

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

Кропотина Ю.А.^{1, 2}

Быков А.М.^{1, 2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

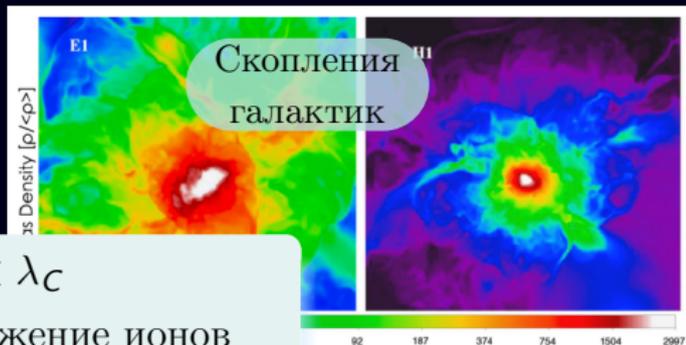
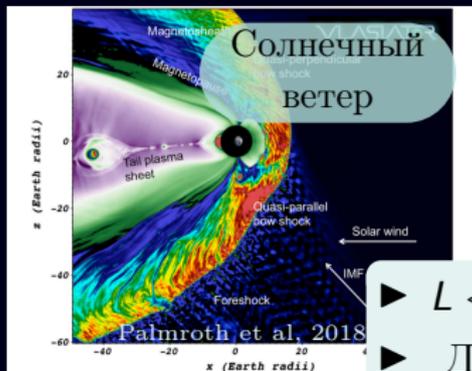
²СПбПУ

05.09.2022

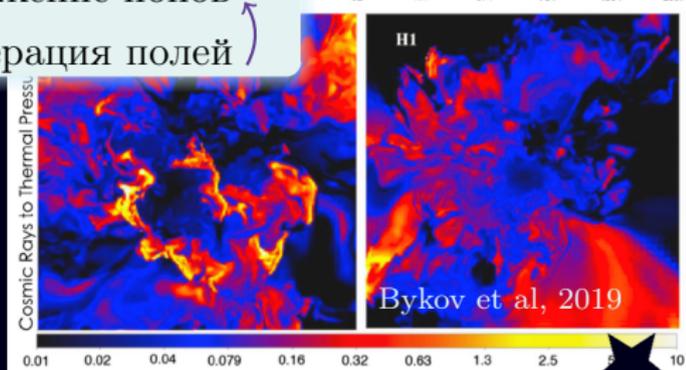
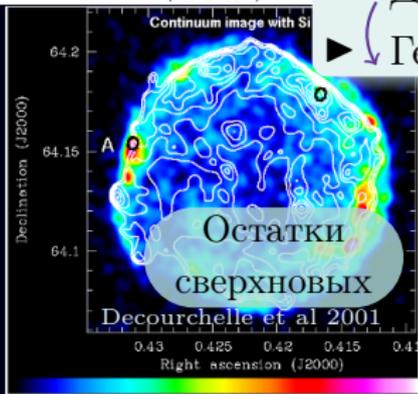
Бесстолкновительные ударные волны (УВ) в астрофизических объектах

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

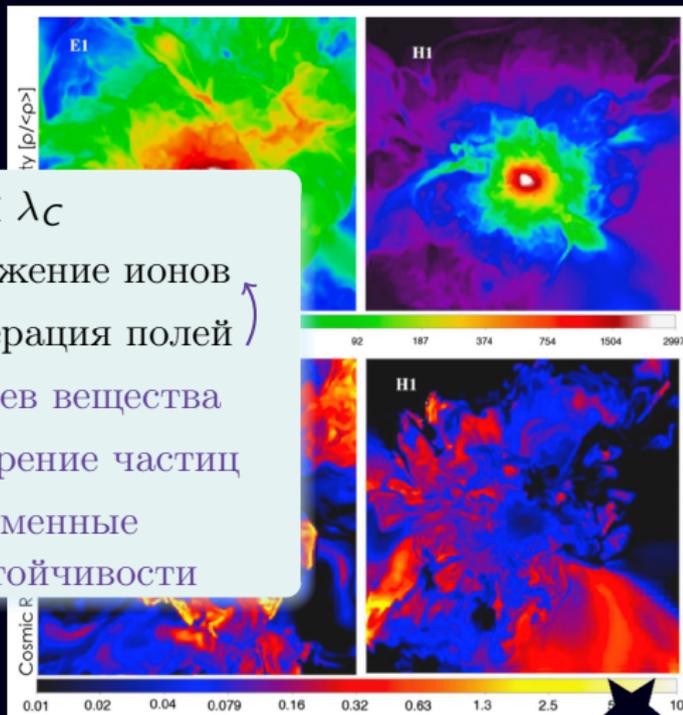
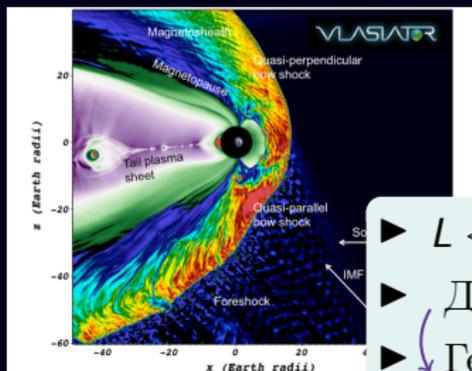
Бесстолкновительные ударные волны (УВ) в астрофизических объектах



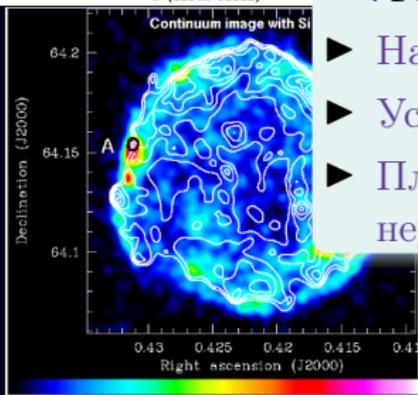
- ▶ $L \ll \lambda_c$
- ▶ Движение ионов
- ▶ Генерация полей



Бесстолкновительные ударные волны (УВ) в астрофизических объектах

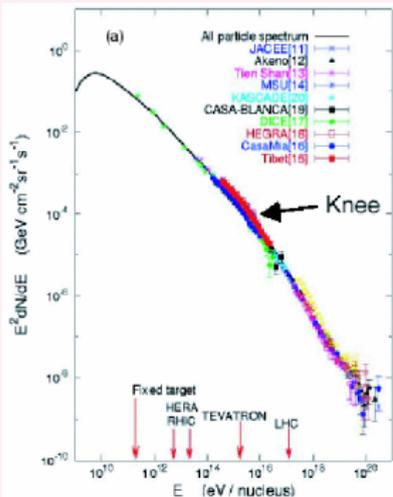


- ▶ $L \ll \lambda_c$
- ▶ Движение ионов
- ▶ Генерация полей
- ▶ Нагрев вещества
- ▶ Ускорение частиц
- ▶ Плазменные неустойчивости



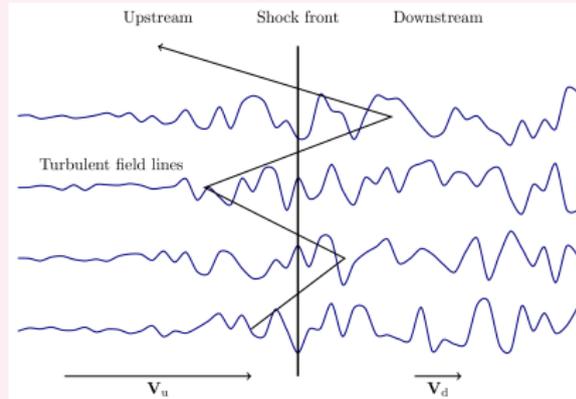
Ускорение частиц на бесстолкновительных УВ

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

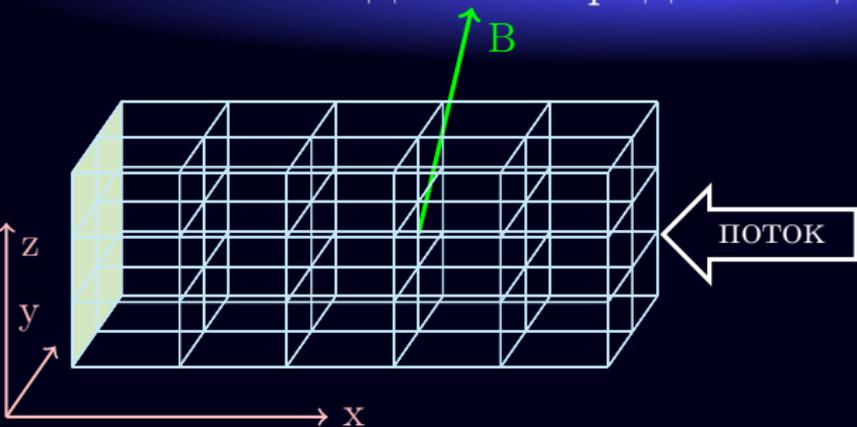
- ▶ Большая часть — тангенциальные и вращательные разрывы
- ▶ Вращательные разрывы: только поворот \vec{B}_\perp , \vec{V}_\perp на $\Delta\phi$
- ▶ Приходят примерно раз в 10 минут
- ▶ Чаще всего слабые ($\Delta\phi \sim 10^\circ$)

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 θ
- ▶ Отношение теплового давления к магнитному β

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

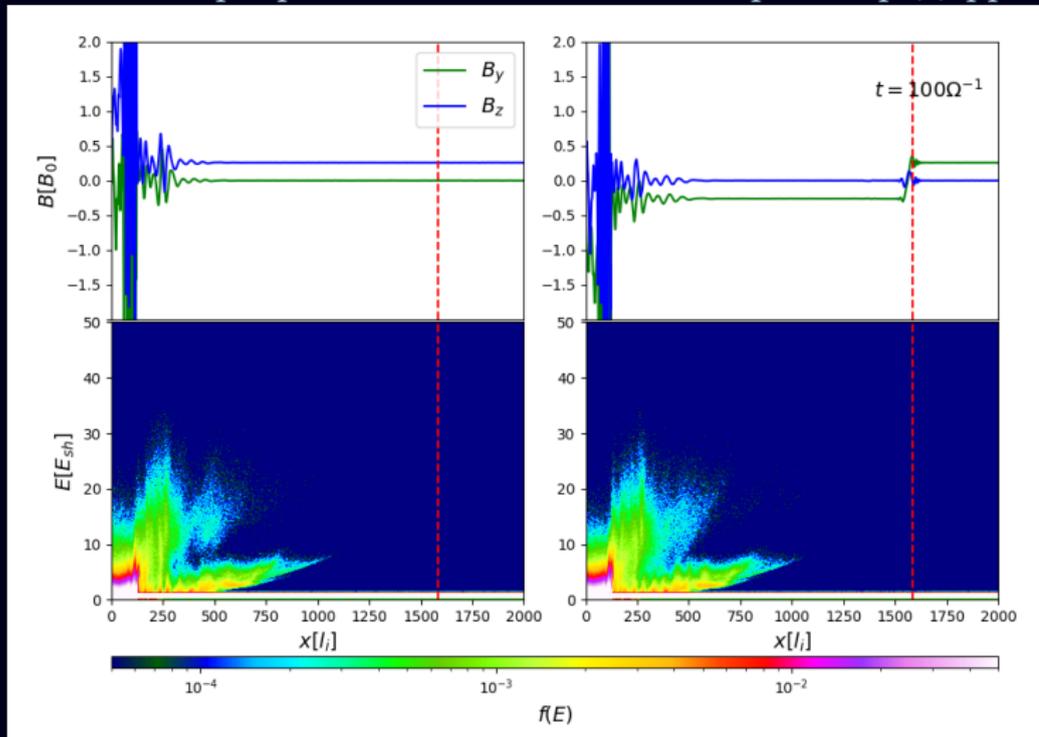
Без разрыва:

Разрыв перед фронтом:

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

Без разрыва:

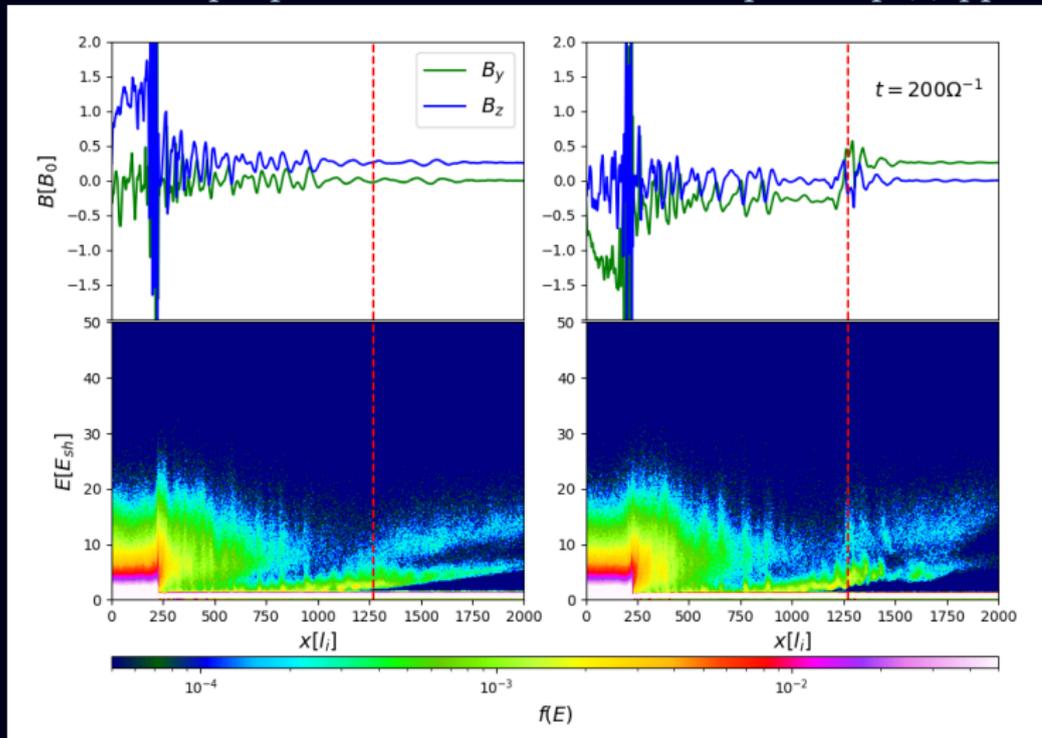
Разрыв перед фронтом:



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

Без разрыва:

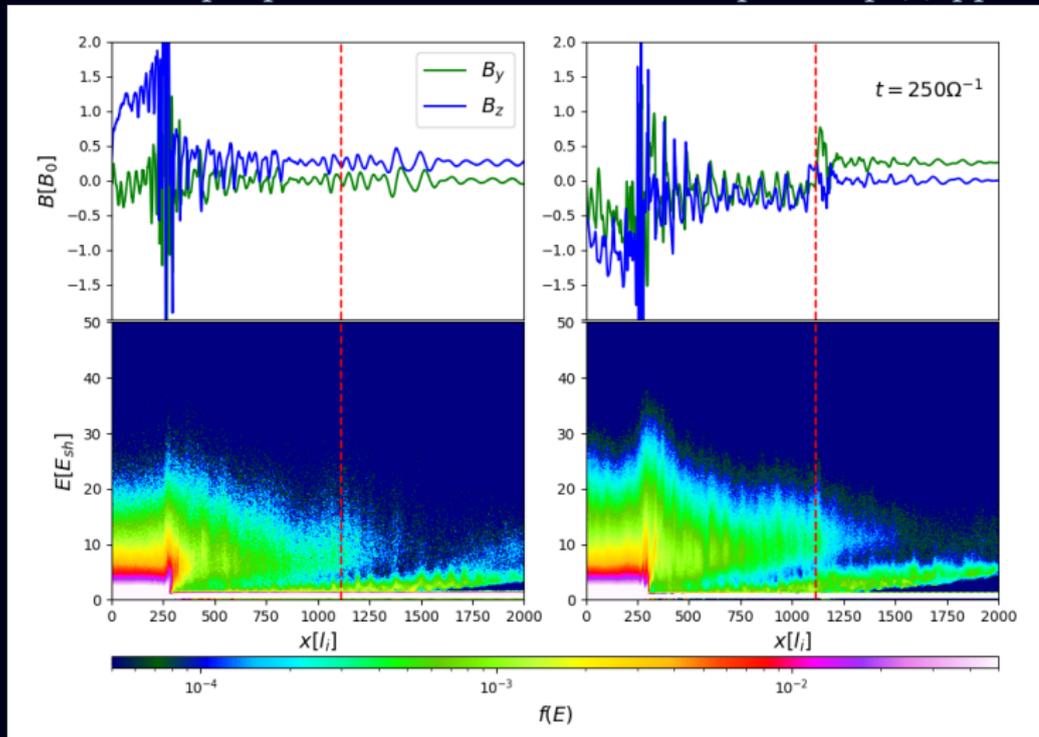
Разрыв перед фронтом:



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

Без разрыва:

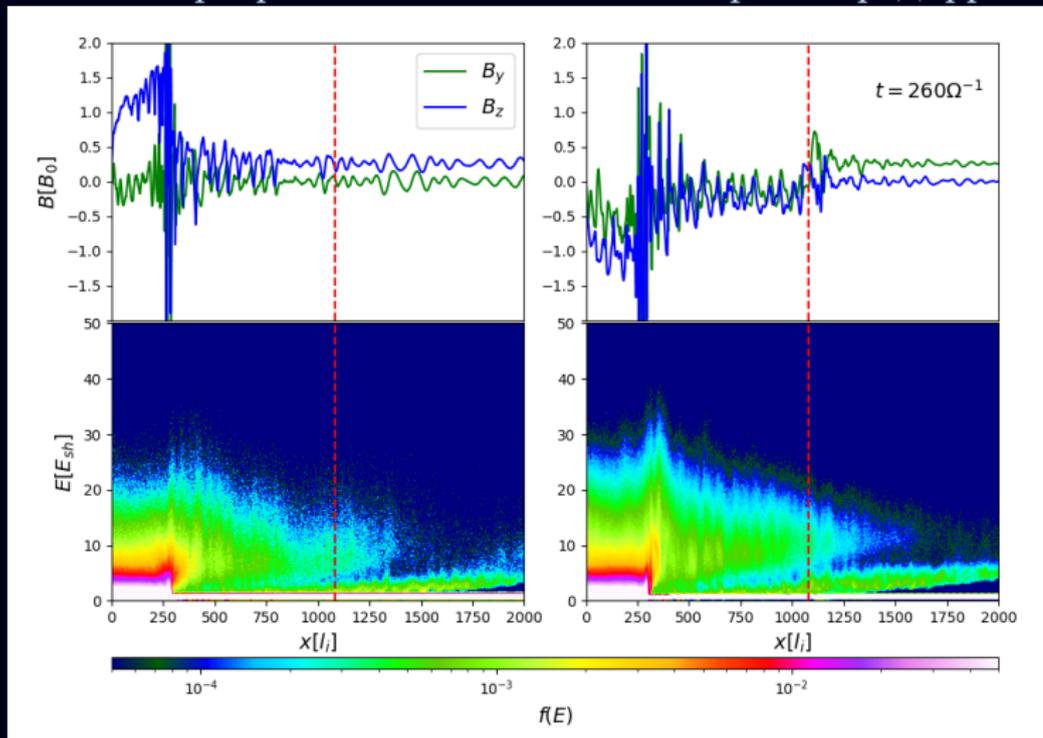
Разрыв перед фронтом:



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

Без разрыва:

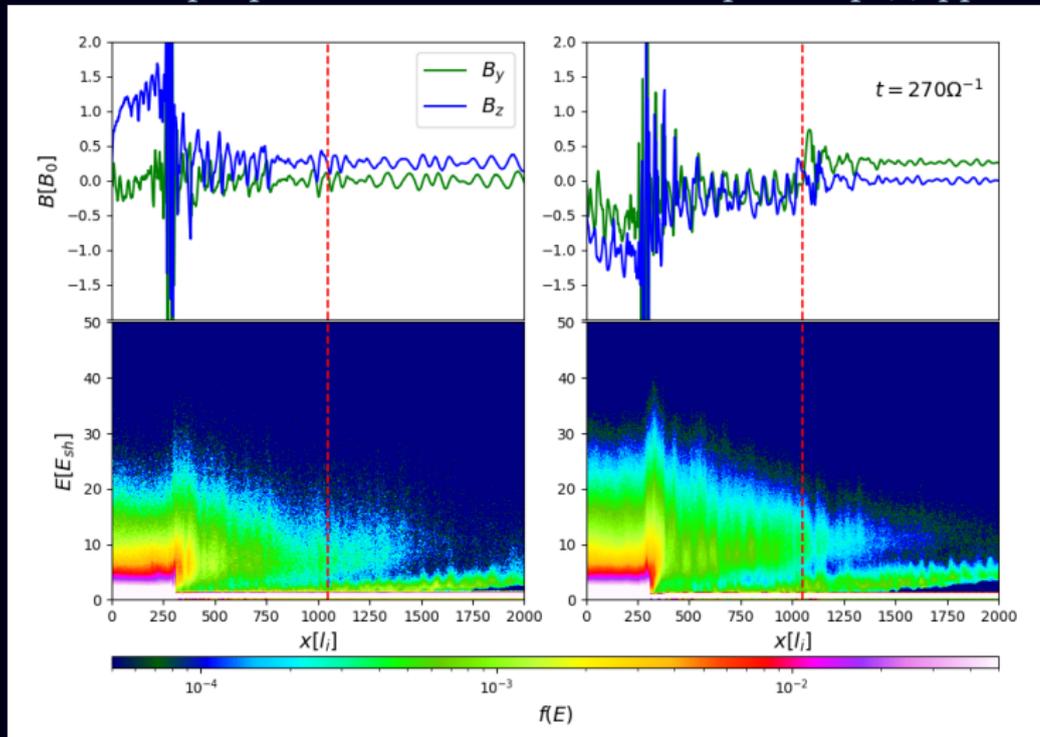
Разрыв перед фронтом:



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

Без разрыва:

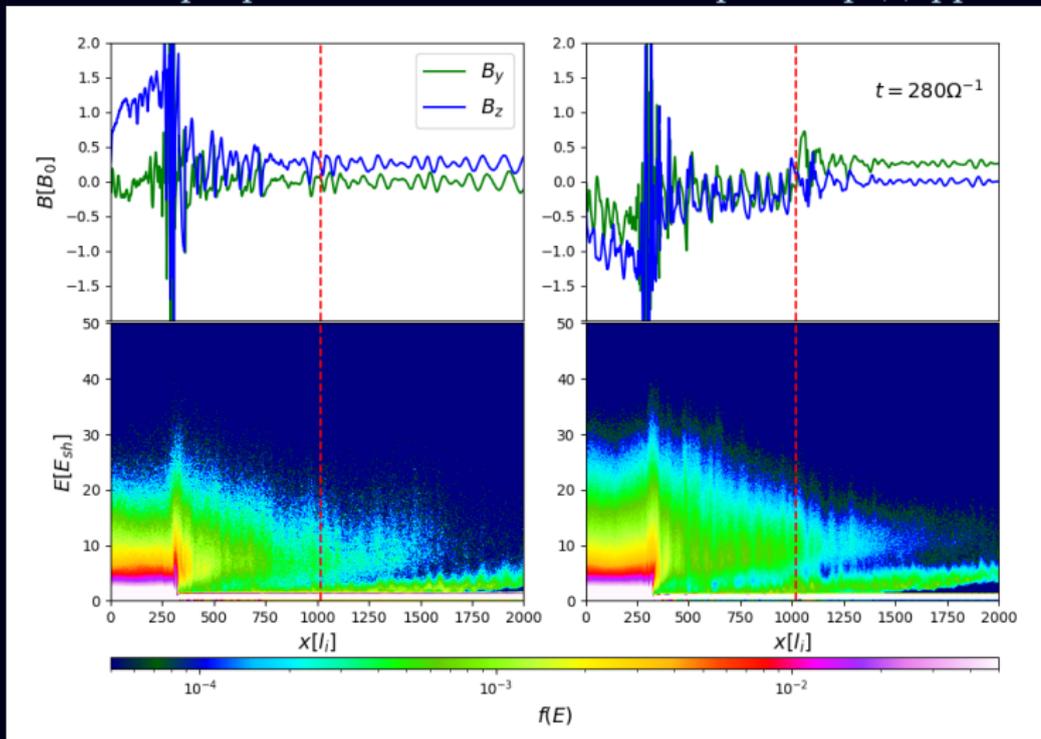
Разрыв перед фронтом:



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

Без разрыва:

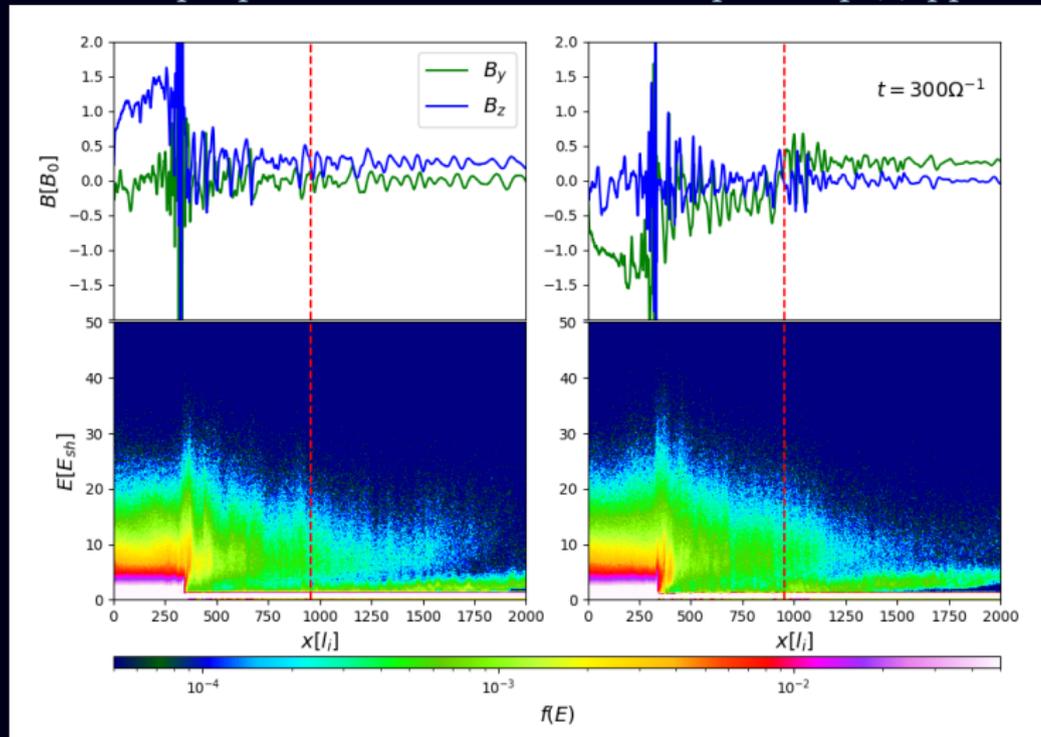
Разрыв перед фронтом:



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

Без разрыва:

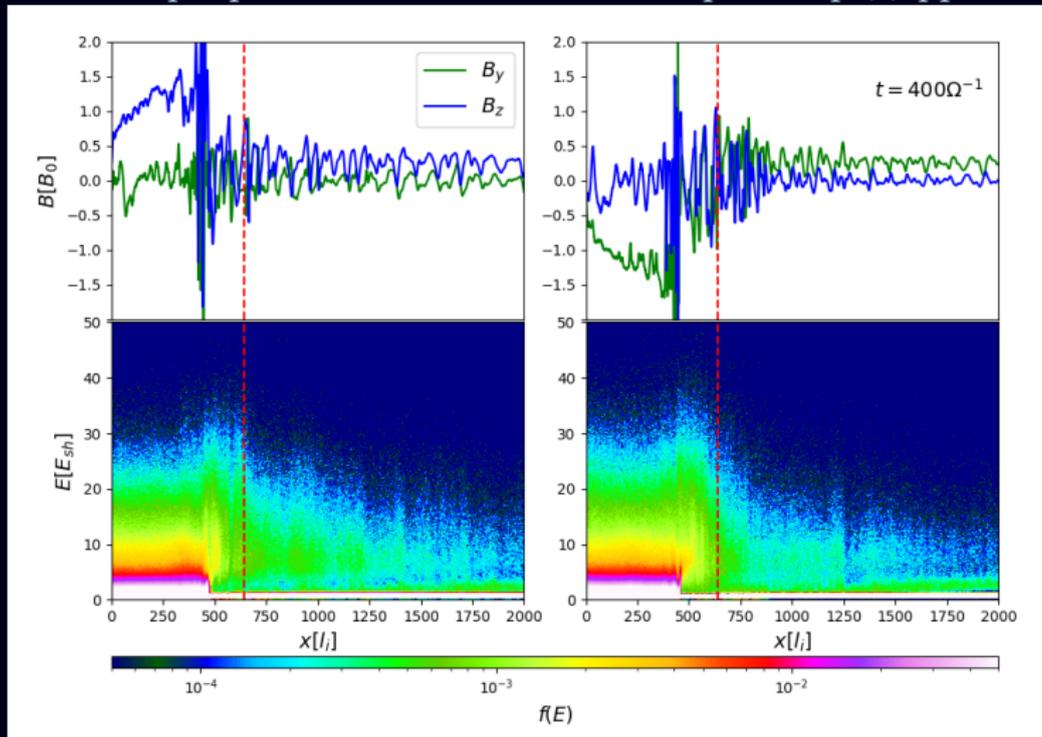
Разрыв перед фронтом:



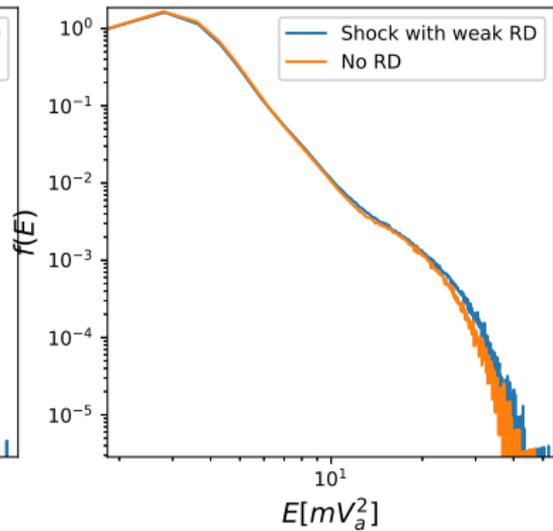
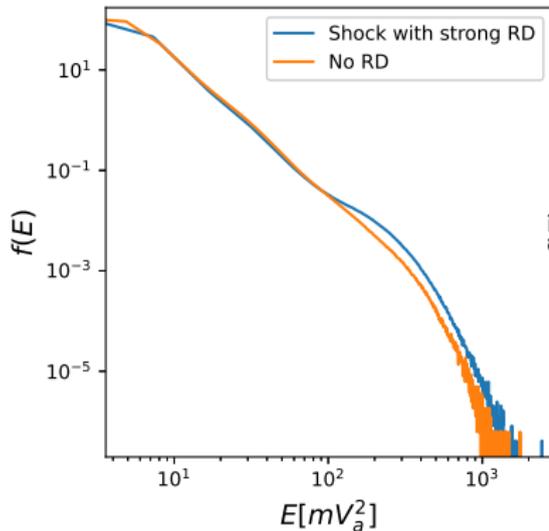
Результаты: слабый разрыв ($\Delta\phi=30^\circ$). Динамика ионов

Без разрыва:

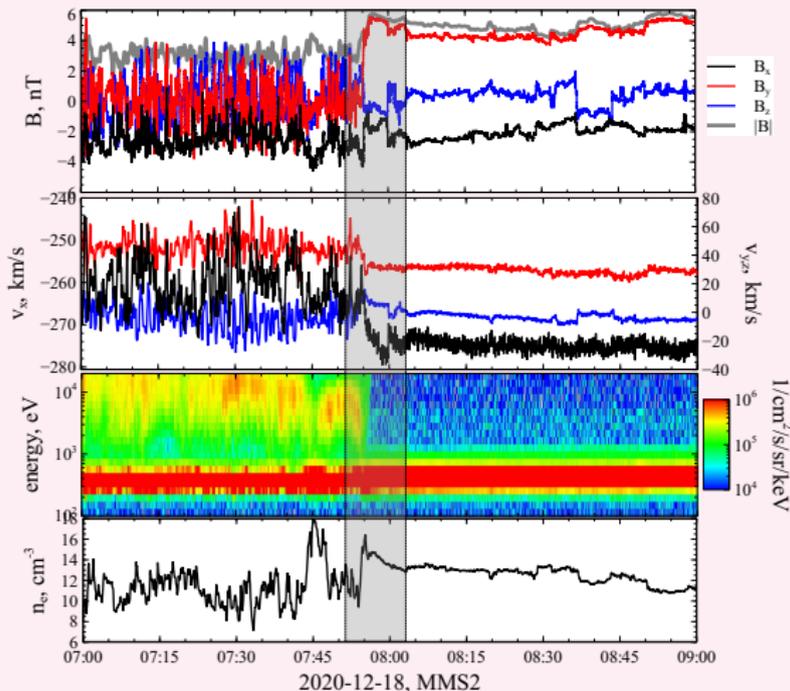
Разрыв перед фронтом:



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?

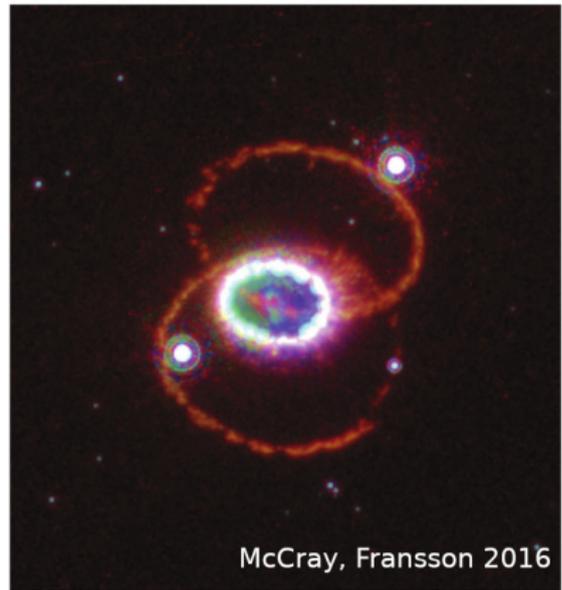
- ▶ Вращательный разрыв удерживает надтепловые частицы и сносит их за фронт
- ▶ Это увеличивает эффективность инъекции и жёсткость спектра
- ▶ Много разрывов может сделать ускорение Ферми эффективнее

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



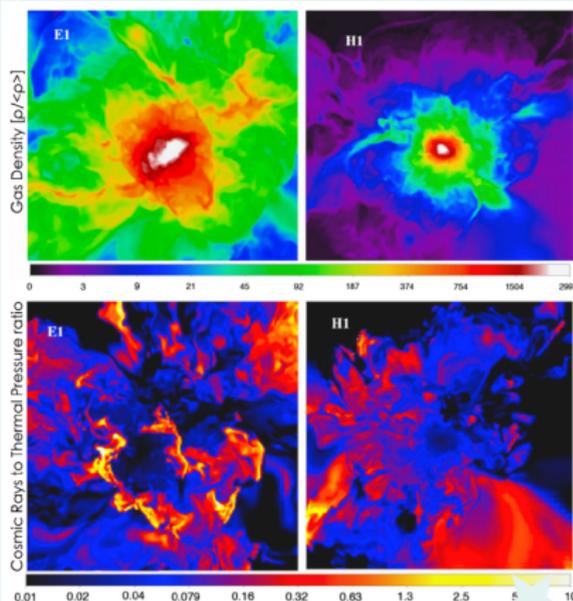
McCray, Fransson 2016

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