

Моделирование влияния  
вращательных разрывов в солнечном ветре  
на ускорение ионов  
головной ударной волной Земли

Кропотина Ю.А.<sup>1, 2</sup>

Быков А.М.<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

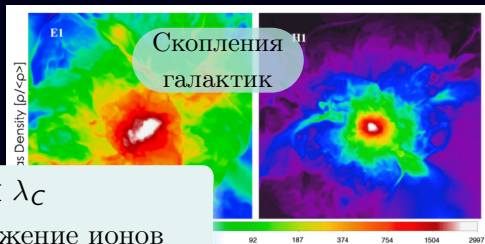
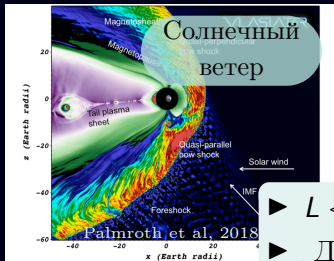
<sup>2</sup>СПбПУ

05.09.2022

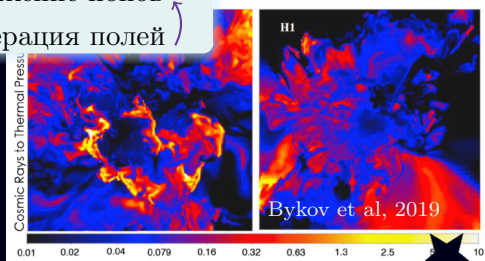
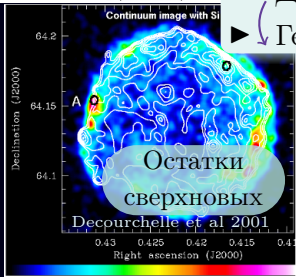
# Бесстолкновительные ударные волны (УВ) в астрофизических объектах

- ▶  $L \ll \lambda_c$
- ▶ Движение ионов
- ▶ Генерация полей

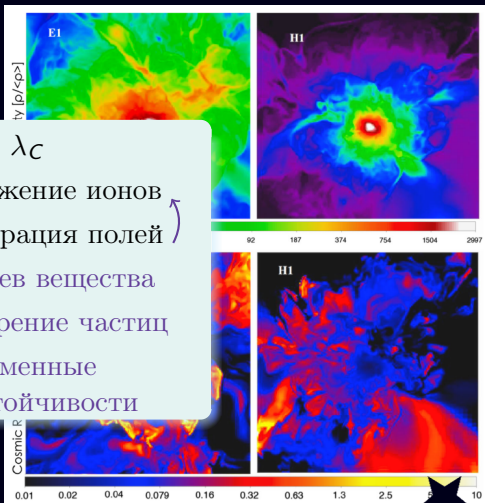
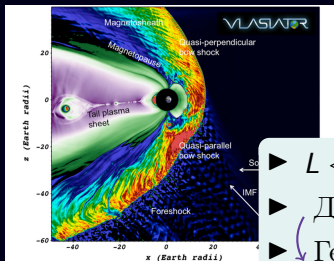
# Бесстолкновительные ударные волны (УВ) в астрофизических объектах



- ▶  $L \ll \lambda_c$
- ▶ Движение ионов
- ▶ Генерация полей



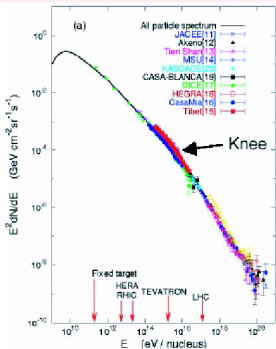
# Бесстолкновительные ударные волны (УВ) в астрофизических объектах



- ▶  $L \ll \lambda_c$
- ▶ Движение ионов
- ▶ Генерация полей
- ▶ Нагрев вещества
- ▶ Ускорение частиц
- ▶ Плазменные неустойчивости

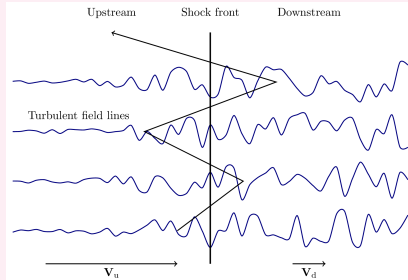
# Ускорение частиц на бесстолкновительных УВ

## Наблюдаемый спектр КЛ



- ▶ Степенной спектр
- ▶ Эффективность 10-20%

## Механизм Ферми I порядка



## Диффузионное ускорение

Что если среда перед фронтом содержит разрывы?

Исследуем на примере головной ударной волны Земли

# Разрывы в солнечном ветре

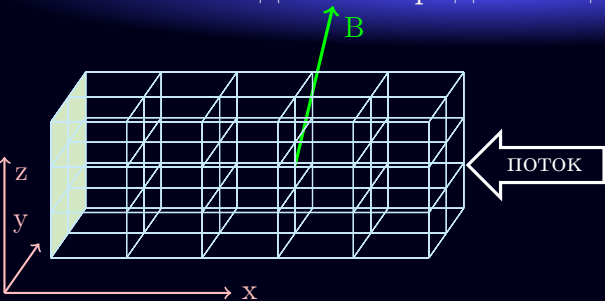
- ▶ Большая часть — тангенциальные и вращательные разрывы
- ▶ Вращательные разрывы: только поворот  $\vec{B}_\perp$ ,  $\vec{V}_\perp$  на  $\Delta\phi$
- ▶ Приходят примерно раз в 10 минут
- ▶ Чаще всего слабые ( $\Delta\phi \sim 10^\circ$ )

# Разрывы в солнечном ветре

- ▶ Большая часть — тангенциальные и вращательные разрывы
- ▶ Вращательные разрывы: только поворот  $\vec{B}_\perp$ ,  $\vec{V}_\perp$  на  $\Delta\phi$
- ▶ Приходят примерно раз в 10 минут
- ▶ Чаще всего слабые ( $\Delta\phi \sim 10^\circ$ )

Как вращательные разрывы взаимодействуют с ускоряющимися частицами?

# Методика: гибридный код “Maximus”



- ▶ Декартова сетка
- ▶ Ионы — частицы
- ▶ Электроны — безмассовая жидкость

- ▶ Уравнения Максвелла + уравнения движения
- ▶ Второй порядок точности + точное сохранение  $\text{div} \vec{B} = 0$

Безразмерные параметры моделирования:

- ▶ Альвеновское число Маха  $M_a$
- ▶ Угол наклона магнитного поля к нормали  $\theta$
- ▶ Отношение теплового давления к магнитному  $\beta$





# Результаты: сильный разрыв ( $\Delta\phi=80^\circ$ ) Динамика ионов

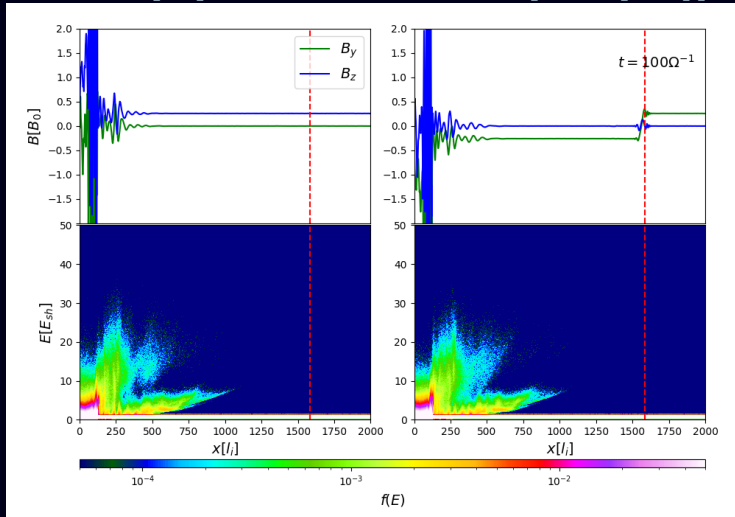
Без разрыва:

Разрыв перед фронтом:

# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

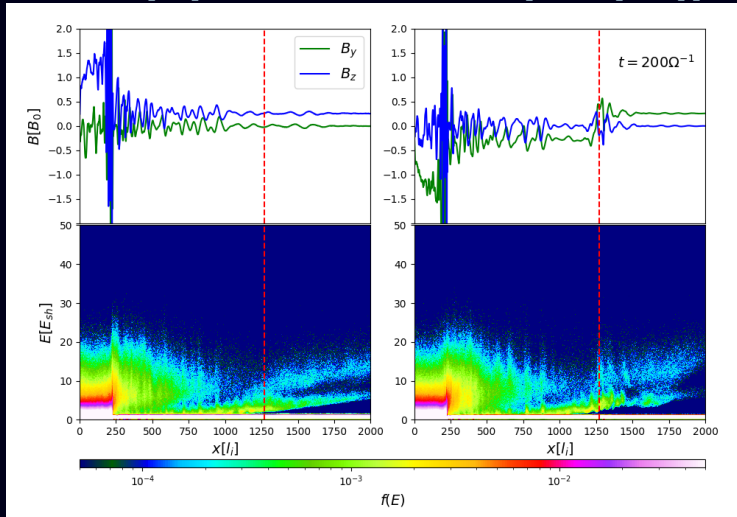
Разрыв перед фронтом:



# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

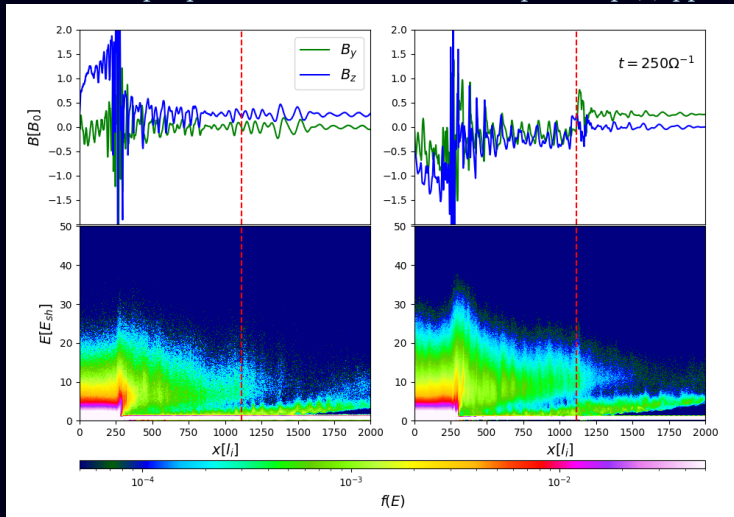
Разрыв перед фронтом:



# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

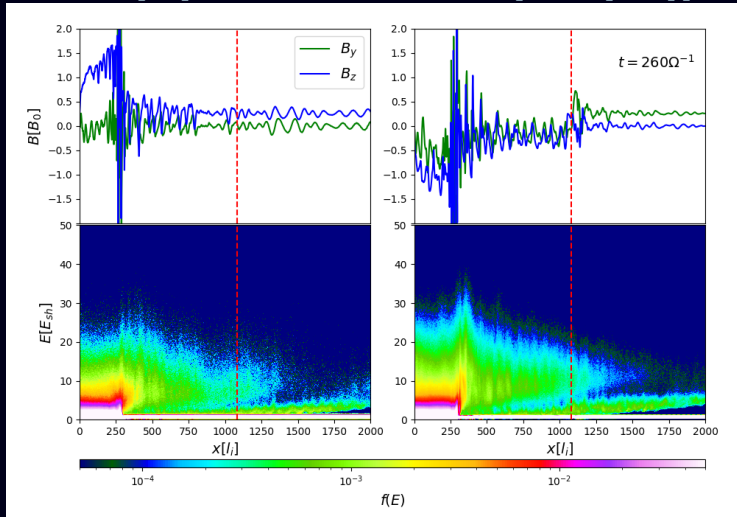
Разрыв перед фронтом:



# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

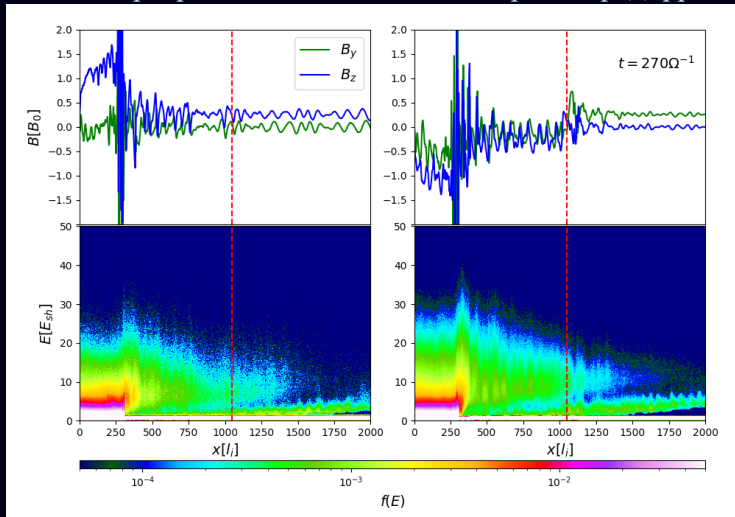
Разрыв перед фронтом:



# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

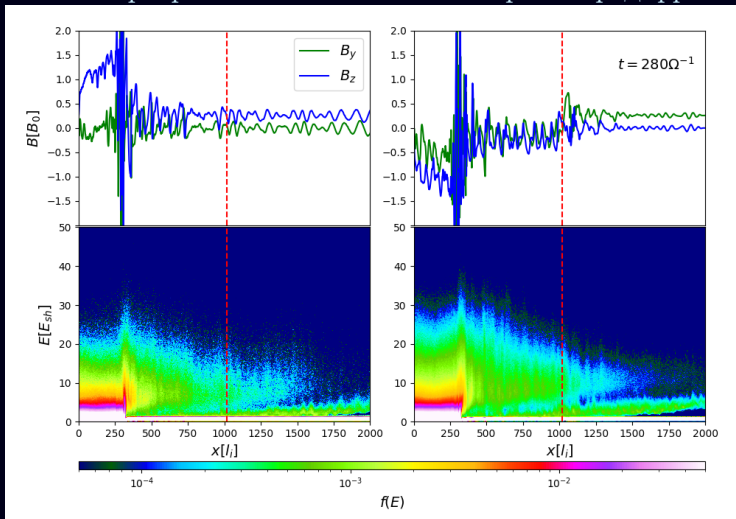
Разрыв перед фронтом:



# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

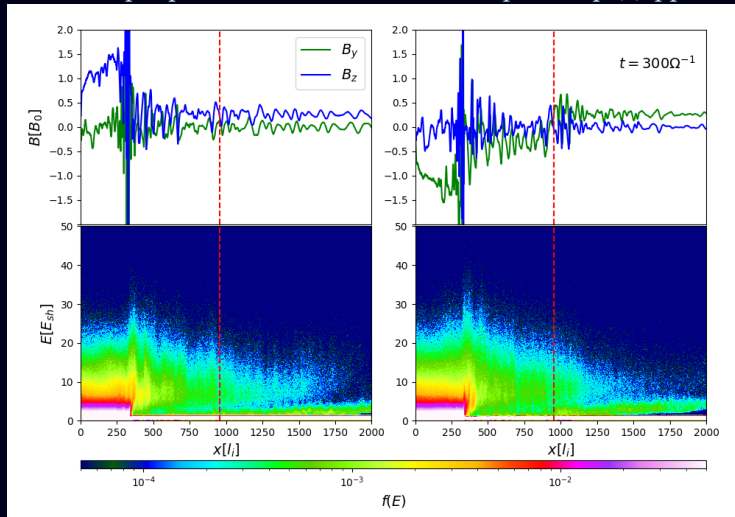
Разрыв перед фронтом:



# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

Разрыв перед фронтом:

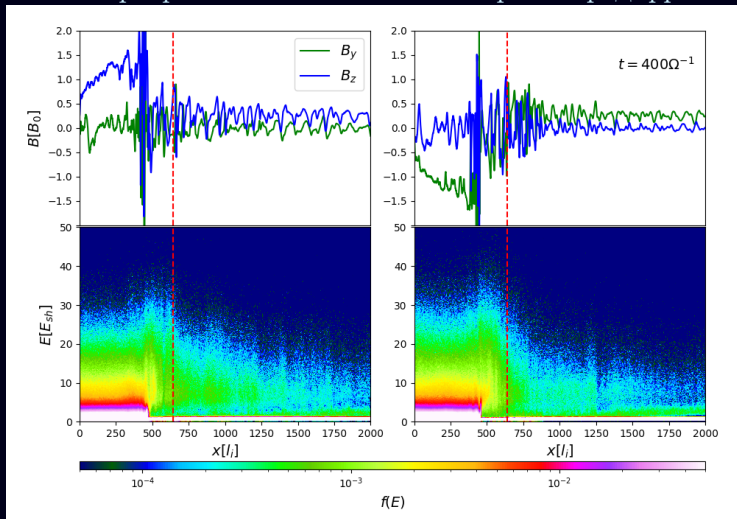




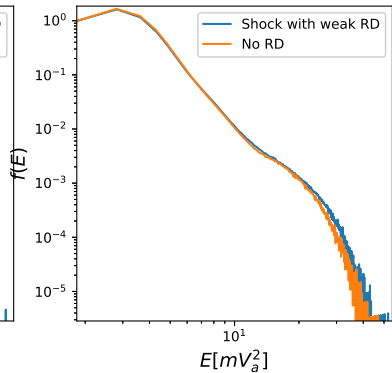
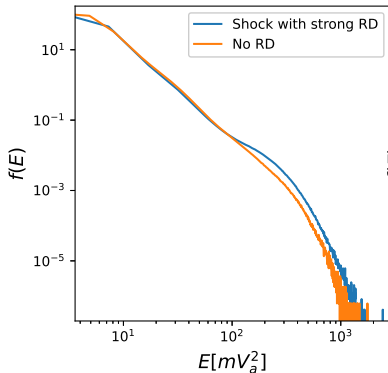
# Результаты: слабый разрыв ( $\Delta\phi=30^\circ$ ). Динамика ионов

Без разрыва:

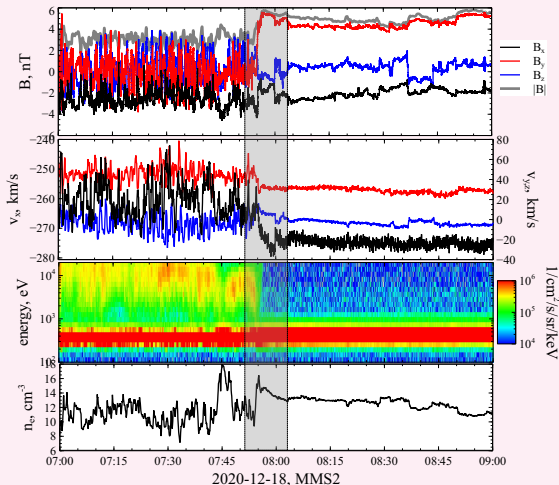
Разрыв перед фронтом:



# Результаты: влияние на распределение надтепловых частиц.



# Пример наблюдаемого события



Данные спутника MMS предоставил А.В. Артемьев  
(ИКИ РАН, University of California)

# Выводы

- ▶ Вращательный разрыв удерживает надтепловые частицы и сносит их за фронт
- ▶ Это увеличивает эффективность инжекции и жёсткость спектра
- ▶ Много разрывов может сделать ускорение Ферми эффективнее

# Выводы

Где это может быть актуально?

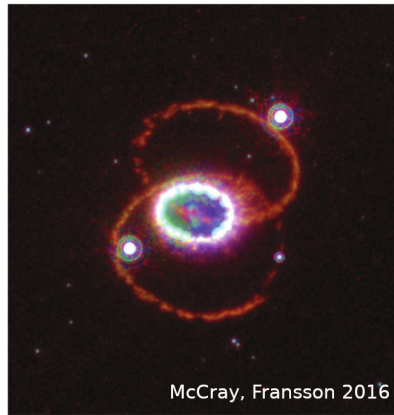
- ▶ Вращательный разрыв удерживает надтепловые частицы и сносит их за фронт
- ▶ Это увеличивает эффективность инъекции и жёсткость спектра
- ▶ Много разрывов может сделать ускорение Ферми эффективнее

# Выводы

- ▶ Вращательный разрыв удерживает надтепловые частицы и сносит их за фронт
- ▶ Это увеличивает эффективность инъекции и жёсткость спектра
- ▶ Много разрывов может сделать ускорение Ферми эффективнее

Где это может быть актуально?

- ▶ Сверхновые, особенно второго типа



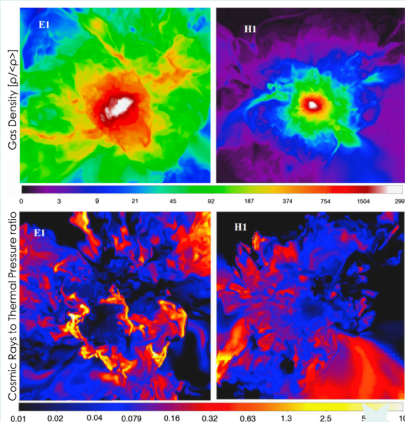
McCray, Fransson 2016

# Выводы

- ▶ Вращательный разрыв удерживает надтепловые частицы и сносит их за фронт
- ▶ Это увеличивает эффективность инъекции и жёсткость спектра
- ▶ Много разрывов может сделать ускорение Ферми эффективнее

## Где это может быть актуально?

- ▶ Сверхновые, особенно второго типа
- ▶ Скопления галактик

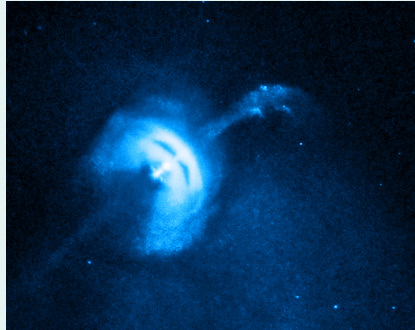


# Выводы

- ▶ Вращательный разрыв удерживает надтепловые частицы и сносит их за фронт
- ▶ Это увеличивает эффективность инъекции и жёсткость спектра
- ▶ Много разрывов может сделать ускорение Ферми эффективнее

## Где это может быть актуально?

- ▶ Сверхновые, особенно второго типа
- ▶ Скопления галактик
- ▶ Пульсарные туманности? (но! там электрон-позитронная плазма)





Спасибо за внимание!

См. также:

Kropotina et al, ApJ2021; Kropotina et al, JPCS2021

Спасибо за внимание!

# Трёхмерный гибридный код "Maximus"

- ▶ Ионы - макрочастицы
- ▶ Электроны - безмассовая жидкость

$$l_i \sim 100 \text{ км} \gg r_D \sim 100 \text{ м}$$
$$\Omega \sim 1 \text{ с}^{-1} \ll \omega_{pe} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$$

$$\frac{d\vec{r}_k}{dt} = \vec{v}_k$$
$$\frac{d\vec{v}_k}{dt} = \frac{Z_k}{A_k} (\vec{E} + \vec{v}_k \times \vec{B}) - \frac{\nu}{\rho_c} (\vec{j}_i - \vec{j}_e)$$
$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E}$$
$$\vec{E} = -\frac{1}{\rho_c} (\vec{j}_e \times \vec{B} + \nabla P_e - \nu (\vec{j}_i - \vec{j}_e))$$
$$\vec{j}_e = \vec{j}_i - \nabla \times \vec{B}$$
$$\vec{j}_i = \sum_{\text{cell}} S(\vec{r}_k) Z_k \vec{v}_k \quad \rho_c = \sum_{\text{cell}} S(\vec{r}_k) Z_k$$

- ▶ Произвольный химический состав
- ▶ Выбор уравнения состояния электронов
- ▶ Адаптивный шаг по времени
- ▶ Схема TVD
- ▶  $\text{div} \vec{B} = 0$
- ▶ Второй порядок точности