



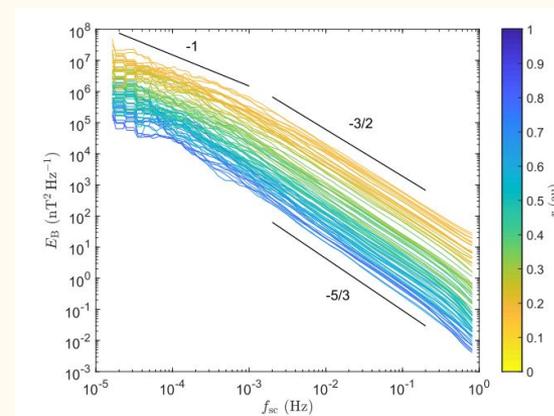
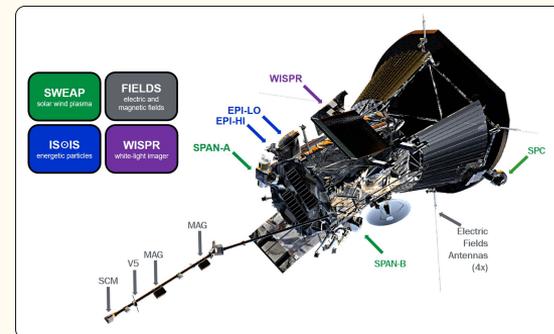
Исследование эволюции энергетического спектра флуктуаций солнечного ветра в рамках оболочечной модели

Дуканов И. А.
Юшков Е. В.
Соколов Д. Д.

БШФФ-2024
г. Иркутск

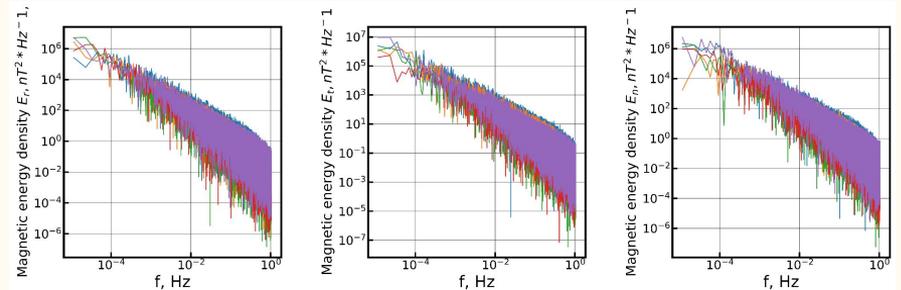
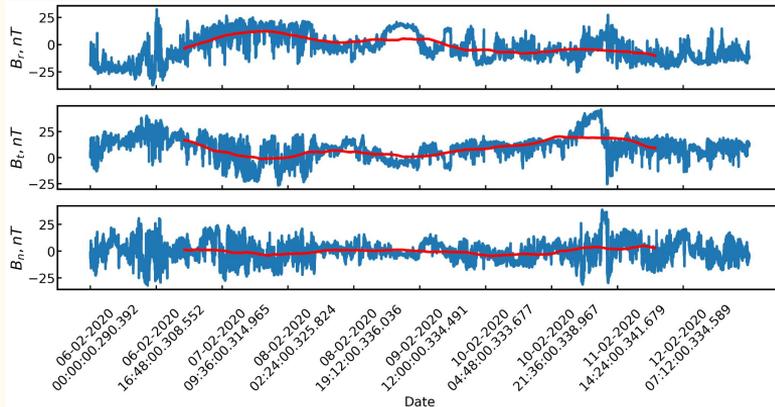
Постановка задачи

- Солнечный ветер – важнейшее связующее звено в системе Земля-Солнце, являющееся ключевым элементом динамики магнитосферы, суббурь, полярных сияний, формирования ударной волны и магнитопаузы.
- Наша работа посвящена изучению спектров флуктуаций полей солнечного ветра. Мы делаем попытку описать формирование инерционного интервала в процессе турбулентного каскада, изменение наклонов спектров и динамику крупномасштабного излома.
- Для этих целей мы используем оболочечную (каскадную) МГД-модель, в рамках которой численно анализируем свободное вырождение турбулентности плазмы солнечного ветра без подкачки энергии и спиральности по спектру. При этом в качестве входных спектральных данных используются данные измерений Parker Solar Probe.



Экспериментальные данные

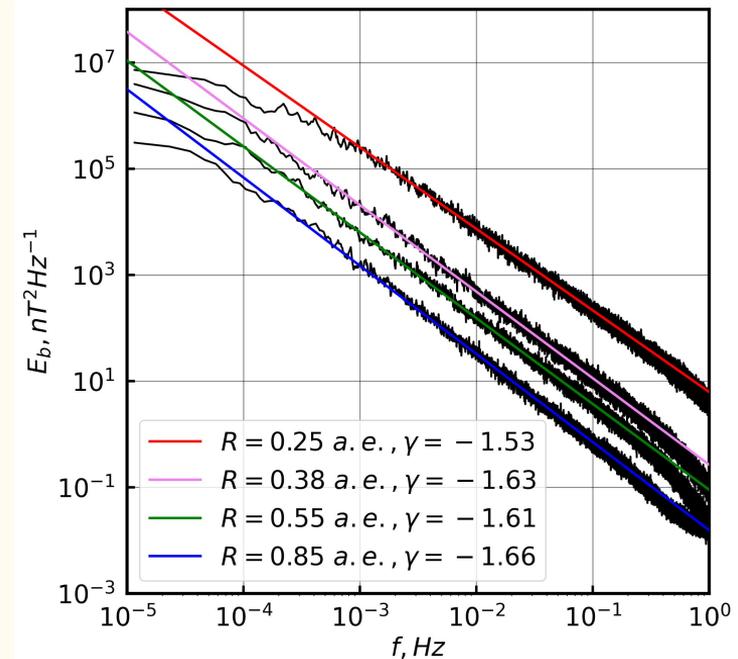
- Основой для спектров флуктуаций полей солнечного ветра, используемых в качестве входных данных моделирования, служат временные ряды магнитного поля (детектор MAG) и поля скорости протонов (детектор SWEAP).
- В качестве периода наблюдений для каждого гелиоцентрического расстояния выбиралась одна неделя.
- Схема подготовки данных: временной ряд \rightarrow среднее \rightarrow флуктуации \rightarrow спектры Фурье.



**Временной ряд магнитного поля, пятидневное среднее.
Соответствующие каждому дню периодограммы.**

Спектры флуктуаций полей солнечного ветра

- Спектральные плотности магнитной энергии для четырех гелиоцентрических расстояний.
- Ключевые индикаторы: наклоны спектральных линий, длины инерционных интервалов и излом в левой части спектра.
- Полученные спектры после обезразмеривания могут служить начальными данными для моделирования и анализа теоретических предсказаний.



Система МГД в каскадном приближении

$$\partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} - \nabla(P + B^2/2) + \text{Re}^{-1} \Delta \mathbf{v}$$

$$\partial_t \mathbf{B} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \text{Rm}^{-1} \Delta \mathbf{B}$$

$$\nabla \mathbf{v} = 0, \quad \nabla \mathbf{B} = 0$$

Переход от безразмерной системы МГД уравнений к системе в каскадном приближении осуществляется с помощью применения Фурье-преобразования к полю скорости и магнитному полю, разбиения рабочего спектрального интервала на равномерную в log-шкале сетку и приближения нелинейного слагаемого некоторой суммой квадратичных нелинейностей, обеспечивающих сохранение всех требуемых интегралов движения.

$$\frac{dU_n}{dt} = W_n(\mathbf{U}, \mathbf{U}) - W_n(\mathbf{B}, \mathbf{B}) - \frac{k_n^2}{\text{Re}} U_n,$$
$$\frac{dB_n}{dt} = W_n(\mathbf{U}, \mathbf{B}) - W_n(\mathbf{B}, \mathbf{U}) - \frac{k_n^2}{\text{Rm}} B_n,$$

$$W_n(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = ik_n [(X_{n-1} Y_{n-1} + X_{n-1}^* Y_{n-1}^*) - \lambda X_n^* Y_{n+1}^* - \frac{\lambda^2}{2} (X_n Y_{n+1} + X_{n+1} Y_n + X_n Y_{n+1}^* + X_{n+1}^* Y_n) - \frac{\lambda}{2} (X_{n-1}^* Y_{n-1} - X_{n-1} Y_{n-1}^*) + \lambda X^* Y_{n+1}] - ik_n \lambda^{-5/2} [\frac{1}{2} (X_{n-1} Y_n + X_n Y_{n-1}) + \lambda X_n^* Y_{n-1}^* - \lambda^2 (X_{n+1} Y_{n+1} + X_{n+1}^* Y_{n+1}^*) + \frac{1}{2} (X_n Y_{n-1}^* + X_{n-1}^* Y_n) - \lambda X_n^* Y_{n-1} + \frac{\lambda}{2} (X_{n+1}^* Y_{n+1} - X_{n+1} Y_{n+1}^*)].$$

Система МГД в каскадном приближении

- Моделируемая МГД-система в каскадном представлении, в котором магнитное поле и поле скорости в каждой спектральной оболочка задаются коллективными переменными.



$$U_n = a_n + ib_n$$

$$B_n = c_n + id_n$$

$$E_n = \Sigma(|U_n|^2 + |B_n|^2)/2$$

- Вид нелинейных слагаемых W определяется законами сохранения. В рамках трехмерной изотропной турбулентности сохраняются перекрестная и магнитная спиральности.

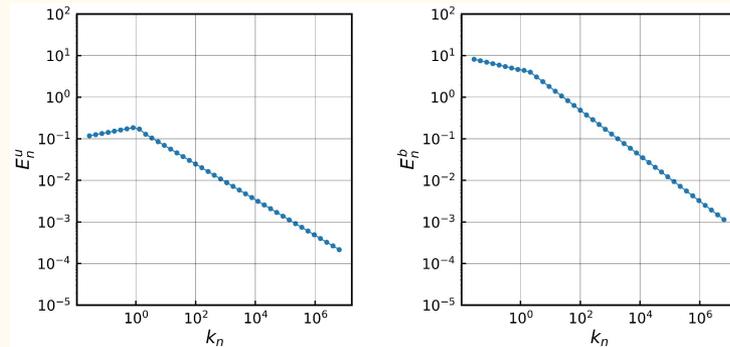
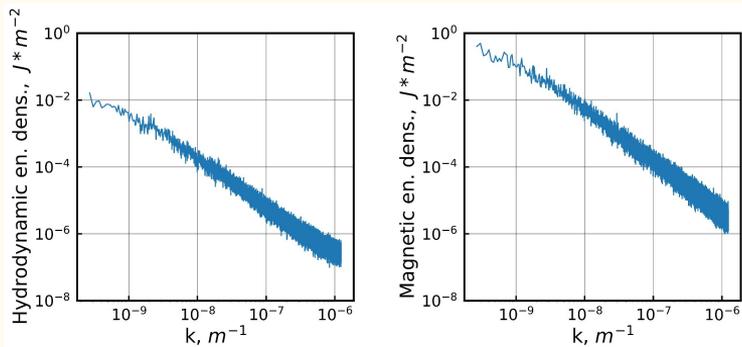


$$H_c = i \sum (U_n B_n^* + U_n^* B_n)/2 = \sum (a_n c_n + b_n d_n)$$

$$H_b = i \sum k_n^{-1} ((B_n^*)^2 - (B_n)^2)/4 = \sum k_n^{-1} c_n d_n$$

Переход от эксперимента к модели

- Для старта каскадного моделирования необходимо привести данные к безразмерному виду.
- Также необходимо разбиение на спектральные ячейки и интерполяция в область малых вихрей (вообще говоря, в эксперименте не измеряется)

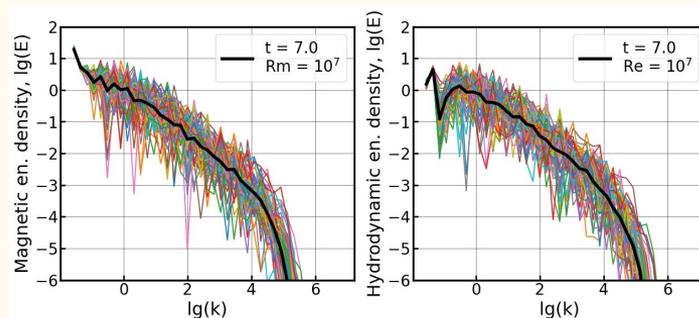
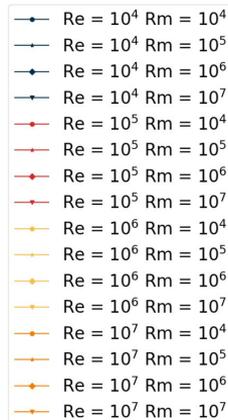
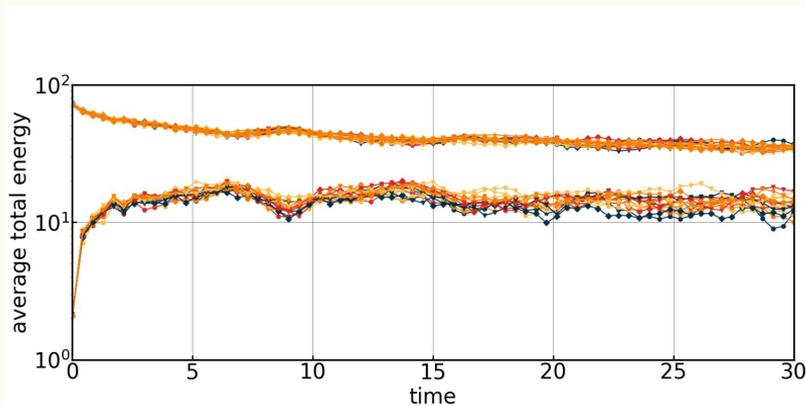


Исходные данные, восстановленные по спутниковым наблюдениям

Данные для запуска каскадной модели

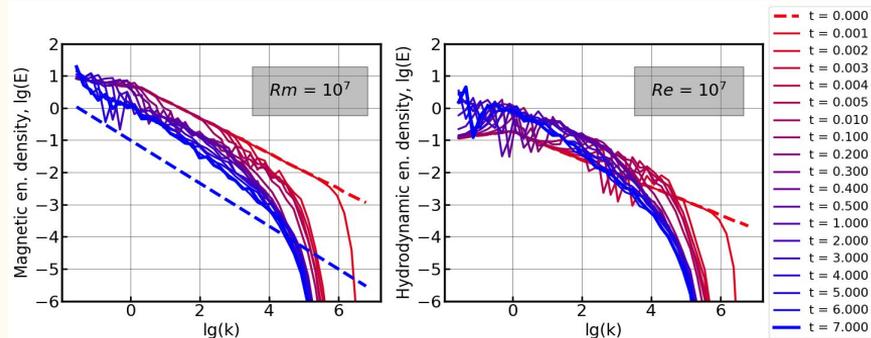
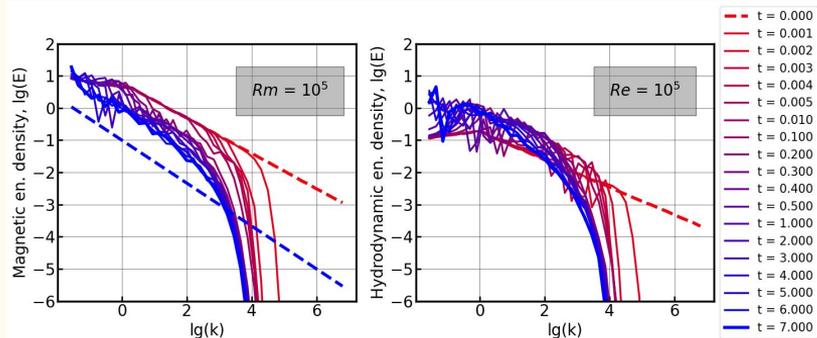
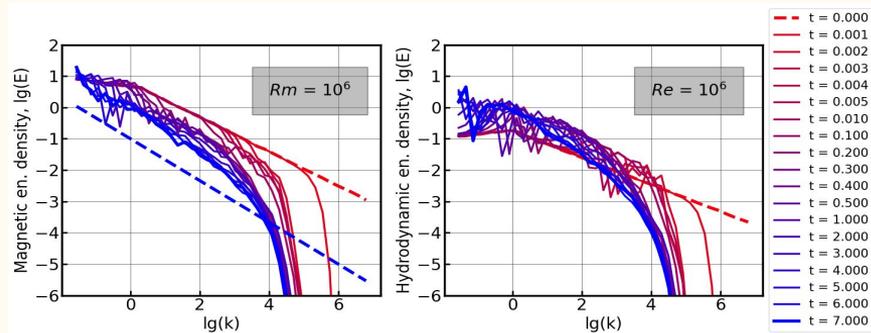
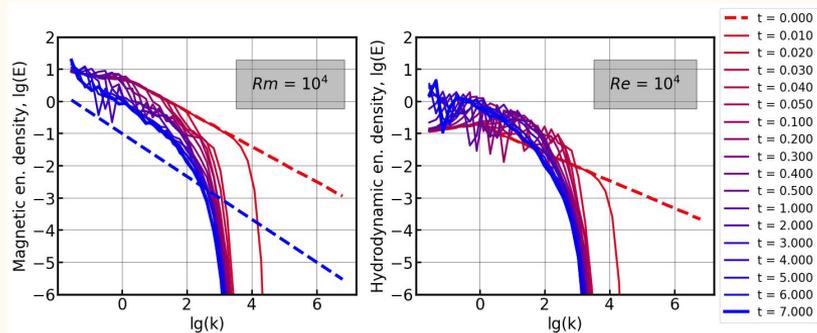
Оценка времени счета

- Оценки числа Рейнольдса для плазмы солнечного ветра, соответствуют $Re, Rm \in [10^4, 10^7]$.
- Предварительно проведем исследование зависимости полной энергии от времени.

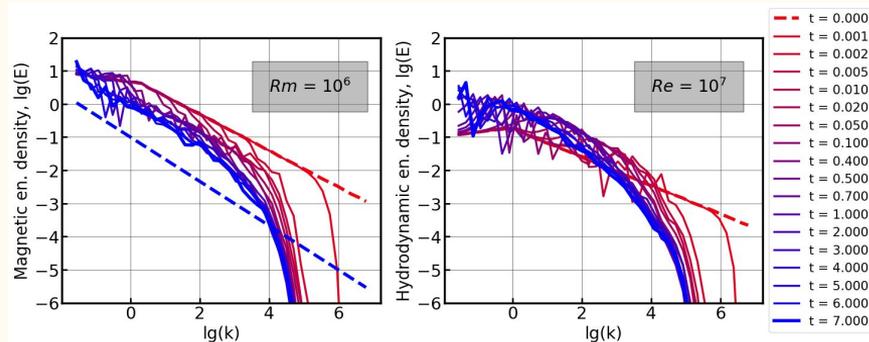
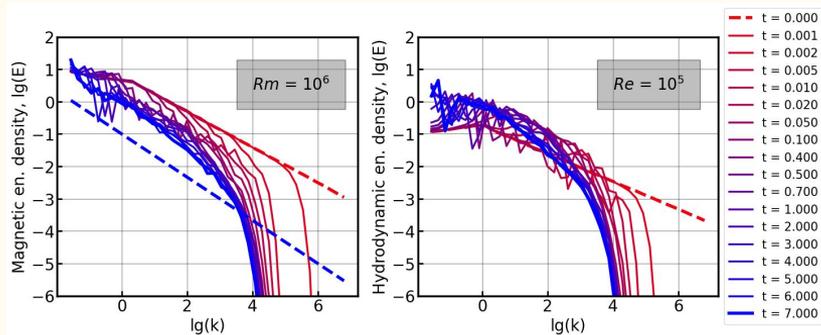
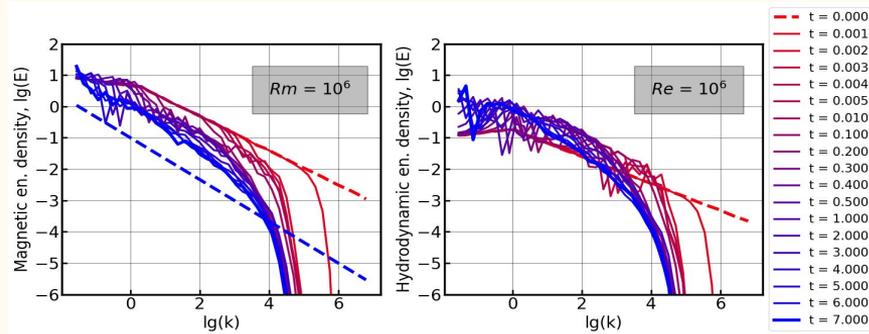
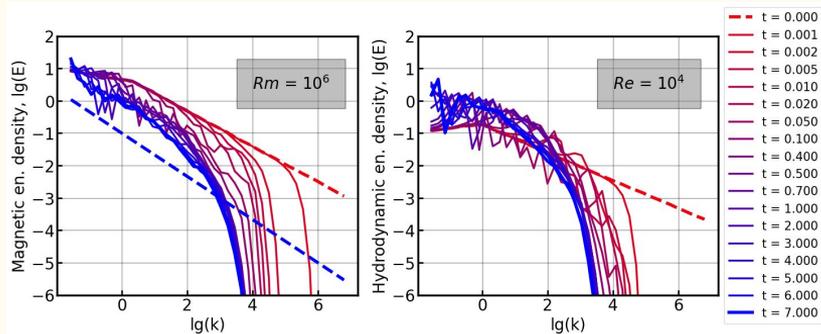


Из-за высокой степени стохастичности всех турбулентных процессов ключевым моментом всей работы с технической стороны является использование параллельных вычислений. Каждая траектория на графике полной энергии построена усреднением по нескольким реализациям. Спектр на графике построен усреднением по 64 реализациям.

Результат моделирования для $Rm = Re$



Вариация магнитного числа Прандтля. $Rm = 10^6$



Выводы

Parker Solar Probe

В спектре флуктуаций образуется инерционный интервал, свидетельствующий о наличии турбулентного каскада в плазме солнечного ветра.

Спектры в своей структуре предполагают наличие процессов подкачки интегралов движения и расширения плазмы солнечного ветра.

В магнитной части спектра имеется крупномасштабный излом.

За расстояние в 0.6 а.е. излом сдвинулся влево на порядок.

Оболочечная (каскадная) модель

В модельных данных образование ясно выраженного инерционного интервала заметно при определенных комбинациях Re и Rm , взятых из экспериментальной литературы.

Не предполагает ни подкачки, ни расширения плазмы. Ключевая идея моделирования – исследовать свободную диссипацию.

В магнитной части спектра имеется крупномасштабный излом.

Скорость движения излома выше. Время счета соответствует 0.1 а.е., а смещение сравнимо.