

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ РАЗРЫВОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ЗЕМЛИ

**Ю.А. Кропотина<sup>1,2</sup>, А.М. Быков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
juliett.k@gmail.com

## SIMULATION OF IMPACT OF SOLAR WIND ROTATIONAL DISCONTINUITIES ON THE ACCELERATION OF IONS BY THE EARTH'S BOW SHOCK

**J.A. Kropotina<sup>1,2</sup>, A.M. Bykov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ioffe Physical-Technical Institute RAS, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia  
juliett.k@gmail.com

**Аннотация.** Рассматривается влияние прохождения вращательного разрыва через головную ударную волну Земли на ускорение протонов по механизму Ферми 1 рода. Ранее нами было показано, что сильный разрыв (с углом поворота магнитного поля  $80^\circ$ ) может удерживать надтепловые ионы в предвестнике ударной волны и сносить их за фронт, что влияет на процесс ускорения. Показано, что прохождение через фронт даже относительно слабого разрыва (с углом поворота магнитного поля  $30^\circ$ ) ведет к увеличению количества ускорившихся частиц и их максимальной энергии. Таким образом, разрывные течения перед фронтом ударной волны могут увеличивать эффективность ускорения Ферми 1 рода. Этот эффект, исследованный на примере головной ударной волны Земли, может быть важен также для ускорения космических лучей в остатках сверхновых, скоплениях галактик и пульсарных туманностях.

**Ключевые слова:** гибридные коды, бесстолкновительные ударные волны, вращательные разрывы, ускорение Ферми.

**Abstract.** In this paper, we consider the impact of passage of a rotational discontinuity through the Earth's bow shock on the first order Fermi acceleration of protons. We have shown before that a strong rotational discontinuity (with an  $80^\circ$  magnetic field rotation) can trap suprathermal ions in a shock precursor and sweep them downstream, thus affecting the acceleration process. In this paper, we show that passage of a relatively weak discontinuity (with a  $30^\circ$  magnetic field rotation) through the shock increases the number of accelerated particles and their maximum energy. Thus, stripped upstream flows can boost the first order Fermi acceleration. This effect, being studied for the Earth's bow shock, could be also important for cosmic ray acceleration in supernovae remnants, galaxy clusters and pulsar wind nebulae.

**Keywords:** hybrid codes, collisionless shocks, rotational discontinuities, Fermi acceleration.

### ВВЕДЕНИЕ

Ускорение Ферми 1 рода — процесс, протекающий вблизи фронта бесстолкновительных ударных волн (УВ) и играющий определяющую роль в ускорении космических лучей. Ускоряющиеся частицы многократно пересекают фронт УВ, набирая энергию за счет разницы скоростей рассеивающих центров. В классической теории ускорения Ферми под рассеивающими центрами понимают электромагнитные флуктуации, возникающие из-за самих ускоряющихся частиц [Skilling, 1975a, b, c; Bell, 1978]. Эти частицы могут проникать в область перед фронтом и раскачивать там электромагнитные неустойчивости, образуя так называемый предвестник УВ. Однако существует ряд работ, показывающих важность для ускорения Ферми турбулентности, которая не связана с самой УВ, а возникает в среде перед фронтом вследствие каких-то внешних причин. [Guo, 2012; Nakanotani, 2022].

Поскольку турбулентные течения могут также приводить к возникновению разрывов, представляет интерес задача о влиянии разрывных течений перед фронтом УВ на процесс ускорения Ферми 1 рода. Такие исследования удобно проводить на примере головной ударной волны (ГУВ) Земли, где параметры УВ и окружающей среды доступны для наблюдения. Согласно работам [Artemyev, 2019; Liu, 2022], наиболее часто (примерно раз в 5–10 мин) с ГУВ Земли взаимодействуют вращательные разрывы, связанные с поворотом поперечных к нормали компонент маг-

нитного поля и скорости потока.

В недавних работах [Kropotina, 2021a, b] при помощи гибридного кода *Maximus* был смоделирован процесс прохождения вращательного разрыва сквозь ГУВ. Результаты моделирования показали хорошее согласие с наблюдениями спутников *Themis* и *MMS*. В частности, было показано, что вращательный разрыв эффективно удерживает надтепловые протоны в предвестнике и сносит их по направлению к фронту УВ. Однако при этом рассматривались относительно сильные вращательные разрывы с углом поворота магнитного поля, равным  $80^\circ$ . Такие разрывы статистически редки и не могут оказывать существенного влияния на ускорение частиц. Поэтому в данной работе мы исследуем влияние на динамику надтепловых частиц относительно слабого вращательного разрыва с углом поворота магнитного поля  $30^\circ$ . Оказывается, что слабый разрыв приводит к небольшому увеличению количества ускоренных частиц за фронтом и их максимальной энергии. Можно ожидать, что в случае многочисленных разрывов этот эффект усилится. В частности, возможно влияние разрывных течений на процесс ускорения космических лучей в таких астрофизических объектах как остатки сверхновых, скопления галактик и пульсарные туманности.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования взаимодействия вращательного разрыва с УВ использовался трехмерный ги-

бридный код Maximus [Kropotina, 2019], в котором на декартовой сетке решалась система уравнений Власова—Максвелла. При этом ионы были представлены как частицы, а электроны — как безмассовая нейтрализующая жидкость.

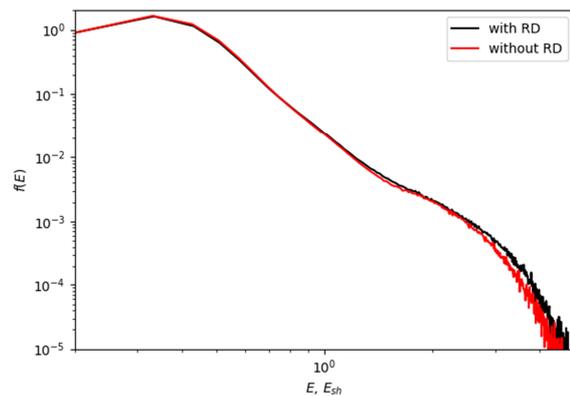
Ударная волна формировалась при отражении сверхзвукового потока, двигавшегося в отрицательном направлении оси  $X$ , от проводящей стенки в плоскости  $x=0$ . В качестве примера была выбрана УВ со следующими параметрами: альфвеновское число Маха (в системе покоя среды за фронтом)  $M_a=4.1$ , угол наклона магнитного поля к нормали к фронту  $\theta=15^\circ$ , отношение теплового давления к магнитному  $\beta=0.8$ . Далеко перед фронтом УВ помещался вращательный разрыв, нормаль которого совпадала с нормалью УВ. Внутри разрыва поперечные компоненты магнитного поля и скорости ( $B_y, V_y$ ) меняли знак. Таким образом, угол поворота поперечной компоненты магнитного поля составлял  $180^\circ$ , а полный угол поворота магнитного поля —  $30^\circ$ . Для сравнения была смоделирована точно такая же УВ, но без разрыва перед фронтом. Моделирование проводилось в трехмерной области в приближении плоского участка фронта.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рисунке сравнивается смоделированный энергетический спектр протонов за фронтом УВ при наличии и отсутствии в ее предвестнике вращательного разрыва. Оба спектра рассчитаны в один и тот же момент времени, который соответствует моменту прохождения разрыва через фронт. Энергия приведена в единицах кинетической энергии потока перед фронтом  $E_{sh}$ , а функция распределения по энергиям — в произвольных единицах.

Оба спектра достаточно схожи и содержат тепловую максвелловскую компоненту, а также надтепловой хвост, начавший формироваться вследствие ускорения Ферми. По прошествии достаточного времени надтепловая часть должна приблизиться к степенному виду, однако в реальности размеры и кривизна ГУВ не позволяют частицам достигать очень высоких энергий и продолжительное моделирование не оправдано. Границу между надтепловой и тепловой частями спектра можно условно провести по точке перегиба  $E=1.5E_{sh}$ . Вблизи этой энергии происходит инжекция частиц в процесс ускорения Ферми (для того чтобы вступить в этот процесс, необходимо уже иметь энергию выше тепловой).

Видно, что максимальная энергия надтепловых частиц и их общее количество примерно на 7–8 % больше в случае, когда УВ взаимодействовала с вращательным разрывом. Причина этого эффекта заключается в том, что разрыв служит дополнительным рассеивающим центром для надтепловых частиц. Ранее при исследовании сильных вращательных разрывов было показано, что надтепловые частицы эффективно захватываются ими и сносятся за фронт, что естественным образом ускоряет процесс набора энергии. В рассматриваемом случае эффект удержания практически незаметен при анализе пространственных распределений частиц, однако ска-



Сравнение распределений протонов по энергиям за фронтом УВ при наличии (черная кривая) и отсутствии (красная кривая) в предвестнике вращательного разрыва

зывается на конечном энергетическом спектре. Можно ожидать, что прохождение нескольких вращательных разрывов приведет к еще более быстрому набору энергии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что прохождение слабого вращательного разрыва через УВ усиливает ускорение ионов по механизму Ферми 1 порядка, т. е. увеличивает количество надтепловых частиц и их максимальную энергию. Следует отметить, что вопрос о максимальной энергии частицы, достижимой при ускорении в конкретном астрофизическом объекте, имеет большую важность для астрофизики. Предполагается, что остатки сверхновых способны ускорять частицы до  $10^{15}$  эВ, однако только в самых оптимистичных моделях такая энергия может быть достигнута за время жизни остатка. Разрывы в межзвездной среде потенциально способны ускорить процесс набора энергии и увеличить ее максимальное значение.

Еще один класс объектов, где УВ распространяется в разрывной среде — пульсарные туманности. Их рентгеновское излучение обусловлено надтепловыми электронами и позитронами, поэтому задача об их взаимодействии с вращательными разрывами представляет отдельный интерес. Разрывы могут также возникать и влиять на надтепловые частицы в областях слияния скоплений галактик.

Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru), при поддержке гранта РФФИ №21-72-20020.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Artemyev A.V., Angelopoulos V., Vasko I.Y., et al. On the kinetic nature of solar wind discontinuities. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46. P. 1185–1194.  
 Bell A.R. The acceleration of cosmic rays in shock fronts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 1978. Vol. 182. P. 147–156.  
 Guo F., Li S., Li H., et al. On the Amplification of magnetic field by a supernova blast shock wave in a turbulent medium. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 747, no. 2. Article id. 98.  
 Kropotina J., Bykov A., Krassilchtchikov A., et al. Maximus:

a Hybrid particle-in-cell code for microscopic modeling of collisionless plasmas. *Communications in Computer and Information Sci.* 2019. Vol. 965. P. 242–253.

Kropotina J.A., Webster L., Artemyev A.V., et al. Solar wind discontinuity transformation at the bow shock. *Astrophys. J.* 2021a. Vol. 913, no. 2. P. 142.

Kropotina J.A., Artemyev A.V., Bykov A.M., Vainchtein D.L. Interaction of rotational discontinuities with energetic ions in the precursor of the Earth's bow shock. *J. Physics Conference Ser.* 2021b. Vol. 2103, no. 1. Article number 012015.

Liu Y.Y., Fu J.S., Cao B., et al. Magnetic discontinuities in the solar wind and magnetosheath: Magnetospheric Multiscale Mission (MMS) observations. *Astrophys. J.* 2022. Vol. 930, no. 1. P. 63.

Nakanotani M., Zank G.P., Zhao L.-L. Turbulence-

dominated shock waves: 2D hybrid kinetic simulations. *Astrophys. J.* 2022. Vol. 926, no. 2. P. 109.

Skilling J. Cosmic ray streaming. I. Effect of Alfvén waves on particles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 1975a. Vol. 172. P. 557–566.

Skilling J. Cosmic ray streaming. II. Effect of particles on Alfvén waves. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 1975b. Vol. 173. P. 245–254.

Skilling J. Cosmic ray streaming. III. Self-consistent solutions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 1975c. Vol. 173. P. 255–269.