# Моделирование характеристик 27-дневных вариаций ГКЛ

Галикян Н.Г., Юлбарисов Р.Ф.

НИЯУ МИФИ

# Цель и задачи исследования

- Цель
  - Воспроизведение характеристик 27-дневных вариаций потоков ГКЛ, наблюдаемых в эксперименте PAMELA в период с конца 2007 до начала 2008 года.

# Цель и задачи исследования

- Цель
  - Воспроизведение характеристик 27-дневных вариаций потоков ГКЛ, наблюдаемых в эксперименте PAMELA в период с конца 2007 до начала 2008 года.
- Задачи
  - Создание алгоритма для моделирования прохождения ГКЛ через гелиосферу путем решения уравнения движения частиц в электромагнитном поле.

# Цель и задачи исследования

- Цель
  - Воспроизведение характеристик 27-дневных вариаций потоков ГКЛ, наблюдаемых в эксперименте PAMELA в период с конца 2007 до начала 2008 года.
- Задачи
  - Создание алгоритма для моделирования прохождения ГКЛ через гелиосферу путем решения уравнения движения частиц в электромагнитном поле.
  - Проведение моделирования распространения протонов ГКЛ в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг.

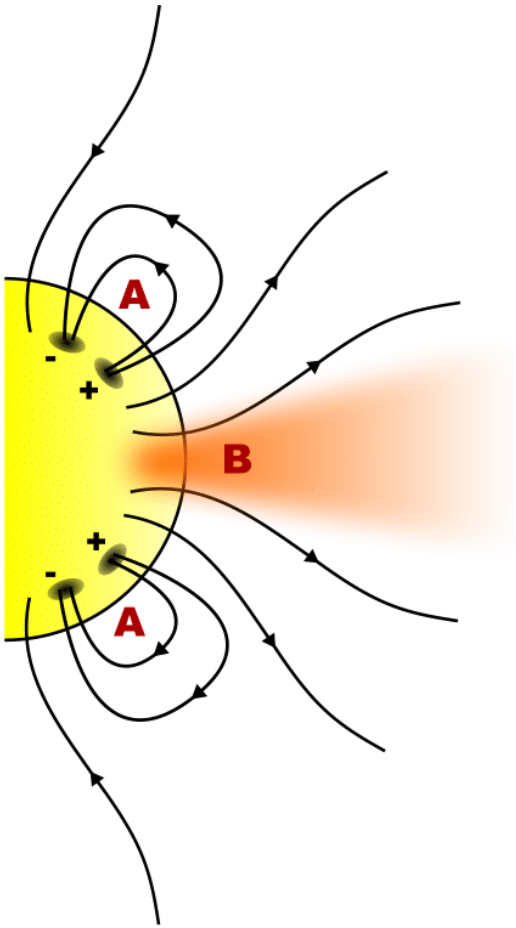
# Цель и задачи исследования

- Цель
  - Воспроизведение характеристик 27-дневных вариаций потоков ГКЛ, наблюдаемых в эксперименте PAMELA в период с конца 2007 до начала 2008 года.
- Задачи
  - Создание алгоритма для моделирования прохождения ГКЛ через гелиосферу путем решения уравнения движения частиц в электромагнитном поле.
  - Проведение моделирования распространения протонов ГКЛ в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг.
  - Определение энергетической зависимости амплитуд получаемых вариаций потока протонов на орбите Земли.

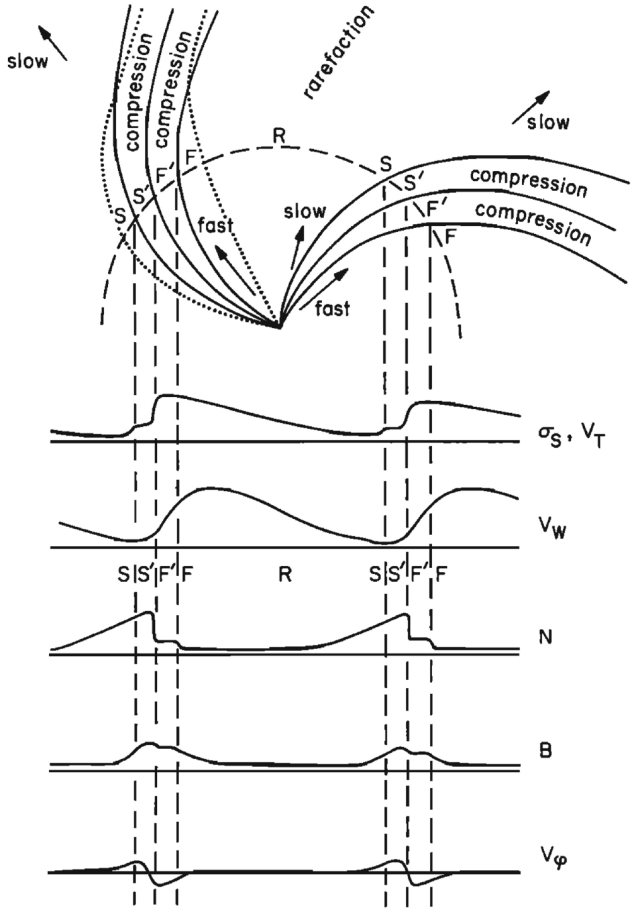
# Цель и задачи исследования

- Цель
  - Воспроизведение характеристик 27-дневных вариаций потоков ГКЛ, наблюдаемых в эксперименте PAMELA в период с конца 2007 до начала 2008 года.
- Задачи
  - Создание алгоритма для моделирования прохождения ГКЛ через гелиосферу путем решения уравнения движения частиц в электромагнитном поле.
  - Проведение моделирования распространения протонов ГКЛ в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг.
  - Определение энергетической зависимости амплитуд получаемых вариаций потока протонов на орбите Земли.
  - Сравнение с наблюдениями в эксперименте PAMELA и анализ.

# Природа возникновения вариаций




Силовые линии магнитной индукции в корональной дыре




Вариации в параметрах плазмы в коротирующих областях

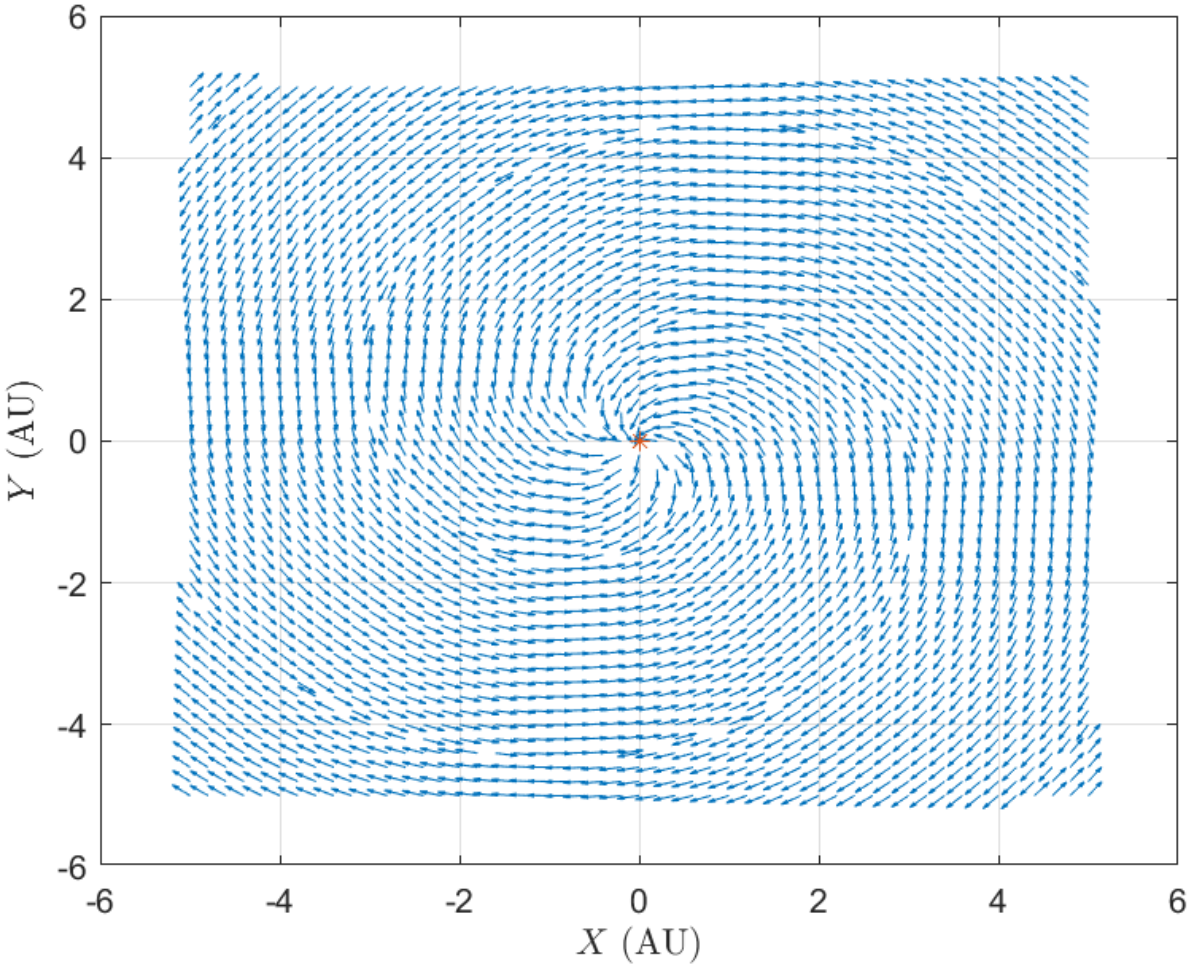
# Модель Паркера для магнитного поля

## Вектор магнитной индукции в солнечной магнитной СК

$$\vec{B} = A \cdot B_0 \frac{r_0^2}{r^2} \left( \vec{e}_r - \frac{(r - r_s)\Omega}{v} \sin\theta \vec{e}_\phi \right) H(\vec{r})$$

$\Omega$ – сидеральная угловая скорость вращения Солнца.
$v$ – радиальная компонента скорости солнечного ветра.
$r_s$ – радиус поверхности источника.
$r_0$ – радиус, где наибольшее значение радиальной компоненты магнитного поля равна $B_0$.
$A$ – полярность солнечного магнитного поля.
$H(\vec{r})$ – сигмоида, задающая противоположное направление магнитного поля по разные стороны от ГТС.

# Визуализация магнитного поля



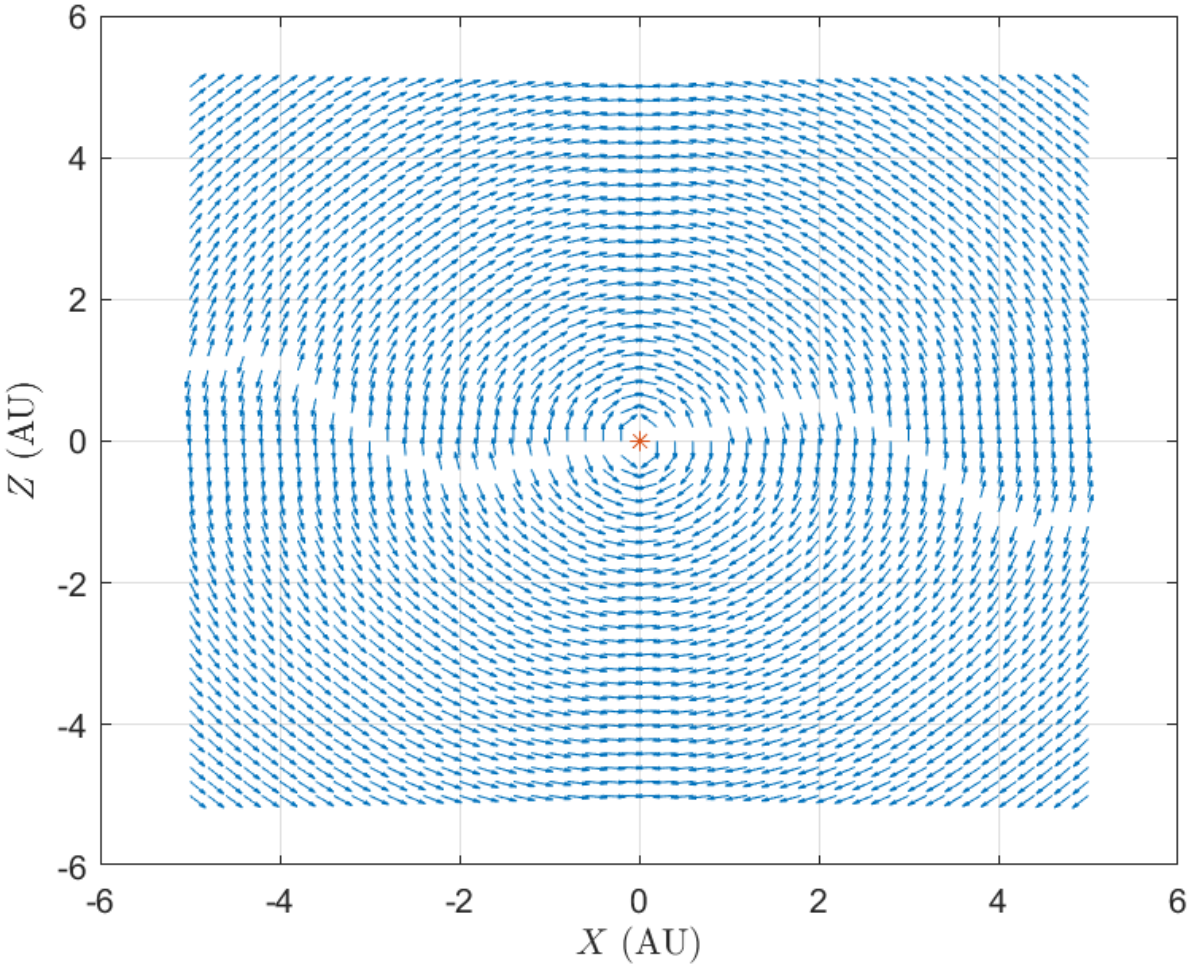

Векторная карта индукции магнитного поля в плоскости магнитного экватора $z = 0$

# Модель Паркера для электрического поля

**Вектор электрической напряженности в солнечной магнитной СК**

$$\vec{E} = \mp B_0 \frac{r_0^2 \Omega (r - r_s)}{r^4} (xz\vec{e}_x + yz\vec{e}_y - (x^2 + y^2)\vec{e}_z) H(\vec{r})$$

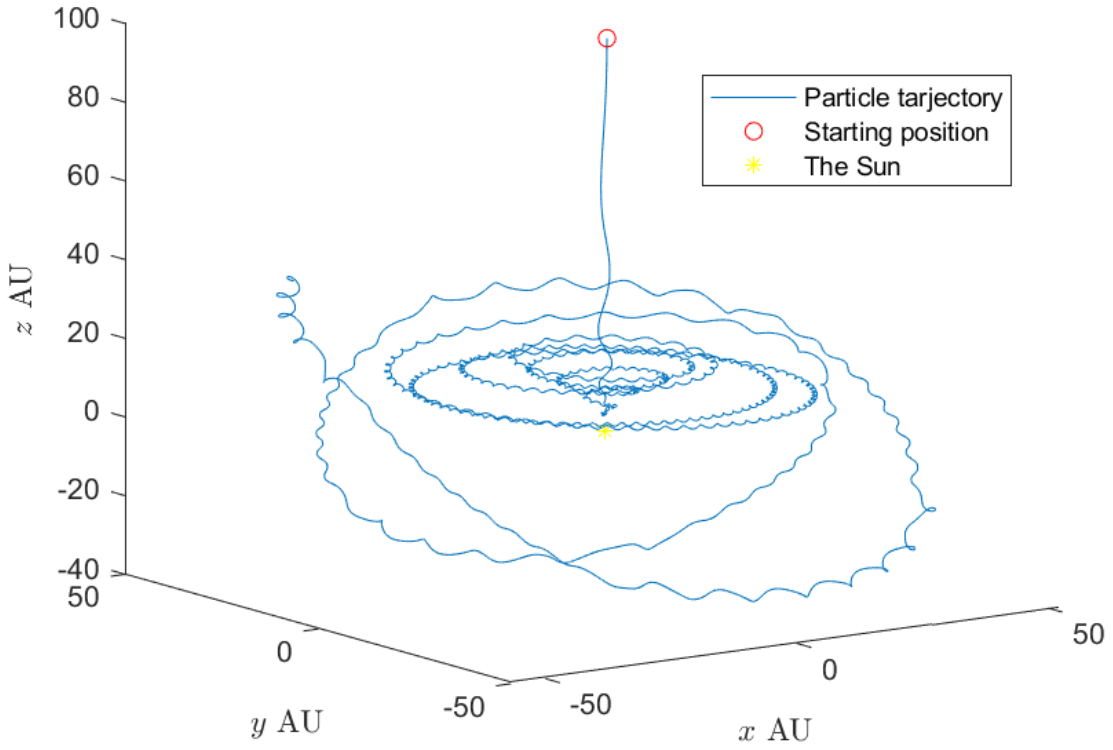
# Визуализация электрического поля




Векторная карта напряженности электрического поля в плоскости $y = 0$

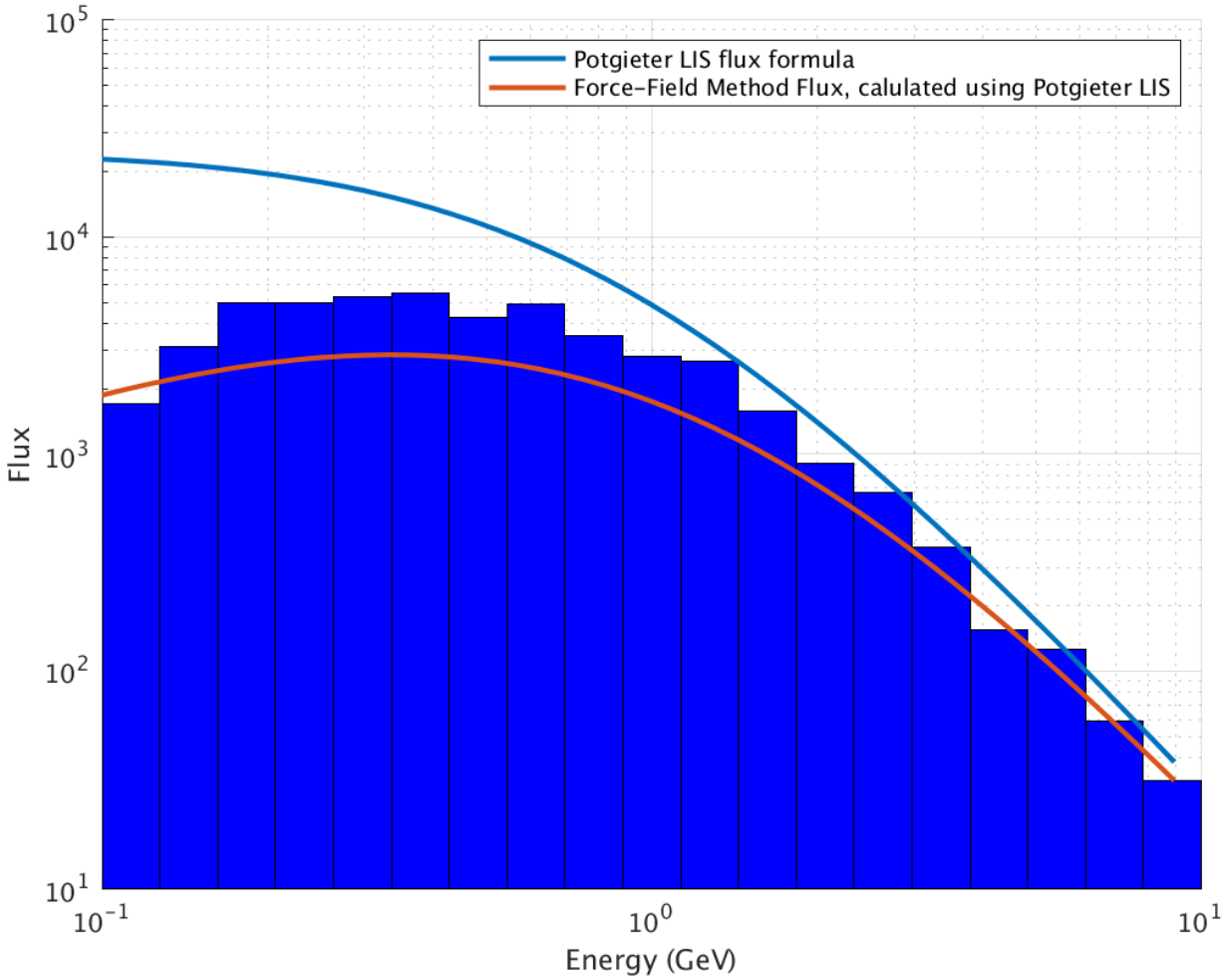
# Трассировка одной частицы в невозмущенной гелиосфере

В работе применяется пакет программ для численных расчетов траектории частиц в ЭМ поле с использованием метода частица-в-ячейке по схеме Бунемана–Бориса.




Пример траектории протона с энергией 1 ГэВ в гелиосфере

# Модуляция энергетического спектра ГКЛ




Воспроизведение эффекта солнечной модуляции ГКЛ (протонов)

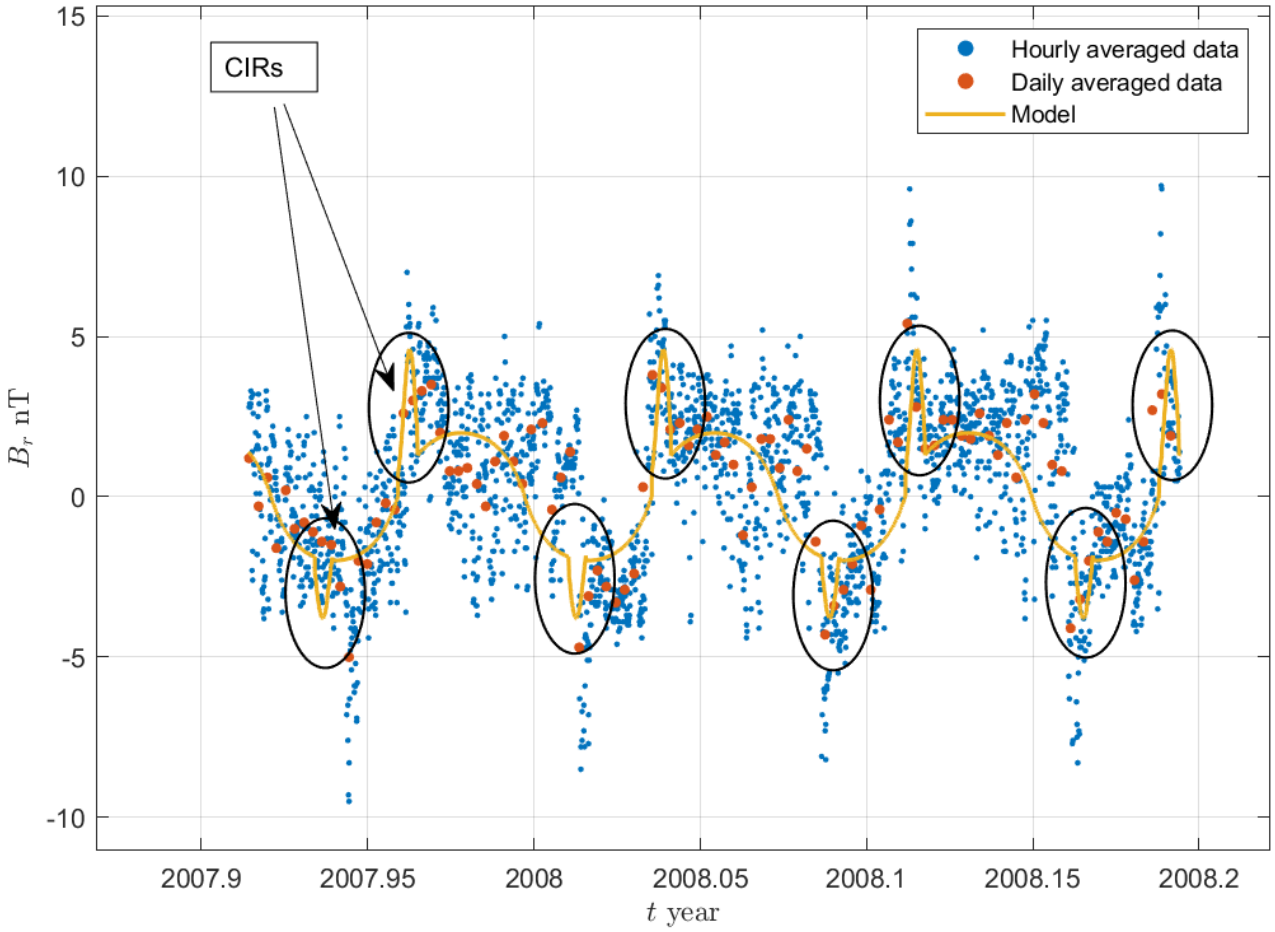
# Введение коротирующих областей в модель

## Силовые линии межпланетного магнитного поля в коротирующей области

$$\phi(r) = -\frac{\Omega \sin\theta}{v_{cir}}(r - r_s(1 + \log\lambda)) + \phi_s$$

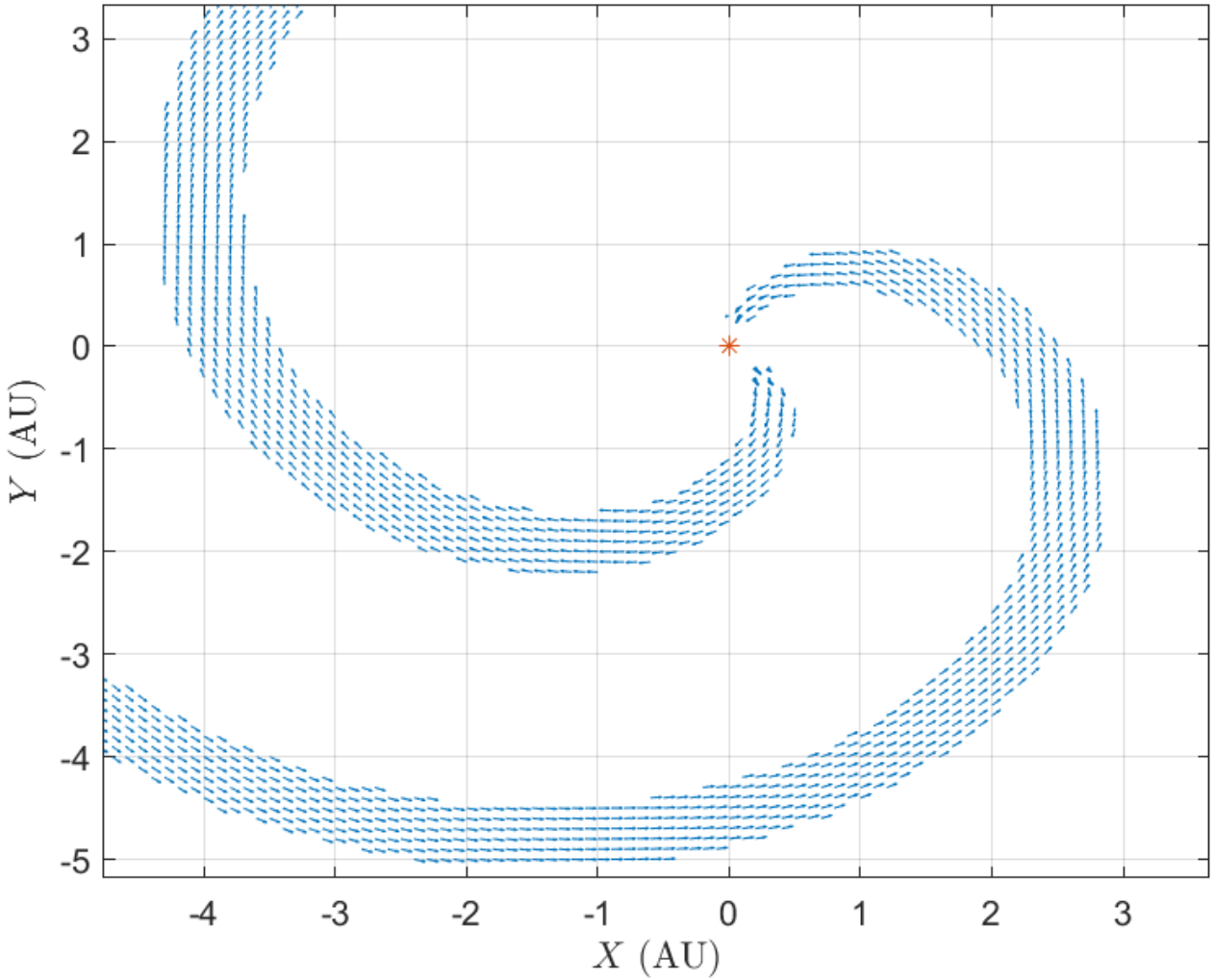
Где $\lambda = \frac{r}{r_s}$, $v_{cir}$ – скорость солнечного ветра в коротирующей области, $\phi = \phi_s$ при $r = r_s$.

# Добавление коротирующих областей и сравнение с измерениями



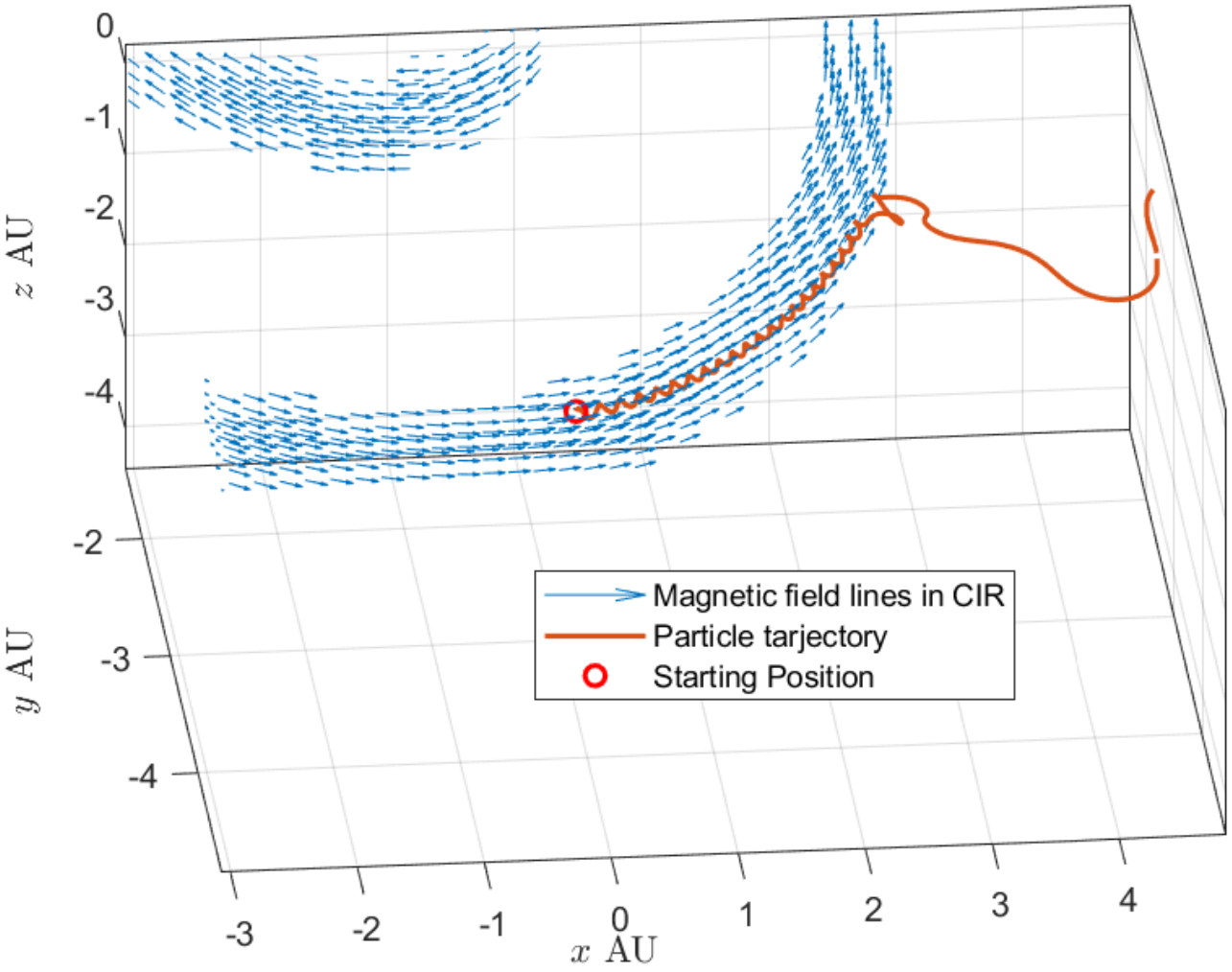

Сравнение измерений магнитного поля космического аппарата ACE с получаемой моделью

# Визуализация коротирующих областей




Векторная карта индукции магнитного поля в коротирующей области, в плоскости $z = 0$

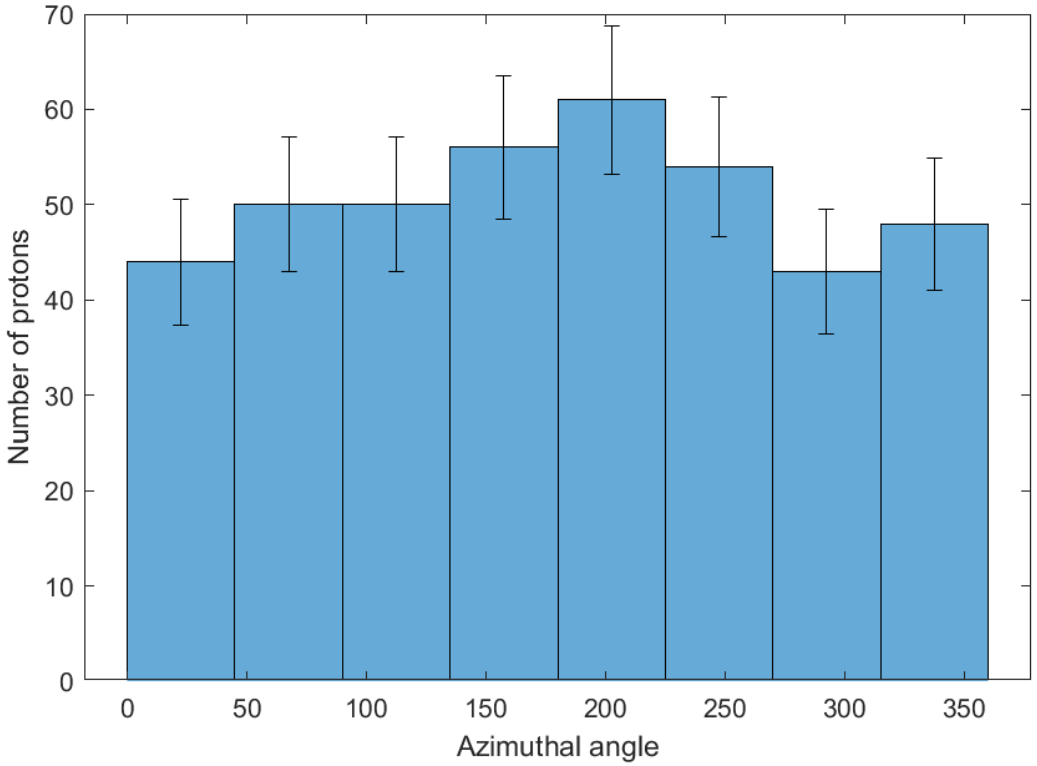
# Захват частиц в коротирующей области




Захват протона энергии 1 ГэВ в коротирующей области

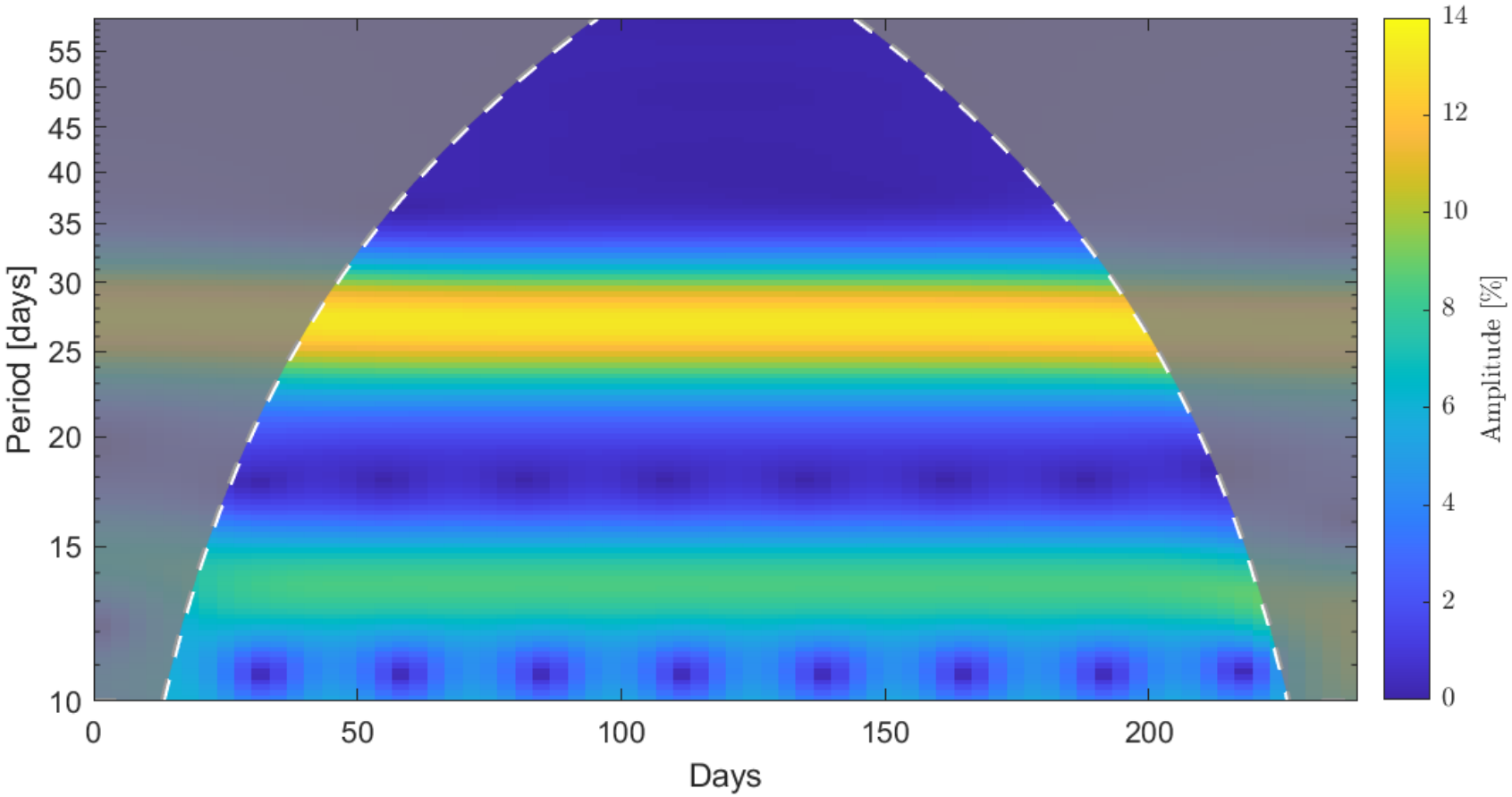
# 27-дневные вариации протонов

На расстоянии 100 а.е. проводилась генерация протонов, начальные координаты и направления скоростей которых распределены однородно и изотропно, а энергия равна 1 ГэВ. Произведена трассировка протонов и отобраны протоны долетевшие до 1 а.е.




Распределение протонов по азимутальному углу, что эквивалентно 27 дням.

# 27-дневные вариации протонов энергии 1 ГэВ




Скалограмма вейвлет-преобразования протонов энергии 1 ГэВ, которая соответствует относительной амплитуде $13 \pm 3\%$

# Результаты

- Построена модель электромагнитного поля в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг. с учетом коротирующих областей, в котором специально созданный алгоритм моделирует распространение ГКЛ.

# Результаты

- Построена модель электромагнитного поля в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг. с учетом коротирующих областей, в котором специально созданный алгоритм моделирует распространение ГКЛ.
- Для проверки воспроизведен эффект солнечной модуляции.

# Результаты

- Построена модель электромагнитного поля в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг. с учетом коротирующих областей, в котором специально созданный алгоритм моделирует распространение ГКЛ.
- Для проверки воспроизведен эффект солнечной модуляции.
- Промоделирован изотропный поток протонов ГКЛ, распространяющихся от окраин гелиосферы вглубь. Определена азимутальная зависимость потока протонов на 1 а.е.

# Результаты

- Построена модель электромагнитного поля в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг. с учетом коротирующих областей, в котором специально созданный алгоритм моделирует распространение ГКЛ.
- Для проверки воспроизведен эффект солнечной модуляции.
- Промоделирован изотропный поток протонов ГКЛ, распространяющихся от окраин гелиосферы вглубь. Определена азимутальная зависимость потока протонов на 1 а.е.
- Получен эффект 27-дневных вариаций для протонов с энергией 1 ГэВ с относительной амплитудой:

$$\delta = 13 \pm 3\%$$

# Результаты

- Построена модель электромагнитного поля в гелиосфере с характеристиками 2007-2008 гг. с учетом коротирующих областей, в котором специально созданный алгоритм моделирует распространение ГКЛ.
- Для проверки воспроизведен эффект солнечной модуляции.
- Промоделирован изотропный поток протонов ГКЛ, распространяющихся от окраин гелиосферы вглубь. Определена азимутальная зависимость потока протонов на 1 а.е.
- Получен эффект 27-дневных вариаций для протонов с энергией 1 ГэВ с относительной амплитудой:

$$\delta = 13 \pm 3\%$$

- Предсказывается существование вариаций с периодом 14 дней.