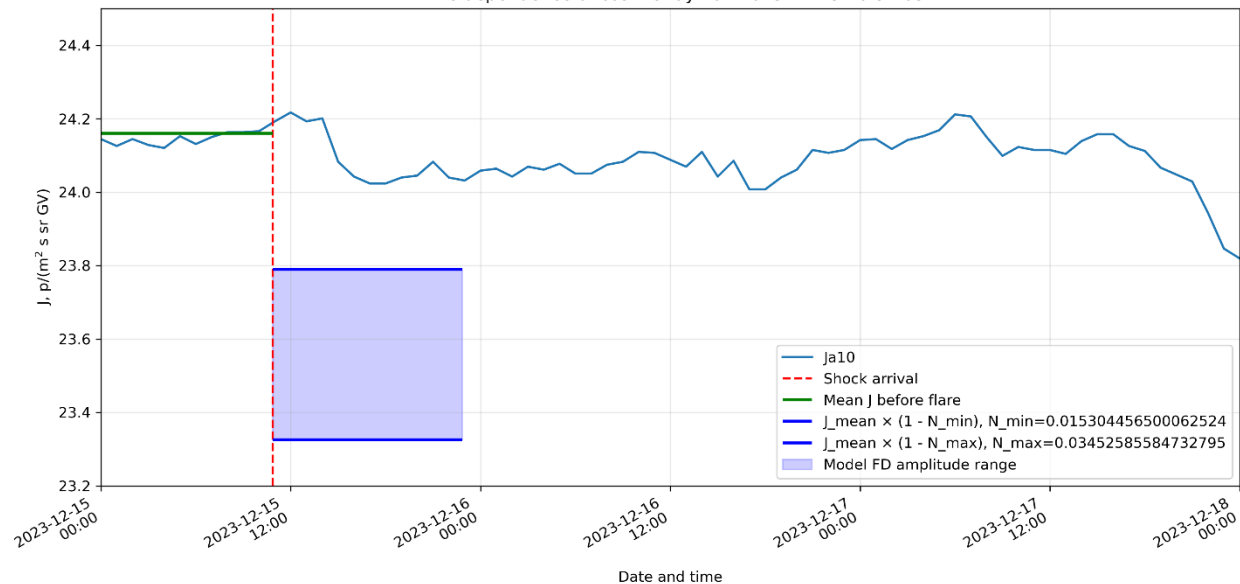
Time dependence of cosmic-ray flux 2014-09-12 15:16:57



Time dependence of cosmic-ray flux 2021-05-12 05:56:06



Time dependence of cosmic-ray flux 2023-12-15 10:52:03



Временные ряды интенсивности КЛ по данным сети нейтронных мониторов. Красная пунктирная линия – вспышка. Горизонтальная зеленая линия – среднее значение интенсивности до возмущения. Синие горизонтальные линии – рассчитанный диапазон интенсивностей при Форбуш понижении.

# Выводы

- 1) В ходе выполнения работы был проведён анализ современного состояния проблемы взаимодействия галактических космических лучей с межпланетными ударными волнами. Особое внимание было уделено механизму магнитного отражения, предложенному в модели Паркера для объяснения Форбуш-понижений, а также более строгому теоретическому описанию данного эффекта в работе Вебба.
- 2) Сравнение наблюдаемых амплитуд с оценками, полученными на основе упрощённой формы результата Вебба, показало, что рассматриваемая модель в ряде случаев правильно воспроизводит порядок величины эффекта и качественно описывает начальную фазу Форбуш-понижения.
- 3) Предварительные результаты были представлены в виде постерного доклада на 39 Всероссийской конференции по космическим лучам.
- 4) Для более полного количественного описания необходимо уточнение диффузионного члена в уравнении переноса космических лучей, поскольку рассеяние частиц на случайных магнитных неоднородностях может существенно влиять на форму, глубину и длительность понижения интенсивности.
- 5) Кроме того, требуется рассмотрение временной зависимости магнитного поля в области межпланетного возмущения, так как параметры магнитного барьера изменяются в процессе прохождения ударной волны и последующей возмущённой области мимо Земли.

# 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  $\alpha$  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.