

# Моделирование солнечной модуляции галактических космических лучей в пакете программ GT

Галикян Н.Г.\* , Голубков В.С.+ , Дягилев А.Р.\* , Майоров А.Г.\* ,  
Юлбарисов Р.Ф.\*

\* Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”  
+ НПП “Радар ммс”

03 июля 2024 г.

# Цель и задачи исследования

- Воспроизведение эффектов солнечной модуляции путем моделирования движения частиц ГКЛ в гелиосфере

# Цель и задачи исследования

- Воспроизведение эффектов солнечной модуляции путем моделирования движения частиц ГКЛ в гелиосфере
  - Создание численной модели магнитного в гелиосфере

# Цель и задачи исследования

- Воспроизведение эффектов солнечной модуляции путем моделирования движения частиц ГКЛ в гелиосфере
  - Создание численной модели магнитного в гелиосфере
  - Проверка созданной модели при сравнении с наблюдениями космических аппаратов

- Воспроизведение эффектов солнечной модуляции путем моделирования движения частиц ГКЛ в гелиосфере
  - Создание численной модели магнитного в гелиосфере
  - Проверка созданной модели при сравнении с наблюдениями космических аппаратов
  - Добавление магнитного поля гелиосферы в пакет GT

- Воспроизведение эффектов солнечной модуляции путем моделирования движения частиц ГКЛ в гелиосфере
  - Создание численной модели магнитного в гелиосфере
  - Проверка созданной модели при сравнении с наблюдениями космических аппаратов
  - Добавление магнитного поля гелиосферы в пакет GT
  - Расчет траекторий частиц

## Общее магнитное поле

$$\vec{B}_{\text{total}} = \vec{B}_{\text{reg}} + \vec{B}_{\text{turb}}$$

## Общее магнитное поле

$$\vec{B}_{\text{total}} = \vec{B}_{\text{reg}} + \vec{B}_{\text{turb}}$$

- $\vec{B}_{\text{reg}}$  — Регулярная компонента, которая описывается моделью Паркера

## Общее магнитное поле

$$\vec{B}_{\text{total}} = \vec{B}_{\text{reg}} + \vec{B}_{\text{turb}}$$

- $\vec{B}_{\text{reg}}$  — Регулярная компонента, которая описывается моделью Паркера
- $\vec{B}_{\text{turb}}$  — Возмущённая компонента, для описания которой в работе используется подход предложенный в (Laitinen et al. 2023), заключающиеся в задании векторного потенциала 2D и Slab частей турбулентности

Регулярная компонента описывается моделью Паркера, которая предполагает, что магнитное поле заморожено в плазме солнечного ветра (Parker 1958). Тогда в солнечно экваториальных координатах поле имеет следующий вид (Pei et al. 2011).

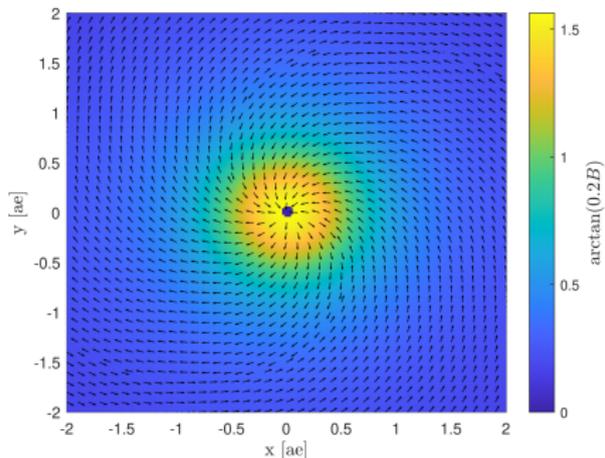
## Модель Паркера

$$\vec{B}_{\text{reg}} = \pm B_0 \frac{r_0^2}{r^2} \left( \vec{e}_r - \frac{\Omega(r - r_s)}{V} \sin \theta \vec{e}_\varphi \right) H(\theta - \theta_{\text{CS}})$$

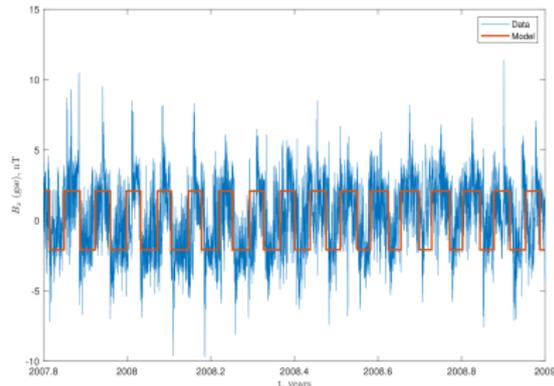
Влияние ГТС на магнитное поле моделируется функцией:

$$H(\theta - \theta_{\text{CS}}) = \tanh \left( \frac{r(\theta_{\text{CS}} - \theta)}{L} \right)$$

# Визуализация регулярной компоненты поля



Регулярное магнитное поле при срезе  $z = 0$ .  
Цветом показана функция пропорциональная  
амплитуде поля в каждой точке



Сравнение  $x$  компоненты магнитного поля, в координатах GSE, вдоль траектории ACE в период минимума солнечной активности

# Задание возмущений с помощью векторного потенциала (2D поле)

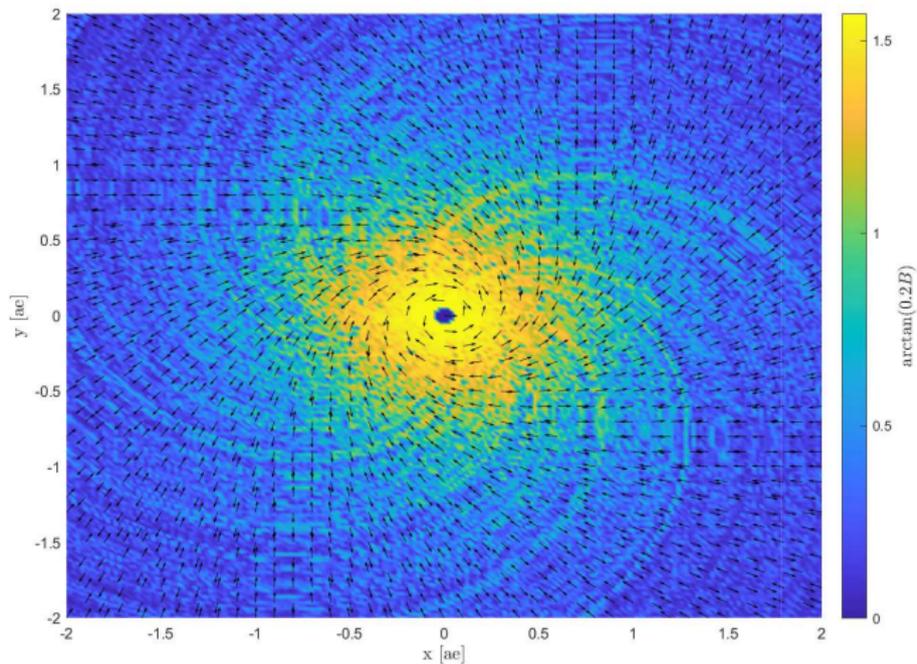
## 2D поле

2D компонента возмущений определяться как компонента у которого волновой вектор перпендикулярен регулярному полю  $\vec{B}_{\text{reg}} \perp \vec{k}$ .

$$\vec{B}_{\text{reg}} \parallel \vec{A}_{2D} = \delta B_{0i}(r, \kappa) \sin \left( \left( \kappa \frac{r}{a} + \kappa \varphi \right) \sin \alpha + \kappa \theta \cos \alpha + \delta \right) \times \\ \times (\cos \psi \vec{e}_r - \sin \psi \vec{e}_\varphi)$$

где  $\alpha$ —поляризация  $i$ -ой моды;  $\delta$ —начальная фаза моды;  $\kappa = kr$ ;  $a = \frac{\Omega}{V}$ ;  $\psi$  — угол между радиальным направлением и регулярным полем;  $\delta B_{0i}(r, \kappa)$  — соответствует спектру Колмогорова.

# Изображение 2D поля



2D поле при срезе  $z = 0$ .

# Задание возмущений с помощью векторного потенциала (Slab поле)

## Slab поле

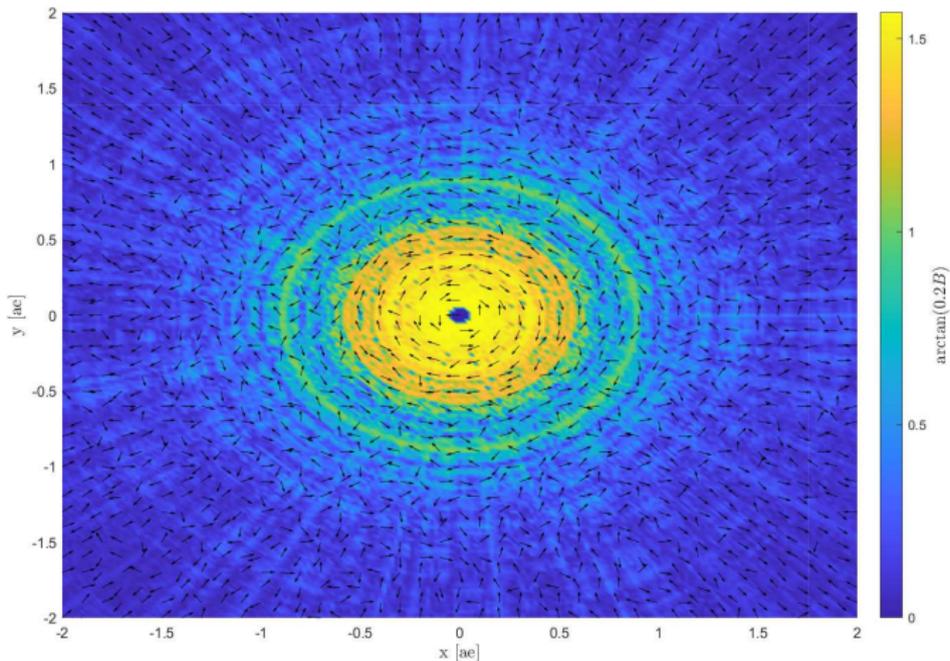
Slab поле характеризуется тем, что  $\vec{B}_{\text{reg}} \parallel \vec{k}$ . В используемой модели Slab разбивается на независимые радиальные и азимутальные составляющие.

$$\vec{A}_{\text{rad}} = \frac{a}{r\kappa \sin \theta} \sin \left( \kappa \sqrt{\frac{r}{a}} + \delta \right) (\cos \alpha \vec{e}_\theta + \sin \alpha \vec{e}_\varphi)$$

$$\vec{B}_{\text{slab,rad}} = 2\delta B_{0i,\text{rad}}(r, \kappa) \cos \psi r \sqrt{ra} \nabla \times \vec{A}_{\text{rad}}$$

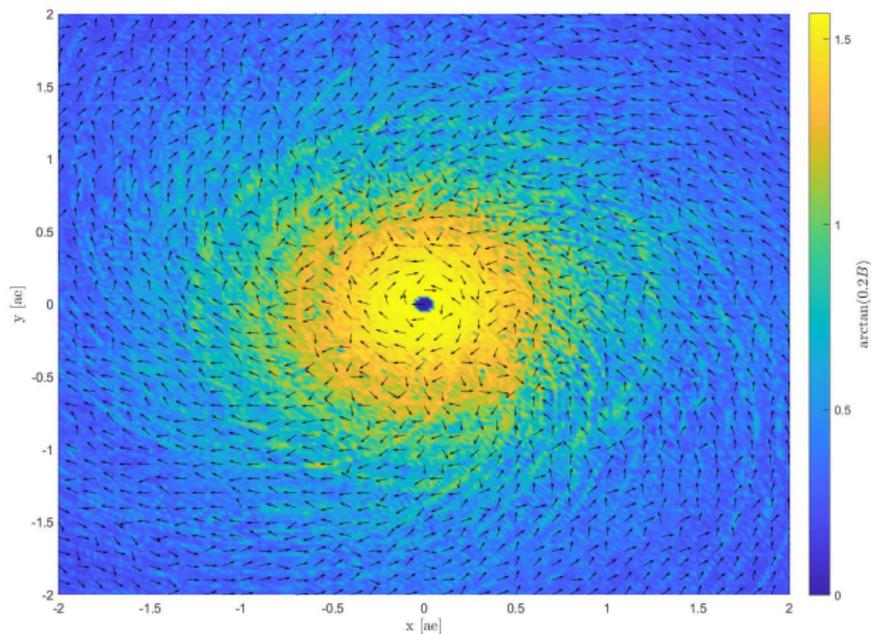
$$\vec{A}_{\text{az}} = r \sin \theta \delta B_{0i,\text{az}} \kappa^{-1} \sin (\kappa \varphi + \delta) \sin \psi (\sin \alpha \vec{e}_r + \cos \alpha \vec{e}_\theta)$$

# Изображение Slab поля



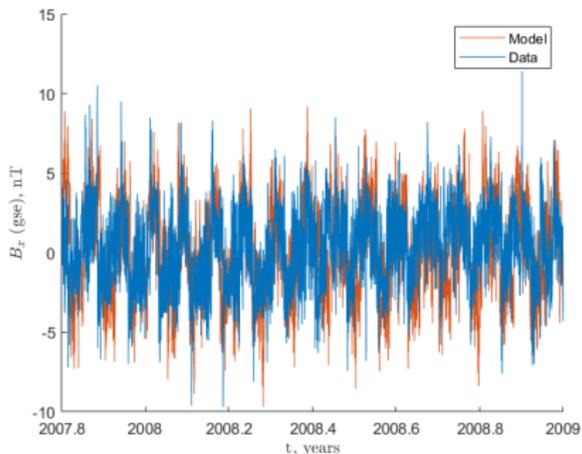
Slab поле при срезе  $z = 0$ .

# Результирующее магнитное поле

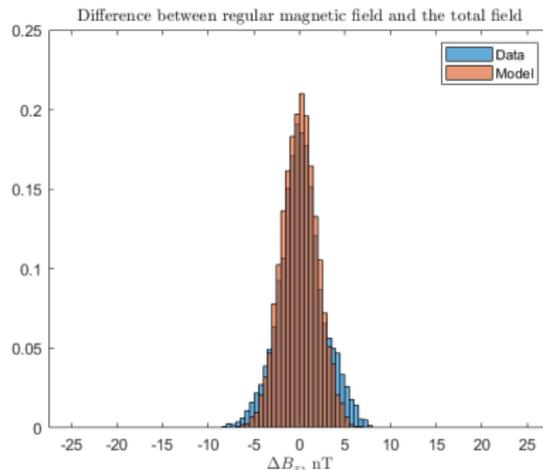


Возмущенное магнитное поле при срезе  $z = 0$ .

# Анализ результатов: ACE

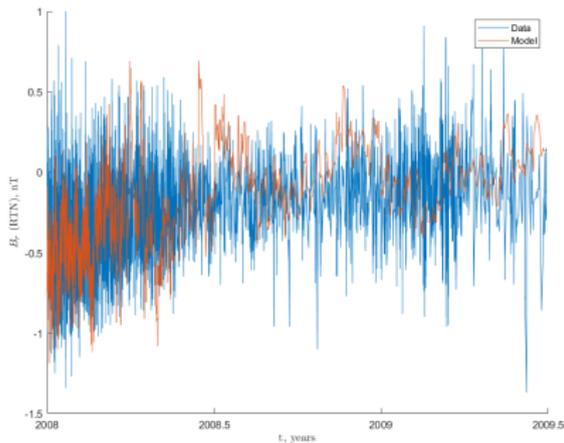


x компонента полного поля, в GSE, в период минимума солнечной активности в сравнении с наблюдениями ACE

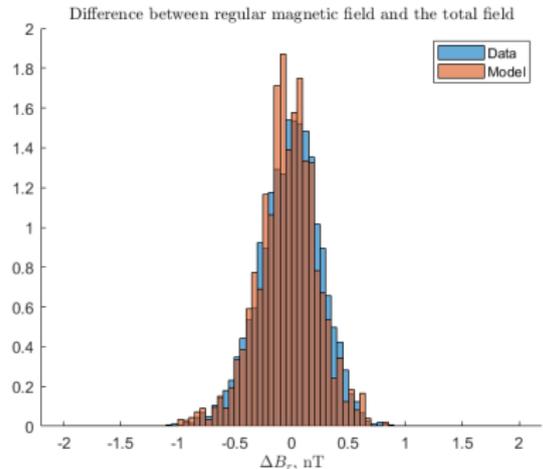


Сравнение распределений  $\Delta B_x$  в координатах GSE с наблюдениями ACE  
Дивергенция Йенсена — Шеннона = 0.22

# Анализ результатов: Ulysses

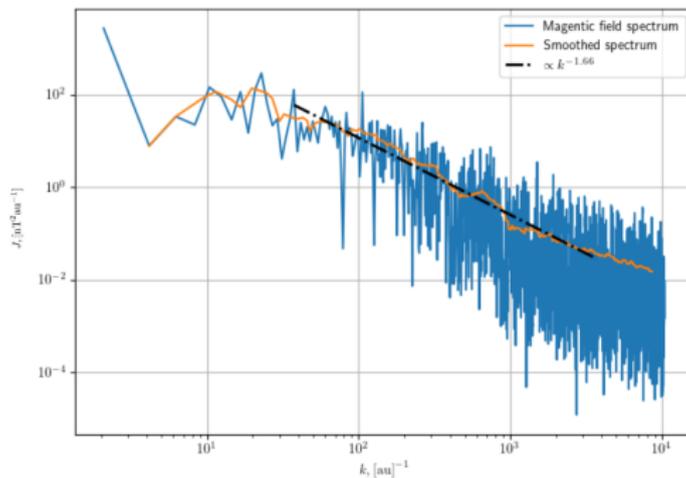


$r$  компонента полного поля, в RTN, в период минимума солнечной активности в сравнении с наблюдениями Ulysses



Сравнение распределений  $\Delta B_r$  в координатах RTN с наблюдениями Ulysses  
Дивергенция Йенсена — Шеннона = 1.41

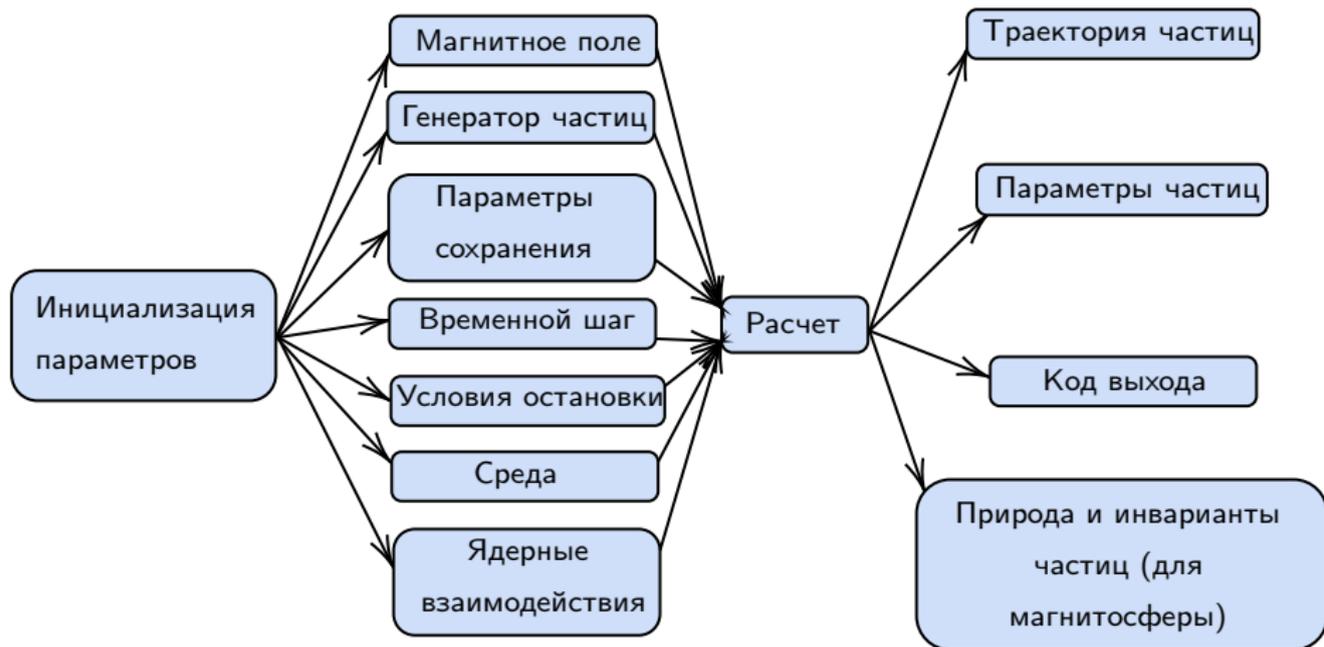
# Энергетический спектр мощности возмущений численной модели



Спектр полученного поля  $\propto k^{-1.63 \pm 0.06}$

Полученный спектр совпадает с наблюдениями PSP (Sioulas et al. 2023).

# Структура пакета GT



- Пакет программ разрабатывался для магнитосферы. Он позволяет рассчитывать:

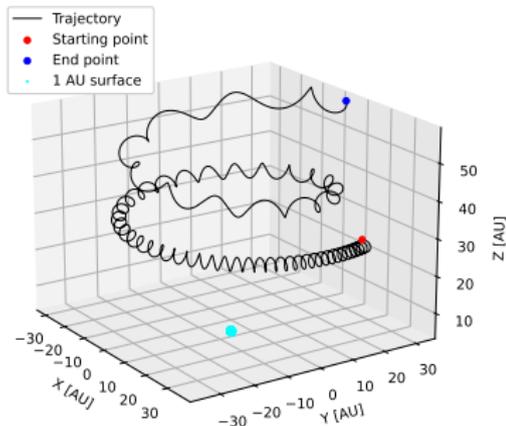
- Пакет программ разрабатывался для магнитосферы. Он позволяет рассчитывать:
  - Жесткость геомагнитного обрезания

- Пакет программ разрабатывался для магнитосферы. Он позволяет рассчитывать:
  - Жесткость геомагнитного обрезания
  - Асимптотические направления

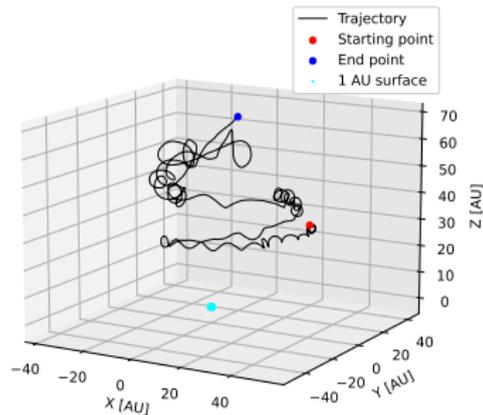
- Пакет программ разрабатывался для магнитосферы. Он позволяет рассчитывать:
  - Жесткость геомагнитного обрезания
  - Асимптотические направления
  - Потоки альбедных частиц

- Пакет программ разрабатывался для магнитосферы. Он позволяет рассчитывать:
  - Жесткость геомагнитного обрезания
  - Асимптотические направления
  - Потоки альбедных частиц
  - Захват частиц
  - ...

# Пример расчета траектории протона

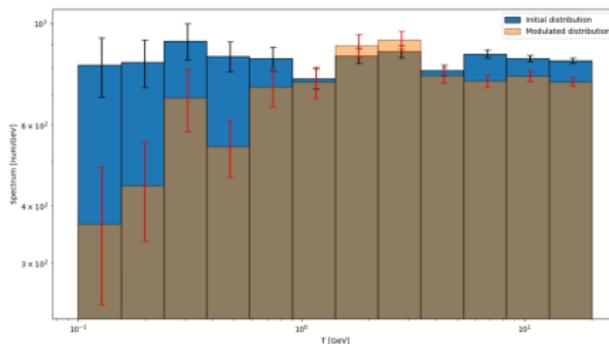


Траектория протона с энергией 1 ГэВ в поле без возмущений

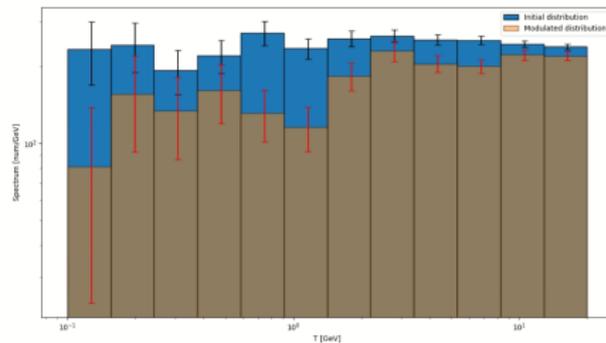


Траектория протона с энергией 1 ГэВ в поле с возмущениями

# Предварительные результаты модуляции космических лучей



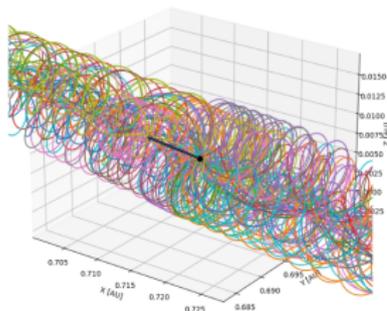
(a) Модуляция в регулярном поле



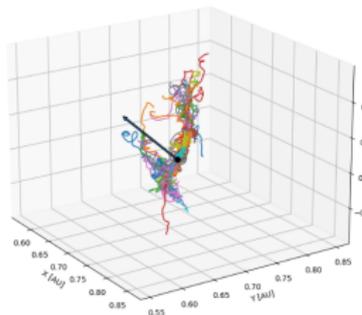
(b) Модуляция в возмущенном поле

Модуляция равномерного спектра протонов энергии от 0.1 ГэВ до 20 ГэВ при распространении из 30 ае до 20 ае

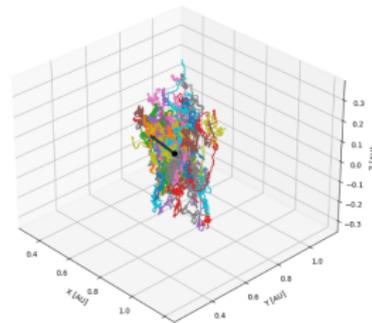
# Диффузия частиц 1



(a) В чисто регулярном поле



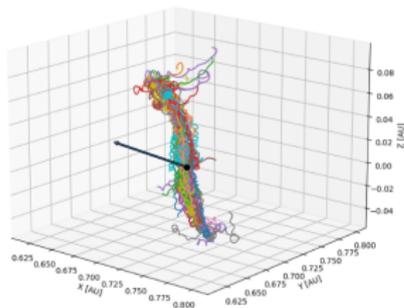
(b) В возмущенном поле (без  $\vec{B}_{reg}$ ) за время 200 сек



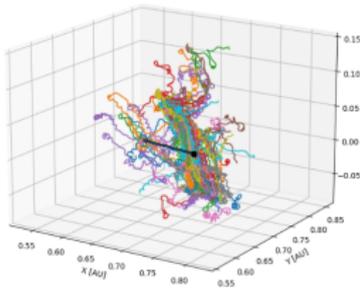
(c) В возмущенном поле (без  $\vec{B}_{reg}$ ) за время 2000 сек

Траектории протонов 200 МэВ запущенных с изотропно с точки  $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0)$  ае, за время  $t$ ; Стрела указывает направление регулярного поля в данной точке

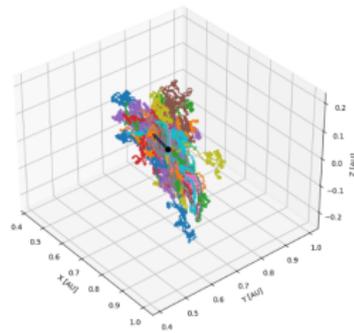
# Диффузия частиц 2



(a) В суммарном поле за время 200 сек



(b) В суммарном поле за время 500 сек



(c) В суммарном поле за время 2000 сек

Траектории протонов 200 МэВ запущенных с изотропно с точки  $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0)$  ае, за время  $t$ ; Стрела указывает направление регулярного поля в данной точке

# Заключение

- Реализована модель возмущённого магнитного поля в гелиосфере

# Заключение

- Реализована модель возмущённого магнитного поля в гелиосфере
- Проведено сравнение модели поля с наблюдаемым полем, космическими аппаратами ACE и Ulysses

# Заключение

- Реализована модель возмущённого магнитного поля в гелиосфере
- Проведено сравнение модели поля с наблюдаемым полем, космическими аппаратами ACE и Ulysses
- Получен спектр возмущений который согласуется с наблюдениями космического аппарата PSP

# Заключение

- Реализована модель возмущённого магнитного поля в гелиосфере
- Проведено сравнение модели поля с наблюдаемым полем, космическими аппаратами ACE и Ulysses
- Получен спектр возмущений который согласуется с наблюдениями космического аппарата PSP
- Среда гелиосферы добавлена в пакет программ GT

# Заключение

- Реализована модель возмущённого магнитного поля в гелиосфере
- Проведено сравнение модели поля с наблюдаемым полем, космическими аппаратами ACE и Ulysses
- Получен спектр возмущений который согласуется с наблюдениями космического аппарата PSP
- Среда гелиосферы добавлена в пакет программ GT
- Показана эффективность в воспроизведении эффекта солнечной модуляции

# Заключение

- Реализована модель возмущённого магнитного поля в гелиосфере
- Проведено сравнение модели поля с наблюдаемым полем, космическими аппаратами ACE и Ulysses
- Получен спектр возмущений который согласуется с наблюдениями космического аппарата PSP
- Среда гелиосферы добавлена в пакет программ GT
- Показана эффективность в воспроизведении эффекта солнечной модуляции
- Рассчитаны траектории портнов 200 МэВ для дальнейшей оценки коэффициента диффузии

Спасибо за внимание!

# Спектр модели

Для  $2D$ :

$$\delta B_{0i}^2 = \delta B_0^2(r) \frac{2\pi\kappa_i\Delta\kappa_i\kappa_i^p}{1 + (\lambda_{\perp c}(r)\kappa_i/r)^{p+q}} \quad (13)$$

Здесь  $q = \frac{8}{3}$ , задает вид спектра при больших волновых числах, а  $p$  при низких, его значение берется равным 0. Функция  $\lambda_{\perp c}(r)$  определяют масштаб при котором происходит переход между двумя видами спектра.

Спектр Slab компонент определяется следующим образом, с  $q = \frac{5}{3}$  и  $p = 0$ .

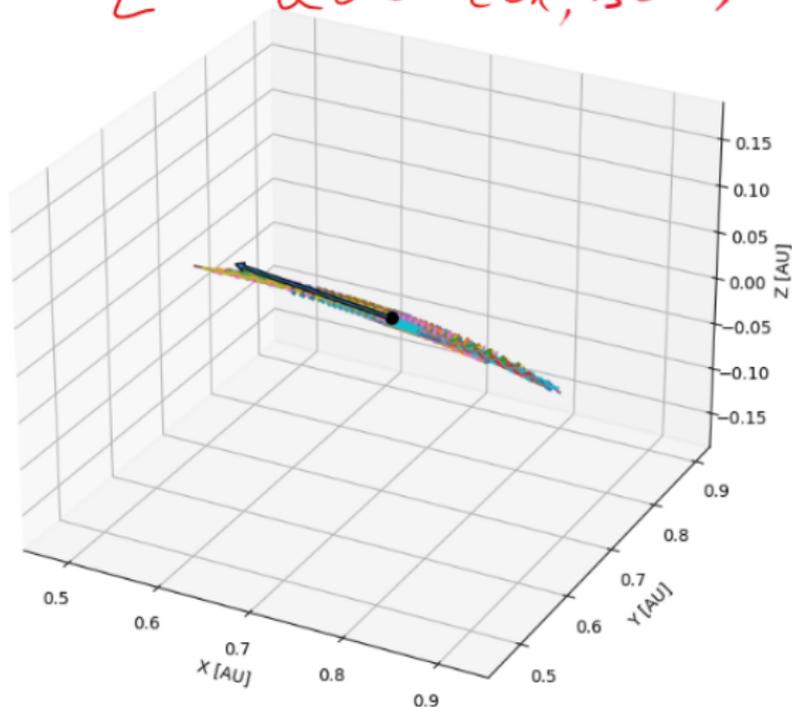
$$\delta B_{0i,\text{rad}}^2 = \delta B_0^2(r) \frac{\Delta\kappa_i\kappa_i^p}{1 + (\lambda_{c\parallel}(r)\kappa_i/\sqrt{ar})^{p+q}} \quad (17)$$

$$\delta B_{0i,\text{az}}^2 = \delta B_0^2(r) \frac{\Delta\kappa_i\kappa_i^p}{1 + (\lambda_{c\parallel}(r)\kappa_i/r)^{p+q}} \quad (18)$$

$$\kappa = k \cdot r$$

# Диффузия в регулярном поле

$$t = 200 \text{ сек}; \nu t = 0,01 \text{ сек}$$



# Условия моделирования модуляции

Регулярное поле

$$\Delta t = 0,1 \text{ сек}$$

Возмущенное поле

$$\Delta t = 0,1 \text{ сек}$$

$$K_{\min} = 0$$

$$K_{\max} = 7$$

$$N = 512$$

# Условия моделирования диффузии

$$K_{\min} = 0; \quad K_{\max} = 6$$

$$N = 1024$$

$$\Delta t = 0,01 \text{ сек}$$