

Солнечное магнитное поле

- Является основополагающим фактором солнечной активности.
- В области солнечной короны является доминирующей силой.
- Доступно для измерений на уровне фотосферы.
- Пространственное распределение рассчитывается по фотосферным магнитограммам.

Способы расчета

- Потенциальная экстраполяция.
- Восстановление в бессиловом приближении.
- МГД моделирование.

Бессиловое поле

Соответствует статическому равновесному состоянию, когда из баланса сил полного МГД уравнения исключены все слагаемые, кроме силы Лоренца:

$$\mathbf{F}_L = [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] = 0, \quad \mathbf{j} \propto [\nabla \times \mathbf{B}],$$

Уравнение бессилового поля:

$$[\nabla \times \mathbf{B}] = \alpha \mathbf{B}.$$

- $\alpha = 0$ – потенциальное поле.
- $\alpha = \text{const}$ – линейное бессиловое поле, аналитическое решение.
- $\alpha \neq \text{const}$ – нелинейное бессиловое поле, численное решение.

Основные методы расчета NLFFF

- Метод типа Града-Рубина

Grad H., Rubin H. // Proceedings of the 2nd International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy. 1958. V. 31. P. 190. (United Nations, Geneva).

- Магнитофрикционный метод

Yang W.H., Sturrock P.A., Antiochos S.K. Force-free magnetic fields - The magneto-frictional method // The Astrophysical Journal. 1986. V. 309. P. 383-391.

- Метод граничного интегрирования

Yan Y., Sakurai T. New Boundary Integral Equation Representation for Finite Energy Force-Free Magnetic Fields in Open Space above the Sun // Solar Physics. 2000. V. 195. P. 89-109.

- Оптимизационный метод

Wheatland M.S., Sturrock P.A., Roumeliotis G. An Optimization Approach to Reconstructing Force-free Fields // The Astrophysical Journal. 2000. V. 540. P. 1150-1155.

Сопоставление результатов:

- Schrijver C.J., De Rosa M.L., Metcalf T.R., et al. Nonlinear Force-Free Modeling of Coronal Magnetic Fields Part I: A Quantitative Comparison of Methods // Solar Physics. 2006. V. 235. P. 161-190.
- Metcalf T.R., De Rosa M.L., Schrijver C.J., et al. Nonlinear Force-Free Modeling of Coronal Magnetic Fields. II. Modeling a Filament Arcade and Simulated Chromospheric and Photospheric Vector Fields // Solar Physics. 2008. V. 247. P. 269-299.
- Schrijver C.J., De Rosa M.L., Metcalf T., et al. Nonlinear Force-free Field Modeling of a Solar Active Region around the Time of a Major Flare and Coronal Mass Ejection // The Astrophysical Journal. 2008. V. 675. P. 1637-1644.

Оптимизационный метод

Сформулирован в работе:

Wheatland M.S., Sturrock P.A., Roumeliotis G. An Optimization Approach to Reconstructing Force-free Fields // The Astrophysical Journal. 2000. V. 540. P. 1150-1155.

Основная идея – последовательное преобразование начального (потенциального) распределения магнитного поля к бессиловому.

$$L = \int_V (B^{-2} |[\nabla \times \mathbf{B}] \times \mathbf{B}|^2 + |\nabla \mathbf{B}|^2) dV.$$

Если поле является бессиловым, тогда $L = 0$, в обратном случае $L > 0$. Т.о., задача поиска бессилового поля математически сводится к задаче на минимизацию L . Эволюционные уравнения, определяющие приращение поля на очередной итерации выводятся путем вариации исходя из очевидного требования:

$$\frac{dL}{dt} < 0.$$

Специфика работы с реальными данными

- Pi-неопределенность поперечной компоненты векторных магнитограмм.
Rudenko G.V. and Anfinogentov S.A. Very Fast and Accurate Azimuth Disambiguation of Vector Magnetograms //Solar Physics. 2014. V. 289. I. 5. PP. 1499-1516.
- Из измерений доступна часть граничных условий (фотосферные магнитограммы).

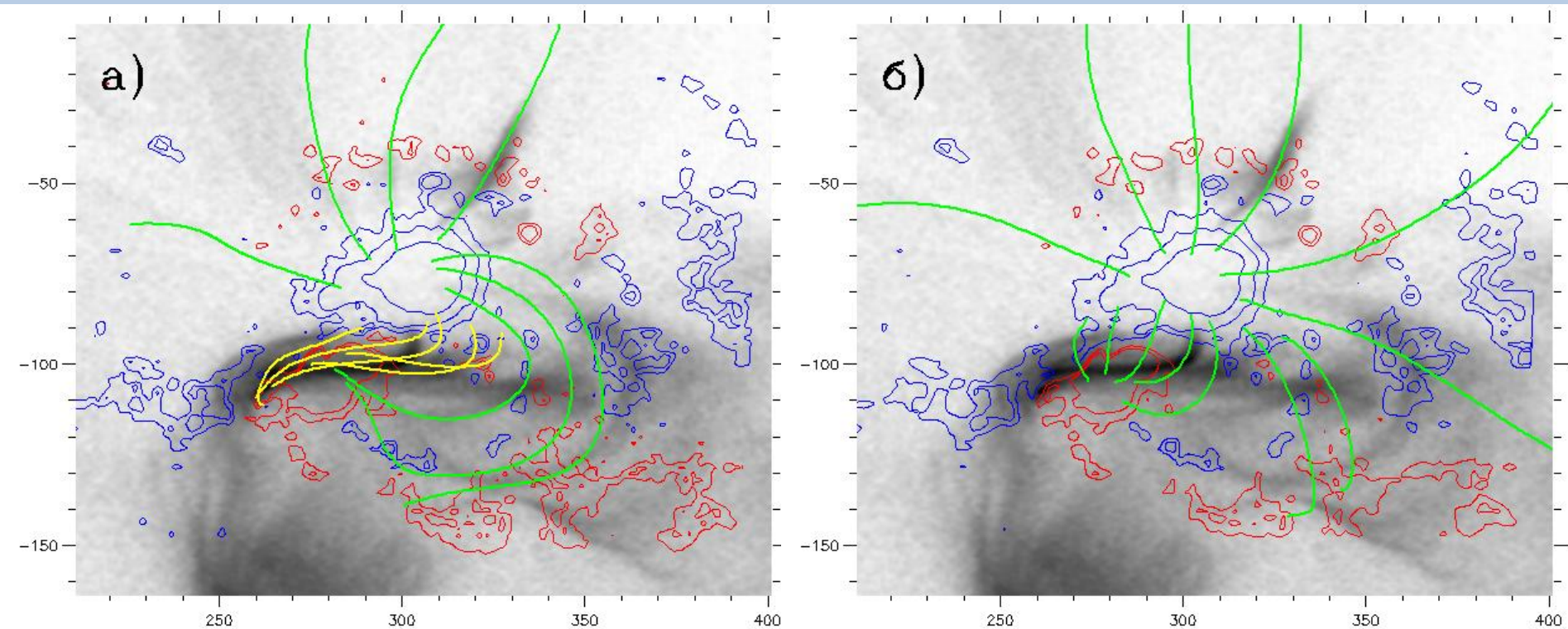
Полный учет всей системы эволюционных уравнений поля.

Rudenko G.V., Myshyakov I.I. Analysis of Reconstruction Methods for Nonlinear Force-Free Fields // Solar Physics. 2009. V. 257. P. 287-304.

Использование весовой функции.

Wiegelmann T. Optimization code with weighting function for the reconstruction of coronal magnetic fields // Solar Physics. 2004. V. 219. P. 87-108.

AR 10930

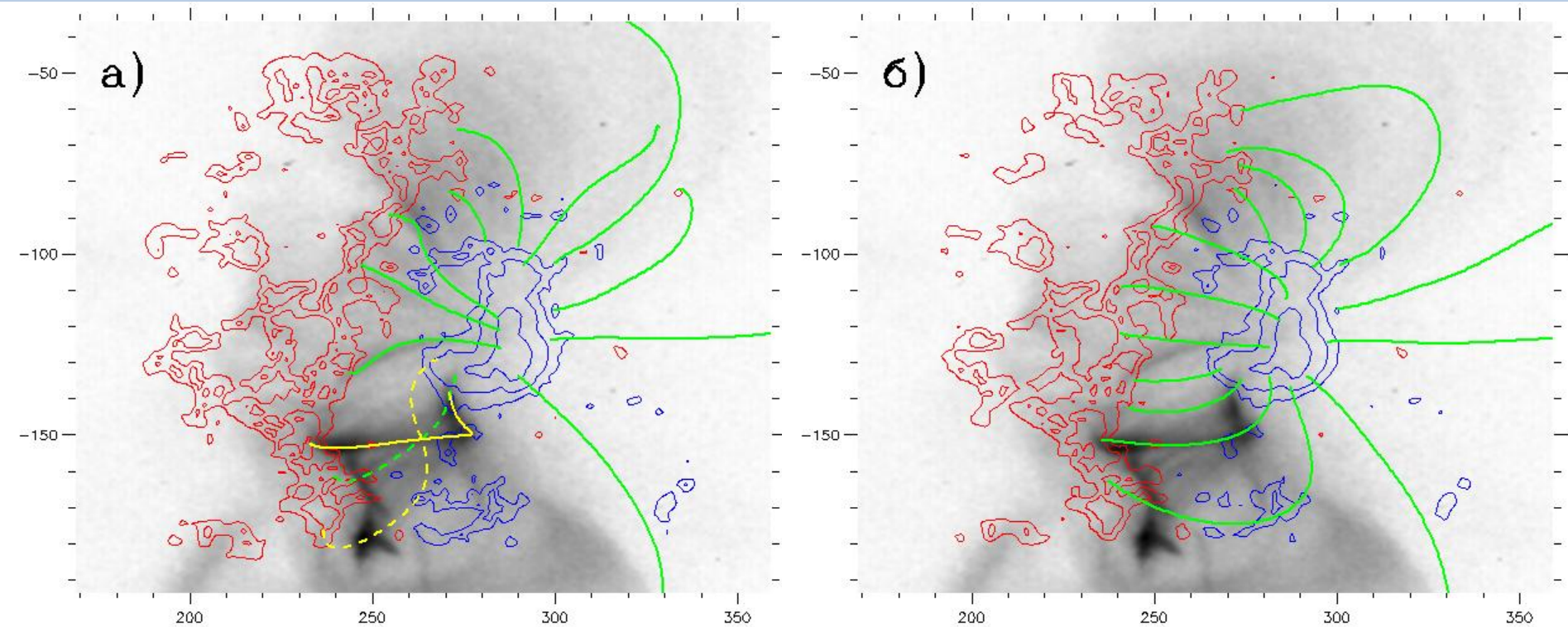


Hinode/SOT Br magnetogram

12.12.2006 20:30:00 UT

a) NLFFF, б) потенциальное поле

AR 10953



Hinode/SOT Br магнитограмма

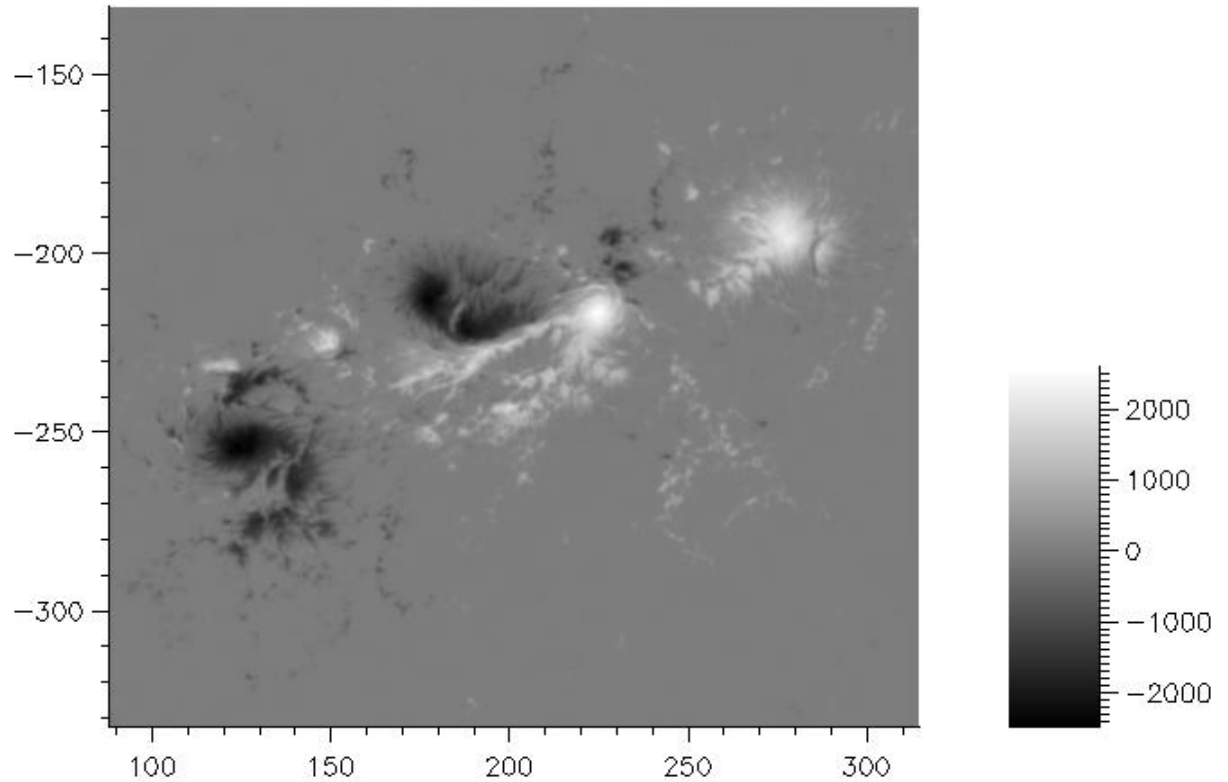
02.05.2007 23:20:15 UT

а) NLFFF, б) потенциальное поле

AR 11158

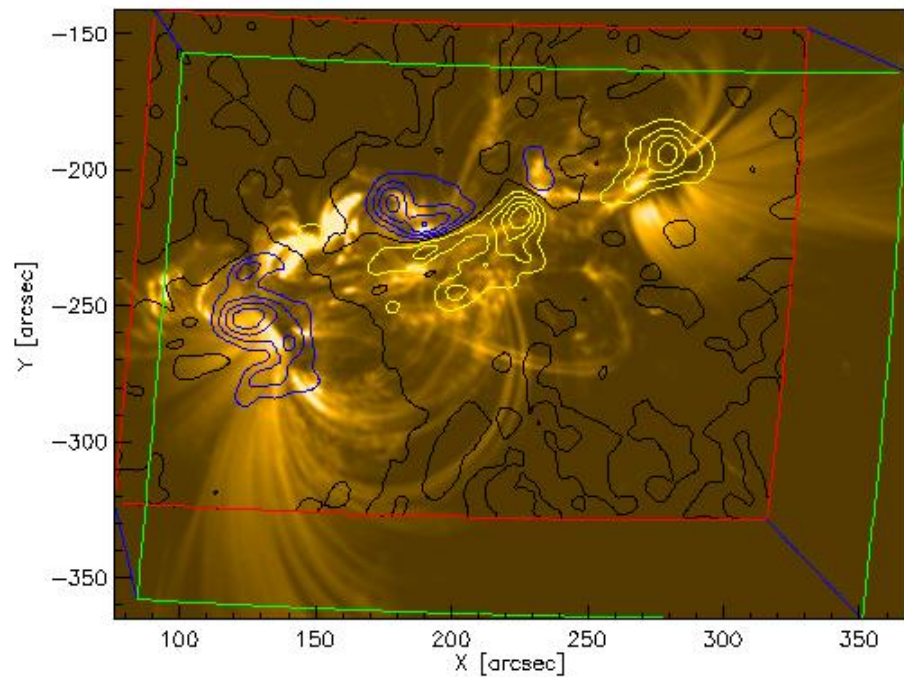
Flare X2.2
15 February 2011

Start 1:44 UT
Peak 1:56 UT

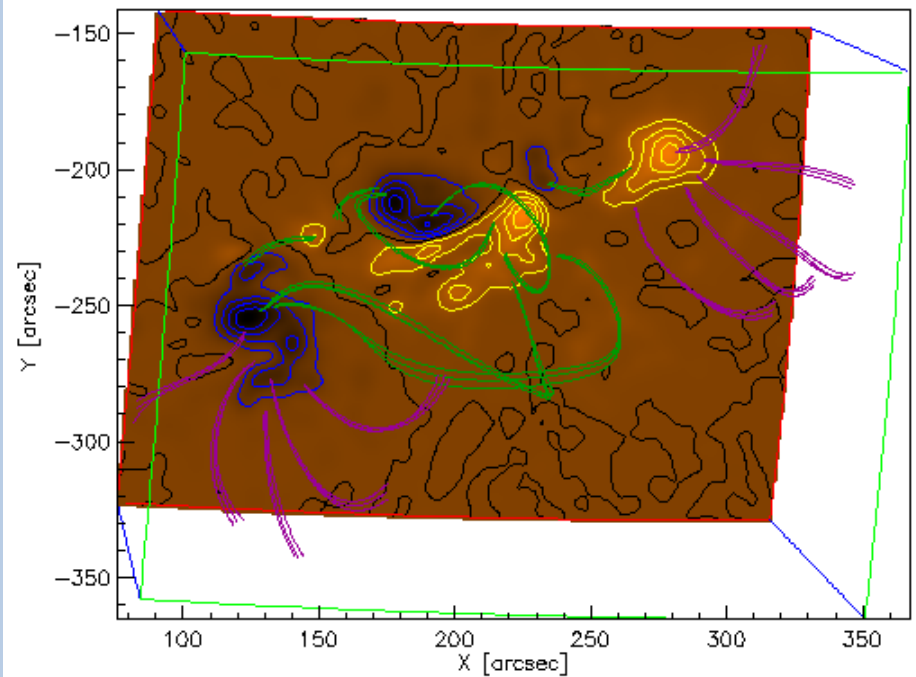


SDO/HMI Br magnetogram 1:00:00 UT

AR 11158



SDO/AIA 171 Å



Reconstructed force lines

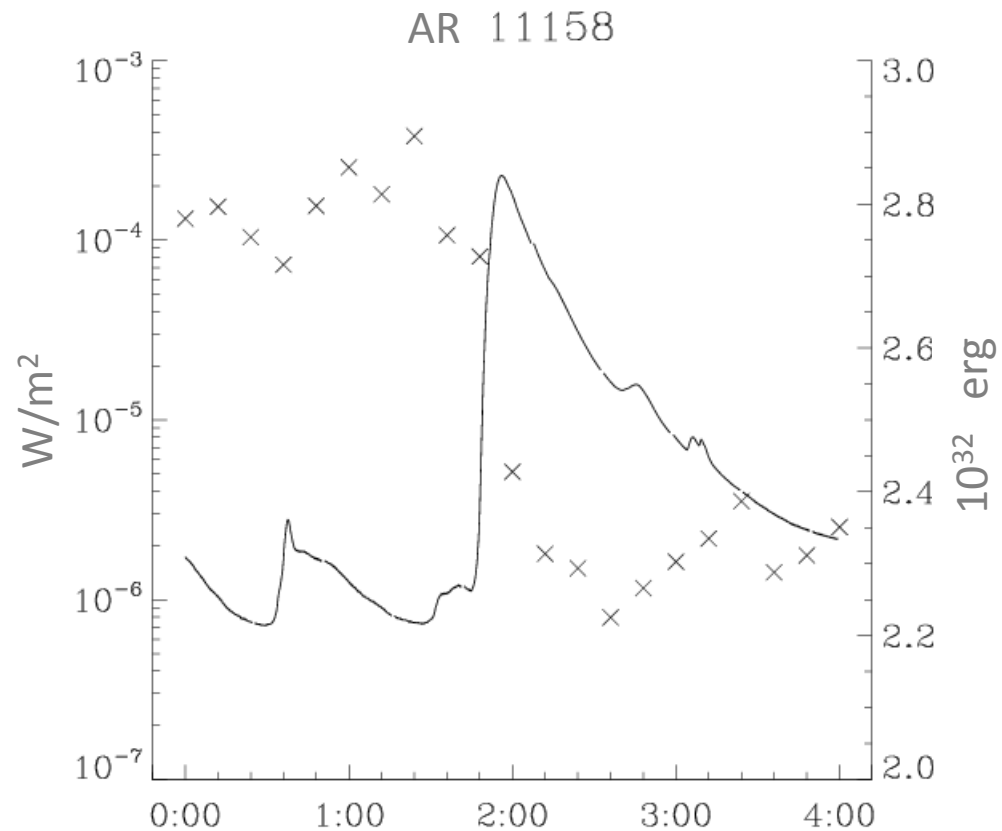
15 February 2011, 1:00 UT

Падение свободной энергии

$$E_{free} = \int \frac{B_{nlff}^2}{8\pi} dV - \int \frac{B_p^2}{8\pi} dV$$

$$E_p = 7.4 \times 10^{32} \text{ erg}$$

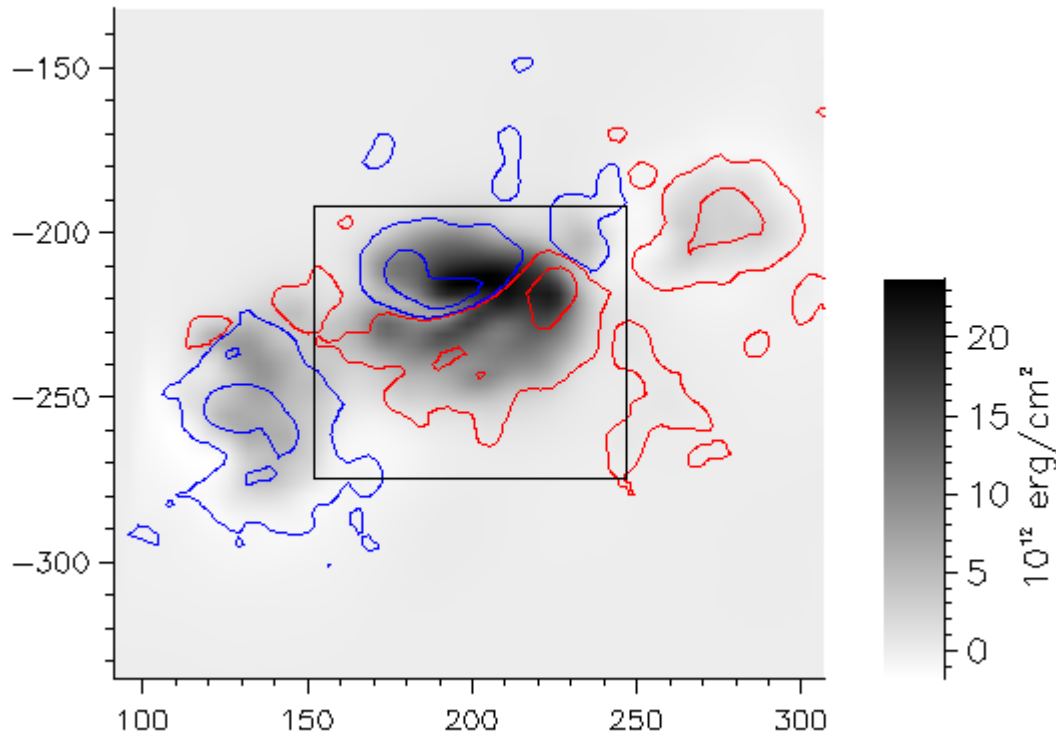
$$\Delta E_{free} = 0.68 \times 10^{32} \text{ erg}$$



15.02.2011

Пространственное распределение свободной магнитной энергии

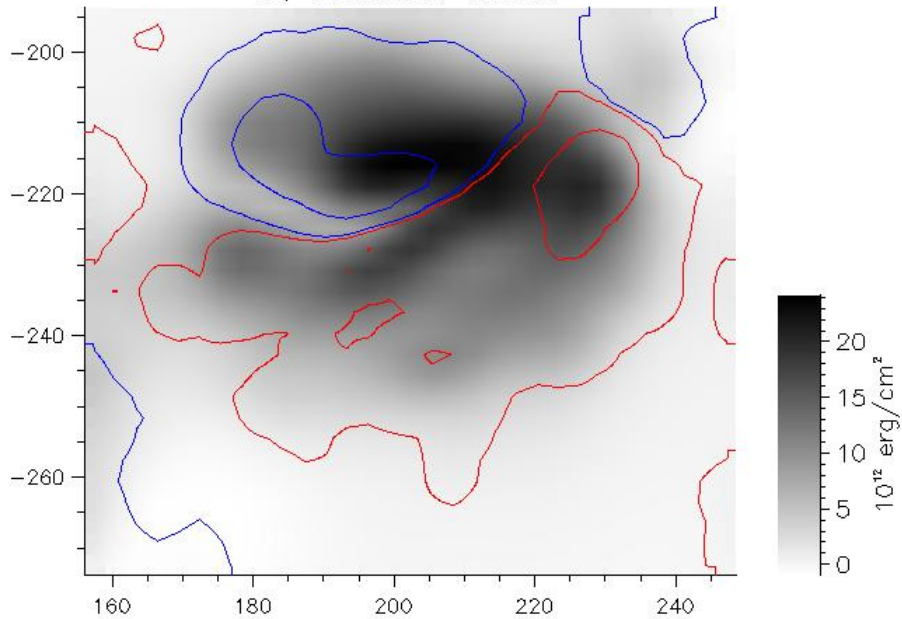
Ef, 15.02.2011 1:00 UT



Около 70% всей свободной магнитной энергии сконцентрировано в приповерхностном слое центральной группы пятен до высоты 30 Мм.

Перераспределение концентрации свободной магнитной энергии в результате вспышки

Ef, 15.02.2011 1:36 UT



Ef, 15.02.2011 2:00 UT

