

Восстановление магнитоплазменной структуры активных областей Солнца с помощью программного пакета ruAMP


Иркутск, БШФФ 2024

Феденёв В.В.¹ Анфиногентов С.А.¹ Лесовой С.В.¹ Глоба М.В.¹

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН



Введение

- Сильное \vec{B} → вспышки → геоэффективные события
- Активные области  – места с сильным \vec{B}
- Знаем поле **в короне** → прогноз вспышек
- \vec{B} достоверно известно только на фотосфере!
- Необходимо восстанавливать полный вектор \vec{B}

Как узнать/оценить \vec{B} в объёме короны?

1. Прямые наблюдения

- Оптические наблюдения с применением эффекта Зеемана. Работают далеко не для всех случаев, есть множество ограничений. Основное ограничение – T .

2. Анализ микроволнового гирорезонансного излучения

- Ищем гирорезонансные источники и смотрим их спектры на радиогелиографах

3. Моделирование путём экстраполяции с фотосферы

- Оптимизационный метод в разных приближениях
- Экстраполяция нейросетями
- Другие методы

4. Комбинирование способов 2 и 3

5. Корональная МГД-сейсмология

Восстановление \vec{B} с ГУ на фотосфере

Ур-я Максвелла

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

- Потенциальное поле: нулевой ток в короне. $\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$, $\vec{B} = -\nabla\phi$, ϕ - магнитный потенциал.
- Линейное бессиловое приближение
 - $\vec{F} \approx [\vec{J} \times \vec{B}] = 0$
 - $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \alpha\vec{B}$, $\alpha = \text{const}$
- Нелинейное бессиловое приближение:
 $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \alpha(\vec{r})\vec{B}$

Плюсы и минусы

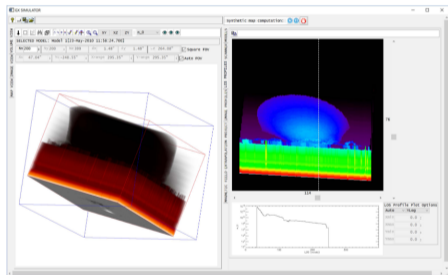
- **Точность:** Потенциальное приближение является самым простым, но не учитывает свободную энергию, которая может содержаться в объёме короны.
- **Вычислительные ресурсы:** Нелинейное бессиловое приближение требует значительных вычислительных ресурсов, результат зависит от разрешения на фотосфере. Приблизительное время расчёта 1 АО: около 20 минут.
- **Задача в любом случае точно не решается!**

GX Simulator






- Известный свободно распространяемый программный пакет
- Использует NLFFF для восстановления \vec{B}
- Создаёт модель T, ρ в короне, моделирует вспышечное и невспышечное излучение

ruAMPP: Приемник GX Simulator

- Написан на Python, использует его возможности
- Интерактивные и параллельные вычисления, высокая производительность
- Широкая экосистема библиотек визуализации



Этапы восстановления \vec{B}

1. Скачивание данных HMI + AIA
2. Построение нижних граничных условий
[ Сергей Анфиногентов]
3. Вычисление потенциального \vec{B} , NLFFF и силовых линий
[C++][ Алексей Ступишин]
4. Создание моделей T, ρ для короны [ Gelu Nita]
5. Создание карты солнечного пятна, переходной зоны и короны, переинтерполяция слоёв [ Алексей Кузнецов]
6. Решение уравнения переноса для радиоизображений, другие шаги [C++][ Алексей Кузнецов]

Компоненты ruAMPР

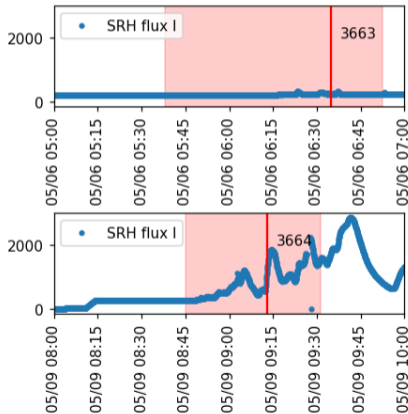
- Скачивание фотосферных данных (SDO/HMI)
- Перепроецирование ГУ на плоское основание (нормальная цилиндрическая равновеликая проекция)
- Создание модели магнитного поля в приближениях
 - потенциальном
 - линейном бессиловом (LFFF)
 - нелинейном бессиловом (NLFFF)
- Создание модели силовых линий, их визуализация
- Построение синтетических карт радиоизлучения с использованием тепловой модели EBTEL

Моделирование активных областей

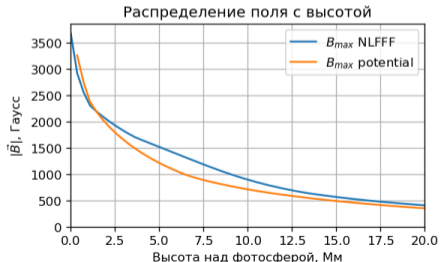
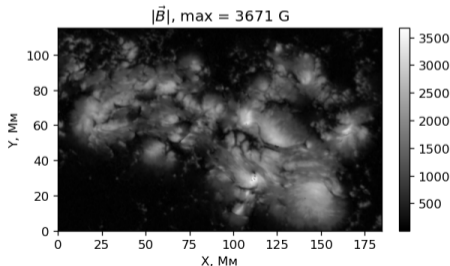
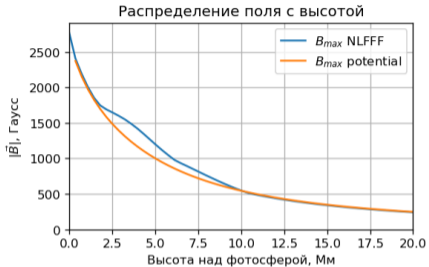
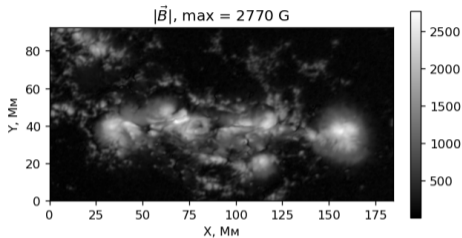
Выбраны активные области, в которых происходили сильные вспышки. Проверялась конфигурация поля до вспышки.

- AR13663
 - 2024-05-06 05:00:00
 - Класс вспышки: X4.5
- AR13664
 - 2024-05-09 08:30:00
 - Класс вспышки: X2.3

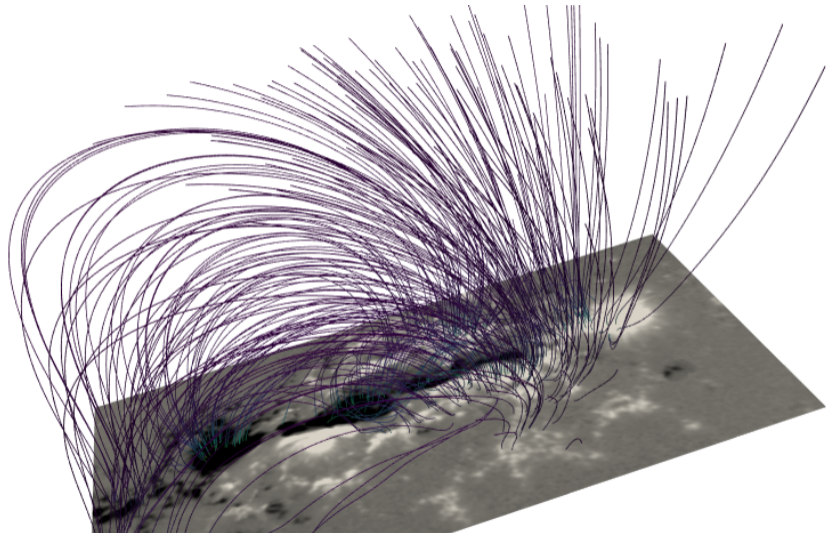
Почему у 13664 выше радиопоток?



Результаты моделирования



Силовые линии \vec{B} (компонент руАМРР)



Энергия магнитоплазменной структуры

$$E_{free} = \int_V \frac{B_{NLFFF}^2}{2\mu_0} dV - \int_V \frac{B_{pot}^2}{2\mu_0} dV \quad (1)$$

- AR13663

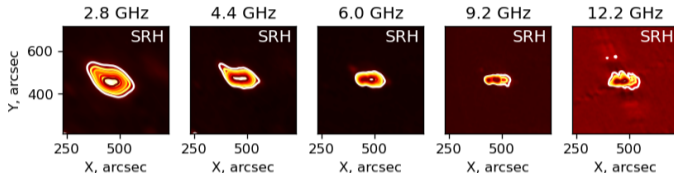
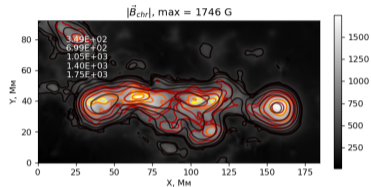
- $E_{pot} = 1.04 \times 10^{33}$ эрг
- $E_{NLFFF} = 1.26 \times 10^{33}$ эрг
- $E_{free} = 2.16 \times 10^{32}$ эрг

- AR13664

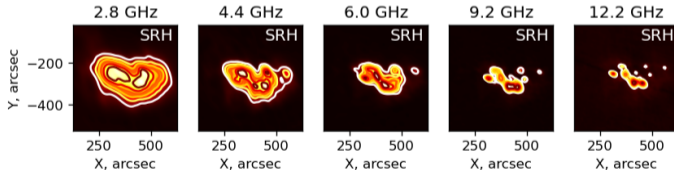
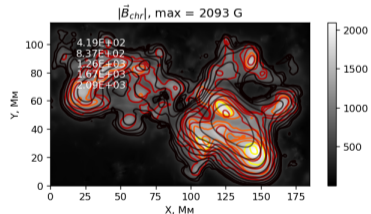
- $E_{pot} = 2.27 \times 10^{33}$ эрг
- $E_{NLFFF} = 3.2 \times 10^{33}$ эрг
- $E_{free} = 9.32 \times 10^{32}$ эрг

Сравнение с наблюдениями СРГ

AR13663



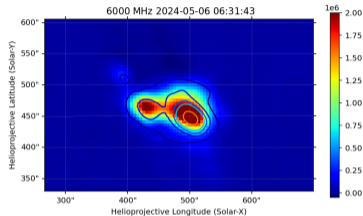
AR13664



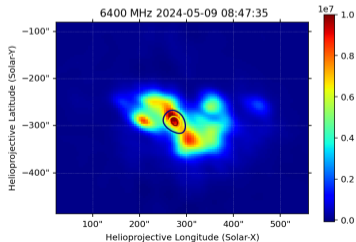
Выводы

- У AR13663 вспышка в зоне сильного \vec{B} . В переходном слое $B = 1746$ Гс, $E_{free} = 2.16 \times 10^{32}$ эрг.
- На высотах переходного слоя у AR13664 $B = 2093$ Гс, $E_{free} = 9.32 \times 10^{32}$ эрг, потоки на СРГ выше. Вспышка на нейтральной линии.

AR13663



AR13664



Спасибо за внимание!

- SUNCAST project: [<https://github.com/suncast-org>]
- pyAMPP-demo: [<https://github.com/vit1-irk/pyAMPP-0>]
- Код синтеза изображений СРГ Марии Глобы:
[<https://github.com/maria-globa/srhdata>]
- GX Simulator: [https://github.com/Gelu-Nita/GX_SIMULATOR]
- Sijie Yu development pyAMPP GUI:
[<https://github.com/sageyu123/pyAMPP>]