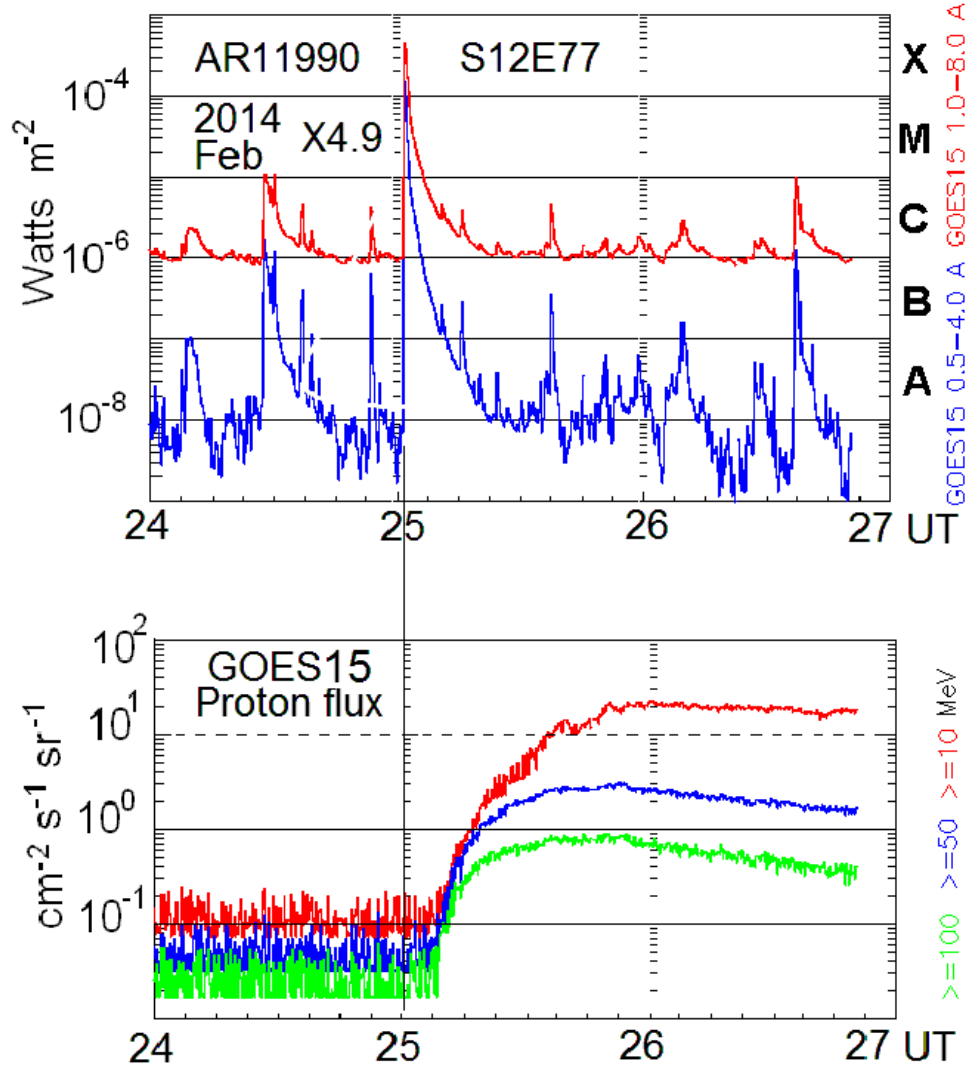
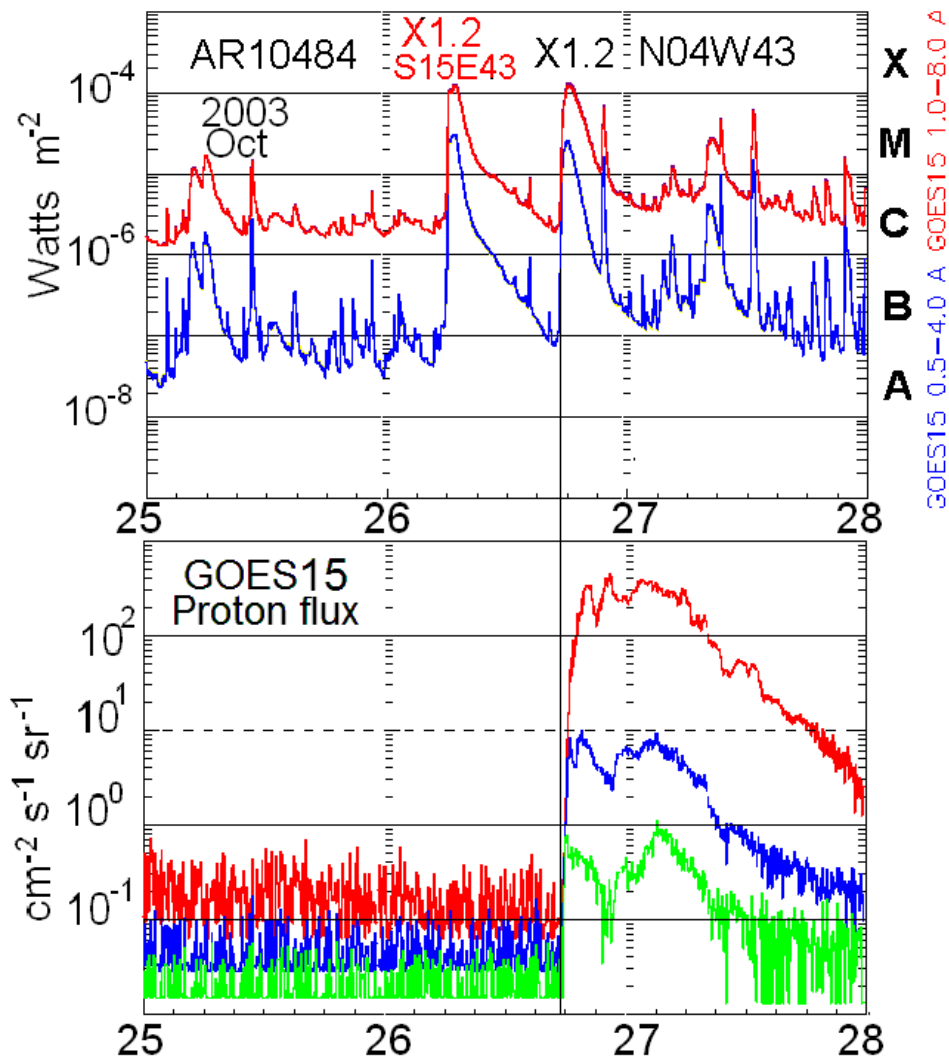


# **МГД МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕСТАХ ВСПЫШЕК С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

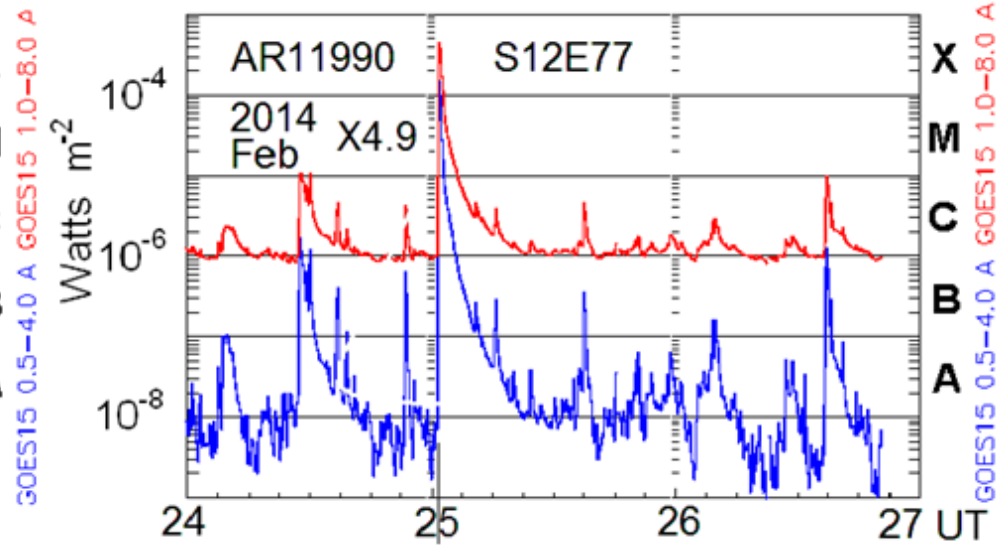
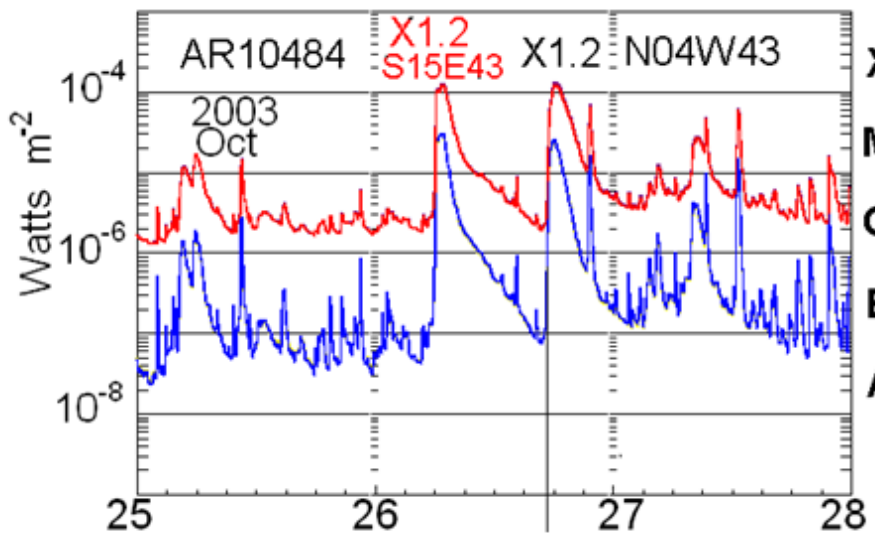
**А.И. Подгорный (ФИАН), И.М. Подгорный (ИНАСАН), А.В. Борисенко (ФИАН)**

**Солнечные космические лучи (СКЛ) – потоки ускоренных заряженных частиц, прежде всего протонов с энергией до 20 ГэВ сопровождают некоторые солнечные вспышки. Это указывает на то, что солнечные космические лучи генерируются во процессе быстрого освобождения энергии во время солнечных вспышек. Поэтому, для того, чтобы понять физический механизм генерации СКЛ (в частности для того, чтобы в дальнейшем можно было осуществить прогноз появления СКЛ на основании понимания физического механизма их генерации) необходимо одновременно изучать физический механизм солнечной вспышки и физический механизм ускорения заряженных частиц во время взрывного вспышечного процесса.**



Солнечные космические лучи — потоки ускоренных заряженных частиц, прежде всего протонов с энергией до 20 ГэВ сопровождают некоторые солнечные вспышки.

**Не все вспышки сопровождаются появлением солнечных космических лучей. Только 30% наиболее мощных вспышек (класса X) вызывают появление СКЛ. Согласно нашим представлениям, заряженные частицы всегда ускоряются в месте первичного вспышечного освобождения энергии в солнечной короне, но не всегда они смогут выйти из конфигурации магнитного поля над активной областью.**



Вспышки X-класса являются наиболее мощными, для них мощность потока мягкого (теплового) излучения вспышки в диапазоне 1 – 8 Å на орбите Земли превышает  $10^{-4}$  Дж м<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>. В этом диапазоне измеряется рентгеновское излучение на космическом аппарате GOES.

$$E(\text{эВ}) = 12\,000 / \lambda(\text{Å}) ; \quad 1\text{эВ} = 10^4 \text{ }^\circ\text{K} :$$

Диапазон (1 – 8 Å) ~ (1.5 – 12 кэВ) ~ (15 – 120 МК) – излучает солнечная корона в месте вспышки, нагретая до нескольких десятков миллионов градусов (20 - 70 МК). Излучение с энергией кванта ~ 100 МК производится электронами с энергией, превышающей среднюю тепловую (находятся на "максвелловских хвостах"). Температура спокойной короны ~1 МК.

**Таким образом, измерения теплового рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 8 Å (1.5 – 12 кэВ) характеризуют основной процесс взрывного освобождения энергии при вспышке.**

**Кроме того, для общего представления рассматриваемого явления необходимо отметить появление более слабых потоков солнечных космических лучей значительно меньших энергий (несколько МэВ), которые не связаны с солнечными вспышками. Один из возможных рассматриваемых механизмов таких солнечных космических лучей связан с появлением ярких рентгеновских точек в солнечной короне. Этот механизм имеет аналогии с рассматриваемым нами механизмом ускорения частиц в токовом слое во время солнечных вспышек. Появление не связанных со вспышками солнечных космических лучей малой энергии, представляющее, также, определенный интерес, в нашем исследовании не рассматривается.**

**Изучение СКЛ может расширить наши представление о механизме генерации космических в общем случае, поскольку галактические космические лучи могут генерироваться во время супервспышек на звездах, которые имеют ту же природу, что и солнечных вспышки. Энергия супервспышек на звездах карликах класса G может достигать  $10^{36}$  эрг (по сравнению с энергией солнечной вспышки  $10^{32}$  эрг), а энергия генерируемых ими космических лучей может достигать  $10^{15}$  эВ.**

Космические лучи исследуются уже 100 лет, однако их происхождение до сих пор не выяснено. Открытие солнечных космических лучей открывает новые возможности для исследования ускорения и распространения частиц в космосе.

Солнце - это астрономическая обсерватория. Благодаря его близости к Земле мы можем получать о нем такую информацию, которая не доходит к нам от других звезд.

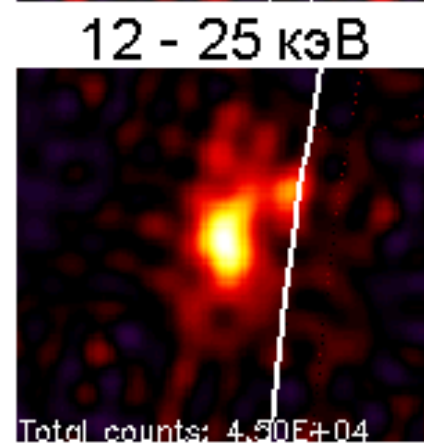
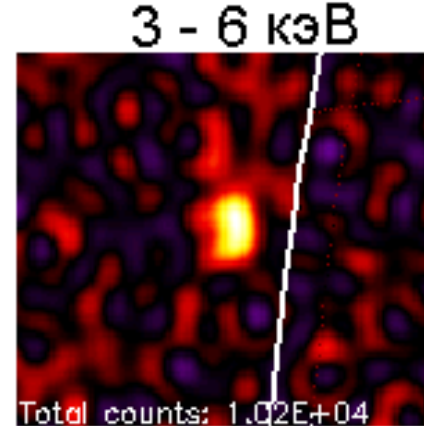
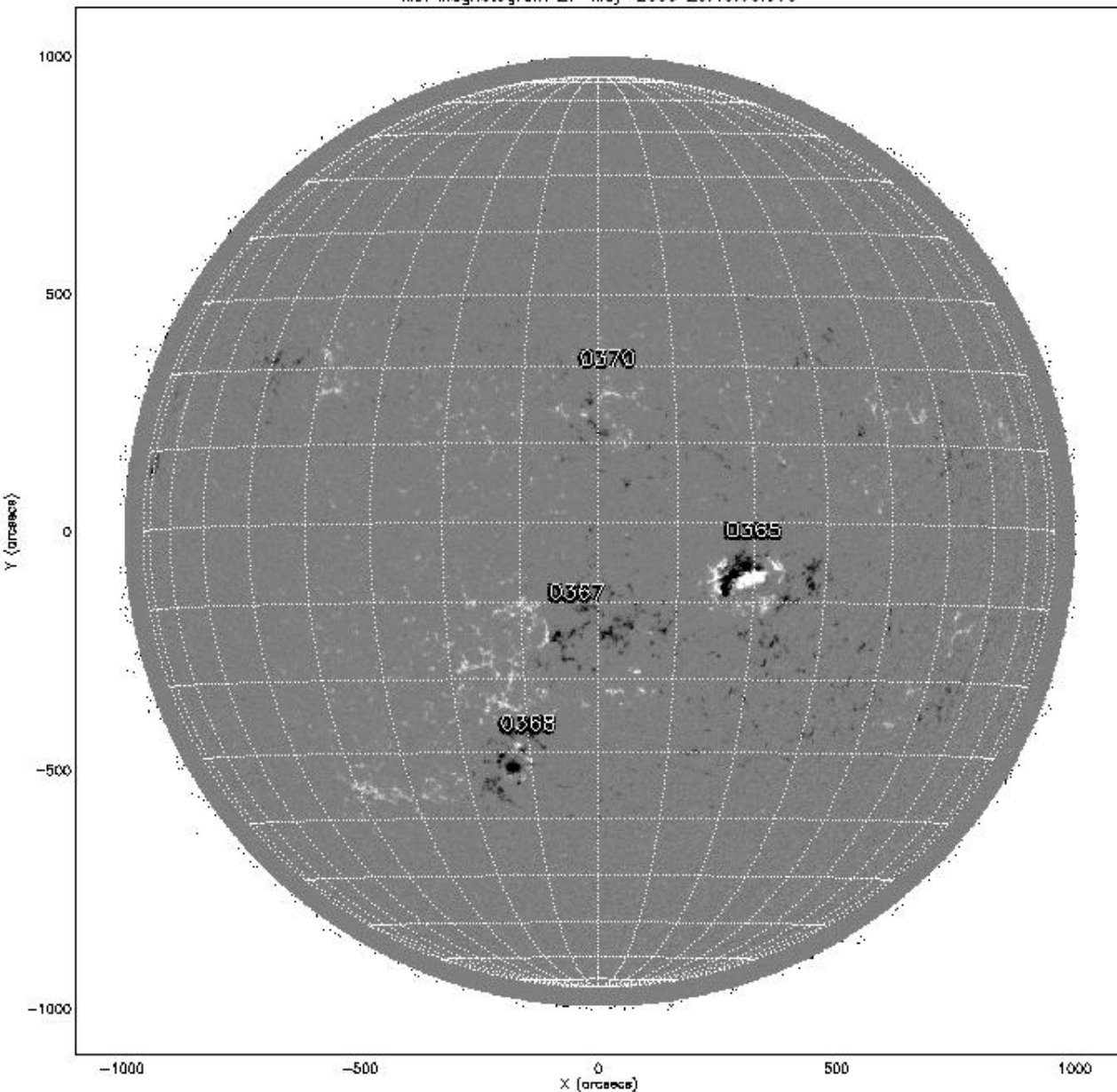
John N. Bahcall

Во время солнечной вспышки за несколько десятков минут происходит освобождение  $\sim 10^{32}$  эрг магнитной энергии, которая переходит в тепловую энергию нагретой до  $\sim 10^7$  °К плазмы, кинетическую энергию корональных выбросов плазмы, энергию ускоренных заряженных частиц (протонов – до 20 ГэВ) и энергию излучения в широком диапазоне частот, создаваемого ускоренными и тепловыми частицами - радиоизлучение, оптическое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение (мягкое тепловое 1 - 20 кэВ и жесткое пучковое 20 – 200 и выше кэВ),  $\gamma$ -излучение.



# СОЛНЕЧНАЯ ВСПЫШКА ПРОИСХОДИТ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ НА ВЫСОТАХ 15 – 70 ТЫСЯЧ КИЛОМЕТРОВ, ЧТО СОСТАВЛЯЕТ 1/40 – 1/10 РАДИУСА СОЛНЦА

MDI Magnetogram 27-May-2003 20:48:00.000

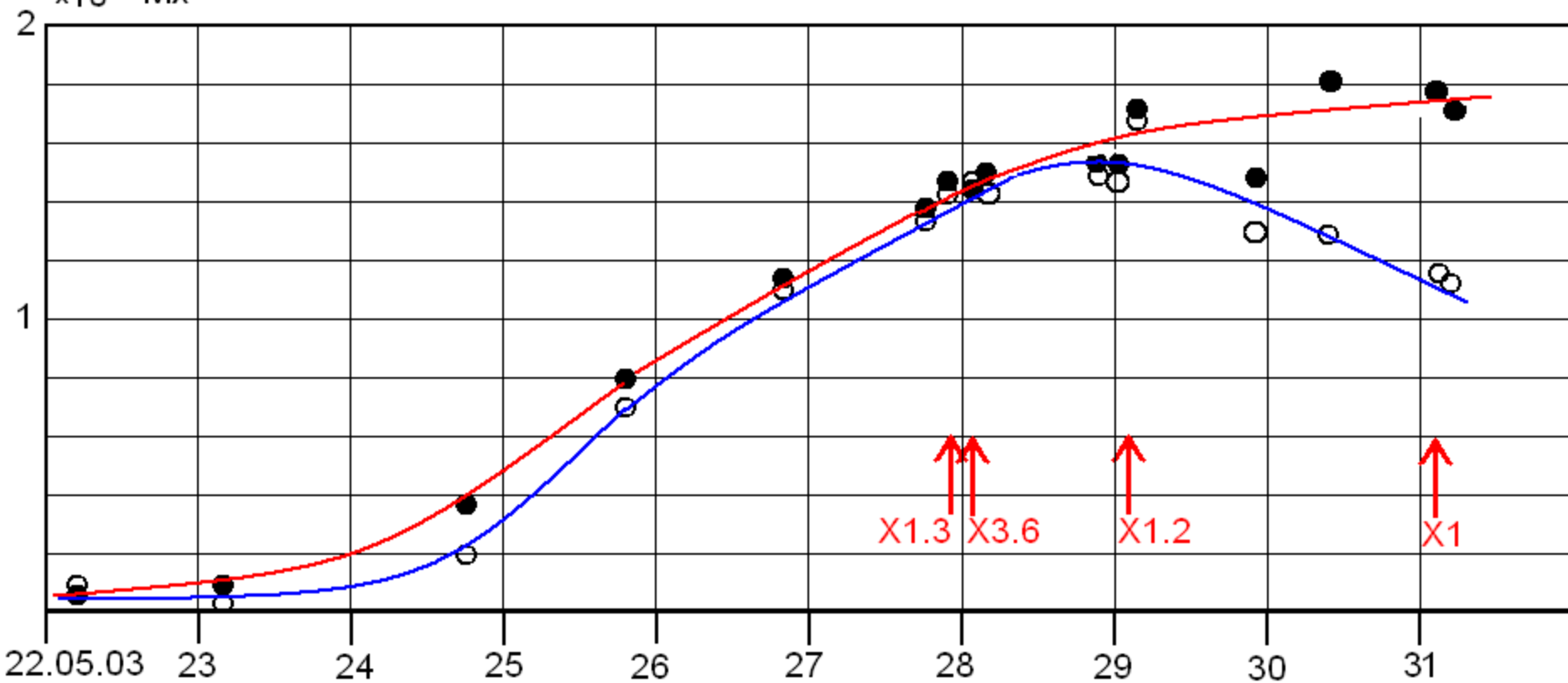


AR 10365

●  $\Phi_N$

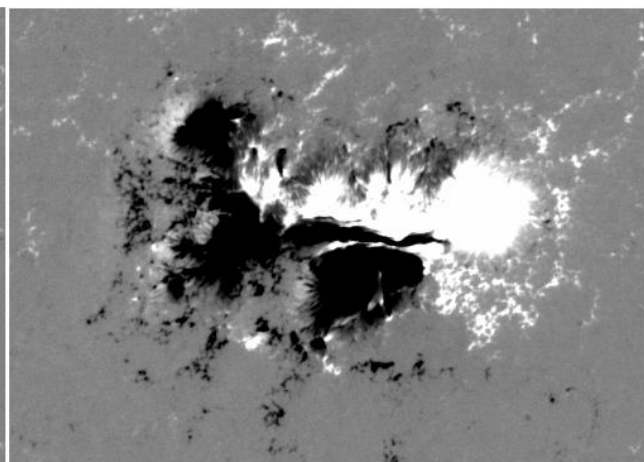
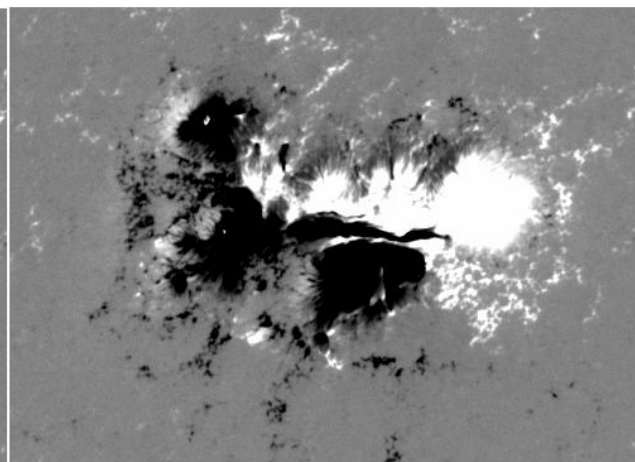
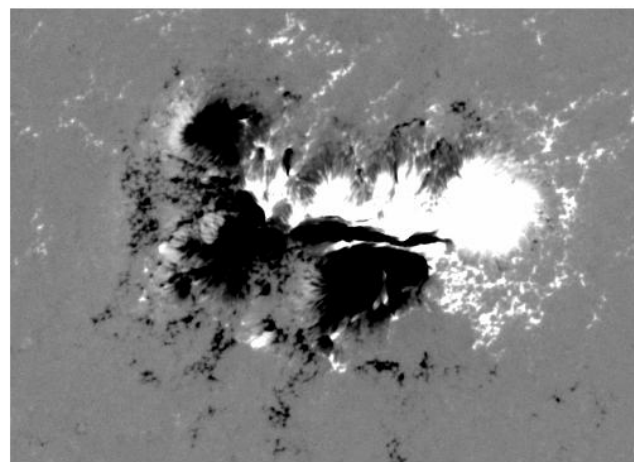
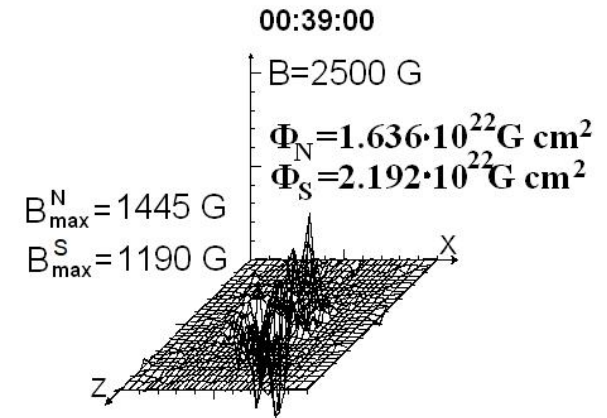
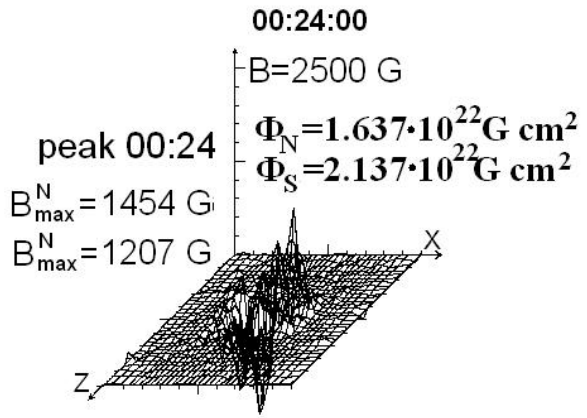
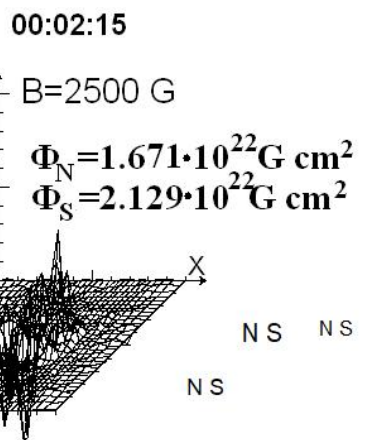
○  $\Phi_S$

$\times 10^{22} \text{ Mx}$



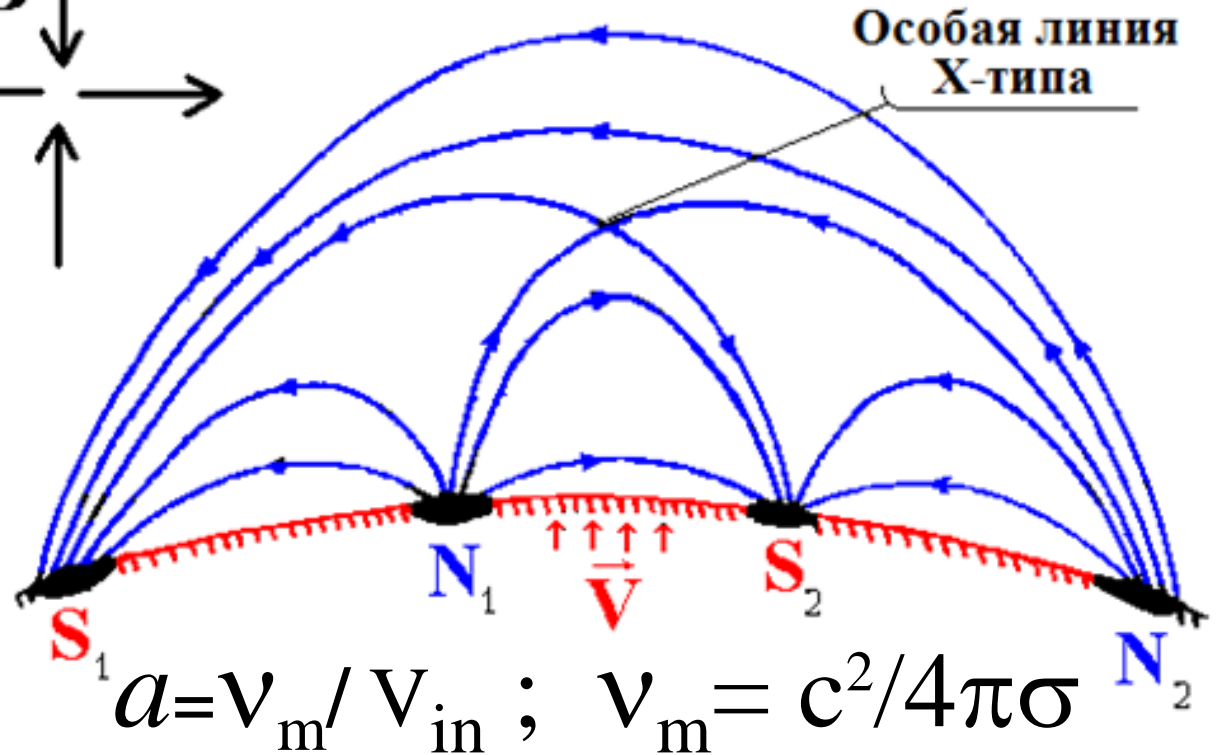
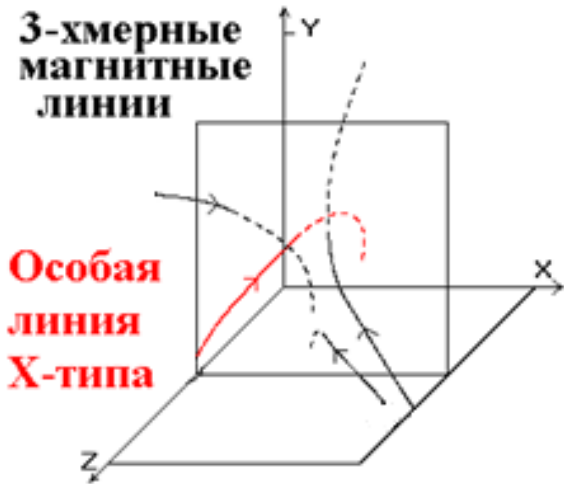
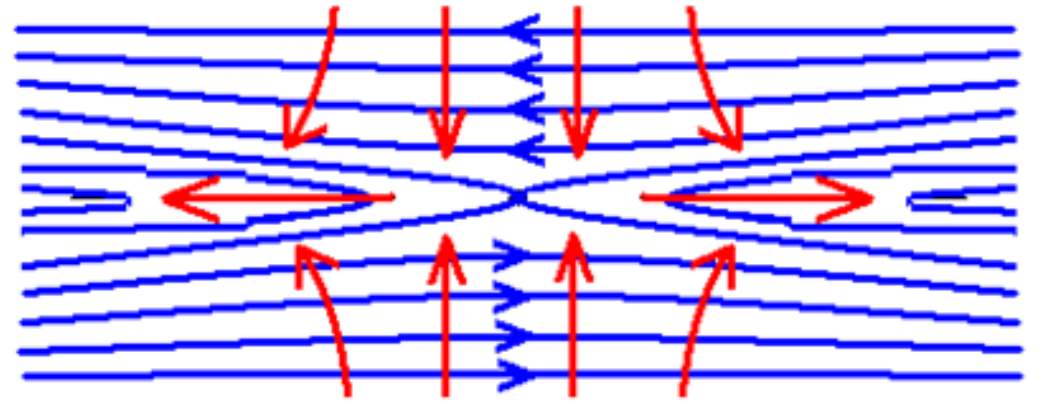
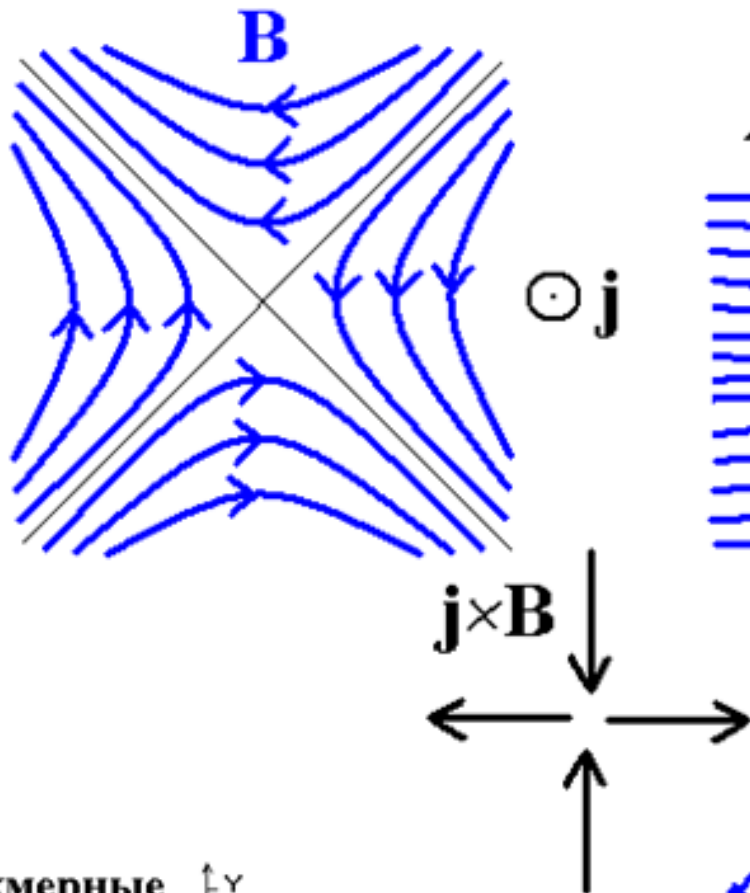
FLARES: X1.3 23:07 S07W16; X3.6 00:27S07W20; X1.2 01:05; X1 02:24 S06W59

NOAA 11429  
 X5.4  
 N18 E31  
 07-03-2012  
 start 00:02  
 $B_{\max}^N = 1497 \text{ G}$   
 $B_{\max}^S = 1236 \text{ G}$

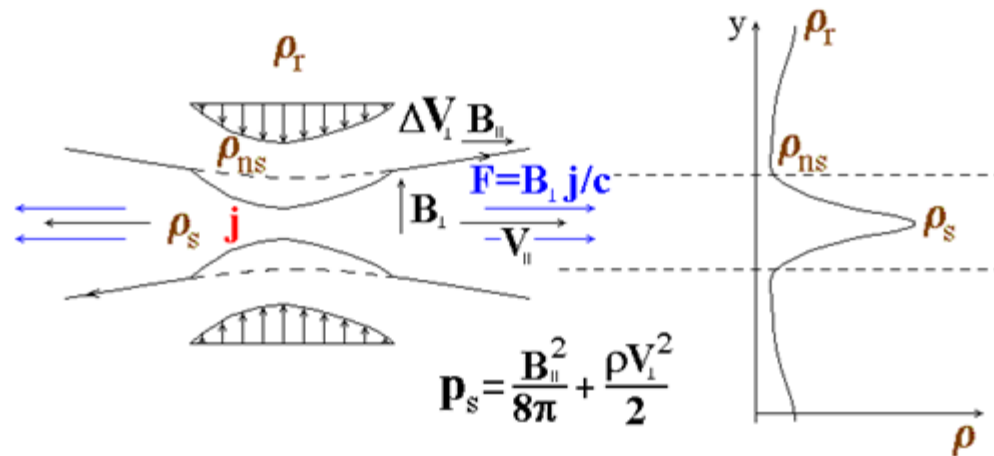


Подгорный, Подгорный, Мешалкина. АЖ. 92, 669, 2015.

С. И. Сыроватский 1966  
 A. Bratenahl, W. Hirsch 1966



# Неустойчивость токового слоя



$$\rho_s \frac{dD_V}{dt} = -D_V A \rho_s + D_B \frac{B_s}{4\pi a} + V_{inl} K_I \frac{B_s h}{4\pi \nu_m} + \rho_1 \left( \frac{T_s}{b_1^2} - A^2 \right)$$

$$\rho_{ns} \frac{dV_{inl}}{dt} = V_{inl} K_V \frac{\rho_{ns} V_{in0}}{a} - \rho_1 K_p \frac{T_s}{a} - D_B \frac{B_s}{4\pi}$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\rho_1 A - D_V \rho_s + V_{inl} \frac{\rho_{ns}}{a}$$

$$\frac{dD_B}{dt} = -2D_V h - D_B \left( A + \frac{\nu_m}{b_1^2} + \frac{\nu_m}{a^2} \right) + V_{inl} \frac{B_s}{b_1^2} K_B$$

$$A = \frac{\partial V_s}{\partial x} = \frac{V_{out}}{b} = \sqrt{\frac{1}{ab} \frac{E_s E_n}{4\pi \rho_1}}, \quad \frac{\partial V_{inl}}{\partial x} = D_V, \quad \frac{\partial B_{y1}}{\partial y} = D_B, \quad h = \frac{\partial B_{x0}}{\partial x} = \frac{B_n}{b}$$

Условие неустойчивости токового слоя  $\gamma_{max} > 0$

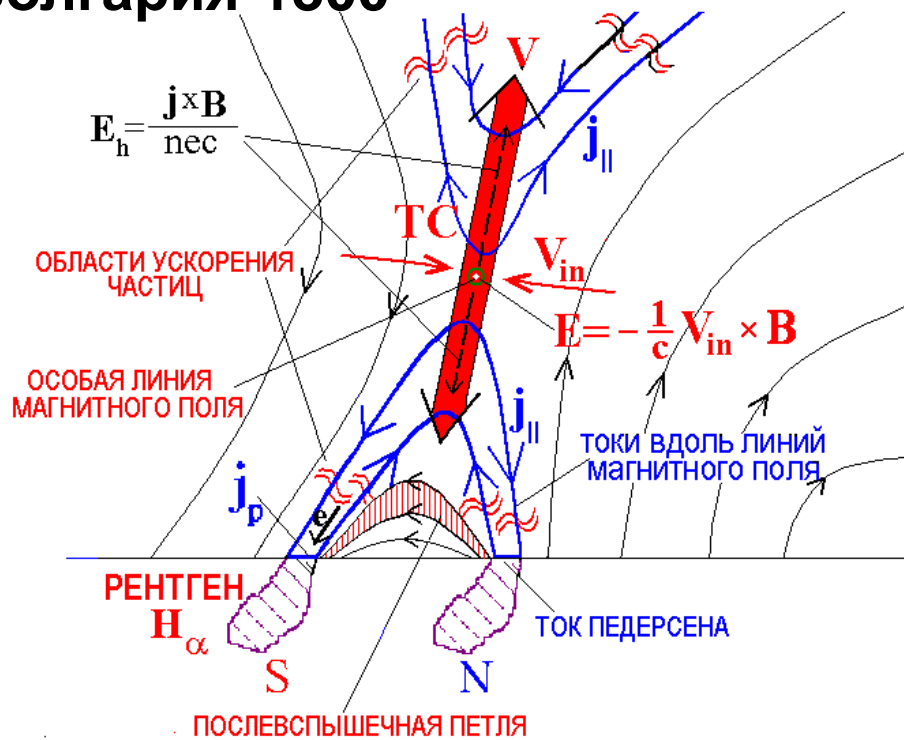
имеет вид:

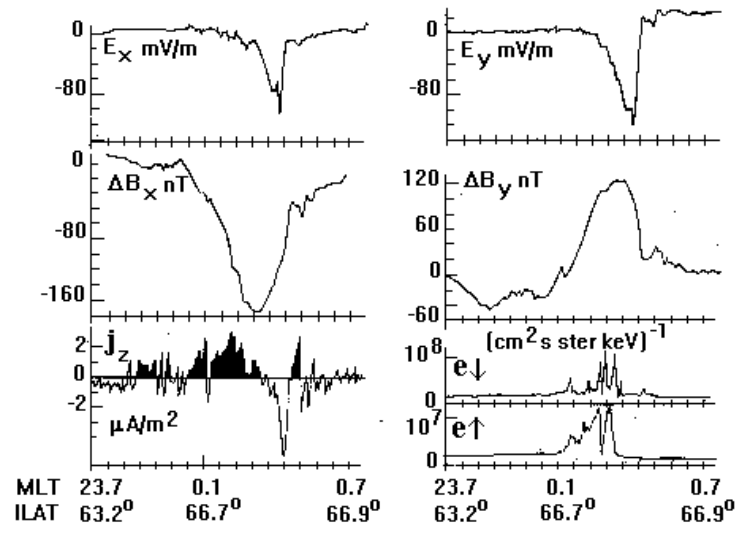
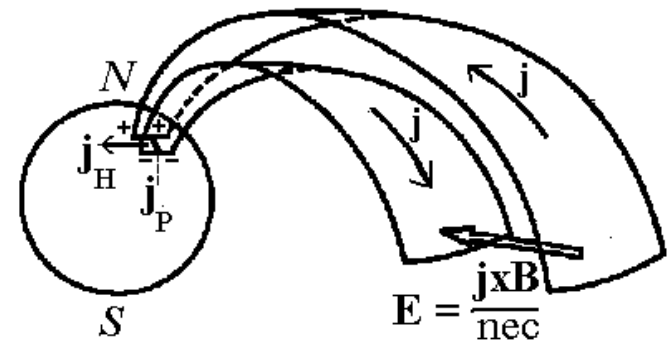
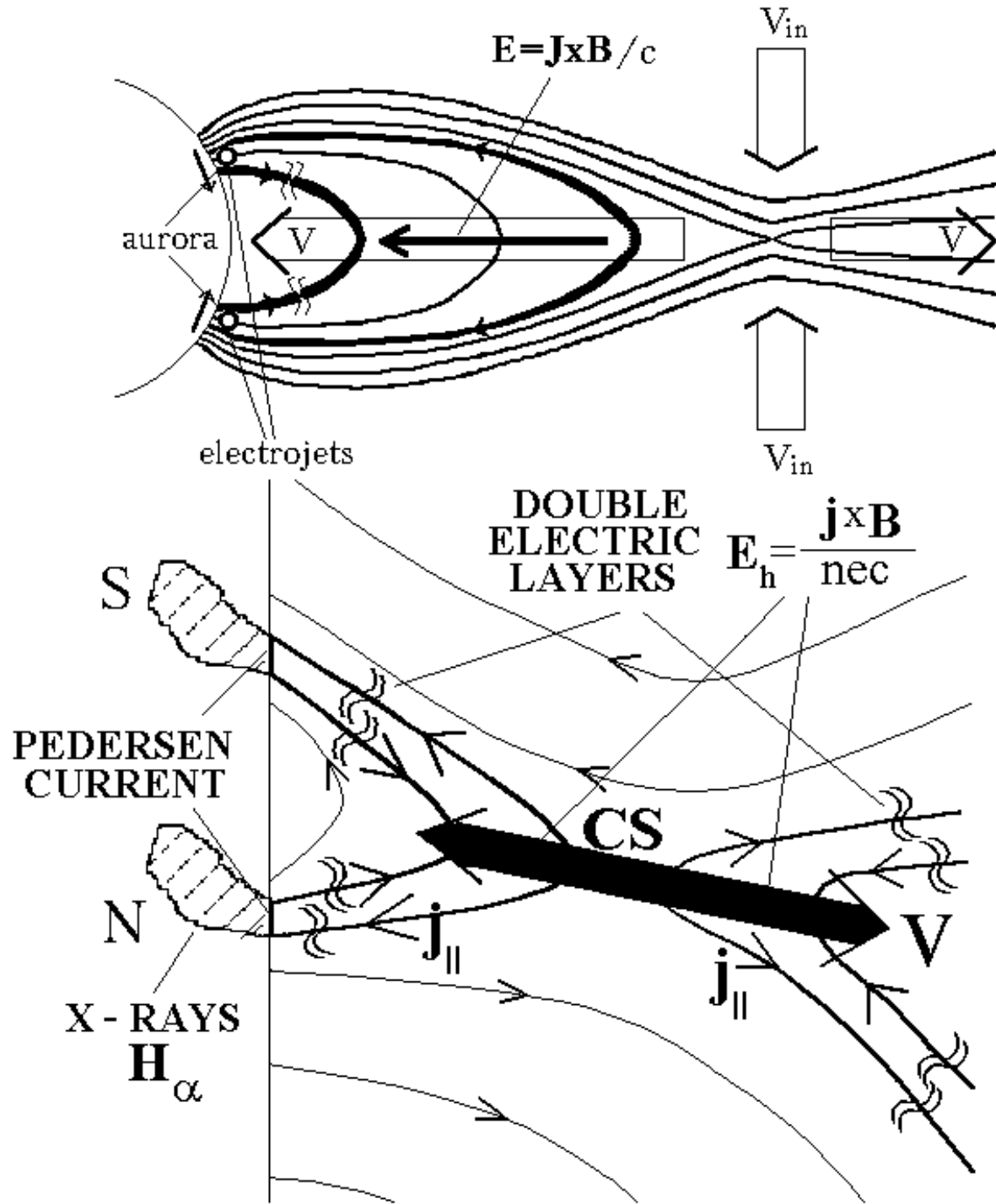
$$\varepsilon_v^2 \text{Re}_m \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_s} \frac{\rho_{ns}}{\rho_r} \frac{1}{K_B}} < \frac{1}{2} \quad (K_B \lesssim 1)$$

# Продолжается выполнение планов Игоря Максимовича Подгорного.

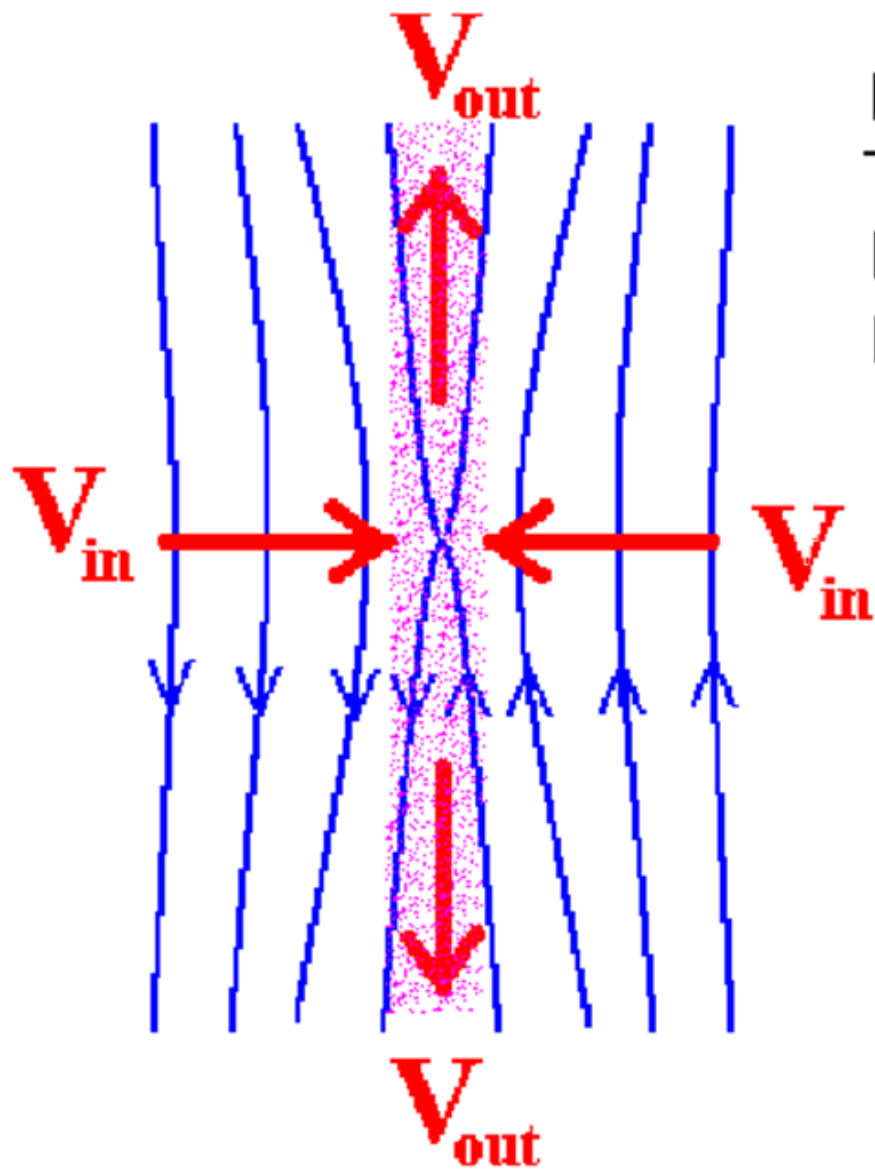
Электродинамическая модель солнечной вспышки.

И.М. Подгорный по результатам измерений на спутнике Интеркосмос-Болгария-1300





На основании измерений, выполненных на Советско-Болгарском космическом аппарате Интеркосмос Болгария-1300, Игорем Максимовичем предложена электродинамическая модель суббури.



From RHESSI:  $(ME)=5 \cdot 10^{49} \text{ cm}^{-3}$ .

$T=3.1 \text{ keV}$   $n=10^{11} \text{ cm}^{-3}$ .

$B^2/8\pi = nkT \rightarrow B = 110 \text{ G}$ .

$M = Nm_p \sim 10^{15} \text{ g}$  --- CME.

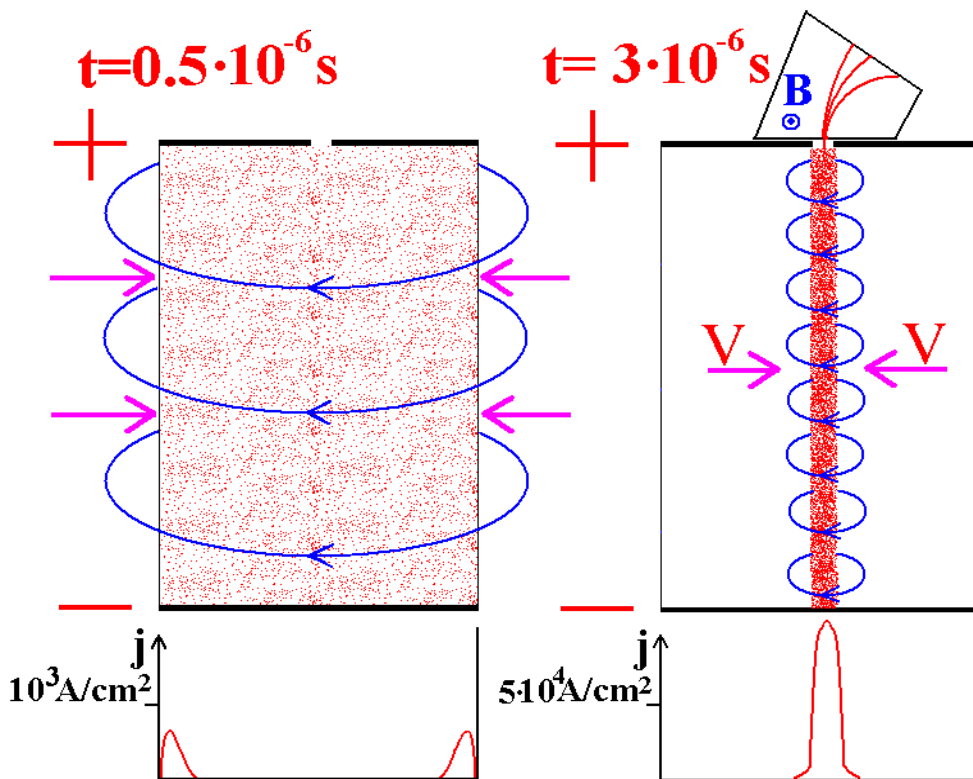
At  $V_{in} = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$  and  $L = 10^9 \text{ cm}$ .

$E = V \times B / c$ .  $E = 20 \text{ V/cm}$ .

$W = 2 \times 10^{10} \text{ eV}$ .



Сжатие газового разряда собственным магнитным полем при токах в сотни кА приводит к генерации электрического поля Лоренца, направленном вдоль оси разряда. Энергия ускоренных частиц  $\sim 300$  кэВ при приложенной разности потенциалов  $\sim 15$  кВ.



$\Phi = 15 \text{ kV}$   
 $dI/dt = 10^{11} \text{ A/s}$   
 $I_{\text{max}} = 200 \text{ kA}$   
 $W > 300 \text{ keV}$   
 $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B} / c$   
 $V \sim 10^7 \text{ cm/s}$   
 $B_{\text{max}} \sim 4 \cdot 10^4 \text{ G}$   
 $E \sim 4 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$

Lab. № 2. 1954.

Atomnaja energija

№ 3. 1956.

Artsimovich et. al. P. 84.

Lukjanov, Podgorny. P. 93.

НИЯФ МГУ 1957.

Podgorny, Kovalsky,

Palchikov.

DAN SSSR. 123, 825 (1958).

1957.

Severny } Electric discharge

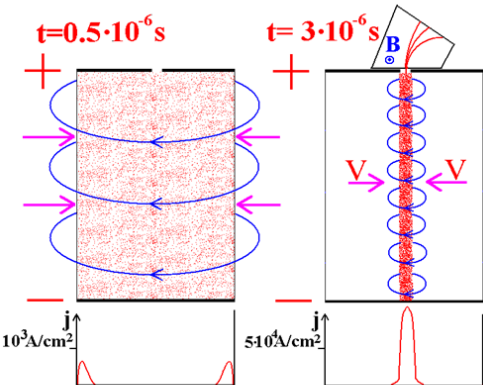
Toneman } in solar corona.

**С. Н. Вернов**

# Механизм генерации космических лучей

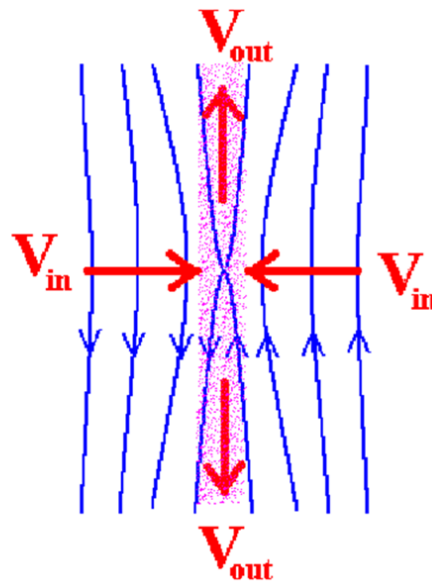
## Игоря Максимовича Подгорного

Механизм И. М. Подгорного осуществляет ускорение заряженных частиц индукционным электрическим полем, равным полю  $V \times B/c$  вблизи основного тока, создающего поле  $B$ . Механизм ускоряет заряженные частицы в пинче и в токовом слое (происходящий при этом физический процесс диссипации магнитного поля в тонком слое тока, образовавшемся в конфигурации магнитного поля X-типа, иногда называют процессом пересоединения, однако применять такое название необязательно). В месте ускорения магнитное поле равно нулю или направлено перпендикулярно электрическому. Ускорение заряженных частиц электрическим полем в токовом слое приводит к генерации солнечных космических лучей во время солнечных вспышек и к генерации галактических космических лучей во время мощных вспышек на звездах.



$\Phi = 15 \text{ kV}$   
 $dI/dt = 10^{11} \text{ A/s}$   
 $I_{\text{max}} = 200 \text{ kA}$   
 $W > 300 \text{ keV}$   
 $E = -V \times B/c$   
 $V \sim 10^7 \text{ cm/s}$   
 $B_{\text{max}} \sim 4 \cdot 10^4 \text{ G}$   
 $E \sim 4 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$

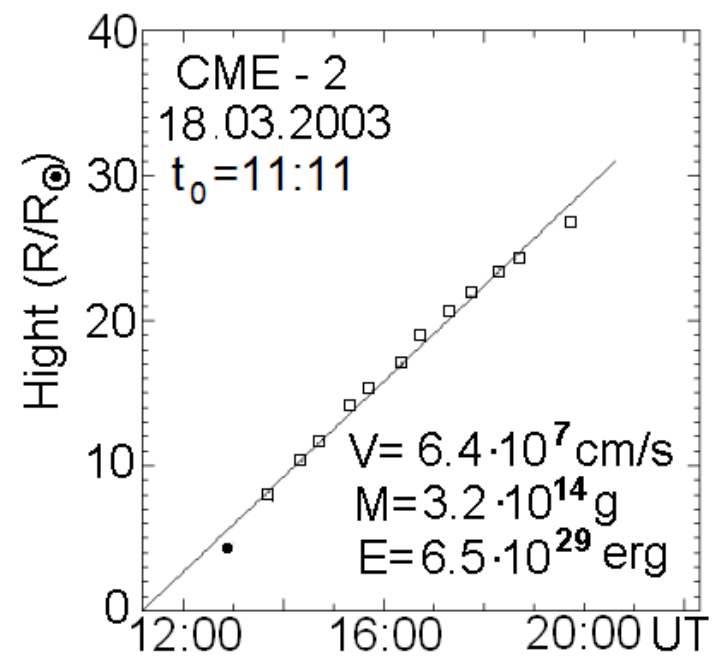
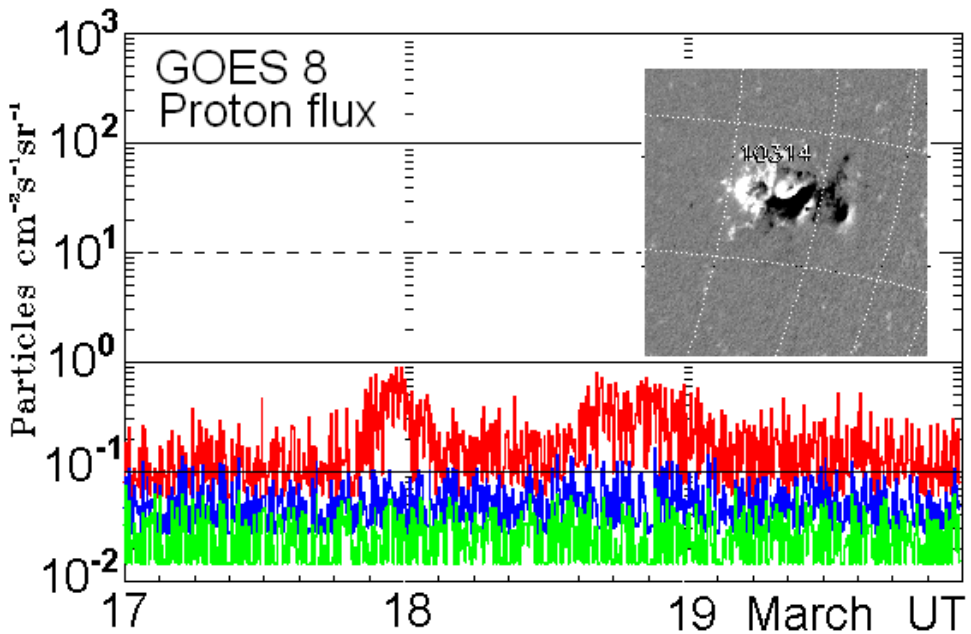
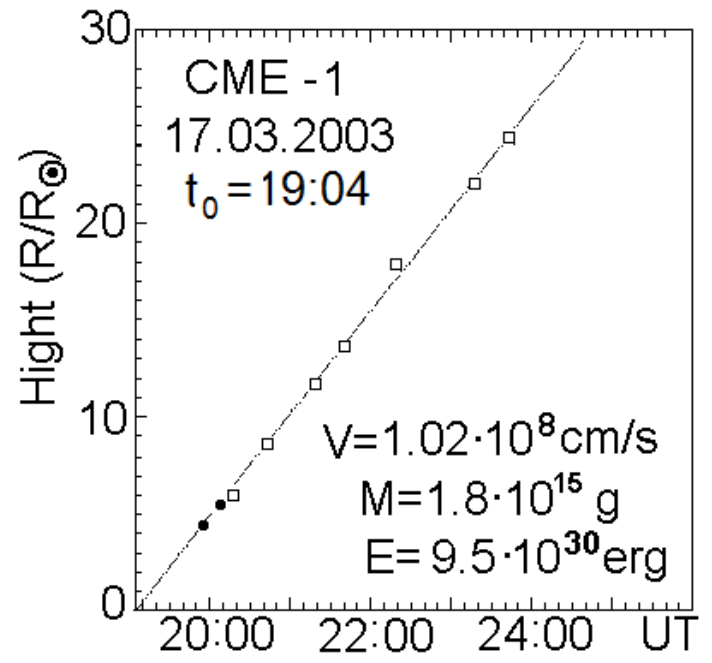
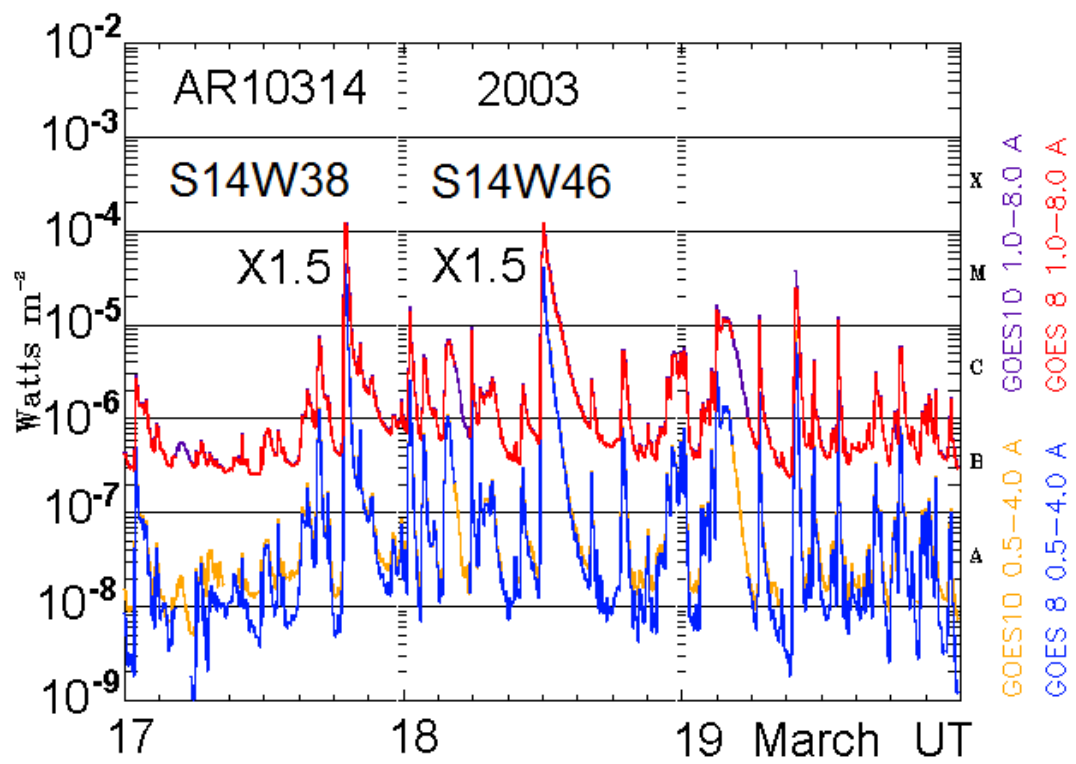
Lab. № 2. 1954.  
 Atomnaja energija  
 № 3. 1956.  
 Artsimovich et. al. P. 84.  
 Lukjanov, Podgorny, P. 93.  
 НИЯФ МГУ 1957.  
 Podgorny, Kovalsky,  
 Palchikov.  
 DAN SSSR. 123, 825 (1958).  
 1957.  
 Severny } Electric discharge  
 Toneman } in solar corona.  
 С. Н. Вернов

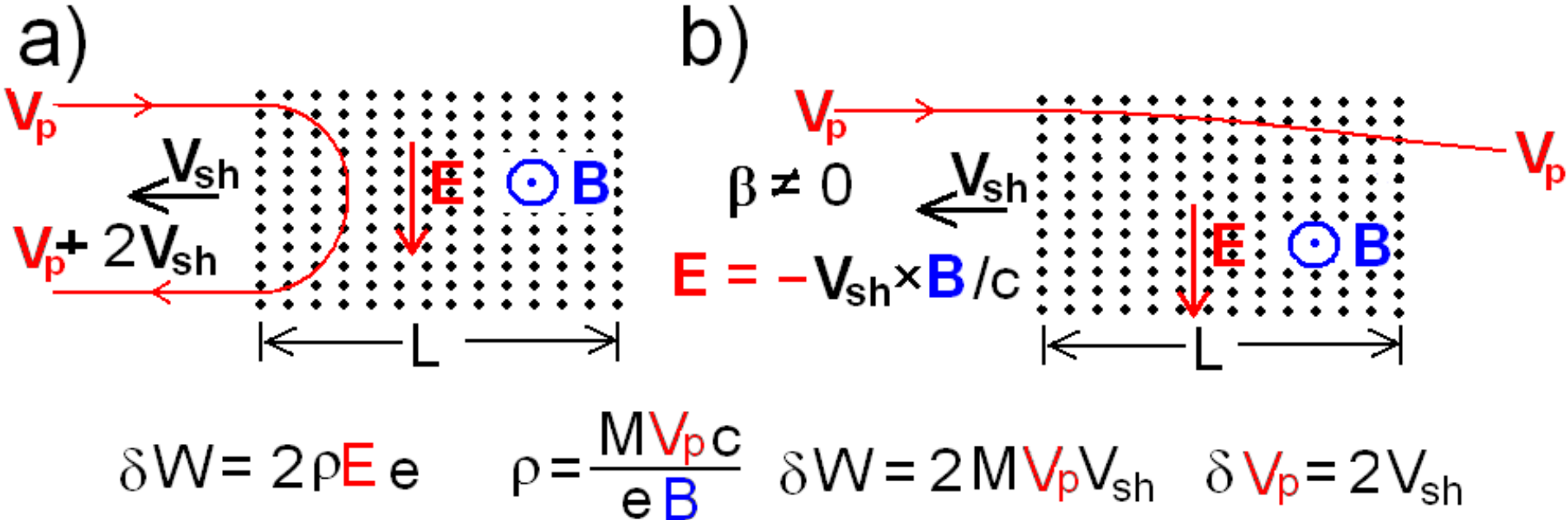


From RHESSI:  $(ME) = 5 \cdot 10^{49} \text{ cm}^{-3}$   
 $T = 3.1 \text{ keV}$   $n = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$   
 $B^2/8\pi = nKT \rightarrow B = 110 \text{ G}$   
 $M = Nm_p \sim 10^{15} \text{ g}$  --- CME.

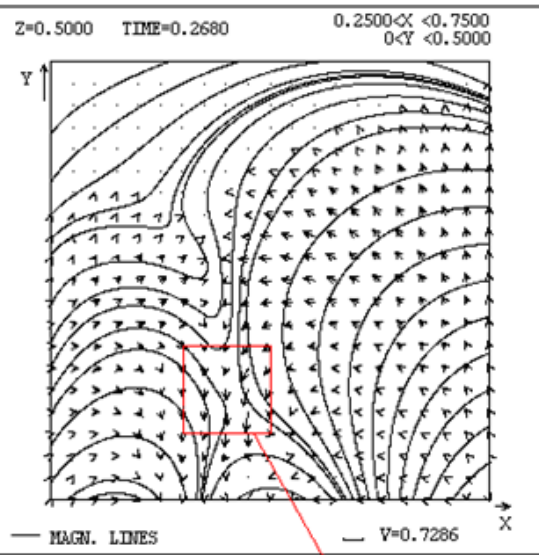
At  $V_{\text{in}} = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$  and  $L = 10^9 \text{ cm}$ .  
 $E = V \times B/c$ .  $E = 20 \text{ V/cm}$ .

$W = 2 \times 10^{10} \text{ eV}$ .

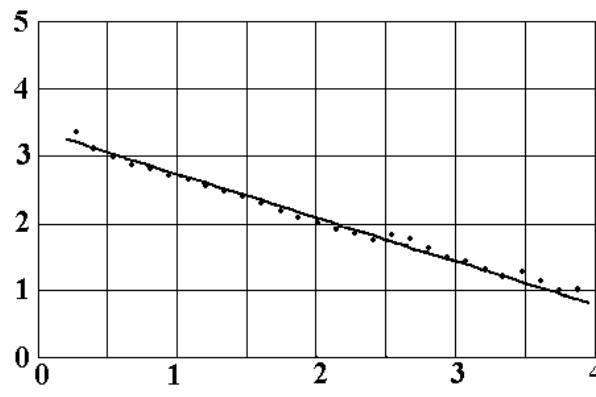




Для Ферми ускорения частицы необходимо, чтобы размер магнитного облака (толщина ударной волны)  $L$  превосходил ларморовский радиус частицы  $\rho$ . В противном случае частица пронизывает магнитное облако. Максимально достижимая энергия соответствует равенству ларморовского радиуса  $\rho \sim W/300B$  размеру магнитного облака. При магнитном поле в ударной волне  $B = 5 \times 10^{-4}$  Г для ускорения до  $2 \times 10^9$  эВ необходима ширина фронта волны большая  $\sim 10^{10}$  см. Скопление таких неоднородностей в солнечном ветре никогда не наблюдалось.



Область, в которой проводится расчет ускоренных частиц



$$dl/dE \sim \exp(-E/E_0) \quad E_0=0.6 \text{ GeV}$$

The rate of reconnection for  $E_0 \sim 0.6 \text{ GeV}$  is order of  $10^7 \text{ cm/s}$ .

$$E = V_{in} B/c$$

**Подгорный, Балабин, Вашенюк, Подгорный**  
**Астр. Журн. Т. 87, С. 704 (2010)**

**Podgorny, Balabin, Podgorny, Vashenyuk**  
**Journ. Atm. Solar-Ter. Phys. V. 72. P. 988 (2010)**

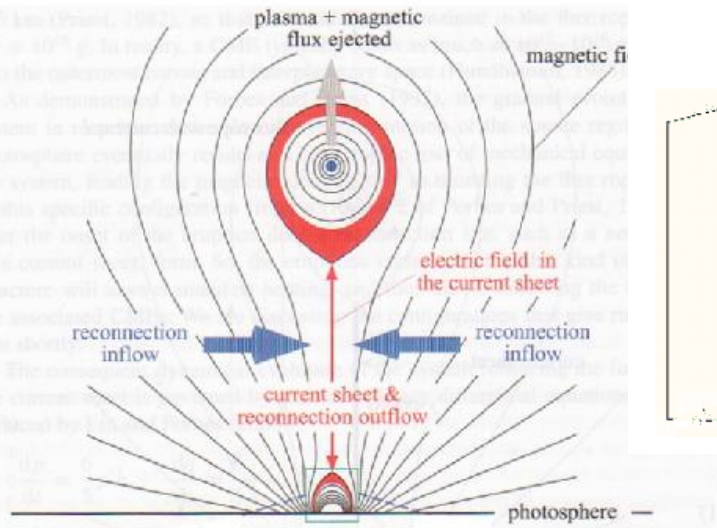
Необходимо путем проведения МГД моделирования в короне над активной областью более точно определить электрическое и магнитное поле в месте вспышечного освобождения энергии и окружающем пространстве, чтобы путем расчета траекторий заряженных частиц в полученных полях изучить механизм ускорения космических лучей и возможность их выхода из сильного магнитного поля над активной областью.

Поскольку нет информации о плазменных неоднородностях, а, следовательно, коэффициент диффузии в уравнении распространения ускоренных частиц неизвестен, прогноз появления в межпланетном пространстве космических лучей, способных вызвать облучение космонавтов, предполагается проводить на основании времен прихода, полученных И. М. Подгорным (JASTP 2018. V. 180. P. 9.) при помощи анализа наблюдательных данных.

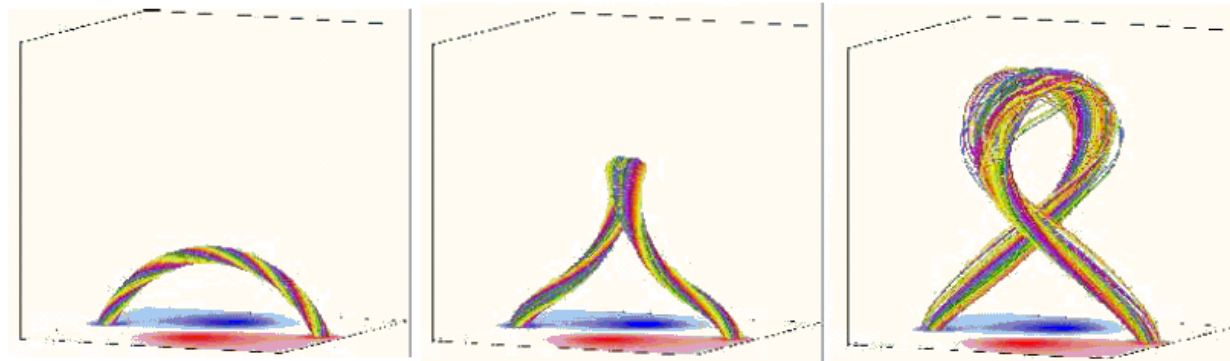
# Examples of alternative models of the solar flare

CME-FLARE ASSOCIATION DEDUCED FROM CATASTROPHIC MODEL OF CMES

Lin 2004



T. TÖRÖK AND B. KLIEM 2005

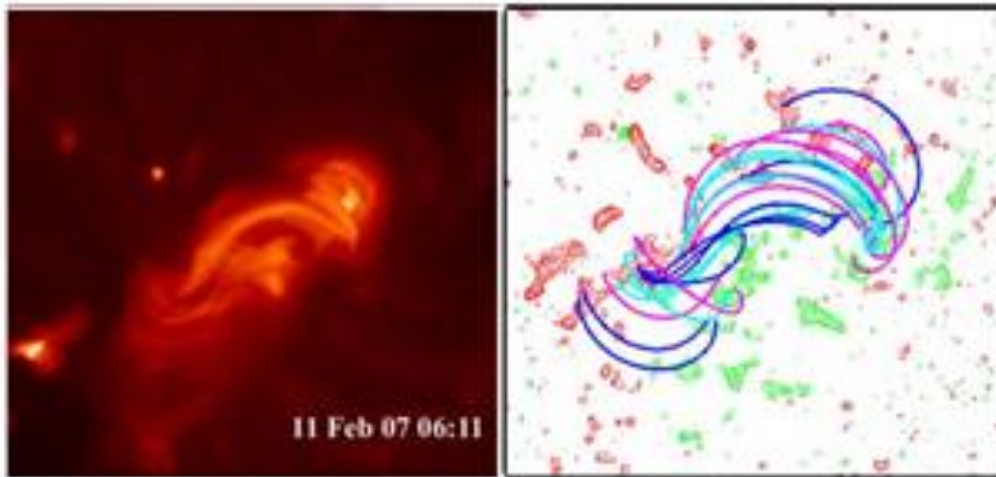


It is unclear how the rope can appear due to real disturbances on the photosphere.

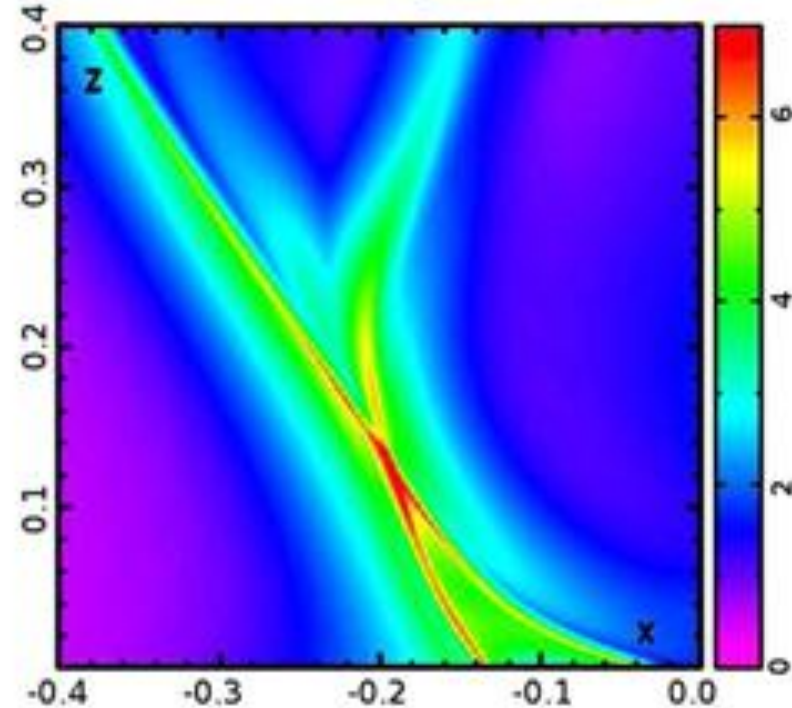
In any case to verify the validity of these models it is necessary to perform presented here MHD simulations for real active region.

Вычисления магнитных полей в короне над активной областью в **бессиловом** приближении ( $\text{rot}\mathbf{V}=\alpha\mathbf{V}$ ).

Savcheva, van Ballegoijen, DeLuca, *ApJ* 744:78, 2012



Savcheva et al. *ApJ*, 750:15, 2012



## **Наша цель:**

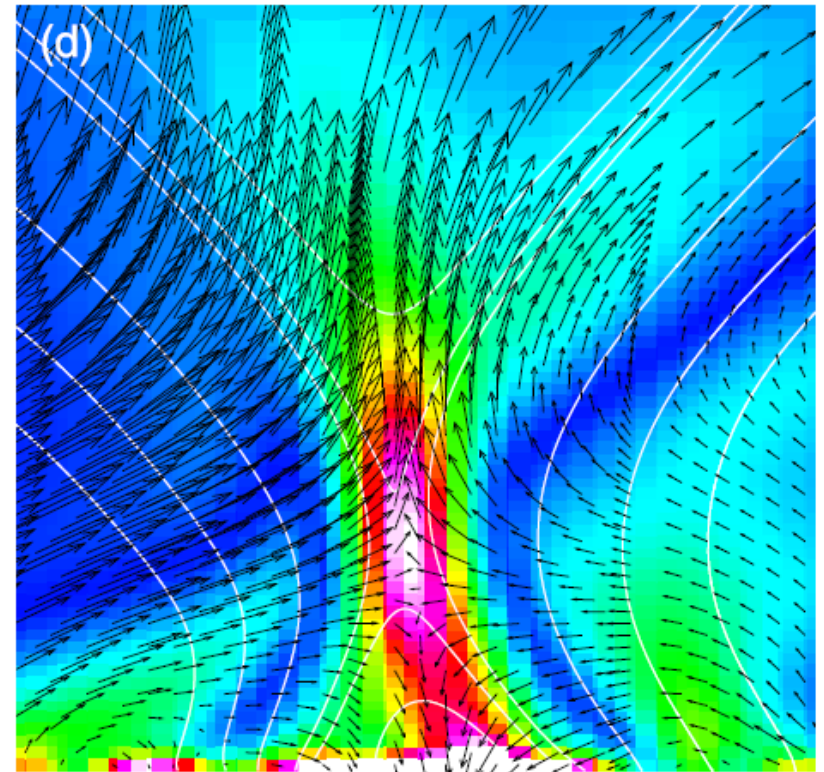
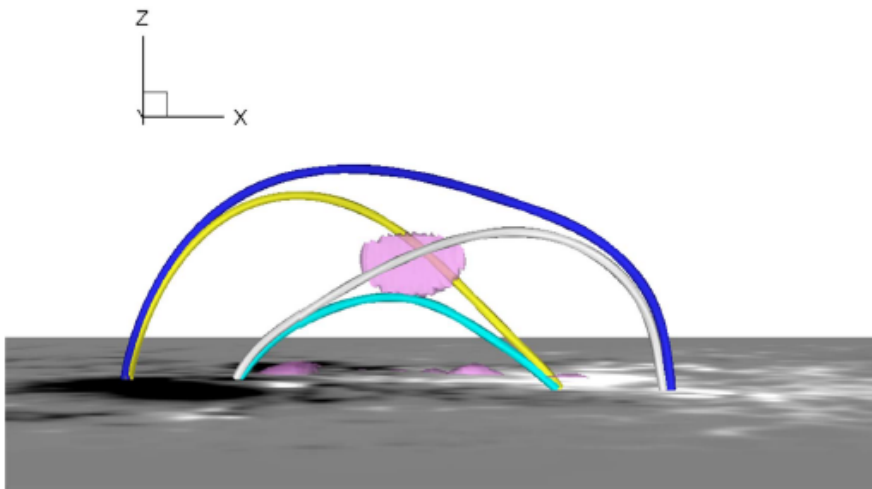
**Определить механизм солнечной вспышки непосредственно путем МГД моделирования в короне над реальной активной областью.**

**Все условия берутся из наблюдений и при постановке задачи никаких предположений о механизме вспышки не делается.**



# Jiang, C., Wu, S.T., Yurchyshyn, V., Wang, H., Feng, X., Hu, Q. 2016

2014 October 24 21:00 UT  
AR 12192 X3.1



$J/B$  0 0.1 0.2 0.3

# Decipher the Three-Dimensional Magnetic Topology of a Great Solar Flare

February 9, 2018

Chaowei Jiang, Peng Zou, Xueshang Feng, Qiang Hu, Aiyong Duan, Pingbing Zuo, Yi Wang, Fengsi Wei

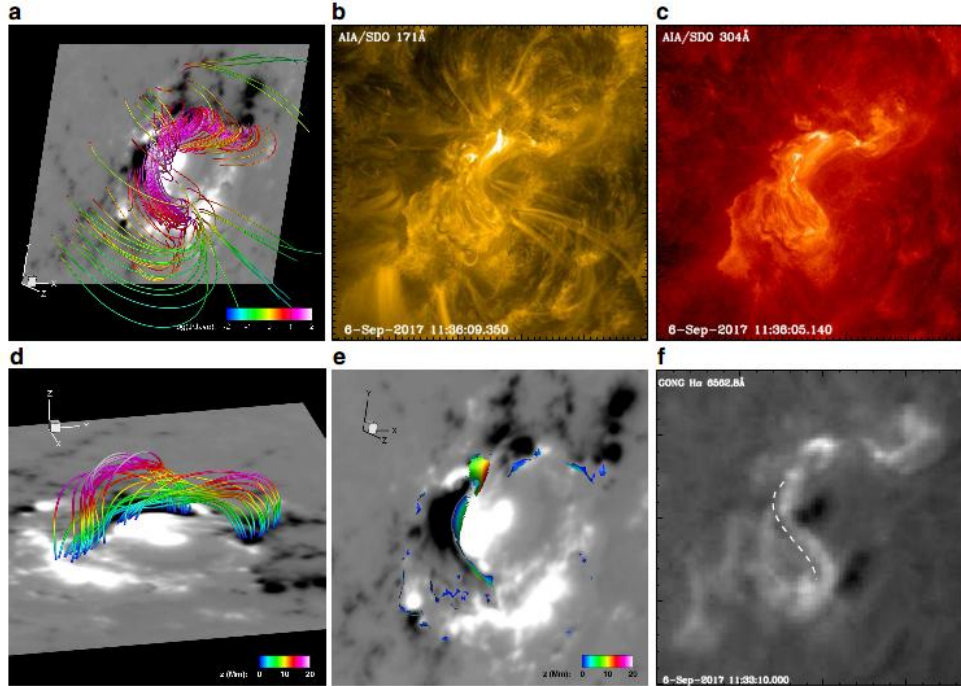


Figure 2: Comparison of the reconstructed magnetic field with the observed features of the solar corona prior to the flare. (a) SDO view of sampled magnetic field lines of the NLFFF reconstruction. The color of the lines represents the value of current density  $J$  (normalized by its average value  $J_{\text{ave}}$  in the computational volume). The background is the photospheric magnetogram. (b) and (c) SDO/AIA 171 Å and 304 Å images of the pre-flare corona. (d) The low-lying magnetic field lines in the core region. The field lines are color-coded by the value of height  $z$ . (e) Locations of dips in the magnetic field lines, and the color indicates the value of height  $z$ . (f) GONG H $\alpha$  image of the AR. The dashed curve denotes the location of a long filament.

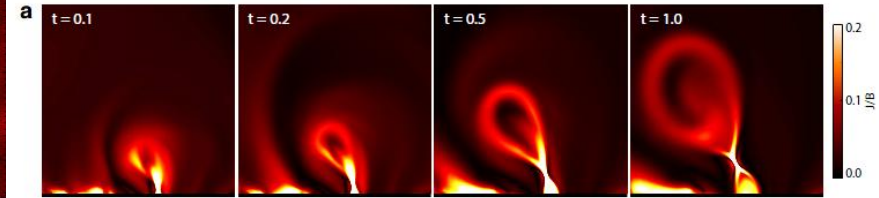


Figure 4: Temporal evolution of the eruptive structure in 2D view. Distribution of current density on the vertical cross section (the  $y = 0$  plane). Here the current density is normalized by local magnetic field strength, which provides a high contrast of thin current layers with other volumetric currents.

## **Наша цель:**

**Определить механизм солнечной вспышки непосредственно путем МГД моделирования в короне над реальной активной областью.**

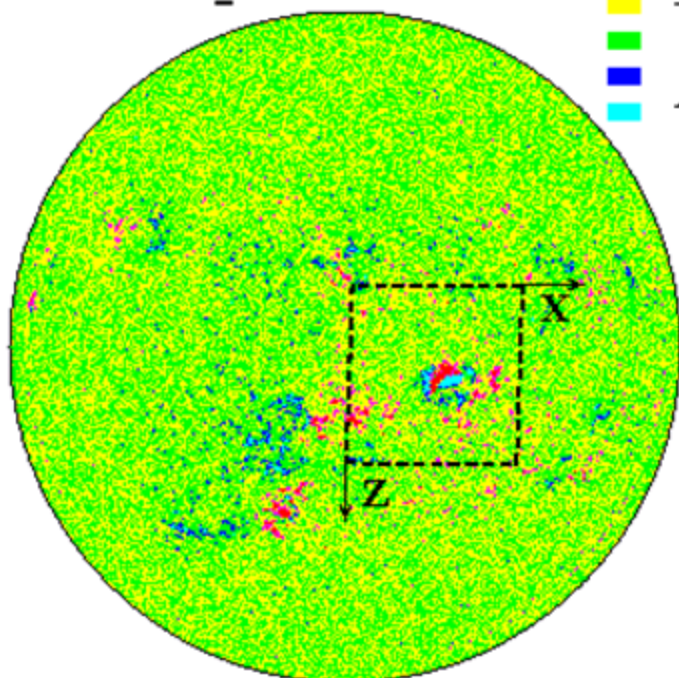
**Все условия берутся из наблюдений и при постановке задачи никаких предположений о механизме вспышки не делается.**

**Для изучения механизма солнечной  
вспышки расчет должен  
начинаться за несколько суток  
перед появлением вспышек, когда  
магнитная энергия для вспышки  
еще не накопилась в короне.**

27-05-2003 20:47:59  
 fd\_M\_96m\_01d.3789.0013.fits  
 B\_0 = -1.1810

**В в Гауссах**

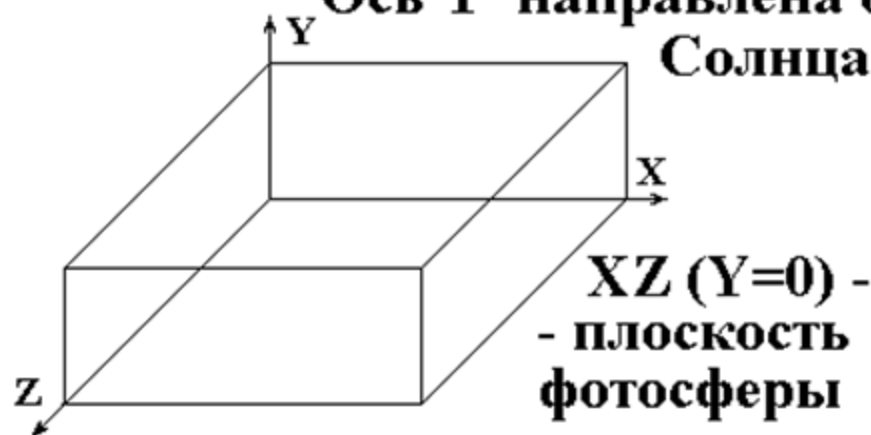
- $B < -150$
- $-150 < B < -50$
- $-50 < B < 0$
- $0 < B < 50$
- $50 < B < 150$
- $150 < B$



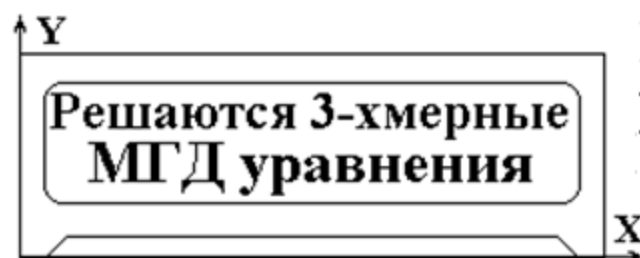
--- ОБЛАСТЬ В КАРТИННОЙ ПЛОСКОСТИ

**РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ В КОРОНЕ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ**

**Ось Y направлена от Солнца**



**Сечение Z=const**



**Нефотосферная граница:**

- $B_{\perp}$  из  $\text{div} \mathbf{B} = 0$
- $B_{\parallel}$  из  $\partial j / \partial n = 0$
- $\partial \rho / \partial n = 0$
- $\partial V / \partial n = 0$
- $\partial T / \partial n = 0$

**Фотосферная граница:**

- $B_{\parallel}$  из вычисленного потенц. поля для наблюдаемого  $B$  вдоль луча зрения;  $B_{\perp}$  из  $\text{div} \mathbf{B} = 0$ ;  $\rho = \text{const}$ ;
- $\partial V / \partial n = 0$ ;  $\partial T / \partial n = 0$

- (  $V = 0$
- $T = \text{const}$
- $B_{\parallel} = \text{const}$  )

**Численное трехмерное моделирование в короне над активной областью. Решается система МГД уравнений для сжимаемой плазмы с диссипативными членами и анизотропной теплопроводностью. Численная неустойчивость стабилизируется введением искусственной вязкости.**

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\text{Re}_m} \text{rot} \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \text{rot} \mathbf{B} \right) + \text{rot}(v_{m\_Art} \text{rot} \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{V} \rho) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} - \frac{\beta_0}{2\rho} \nabla(\rho T) - \frac{1}{\rho} (\mathbf{B} \times \text{rot} \mathbf{B}) + \frac{1}{\text{Re}_\rho} \Delta \mathbf{V} + G_g \mathbf{G} + v_{m\_Art} \Delta \mathbf{V} \quad (3)$$

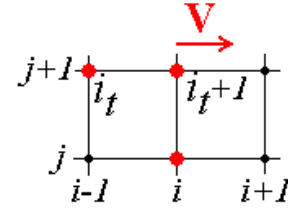
$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -(\mathbf{V}, \nabla) T - (\gamma - 1) T \text{div} \mathbf{V} + (\gamma - 1) \frac{2\sigma_0}{\text{Re}_m \sigma \beta_0 \rho} (\text{rot} \mathbf{B})^2 - (\gamma - 1) G_q \rho L'(T) + \\ & + \frac{\gamma - 1}{\rho} \text{div} \left( \mathbf{e}_{\parallel} \kappa_{dl}(\mathbf{e}_{\parallel}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 1} \kappa_{\perp dl}(\mathbf{e}_{\perp 1}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 2} \kappa_{\perp dl}(\mathbf{e}_{\perp 2}, \nabla T) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

**Для численного решения  
МГД уравнений  
разработана  
программа ПЕРЕСВЕТ**

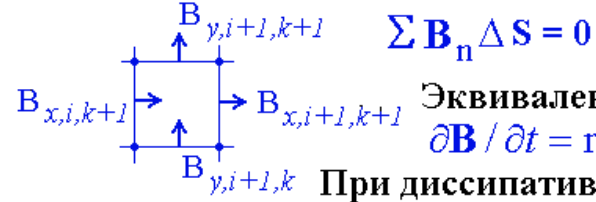
A.I. Podgorny Solar Phys. 156,41,1995.  
A.I. Podgorny, I.M. Podgorny  
Solar Phys. 139, 125, 1992 Cosmic Research 35, 35, 1997  
161, 165, 1995 35, 235, 1997  
182, 159, 1998 36, 492, 1998  
207, 323, 2002  
Astronomy Reports 42, 116, 1998 45, 60, 2001 48, 435, 2004  
43, 608, 1999 46, 65, 2002 49, 837, 2005  
44, 407, 2000 47, 696, 2003 52, 666, 2008  
Comput. Mathem. Mathematical Phys 44, 1784, 2004 54, 645, 2010

# В программе ПЕРЕСВЕТ:

- Противопоточная для диагональных членов, конечно-разностная схема.
- Схема абсолютно неявная, решается методом итераций (не обязательно  $\Delta t V_w / \Delta x < 1$ ).
- Схема консервативна относительно магнитного потока  $[\text{div} \mathbf{B}] = 0$



$$\mathbf{u}_i^{(i_t+D)j+1} = \mathbf{u}_i^j - \mathbf{v} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{u}_i^{(i_t)j+1} - \mathbf{u}_{i-1}^{(i_t)j+1})$$



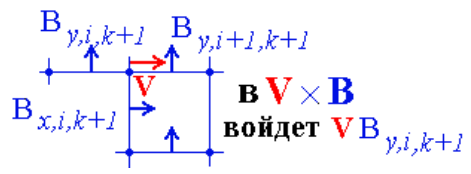
$$\sum \mathbf{B}_n \Delta S = 0$$

Эквивалентность уравнений

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + v_m \Delta \mathbf{B} \quad \text{и} \quad \partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - v_m \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B})$$

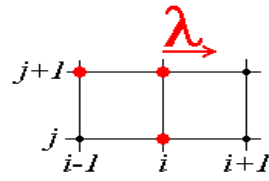
При диссипативной релаксации магнитно поля плотность тока  $[\text{rot} \mathbf{B}] \rightarrow 0$

- Несимметричная (противопоточная) аппроксимация  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ .



# Другие методы:

- Явные конечно-разностные схемы
- Часто типа Годунова (волны Римана)
- Используем специальные методы повышения порядка аппроксимации (FCT, TVD)
- Так же Лагранжевы схемы с пересчетом путем интерполяции на каждом шаге

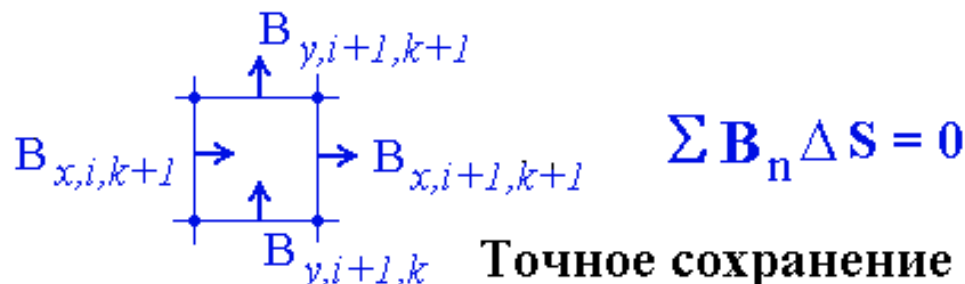


$$\mathbf{w}_i^{j+1} = \mathbf{w}_i^j - \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{w}_i^j - \mathbf{w}_{i-1}^j)$$

- Некоторые схемы также консервативны относительно магнитного потока  $[\text{div} \mathbf{B}] = 0$ , но с симметричной аппроксимацией  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ .

В  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  войдет  $\mathbf{v} (B_{y,i+1,k+1} + B_{y,i,k+1}) / 2$

Конечно-разностная схема консервативна относительно магнитного потока.



Точное сохранение  $[\text{div } \mathbf{B}] = 0$  : уравнения

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \nu_m \Delta \mathbf{B} \quad \text{и}$$

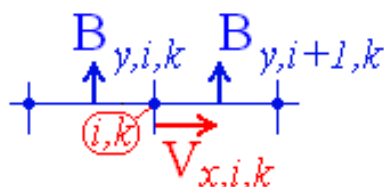
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \nu_m \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B}) \quad \text{эквивалентны.}$$

При диссипативной релаксации магнитно поля, численное значение плотности тока  $[\text{rot } \mathbf{B}] \rightarrow 0$ .

Для противопоточной аппроксимации  $\text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B})$  элементы вектора  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  аппроксимируются:

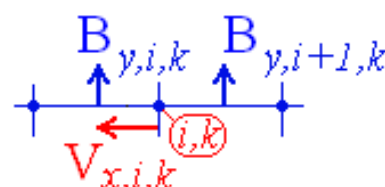
При  $V_{x,i,k} > 0$

$$(V_x B_y)_{i,k} = V_{x,i,k} B_{y,i,k}$$



При  $V_{x,i,k} < 0$

$$(V_x B_y)_{i,k} = V_{x,i,k} B_{y,i+1,k}$$





# Схема решается методом итераций

$$\begin{aligned}
 & \frac{B_{x,i_x,i_y}^{j+1} - B_{x,i_x,i_y}^j}{\tau} = [\text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B})]_x + \\
 & + v_m \left( \frac{B_{x,i_x,i_y-1}^{j+1} - 2B_{x,i_x,i_y}^{j+1} + B_{x,i_x,i_y+1}^{j+1}}{h^2} + \frac{B_{x,i_x-1,i_y}^{j+1} - 2B_{x,i_x,i_y}^{j+1} + B_{x,i_x+1,i_y}^{j+1}}{h^2} \right)
 \end{aligned}$$

Не смотря на использование специально разработанных методов, вычисления выполняются медленно. Поэтому, проведение МГД моделирования на персональном компьютере, (двухядерный процессор 1.6 ГГц) за обозримое время (не годы) быть выполнено только в сильно сокращенном масштабе времени (в  $10^4$  раз). **Возникает необходимость применения параллельных вычислений.**

**Время расчета эволюции поля и плазмы в солнечной короне над активной областью определяется:**

- 1) Величиной шага по времени (при котором схема остается устойчивой)**
- 2) Количеством итераций**
- 3) Временем расчета одной итерации**

**Распараллеливание вычислений осуществлялось по технологии CUDA на современных видеокартах (GPU). Использовано современное программное обеспечение (Fortran PGI). Разработаны методы оптимизации распараллеливания вычислений, включающие минимизацию обмена данными между памятью GPU и памятью центрального процессора.**

**Для оптимизации алгоритма распараллеливания вычислений было выполнено более 20 модернизаций программы, в результате чего скорость вычислений увеличилась в 7,5 раз и стала в 120 раз быстрее скорости вычислений не распараллеленной программы, в которой в которой реализована та же разностная схема. После проведенной оптимизации время расчета одной итерации на используемой сетке разностной схемы  $135 \times 41 \times 135$  составило 0,02 с.**

**Шаг по времени  $\tau$  не должен значительно превосходить время из условия Куранта  $\tau_K$  :  $\tau < \tau_K = h/(V_{MV} + V_{MA})$ . Здесь  $h$  – пространственный шаг,  $V_{MV}$  – максимум модуля скорости и  $V_{MA}$  – максимальное значение модулей магнитозвуковой и альвеновской скоростей. Расчеты показали, что шаг по времени  $\tau$  должен быть меньше  $\tau_K$ , несмотря на то, что используется абсолютно неявная схема (повидимому из-за того, что: система уравнений с перекрестными членами, и используется метод итераций).**

**Для исследования механизма солнечной вспышки, необходимо правильно выбрать параметры задачи, исходя из принципа ограниченного моделирования И.М. Подгорного (Fund. Cosm. Phys. 1978), и параметры вычислительного метода (искусственную вязкость и параметры разностной схемы).**

**Параметры в области в короне над выбранной активной областью:**

$$\text{Re}_m = L_0 V_0 / v_m = 2 \times 10^{16}, \quad \text{Re} = 10^4, \quad \text{Re}_{(\text{В-ЗАМАГНИЧ.})} = 10^{20},$$
$$\beta = 8p_0 / B_0^2 = 0.6 \times 10^{-5}$$

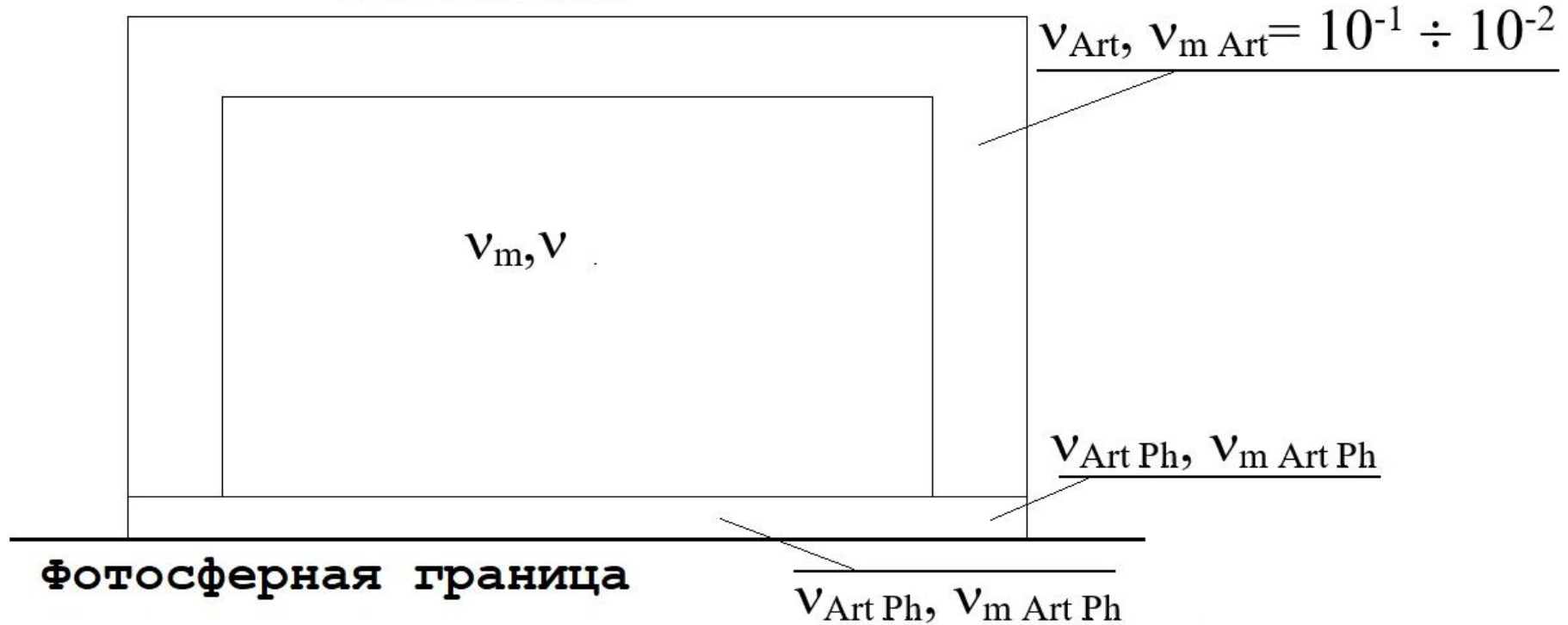
$$(B_0 = 300 \text{Gs}, \quad n_0 = 10^8 \text{ cm}^{-3}, \quad T_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ }^0\text{K} = 130 \text{ eV} =$$
$$= 2 \times 10^{-10} \text{ erg})$$

## 2 набора параметров:

- 1)  $Re_m = 3 \times 10^5$ ,  $Re = 10^4$ ,  $\beta = 0.6 \times 10^{-5}$  - использовался для предыдущего расчета, сравнительно большие вязкости обеспечили устойчивость решения, но подвляли возмущение, распространяющееся от фотосферы, и поэтому препятствовали накоплению энергии в короне для вспышки.
- 2)  $Re_m = 10^9$ ,  $Re = 10^7$ ,  $\beta = 0.6 \times 10^{-5}$  —  
**сейчас выбран набор параметров**

**Стабилизация неустойчивости на границе, которая появляется особенно часто при малой вязкости в области (магнитной и обычной) требует малых шагов и большого количества итераций.**

**Расчетная область**



Два расчета с наборами параметров:

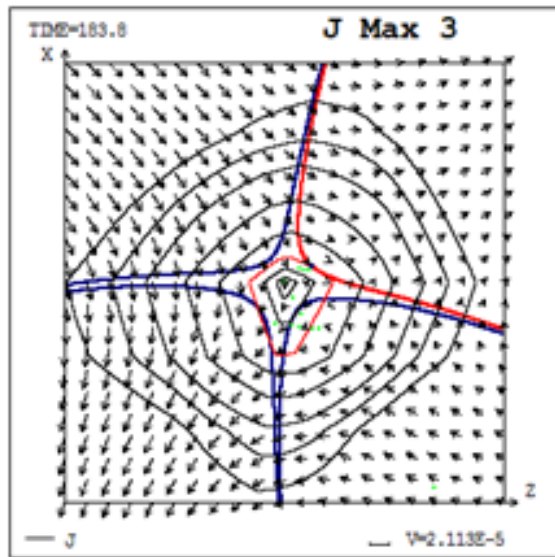
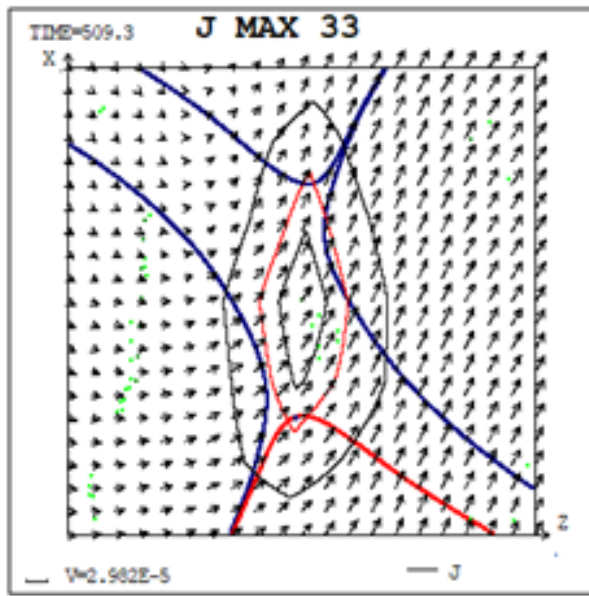
1.  $v_m = 0.3 \times 10^{-5}$  ( $Rm = 3 \times 10^5$ );  $v = 10^{-4}$  ( $Re = 10^4$ );  $v_{Art Ph}, v_{m Art Ph} = 0.3 \times 10^{-2}$
2.  $v_m = 10^{-9}$  ( $Rm = 10^9$ );  $v = 10^{-7}$  ( $Re = 10^7$ );  $v_{Art Ph}, v_{m Art Ph} = 10^{-4}$

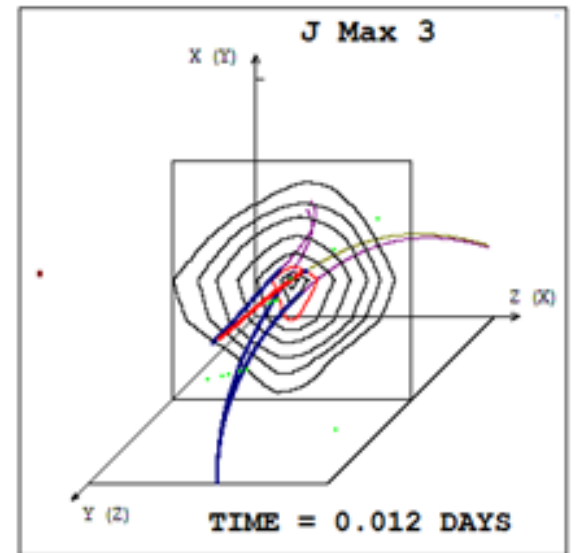
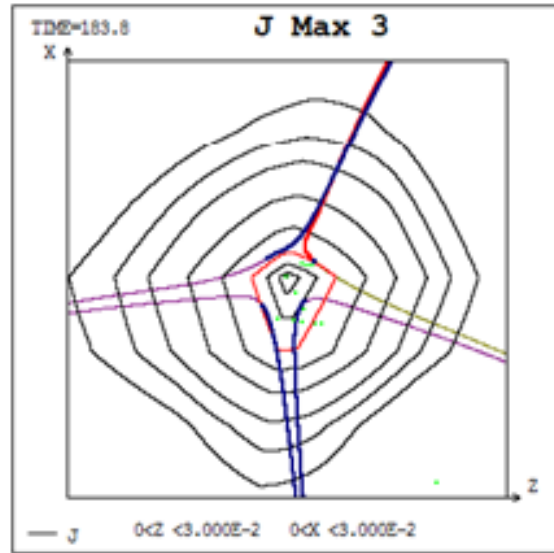
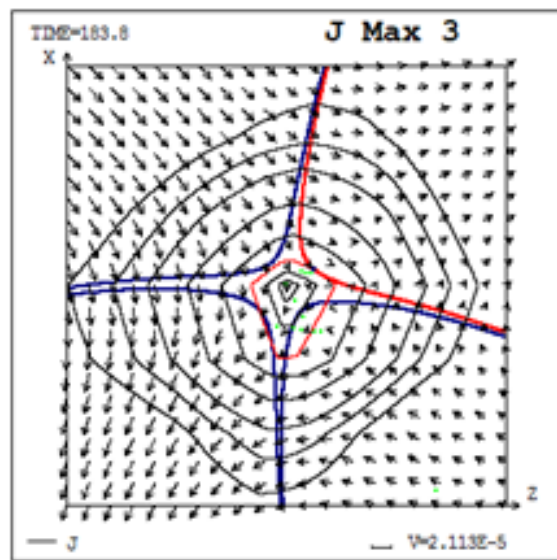
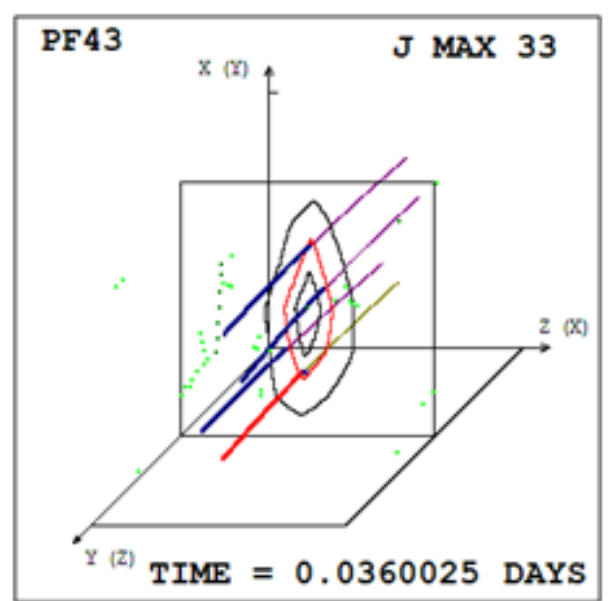
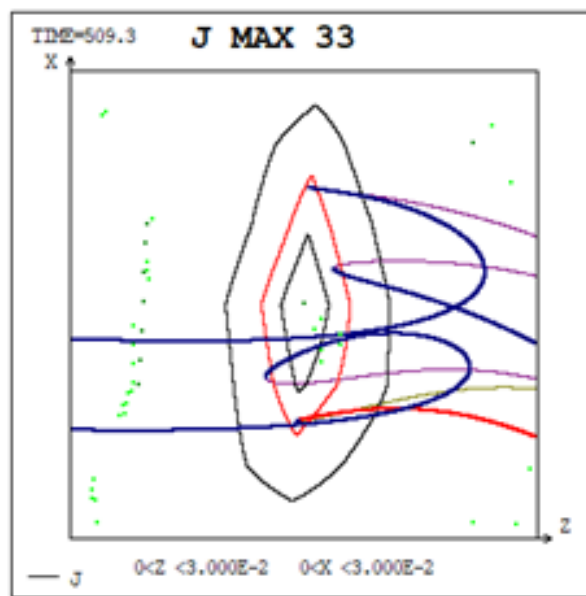
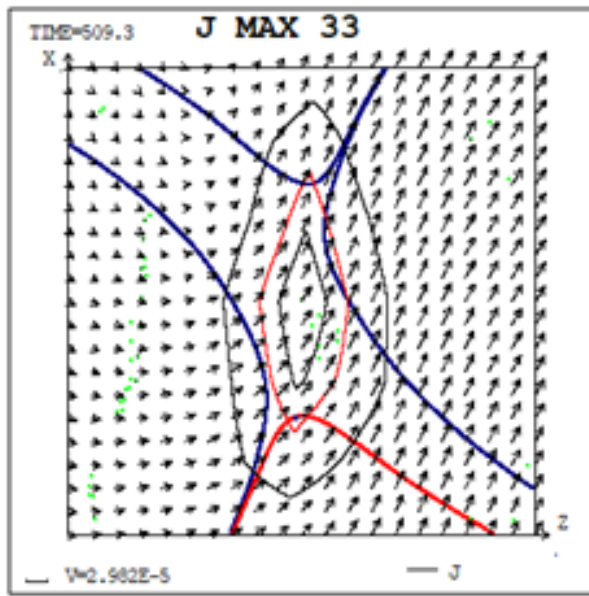
(В солнечной короне  $Rm = 10^{16}$ ,  $Re = 10^4$ ,  $Re_B = 10^{20}$ ; сеточная вязкость  $v_{grid} = h V_{DimLess}$ ;  $h = 0.5 \times 10^{-2}$ ;  $V_{DimLess} = 10^{-6} \div 10^{-3}$ ;  $a = v_m / V_{in}$ )



Шаг по времени из условия Куранта  $\tau_K = h/(V_{MV} + V_{MA})$  в расчетах  $\tau_K = 10^{-8} \div 10^{-7}$  суток. Для оценки времени расчета с шагом  $\tau_K$ : время расчета одной итерации на графических платах с применением CUDA технологии  $2 \times 10^{-2}$  сек, для 5 итераций время расчета одного шага 0.1 сек, так что (сутки  $\sim 10^5$  сек) время расчета одних суток эволюции в солнечной короне 10 – 100 суток.

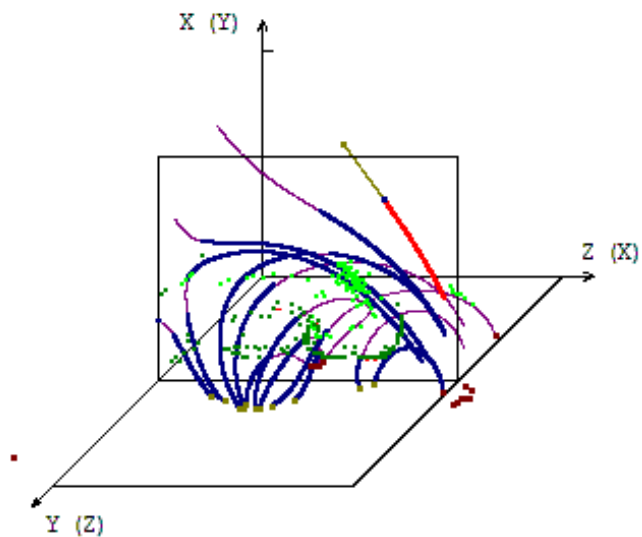
В действительности, при появлении неустойчивости на границе, для её стабилизации помимо применения предложенных необходимы меньшие шаги по времени и большее количество итераций. **Поэтому, несмотря на применение разработанных методов стабилизации численных неустойчивостей вблизи границы расчетной области, время вычислений может значительно возрасти.**





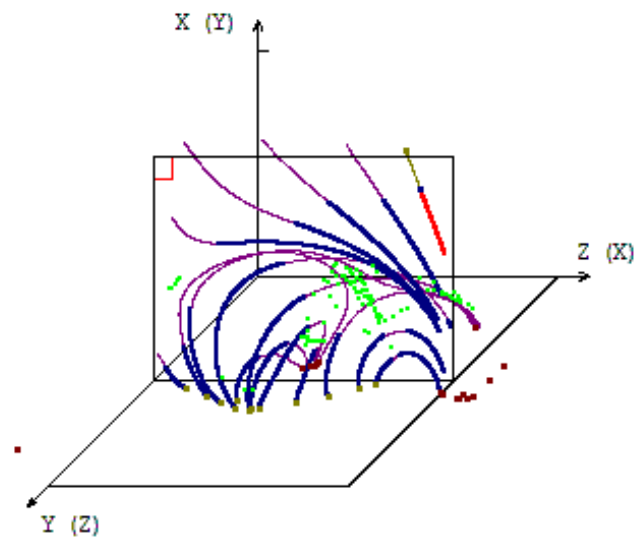
PF43

TIME = 0.0360025 DAYS



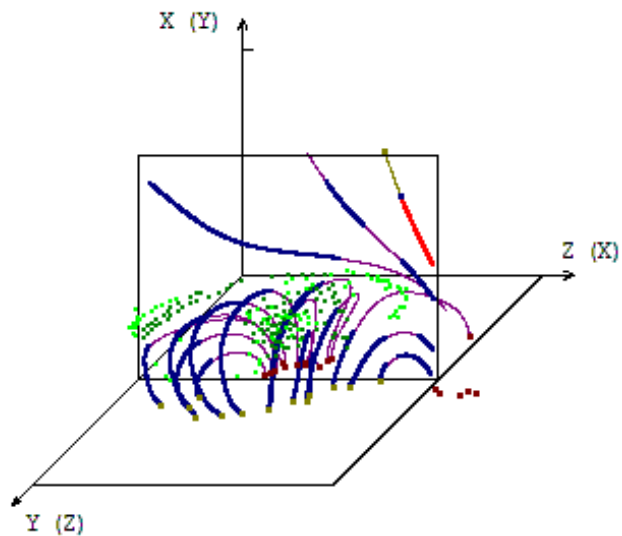
PF127

TIME = 0.1200025 DAYS



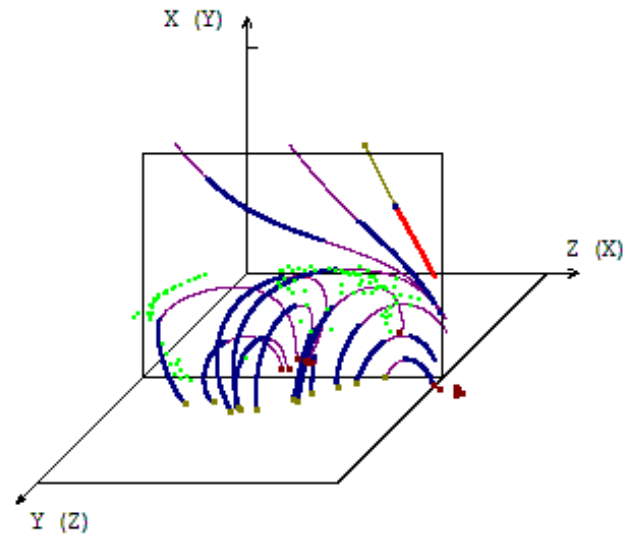
PF680

TIME = 0.6705025 DAYS



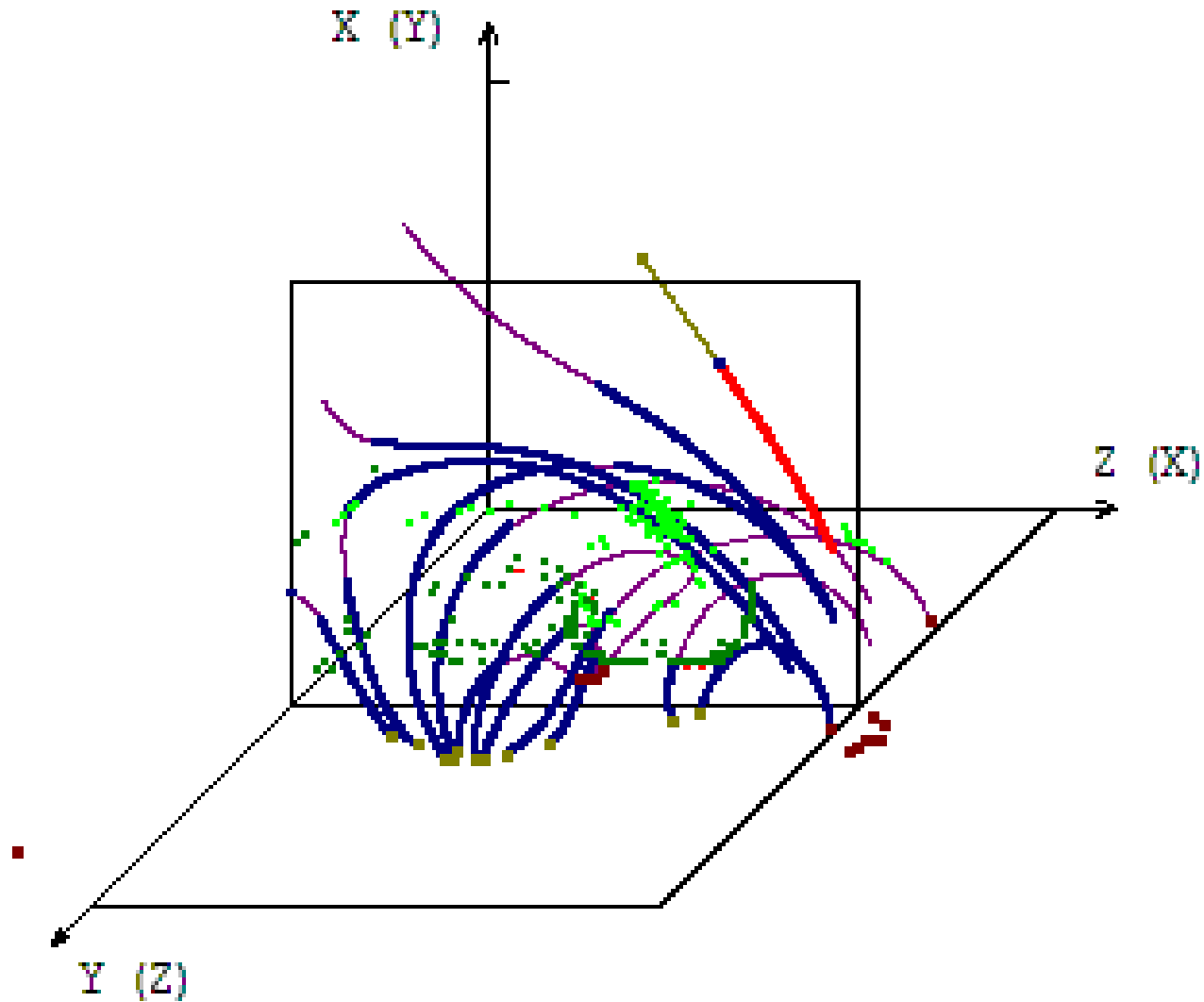
PF426

TIME = 0.4183025 DAYS



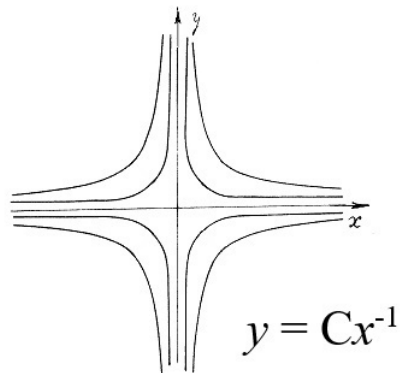
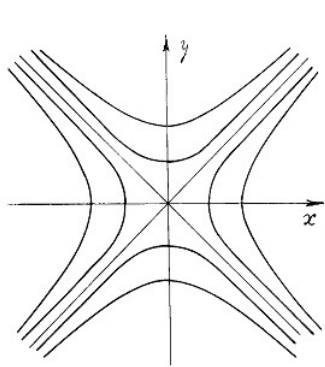
PF43

TIME = 0.0360025 DAYS



**Создана графическая система поиска положений токовых слоев для сравнения с наблюдаемыми положениями источников теплового рентгеновского излучения.**

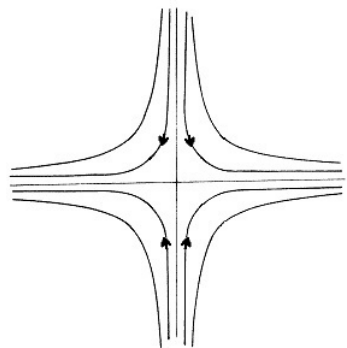
**Для поиска положения токового слоя используется его свойство, согласно которому локальный минимум абсолютной величины плотности тока расположен в центре токового слоя. Находятся все положения локальных максимумов плотности тока. Анализируется конфигурация магнитного поля в окрестности каждого максимума плотности тока. В первую очередь анализируется конфигурация магнитного поля в плоскости, расположенной перпендикулярно вектору магнитного поля в точке этого максимума, в которой конфигурация магнитного поля токового слоя наиболее ярко выражена.**



$$\nabla \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_x}{dy} & \frac{dB_x}{dz} \\ \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_y}{dy} & \frac{dB_y}{dz} \\ \frac{dB_z}{dx} & \frac{dB_z}{dy} & \frac{dB_z}{dz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_x}{dy} \\ \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_y}{dy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

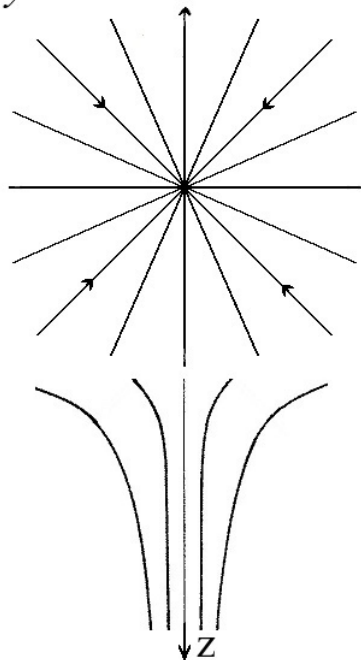
$$y = Cx^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$$

$$y = Cx^{-1}$$

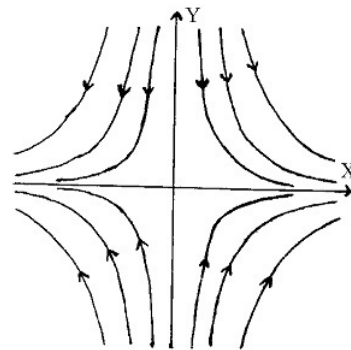


+

$$y = Cx$$

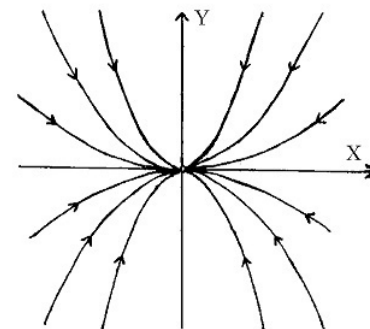


=



$$\alpha < 0$$

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$   
разных знаков

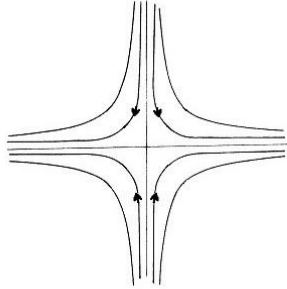


$$\alpha > 0$$

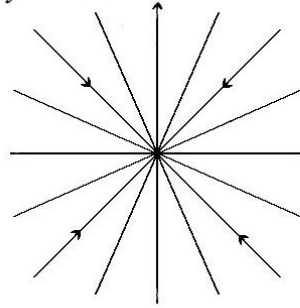
$\lambda_1$  и  $\lambda_2$   
одного знака

$$y = Cx^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$$

$$y = Cx^{-1}$$

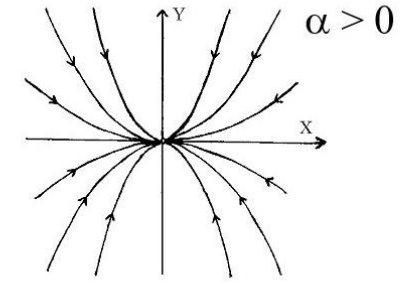
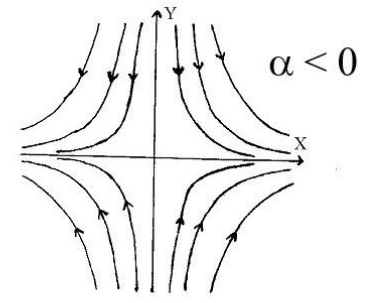


$$y = Cx$$

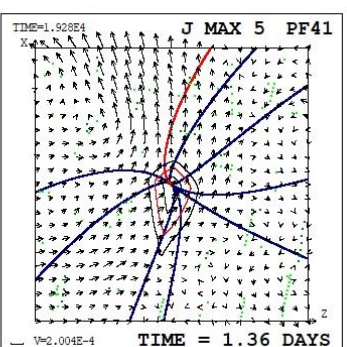
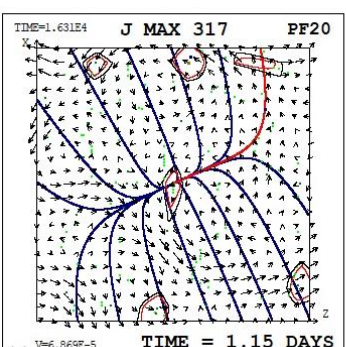
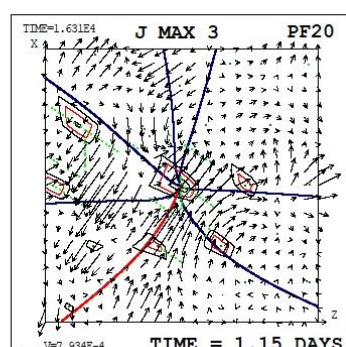
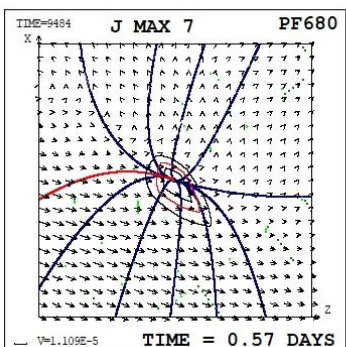
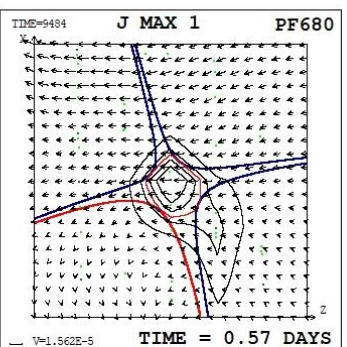
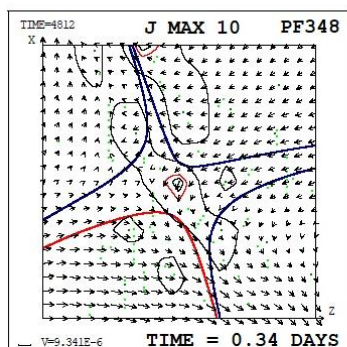
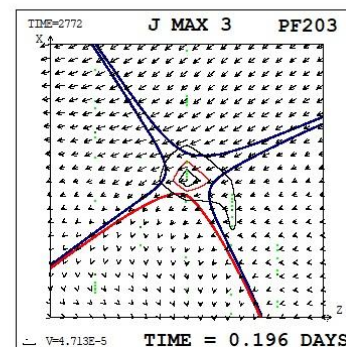
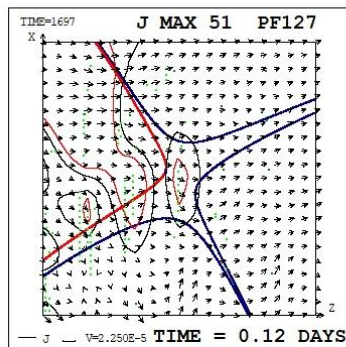


+

=

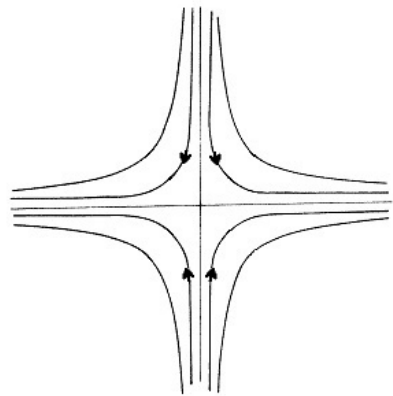


$$y = Cx^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$$



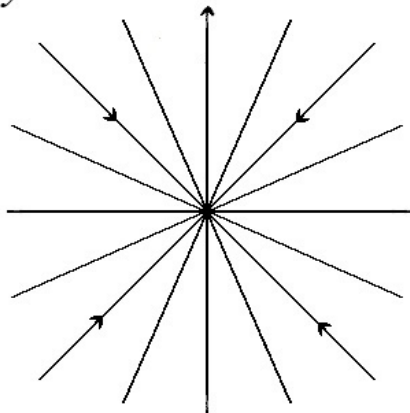


$$y = Cx^{-1}$$

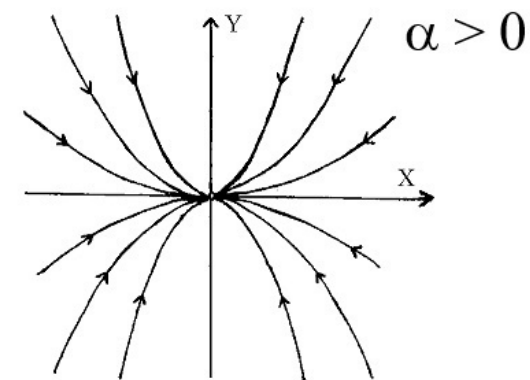
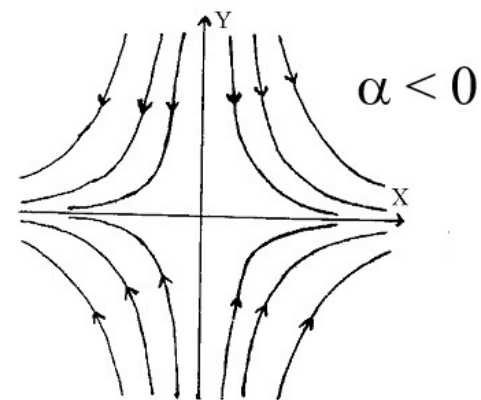


+

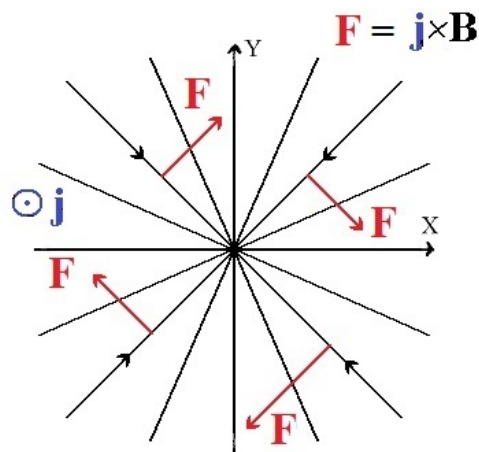
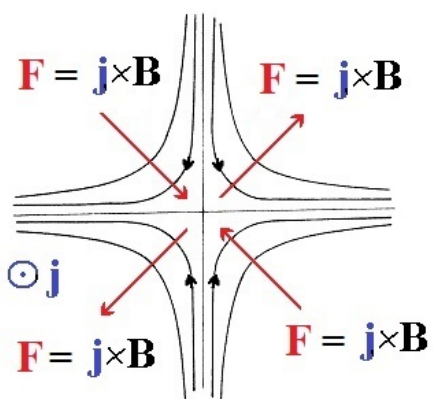
$$y = Cx$$



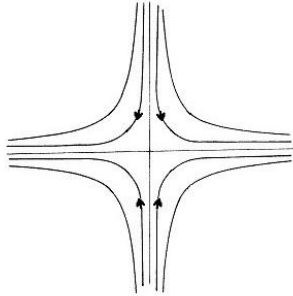
=



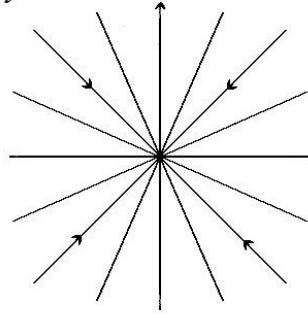
$$y = \underline{Cx}^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$$



$$y = Cx^{-1}$$

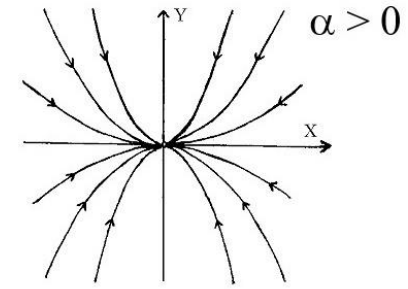
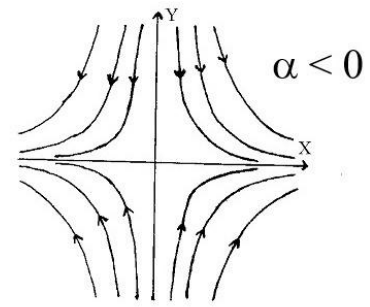


$$y = Cx$$

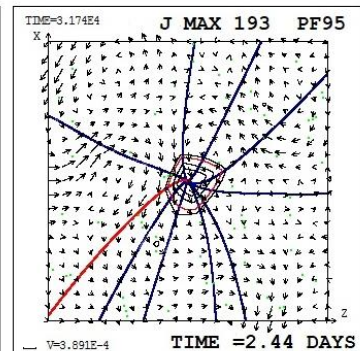
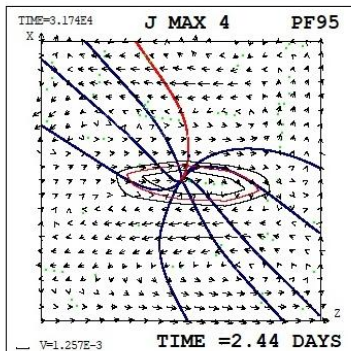
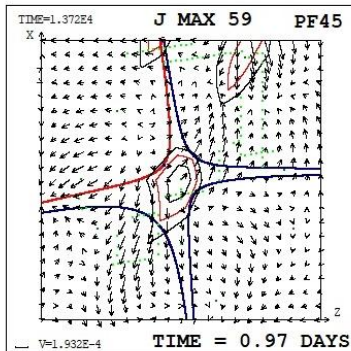
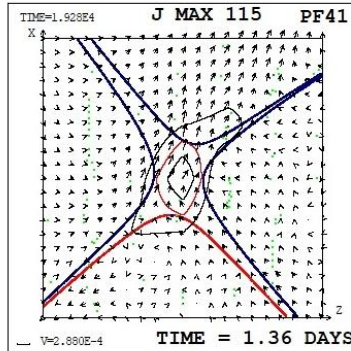
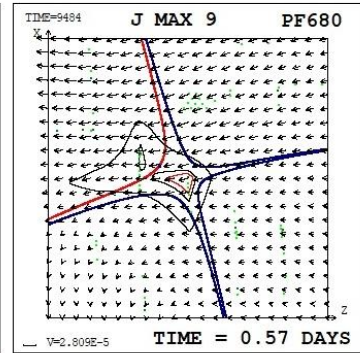
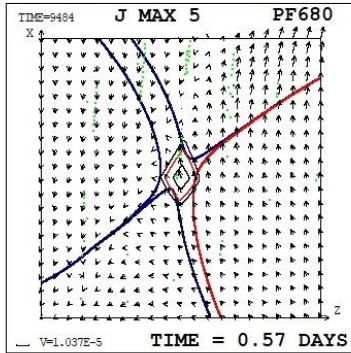
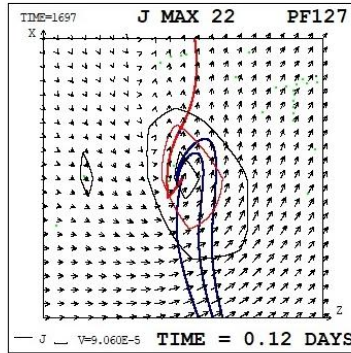
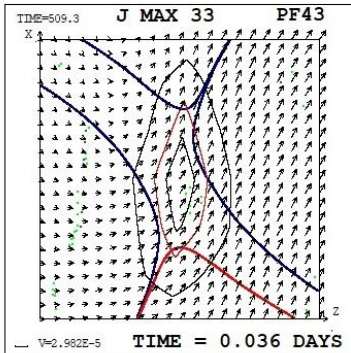


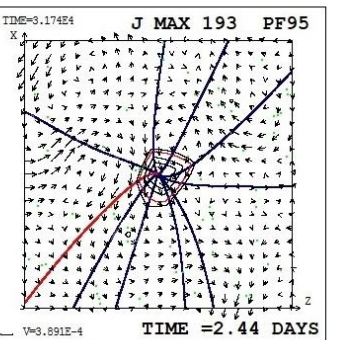
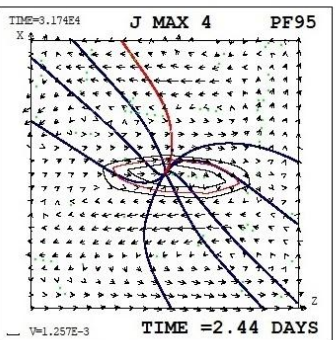
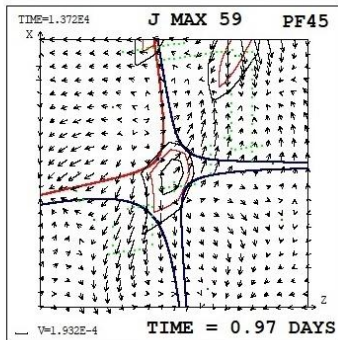
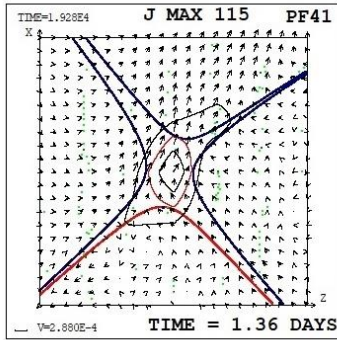
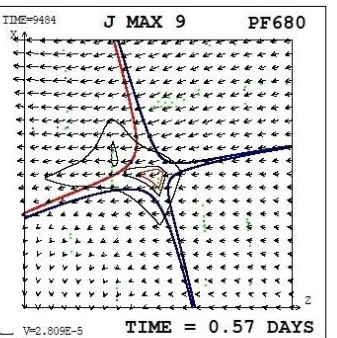
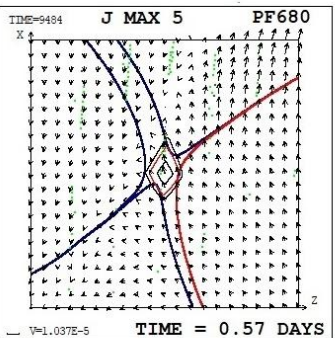
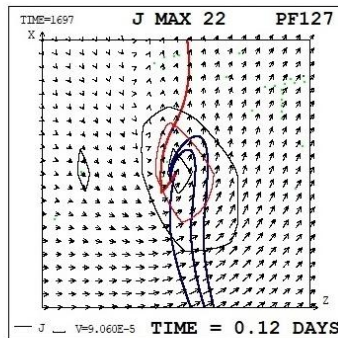
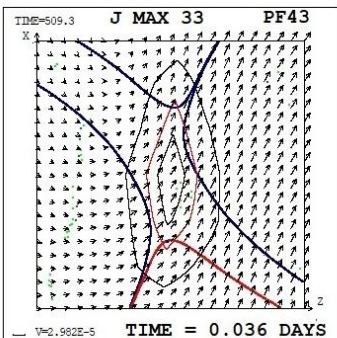
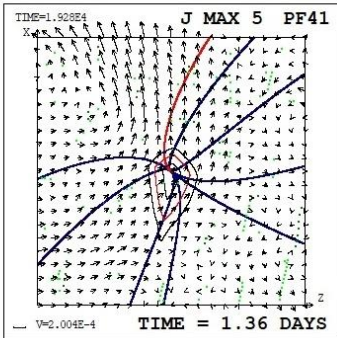
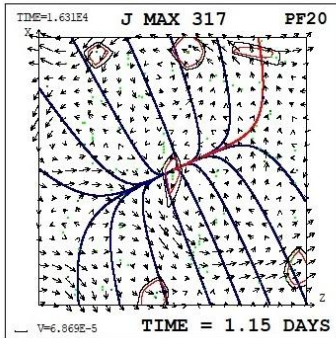
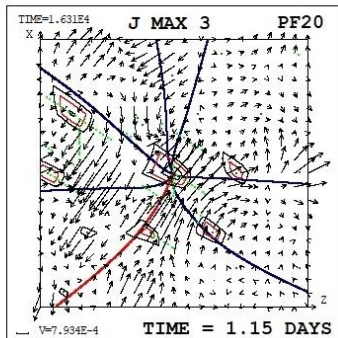
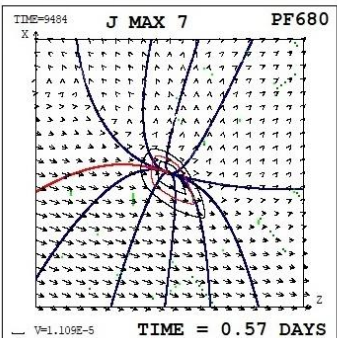
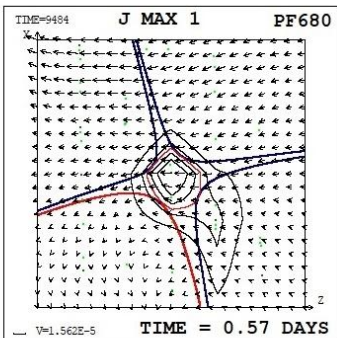
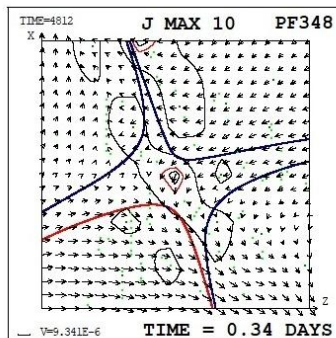
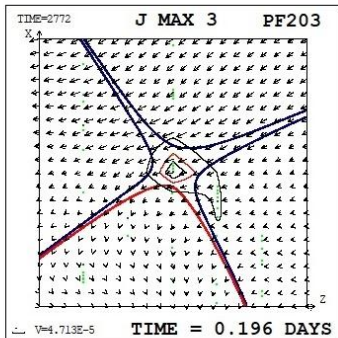
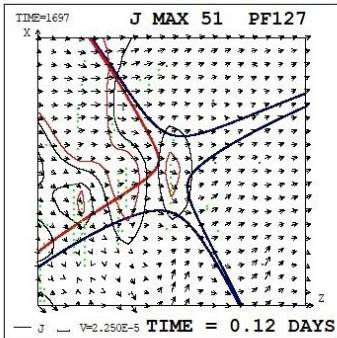
+

=

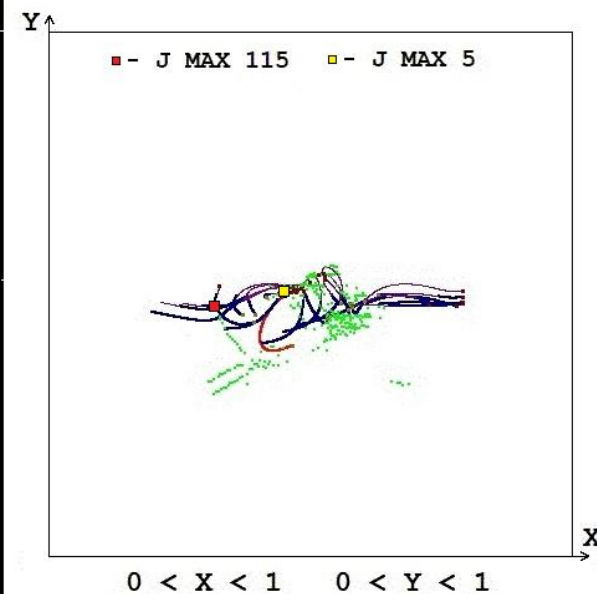
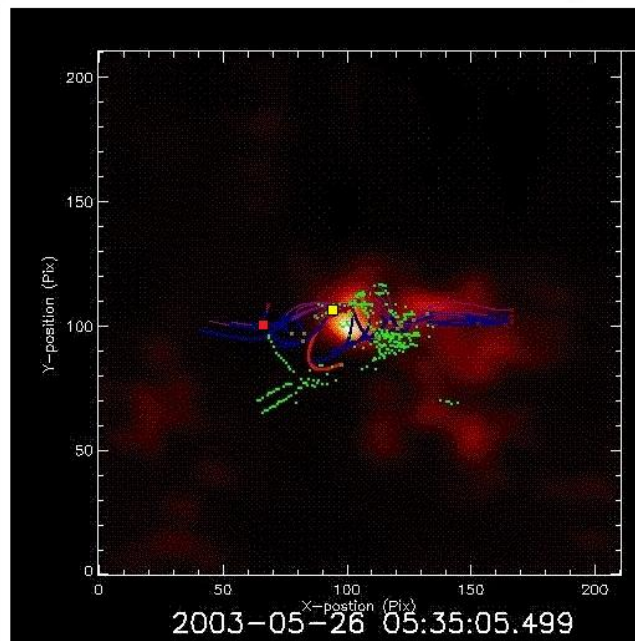
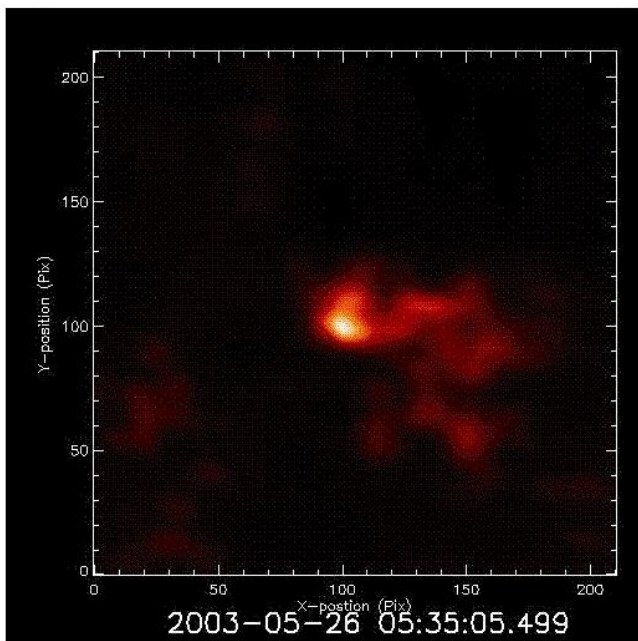
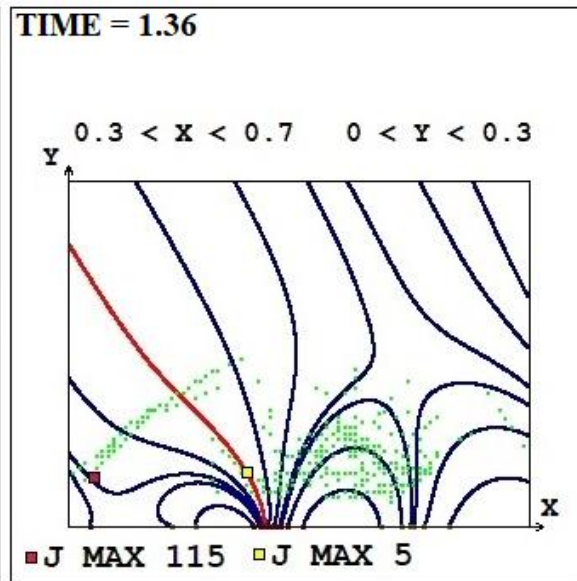
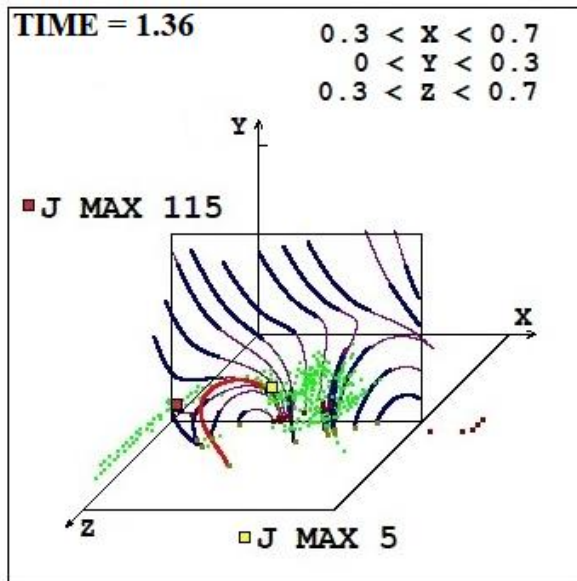
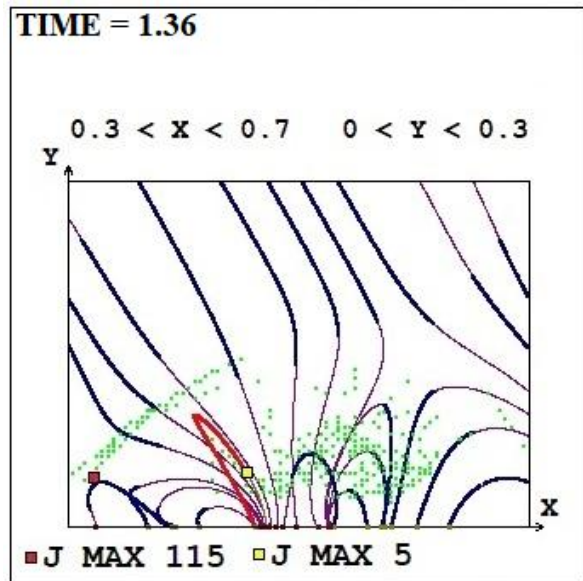


$$y = Cx^\alpha, \quad \alpha = \lambda_2/\lambda_1$$



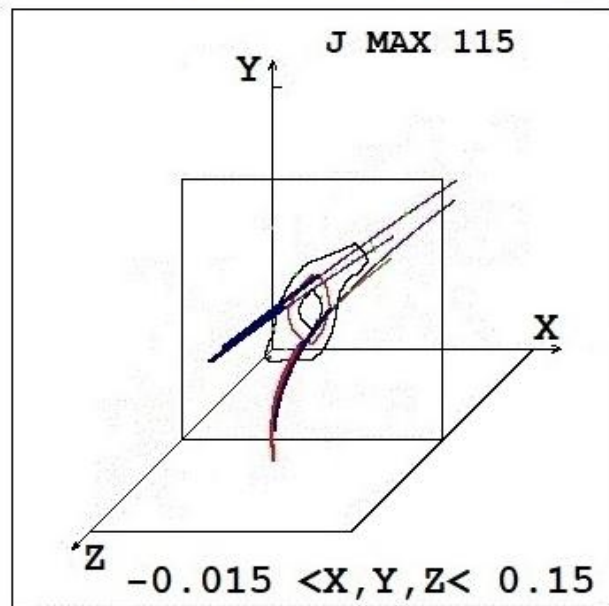
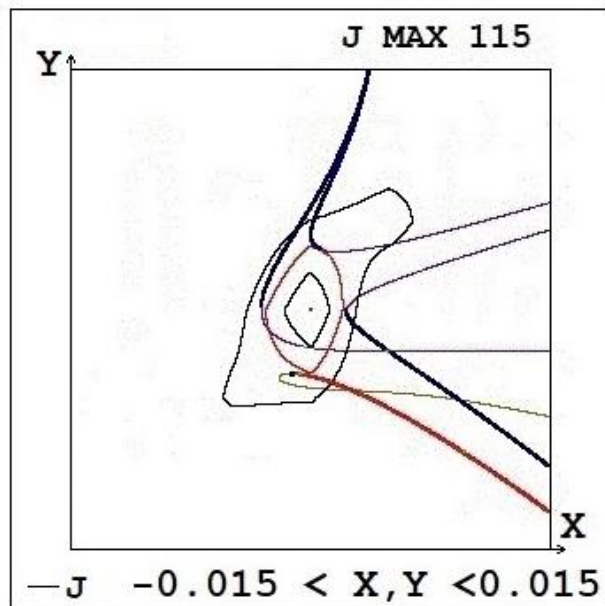
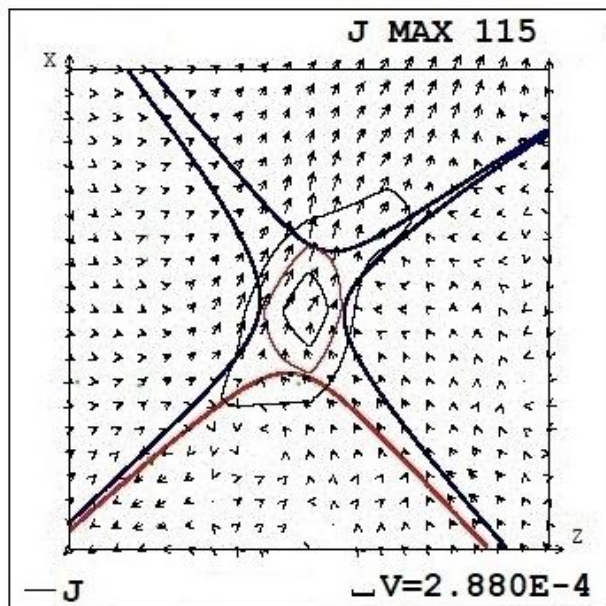
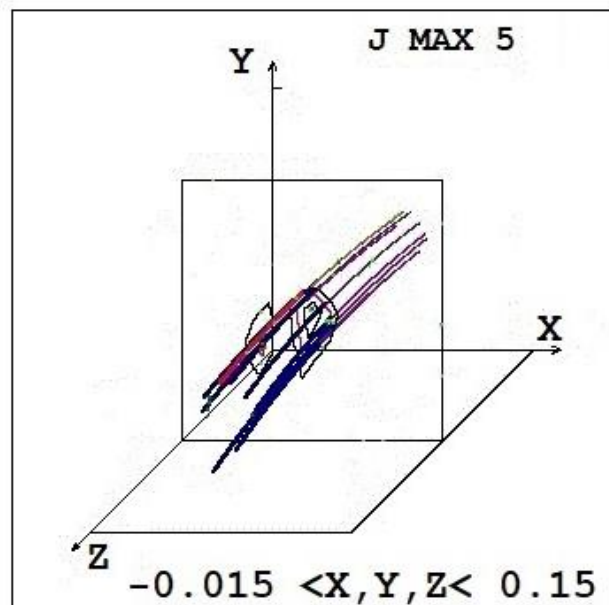
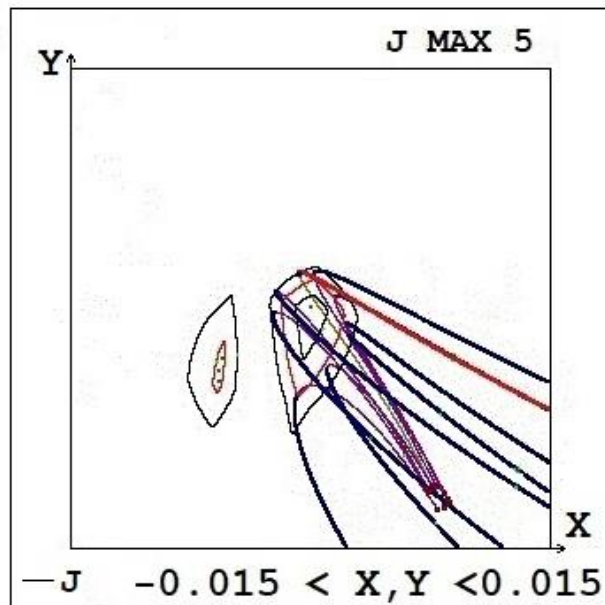
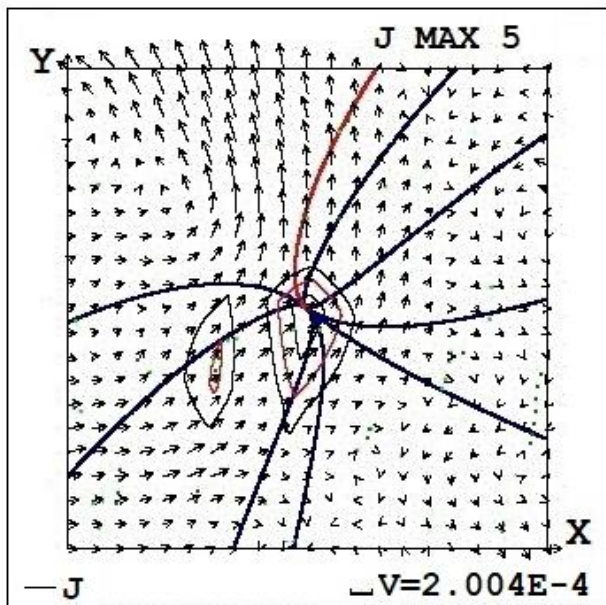


# Вспышка M1.9 26.05.2003 в 05:53 над АО 10365

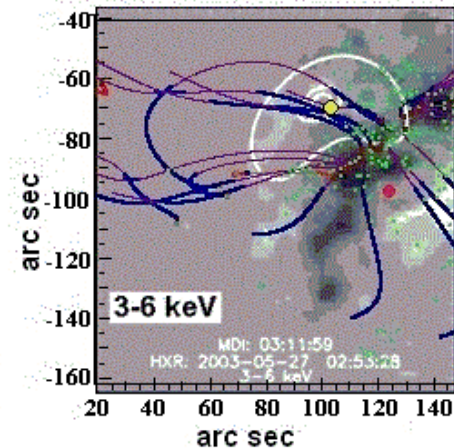
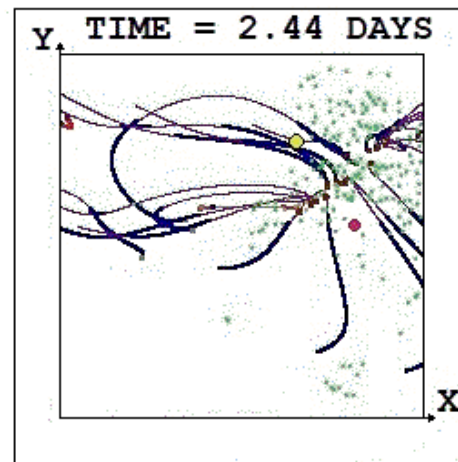
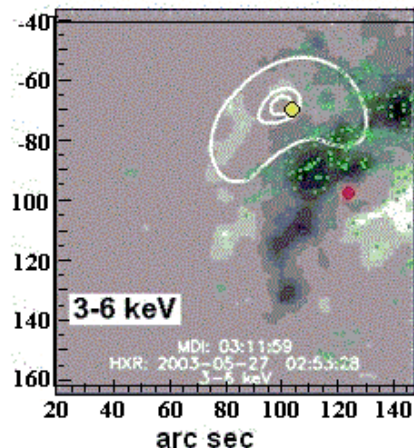
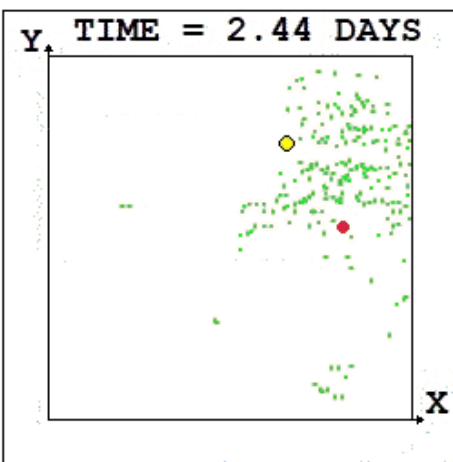
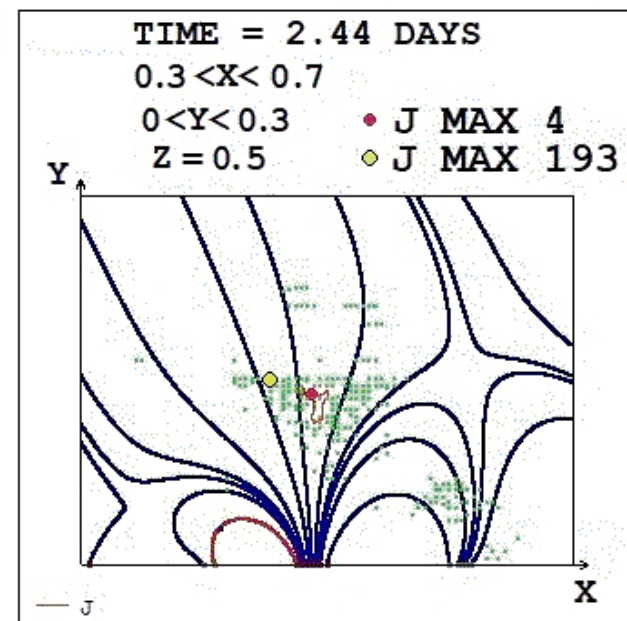
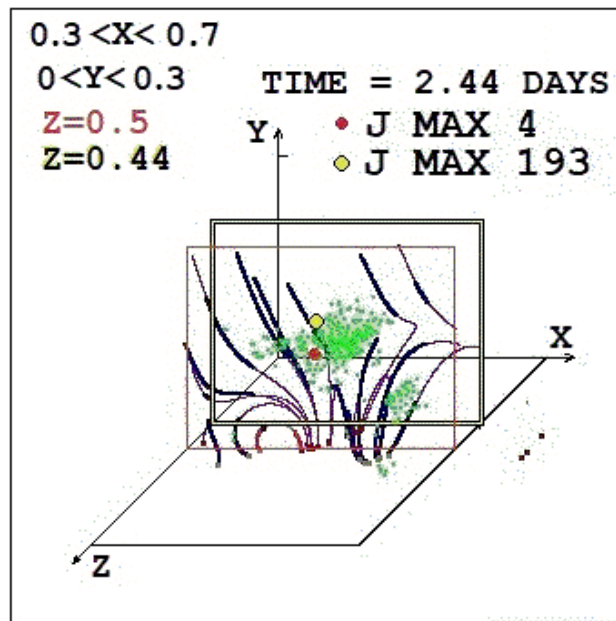
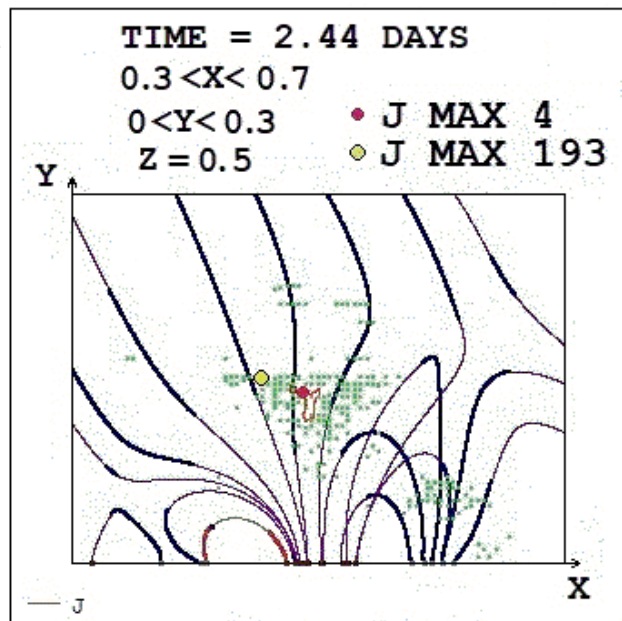


Radio emission at a frequency of 17 GHz, obtained with the Nobeyama Radioheliograph

# Вспышка M1.9 26.05.2003 в 05:53 над АО 10365



# Вспышка M1.4 27.05.2003 в 2:43 над АО 10365

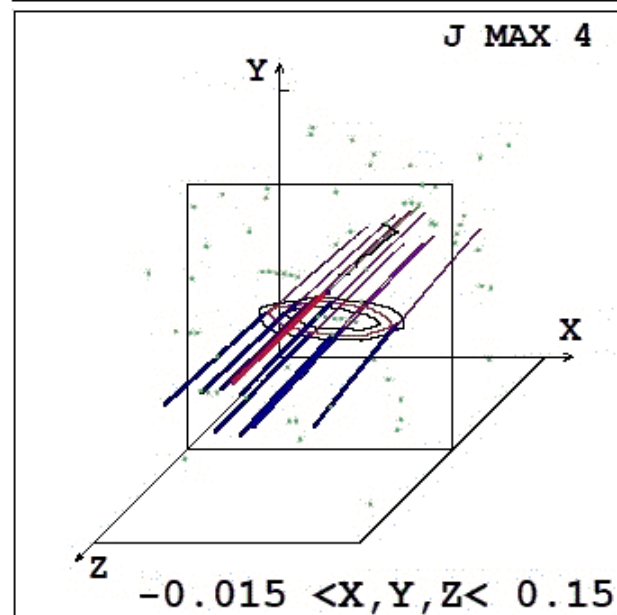
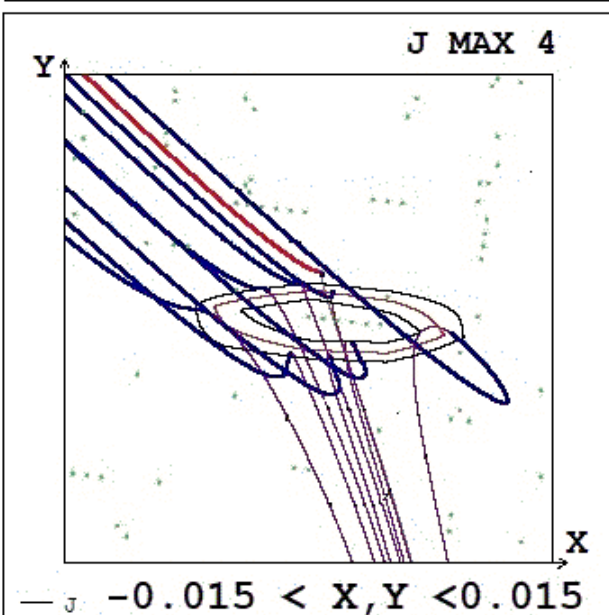
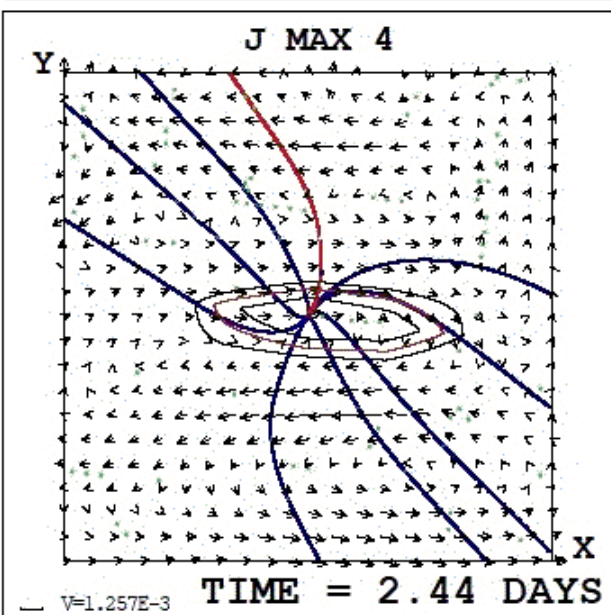
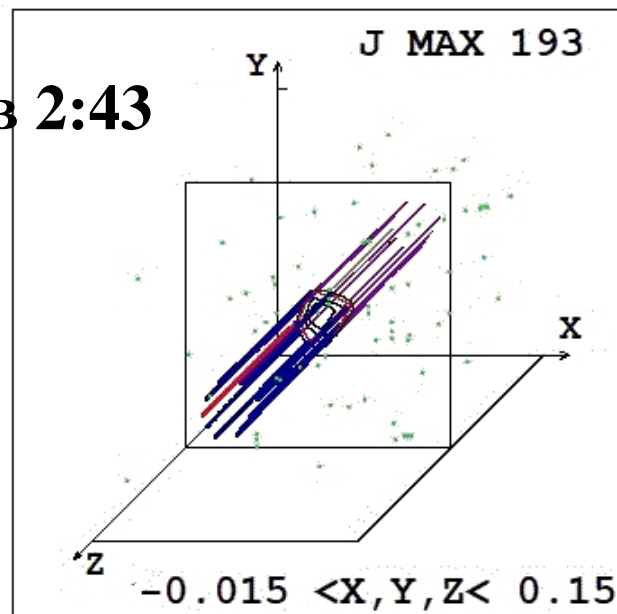
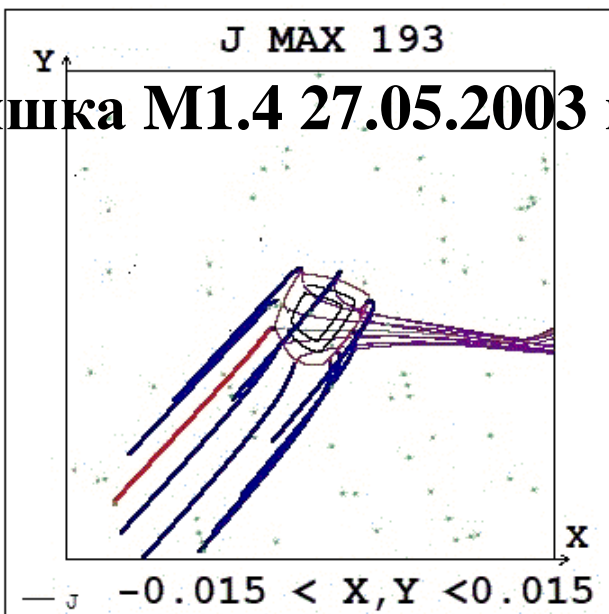
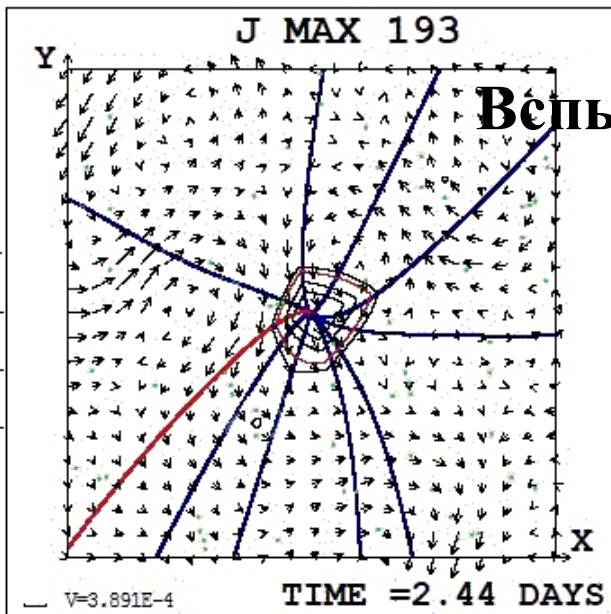


• J MAX 4       $0 < X < 1$   
 • J MAX 193     $0 < Z < 1$

• J MAX 4       $0 < X < 1$   
 • J MAX 193     $0 < Z < 1$

# Вспышка M1.4 27.05.2003 в 2:43 над АО 10365

Вспышка M1.4 27.05.2003 в 2:43



# Выводы

- 1. Для того, чтобы понять физический механизм генерации СКЛ необходимо одновременно изучать физический механизм солнечной вспышки и физический механизм ускорения заряженных частиц.**
- 2. Физический механизм солнечной вспышки может быть изучен только путем МГД моделирования в солнечной короне над реальной активной областью, когда все условия берутся из наблюдений, и расчет начинается за несколько суток до появления вспышек, когда в короне еще не была накоплена энергия для вспышки.**
- 3. Разработана методика МГД моделирования в солнечной короне: разработана абсолютно неявная противопоточная конечно-разностная схема, консервативная относительно магнитного потока, проведено распараллеливание вычислений на графических процессорах (GPU) по технологии CUDA. Разработаны методы, включающие, в частности, применение искусственной вязкости, позволившие частично решить проблему стабилизации численных неустойчивостей, возникающих вблизи границы расчетной области, благодаря чему стало возможно проведение моделирования над активной областью АО 10365 в течении интервала около суток для малой обычной и магнитной вязкости.**



# Выводы

4. Расчеты показали, что конфигурация магнитного поля над активной областью настолько сложная, что положения особых линий и образующихся на них токовых слоев, в поле которых накапливается токовых слоев, можно найти только при помощи специально разработанной системы графического поиска.

5. На конфигурацию магнитного поля X-типа вблизи особой линии может быть наложено расходящееся магнитное поле, но даже если это расходящееся поле преобладает, из-за присутствия поля X-типа в такой конфигурации может образоваться достаточно мощный токовый слой.

6. Совпадение положения источника вспышечного теплового рентгеновского излучения с местами на особых линиях, в которых образовался токовый слой, подтверждает механизм солнечной вспышки, основанный на накоплении энергии в магнитном поле токового слоя.

## Выводы

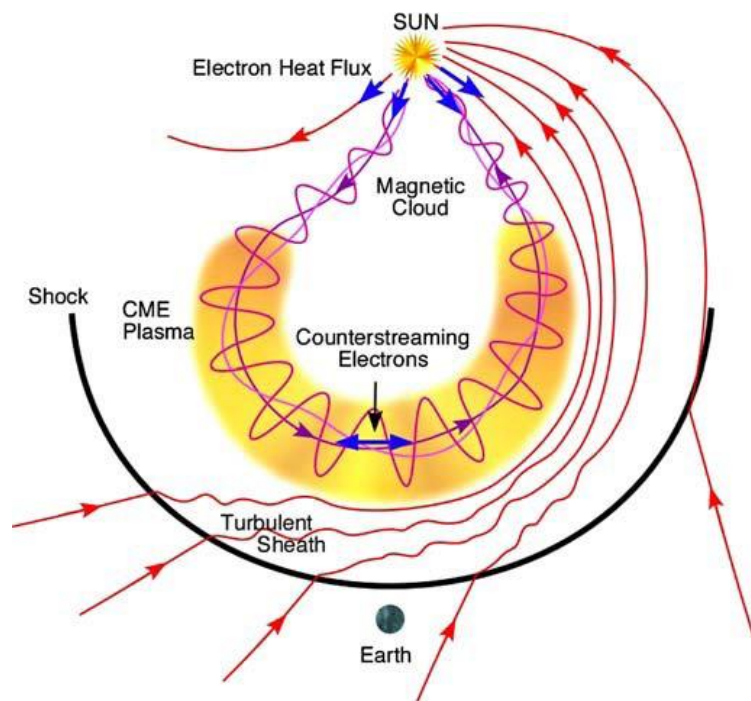
**7. Полученные физические и методические результаты позволяют выработать план модернизации методов МГД моделирования в солнечной короне, с целью расчета конфигураций электрических и магнитных полей для изучения ускорения космических лучей во время вспышек путем расчета траекторий заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, полученных МГД моделированием.**

**При этом важной является задача определения условий выхода ускоренных частиц из конфигурации магнитного поля над активной областью. В настоящее время решение этой задача еще никем не начато.**

**Спасибо за  
внимание!**



Dumbovic M. Utilizing galactic cosmic rays to understand the Sun-to-Earth evolution of CMEs. VarSITI Symposium. София, Болгария. июнь, 2019



Из доклада Матеи Думбовик: По измерениям на спутниках магнитное поле в 70% выбросов не имеет скрученной структуры.

**(Жгут не появляется)**

**Численное трехмерное моделирование в короне над активной областью. Решается система МГД уравнений для сжимаемой плазмы с диссипативными членами и анизотропной теплопроводностью.**

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\text{Re}_m} \text{rot} \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \text{rot} \mathbf{B} \right)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{V} \rho)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} - \frac{\beta}{2\rho} \nabla(\rho T) - \frac{1}{\rho} (\mathbf{B} \times \text{rot} \mathbf{B}) + \frac{1}{\text{Re}_\rho} \Delta \mathbf{V} + G_g \mathbf{G}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -(\mathbf{V}, \nabla) T - (\gamma - 1) T \text{div} \mathbf{V} + (\gamma - 1) \frac{2\sigma_0}{\text{Re}_m \sigma \beta \rho} (\text{rot} \mathbf{B})^2 - (\gamma - 1) G_q \rho L'(T) + \\ & + \frac{\gamma - 1}{\rho} \text{div} (\mathbf{e}_{\parallel} \kappa_{\parallel dl} (\mathbf{e}_{\parallel}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 1} \kappa_{\perp dl} (\mathbf{e}_{\perp 1}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 2} \kappa_{\perp dl} (\mathbf{e}_{\perp 2}, \nabla T)) \end{aligned}$$

**Для численного решения МГД уравнений разработана программа ПЕРЕСВЕТ**

A.I. Podgorny Solar Phys. 156,41,1995.

A.I. Podgorny, I.M. Podgorny

Solar Phys. 139, 125, 1992 Cosmic Research 35, 35, 1997

161, 165, 1995 35, 235, 1997

182, 159, 1998 36, 492, 1998

207, 323, 2002

Astronomy Reports 42, 116, 1998 45, 60, 2001 48, 435, 2004

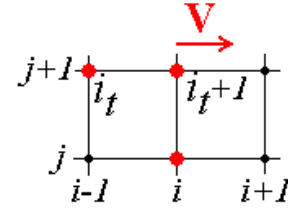
43, 608, 1999 46, 65, 2002 49, 837, 2005

44, 407, 2000 47, 696, 2003 52, 666, 2008

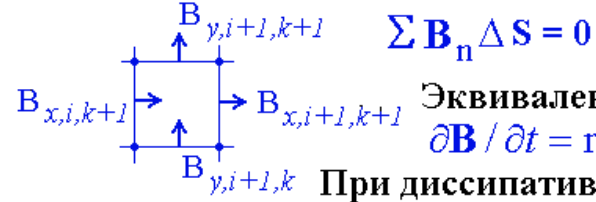
Comput. Mathem. Mathematical Phys 44, 1784, 2004 54, 645, 2010

# В программе ПЕРЕСВЕТ:

- Противопоточная для диагональных членов, конечно-разностная схема.
- Схема абсолютно неявная, решается методом итераций (не обязательно  $\Delta t V_w / \Delta x < 1$ ).
- Схема консервативна относительно магнитного потока  $[\text{div} \mathbf{B}] = 0$

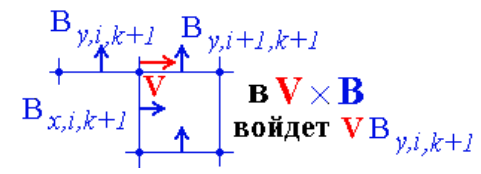


$$\mathbf{u}_i^{(i_t+D)j+1} = \mathbf{u}_i^j - \mathbf{v} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{u}_i^{(i_t+D)j+1} - \mathbf{u}_{i-1}^{(i_t)j+1})$$



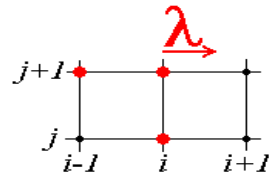
$\Sigma \mathbf{B}_n \Delta S = 0$   
 Эквивалентность уравнений  $\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + v_m \Delta \mathbf{B}$  и  $\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - v_m \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B})$   
 При диссипативной релаксации магнитно поля плотность тока  $[\text{rot} \mathbf{B}] \rightarrow 0$

- Несимметричная (противопоточная) аппроксимация  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ .



# Другие методы:

- Явные конечно-разностные схемы
- Часто типа Годунова (волны Римана)
- Используем специальные методы повышения порядка аппроксимации (FCT, TVD)
- Так же Лагранжевы схемы с пересчетом путем интерполяции на каждом шаге

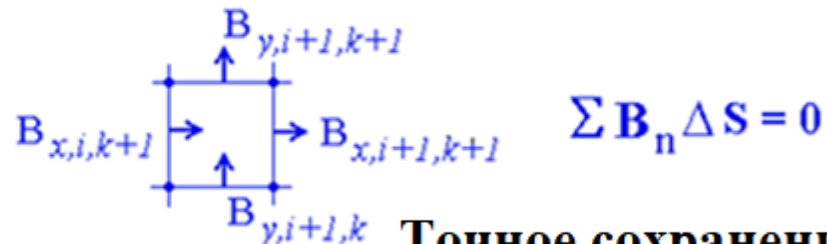


$$\mathbf{w}_i^{j+1} = \mathbf{w}_i^j - \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{w}_i^j - \mathbf{w}_{i-1}^j)$$

- Некоторые схемы также консервативны относительно магнитного потока  $[\text{div} \mathbf{B}] = 0$ , но с симметричной аппроксимацией  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ .

В  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  войдет  $\mathbf{v} (B_{y,i+1,k+1} + B_{y,i,k+1}) / 2$

**Абсолютно неявная, консервативная относительно магнитного потока, противопоточная конечно-разностная схема**



**Точное сохранение  $[\text{div } \mathbf{B}] = 0$  : уравнения**

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \nu_m \Delta \mathbf{B} \quad \text{и} \quad \partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \nu_m \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B})$$

**эквивалентны.**

**При диссипативной релаксации магнитного поля плотность тока  $[\text{rot } \mathbf{B}] \rightarrow 0$ .**

**С использованием искусственной вязкости**

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \nu_m \Delta \mathbf{B} + \nu_m \text{artif. } \Delta \mathbf{B}$$

$$\partial \mathbf{V} / \partial t = \dots + \nu_{\text{artif.}} \Delta \mathbf{V}$$

**Искусственная вязкость помогает стабилизировать численную неустойчивость, возникающую вблизи границы.**



Солнечные космические лучи – потоки ускоренных заряженных частиц, прежде всего протонов с энергией до 20 ГэВ сопровождают некоторые солнечные вспышки.

Magnetograms

24.10.2014

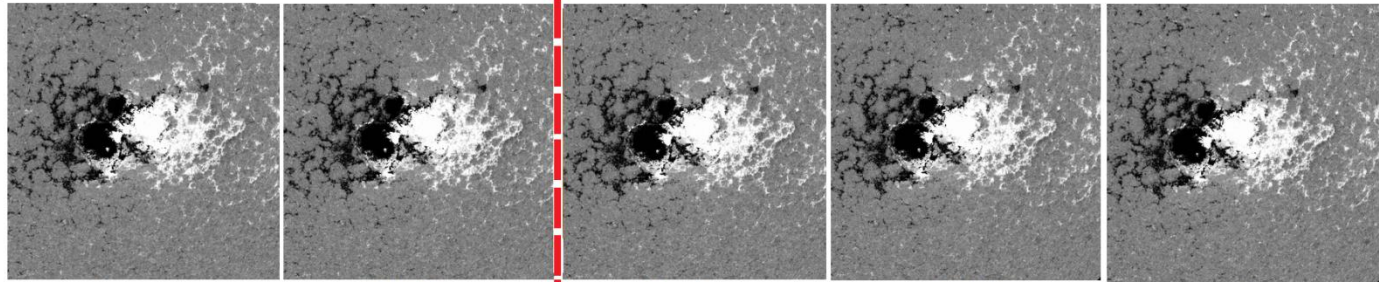
AR12192

S12W21

X3.1

$t_0=21:07$

No solar cosmic rays



20:15

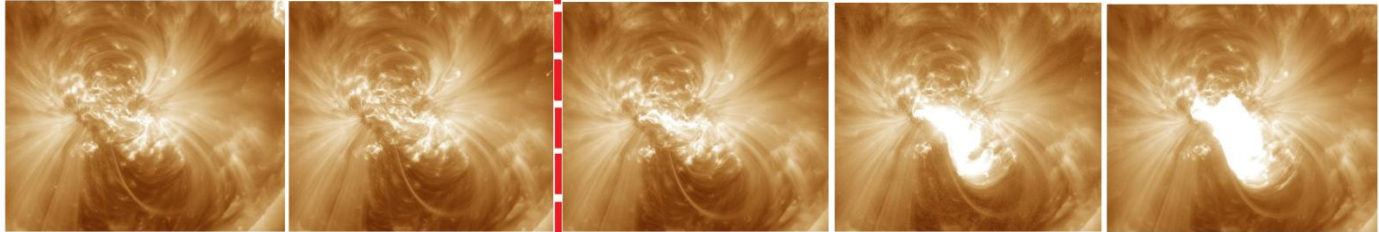
21:00

21:15

21:20

21:45

193 A  
FeXXIV  
20 MK  
FeXII  
1.2 MK



20:25

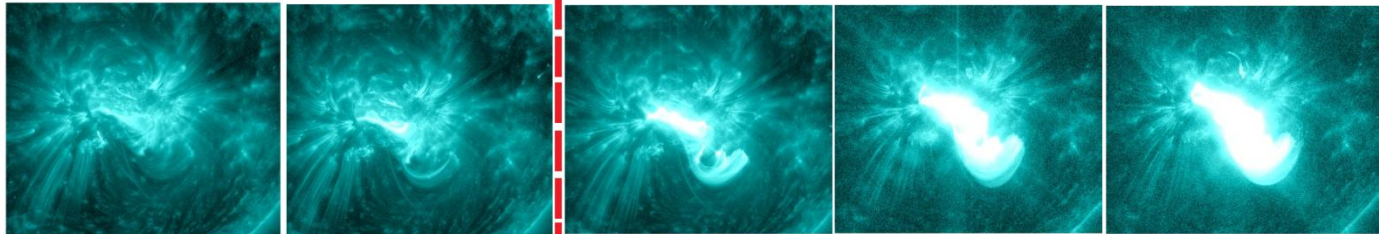
20:56

21:10

21:26

21:41

131 A  
FeXXIII  
16 MK  
FeXX  
10 MK



20:28

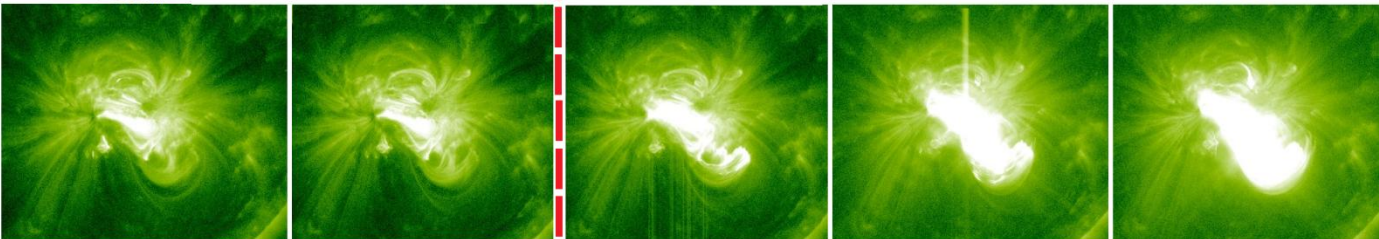
20:58

21:13

21:28

21:43

94 A  
FeXVII  
6.3 MK



20:29

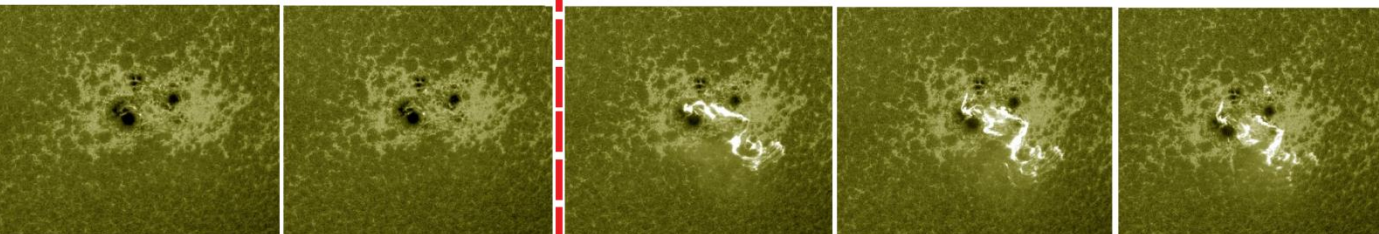
20:44

21:14

21:30

21:45

1600 A  
CIV  
0.1 MK



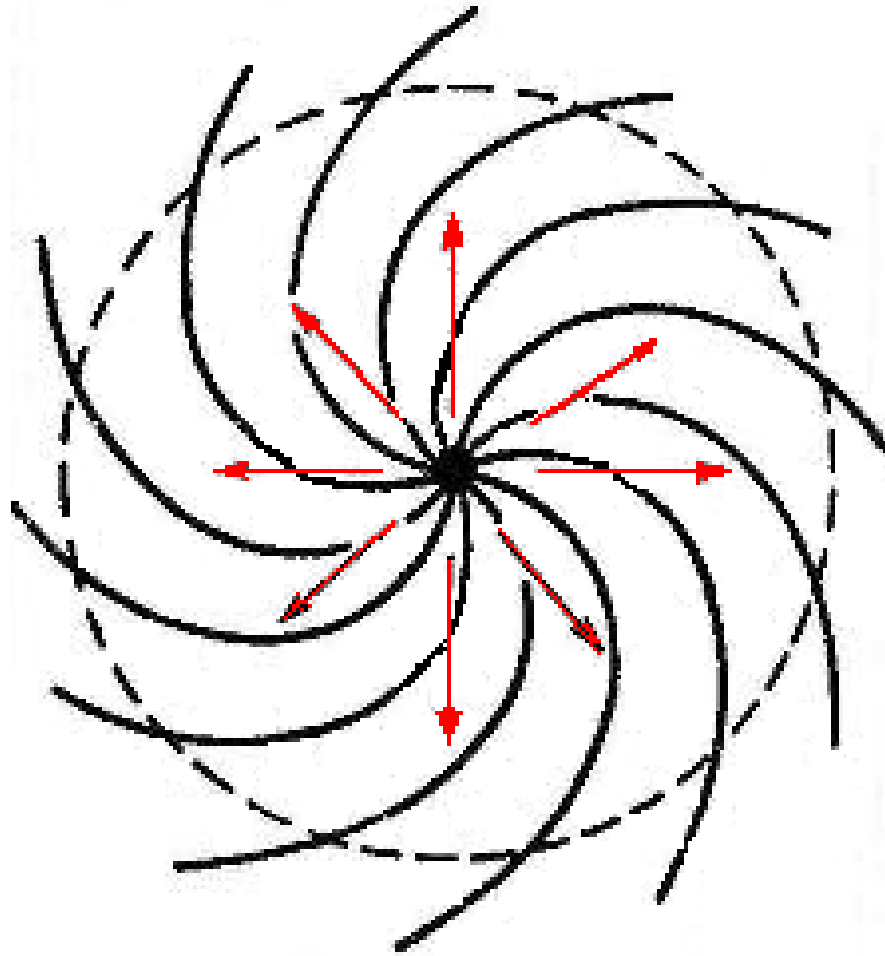
20:17

20:47

21:18

21:34

21:48



Солнечный ветер -  
расширение в вакуум  
плазмы в магнитном  
поле при  
 $8\pi nW/B^2 > 1$ .

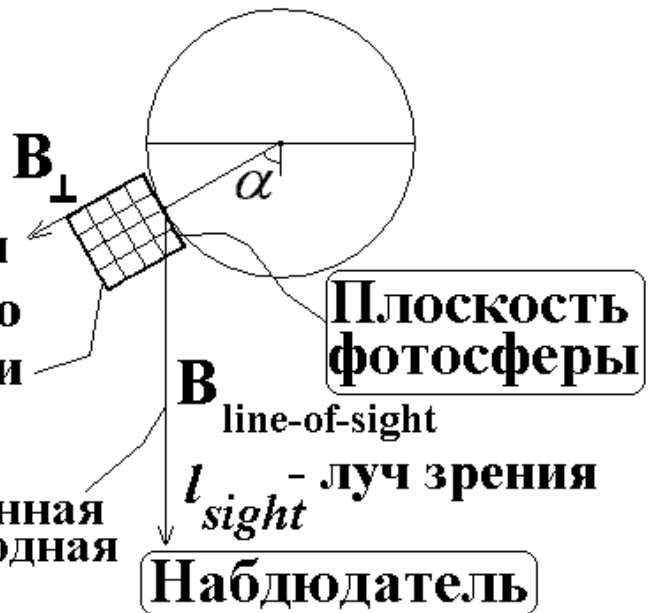
# Начальное потенциальное магнитное поле

$$\mathbf{B} = \nabla \varphi_m$$

$\Delta \varphi_m = 0$  решается используя конечно-разностную схему в области

Граничное условие на плоскости фотосферы:

$$\frac{\partial \varphi_m}{\partial l_{sight}} = \mathbf{B}_{\text{line-of-sight}} \cdot \mathbf{n} \quad \text{— наклонная производная}$$



На сетке, соответствующей консервативной относительно магнитного потока конечно-разностной схеме решения МГД уравнений

$$[\mathbf{rot}]\mathbf{B}=0 \quad [\mathbf{div}]\mathbf{B}=0$$

2 метода решения  $\Delta \varphi_m = 0$  :

1.  $\Delta \varphi_m = 0$  непосредственно итерациями

2. Релаксацией диффузионного уравнения  $\frac{\partial \varphi_m}{\partial t} = \Delta \varphi_m$

# ОСОБЕННОСТИ КОНФИГУРАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ В МЕСТАХ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

А.И. Подгорный (ФИАН), И.М. Подгорный (ИНАСАН), А.В. Борисенко (ФИАН)

Продолжено МГД моделирование в солнечной короне над активной областью в реальном масштабе времени. При постановке задачи никаких предположений о механизме вспышки не делалось. Все условия брались из наблюдений. Расчет начинался за несколько суток до появления вспышек, когда в короне еще не была накоплена энергия для вспышки.

**МГД моделирование только в такой постановке задачи позволяет изучить механизм солнечной вспышки.**

