

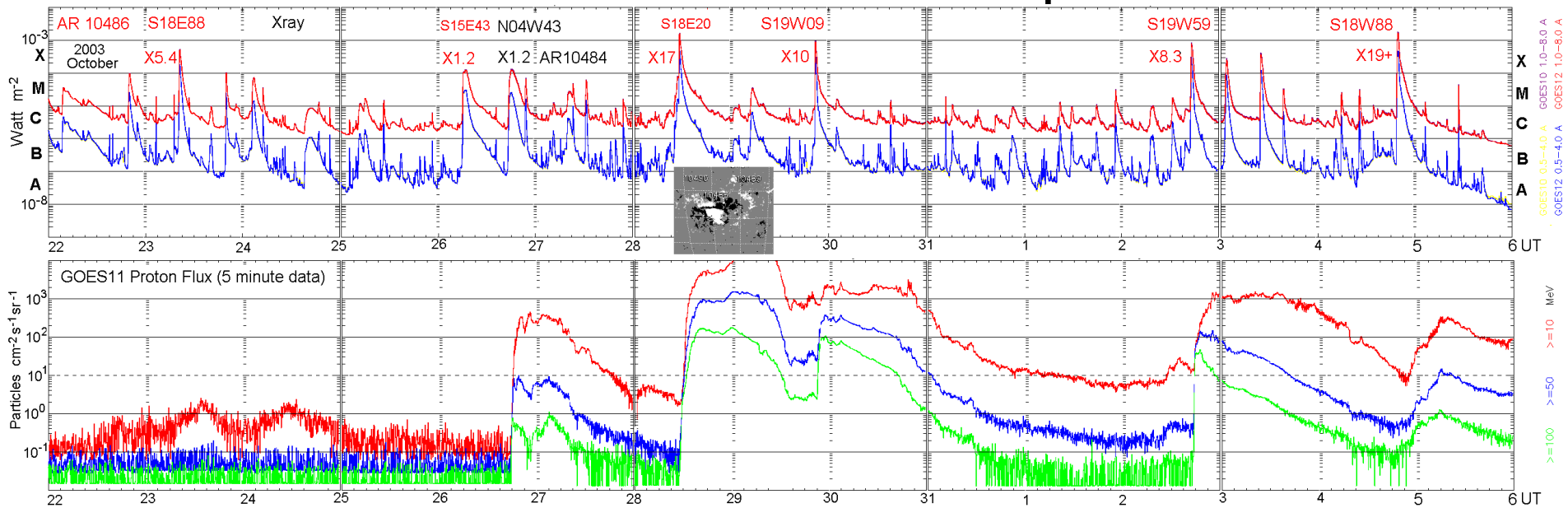
ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА УСКОРЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В ТОКОВОМ СЛОЕ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**И.М. Подгорный, А.И. Подгорный, Э.В. Вашенюк, Ю.В. Балабин, А.В.
Борисенко, Н.С. Мешалкина, Б.Б. Гвоздевский
ИНАСАН, ФИАН, ПГИ, ИСЗФ**

Генерация солнечных космических лучей происходит в ходе взрывного энерговыделения в солнечной вспышке, так что для того чтобы понять это явление необходимо изучать как механизм солнечной вспышки, так и процесс ускорения частиц образовавшимся электрическим полем. Во время солнечной вспышки в солнечной короне над активной областью (АО) происходит освобождение энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя. Используя результаты численного МГД моделирования и наблюдений, И.М. Подгорным предложена электродинамическая модель солнечной вспышки, объясняющая ее основные наблюдательные проявления, в частности появление пучкового рентгеновского излучения на поверхности Солнца. Ускорение протонов происходит вдоль особой линии магнитного поля токового слоя электрическим полем $E = -V \times B / c$, которое усиливается во время неустойчивости токового слоя. Этот механизм генерации солнечных лучей подтвержден сравнением спектра, найденного расчетом траекторий протонов в электрическом и магнитном полях, полученных МГД моделированием, со спектром, полученном по данным мировой сети нейтронных мониторов. Для того, чтобы избавиться от искажающей численное решение неустойчивости необходимо проводить МГД моделирование в реальном масштабе времени. МГД моделирование в солнечной короне над АО в реальном масштабе времени может быть осуществлено только при помощи параллельных вычислений на суперкомпьютере. Осуществлено распараллеливание программы решения МГД уравнений с использованием процессоров графической платы по технологии CUDA, которое дало ускорение расчета чем в 120 раз. Первые результаты МГД моделирования в реальном масштабе времени подтвердили образование токовых слоев над АО 10365. Совершенствуются специально разработанные методы численного решения МГД уравнений и аппроксимации условий свободного выхода на нефотосферной границе, позволяющие значительно снизить искажение решения под влиянием неустойчивости, возникающей вблизи границы.

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

Серия больших протонных событий в октябрь-ноябре 2003 над **сложной активной областью** (что типично) . Отсутствует корреляция между величинами вспышек и потоков протонов. Не все вспышки класса X вызвали поток протонов.

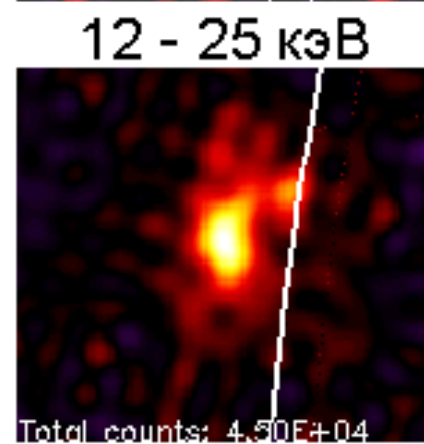
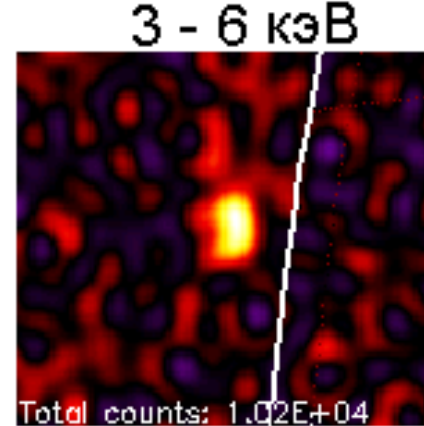
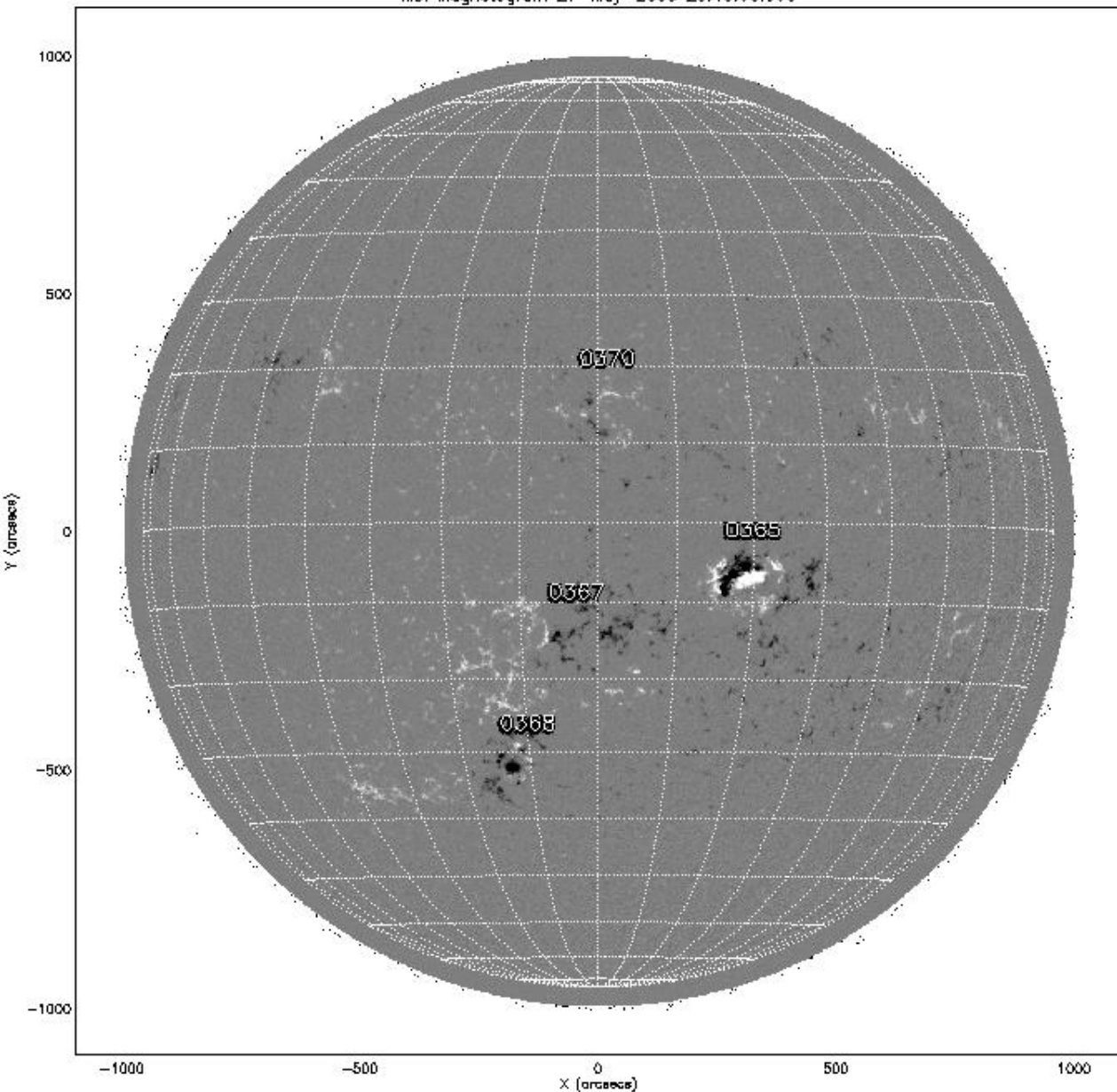


Длительность потока протонов на три порядка величины превосходит длительность рентгеновского излучения вспышки

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), γ -излучение.

СОЛНЕЧНАЯ ВСПЫШКА ПРОИСХОДИТ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ НА ВЫСОТАХ 15 – 30 ТЫСЯЧ КИЛОМЕТРОВ, ЧТО СОСТАВЛЯЕТ 1/40 – 1/20 РАДИУСА СОЛНЦА

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

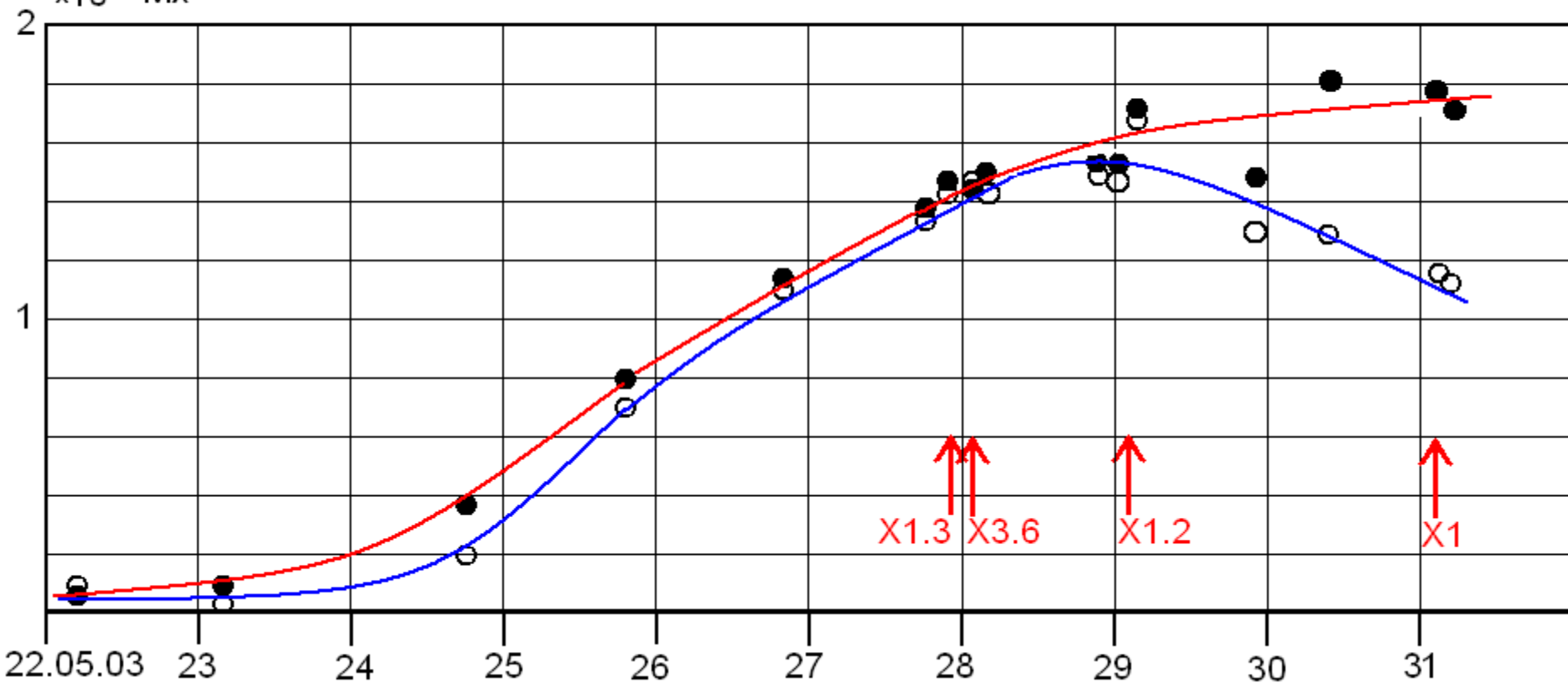


AR 10365

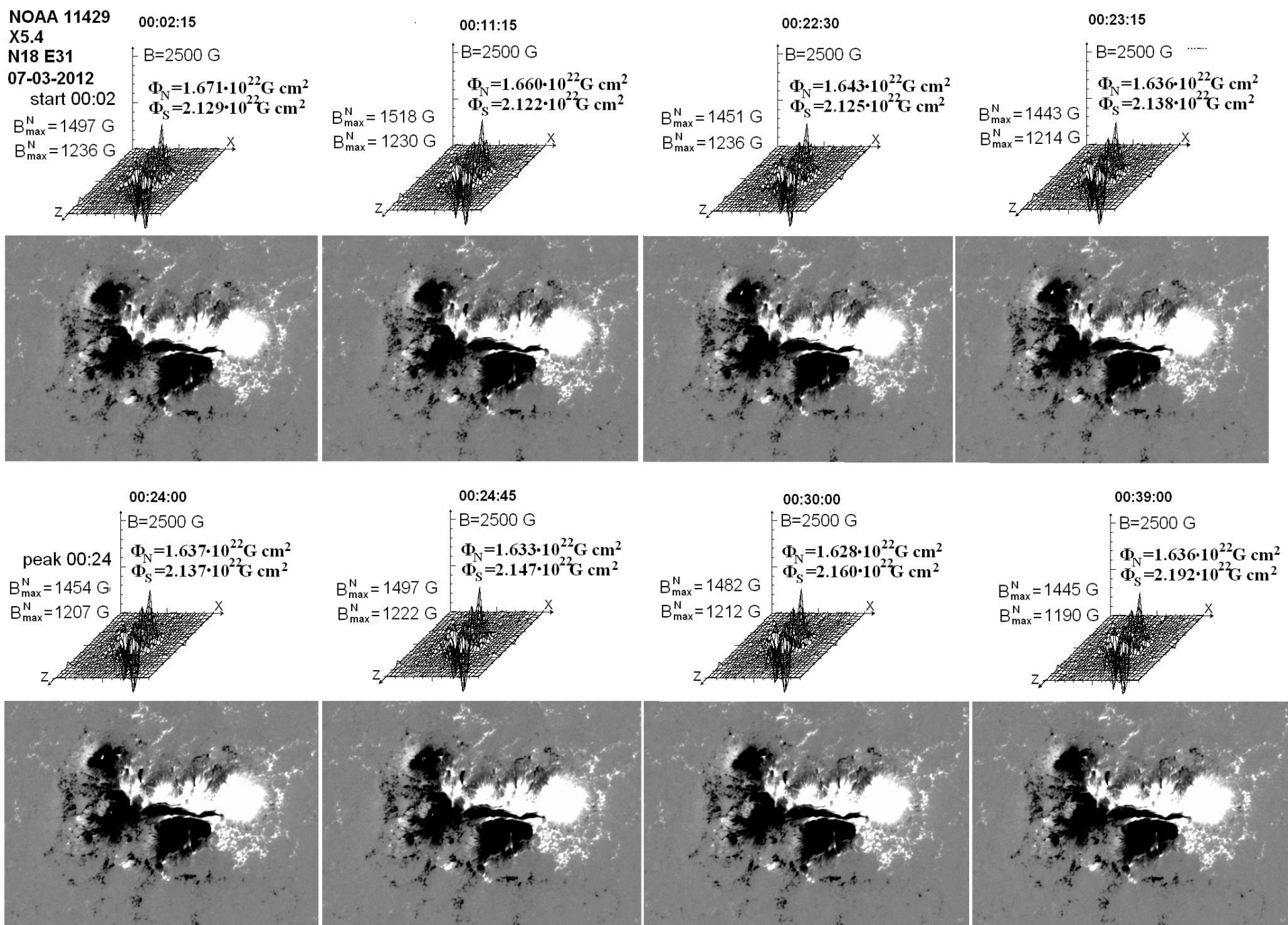
● Φ_N

○ Φ_S

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



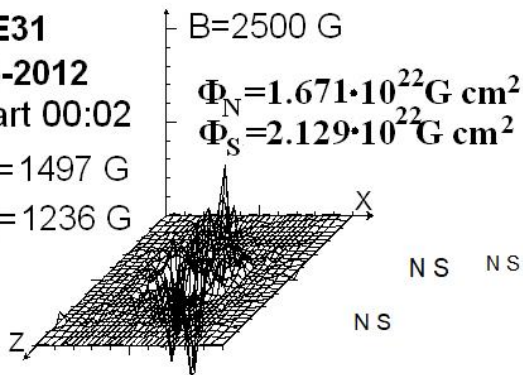
FLARES: X1.3 23:07 S07W16; X3.6 00:27S07W20; X1.2 01:05; X1 02:24 S06W59



NOAA 11429
X5.4
N18 E31
07-03-2012
start 00:02

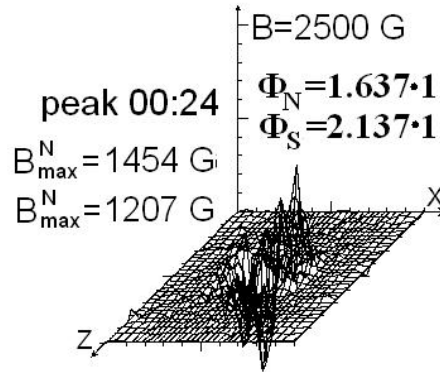
00:02:15

B=2500 G
 $\Phi_N = 1.671 \cdot 10^{22} \text{ G cm}^2$
 $\Phi_S = 2.129 \cdot 10^{22} \text{ G cm}^2$
 $B_{\text{max}}^N = 1497 \text{ G}$
 $B_{\text{max}}^S = 1236 \text{ G}$



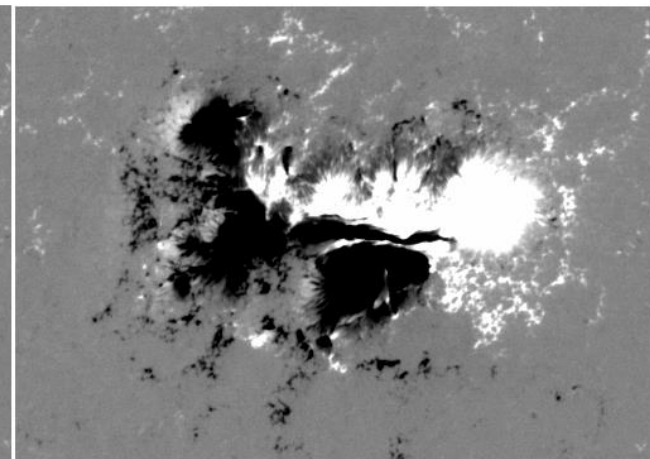
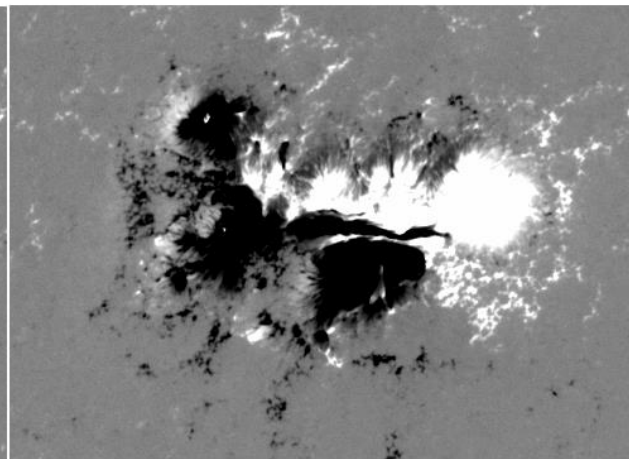
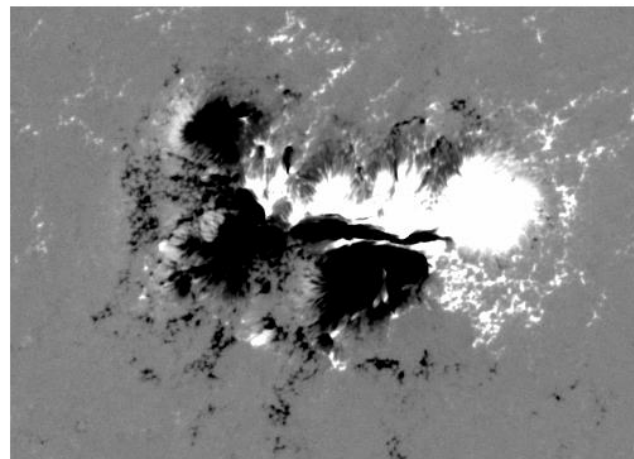
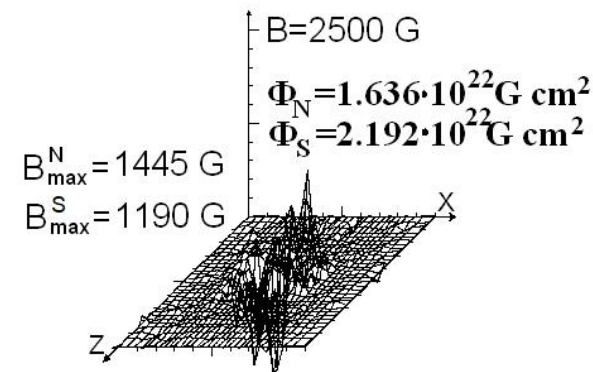
00:24:00

peak 00:24
B=2500 G
 $\Phi_N = 1.637 \cdot 10^{22} \text{ G cm}^2$
 $\Phi_S = 2.137 \cdot 10^{22} \text{ G cm}^2$
 $B_{\text{max}}^N = 1454 \text{ G}$
 $B_{\text{max}}^S = 1207 \text{ G}$



00:39:00

B=2500 G
 $\Phi_N = 1.636 \cdot 10^{22} \text{ G cm}^2$
 $\Phi_S = 2.192 \cdot 10^{22} \text{ G cm}^2$
 $B_{\text{max}}^N = 1445 \text{ G}$
 $B_{\text{max}}^S = 1190 \text{ G}$



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

Magnetograms

24.10.2014

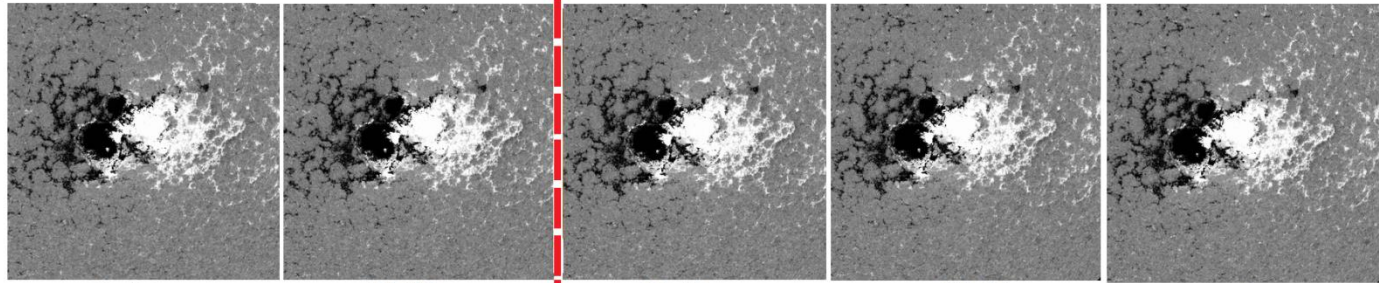
AR12192

S12W21

X3.1

$t_0=21:07$

No solar cosmic rays



20:15

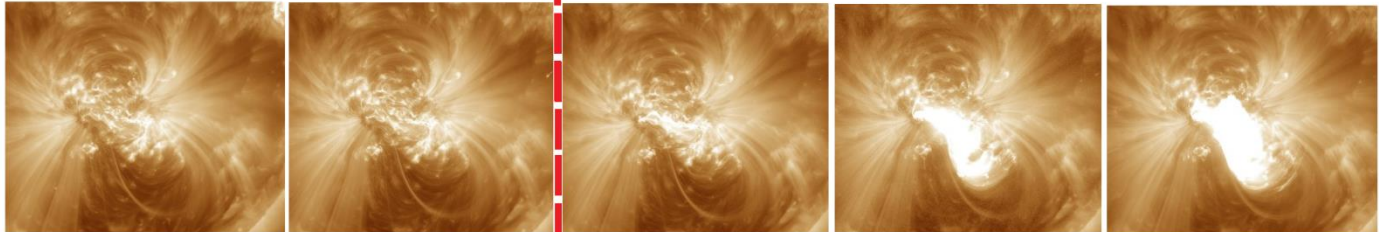
21:00

21:15

21:20

21:45

193 A
FeXXIV
20 MK
FeXII
1.2 MK



20:25

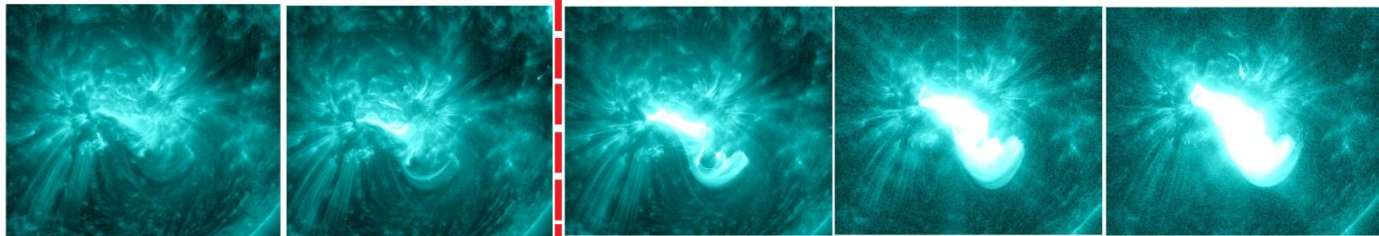
20:56

21:10

21:26

21:41

131 A
FeXXIII
16 MK
FeXX
10 MK



20:28

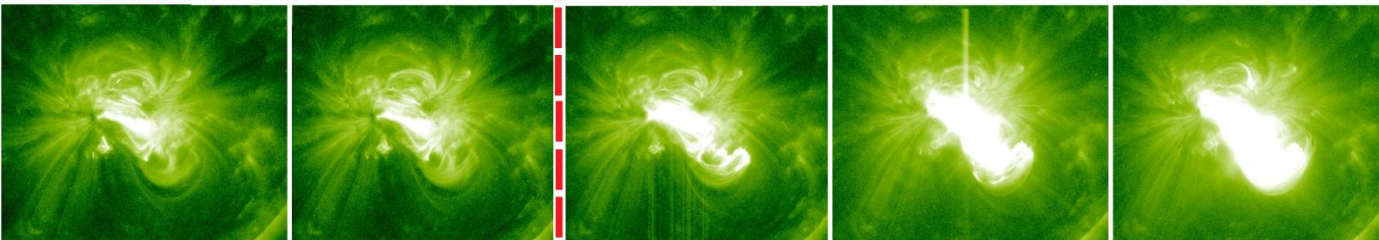
20:58

21:13

21:28

21:43

94 A
FeXVII
6.3 MK



20:29

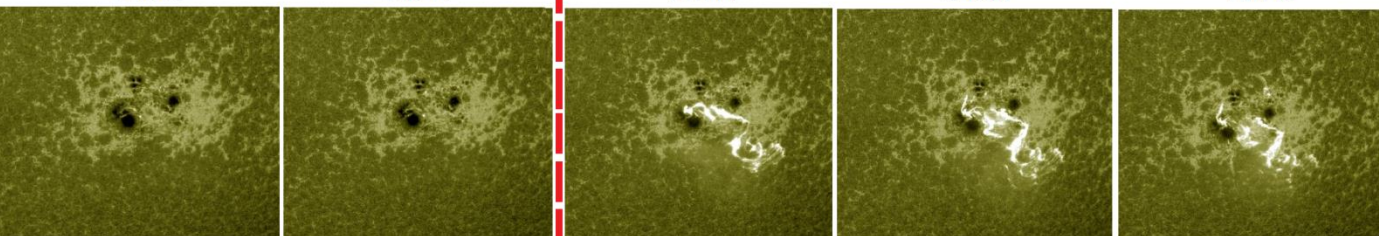
20:44

21:14

21:30

21:45

1600 A
CIV
0.1 MK



20:17

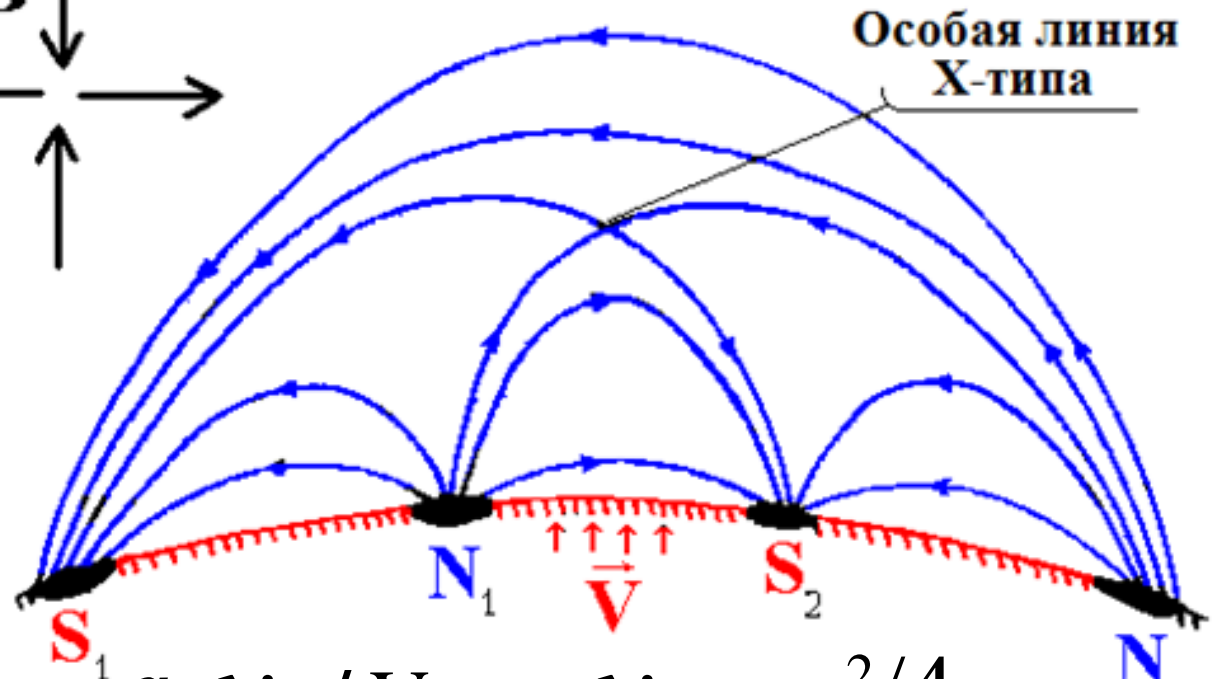
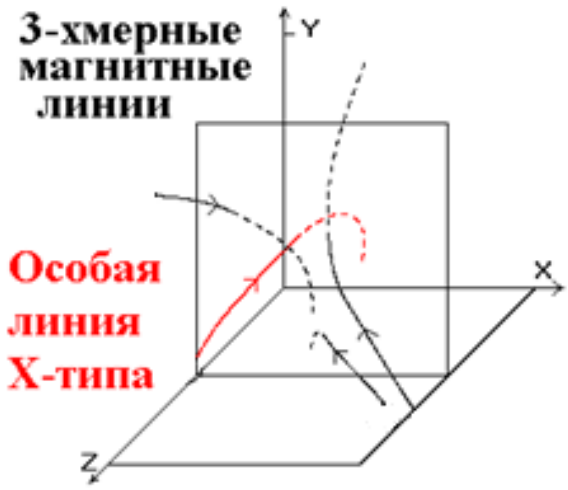
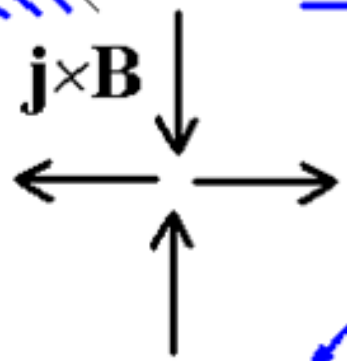
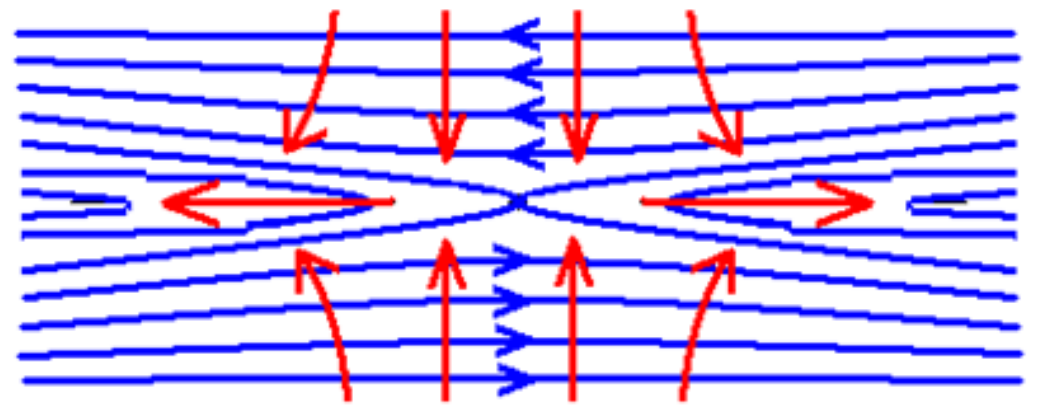
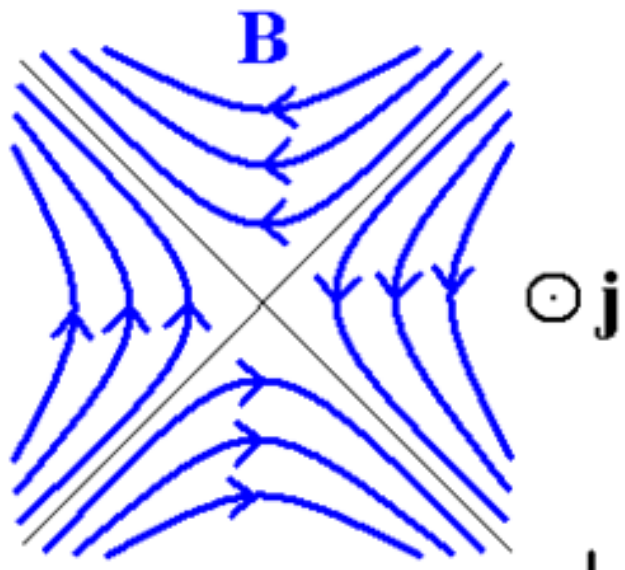
20:47

21:18

21:34

21:48

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

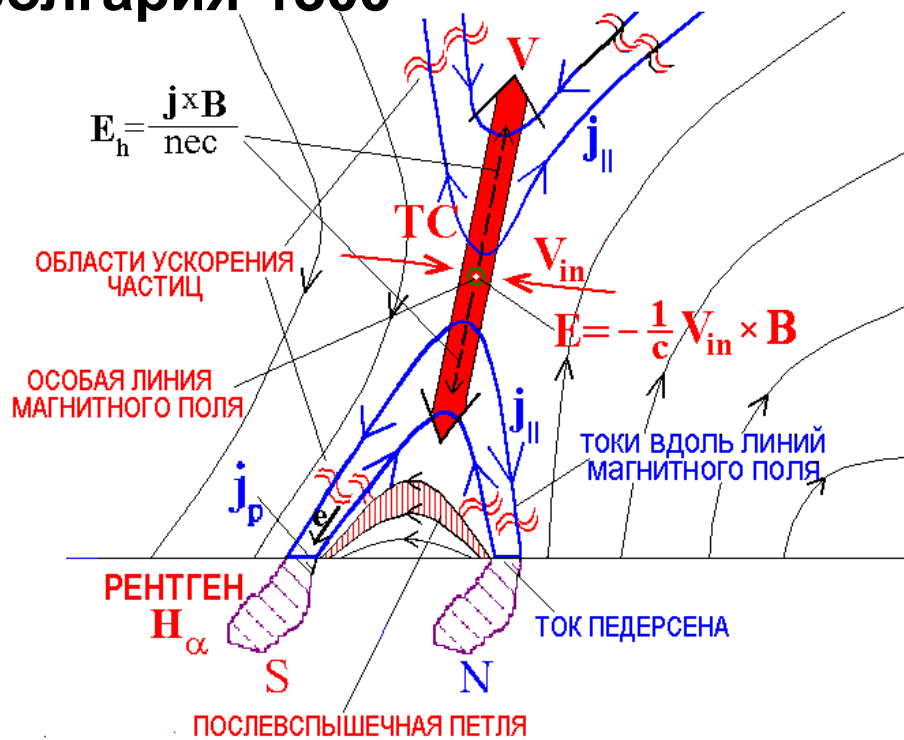


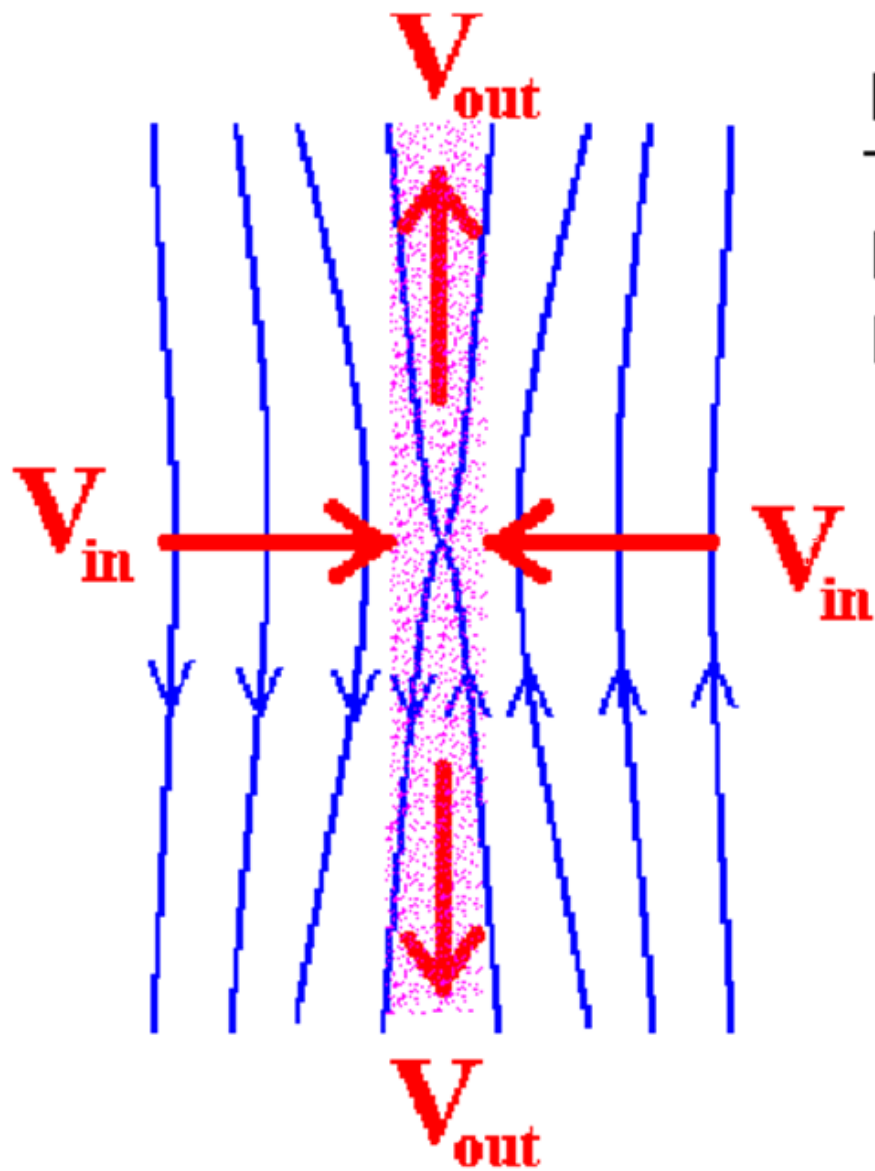
$$a = v_m / v_{in} ; v_m = c^2 / 4\pi\sigma$$

Продолжается выполнение планов Игоря Максимовича Подгорного.

Электродинамическая модель солнечной вспышки.

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





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 $L = 10^9 \text{ cm}$.

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

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

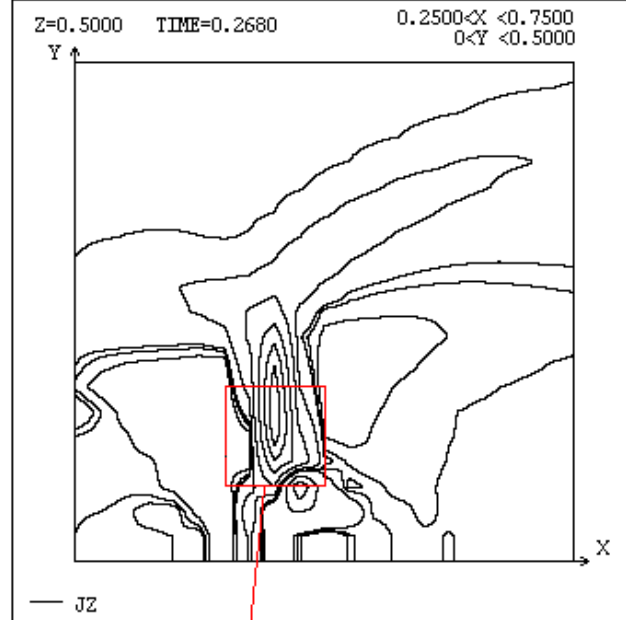
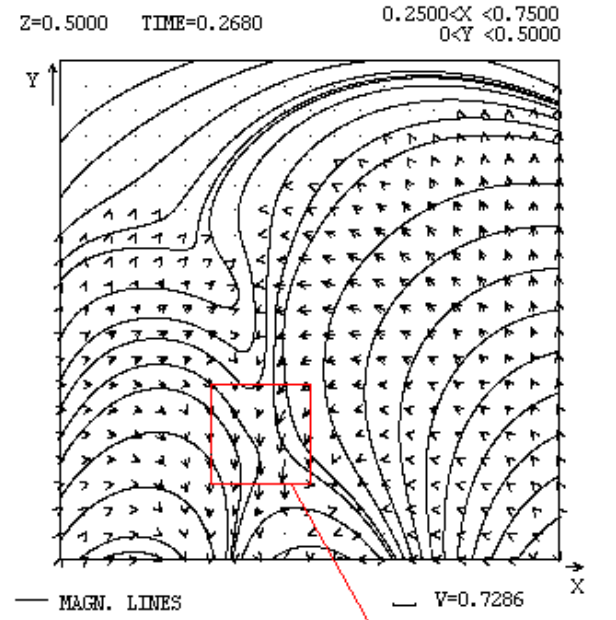
$W_0 = 0.6 \text{ GeV}$

The rate of reconnection for $W_0 \sim 0.6 \text{ GeV}$ is order of 10^7 cm/s .

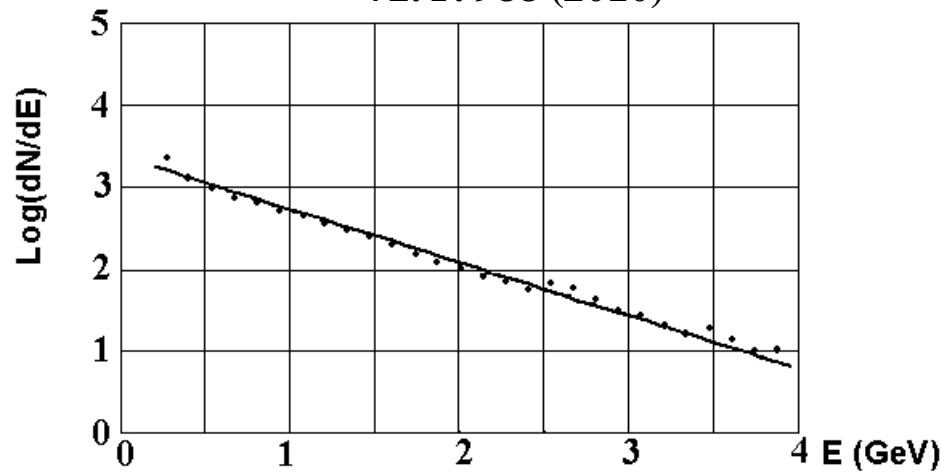
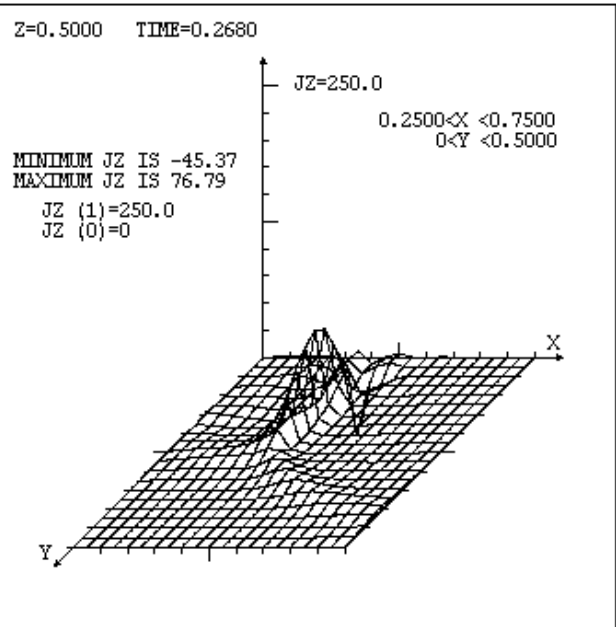
$$E = V_{in} B/c$$

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

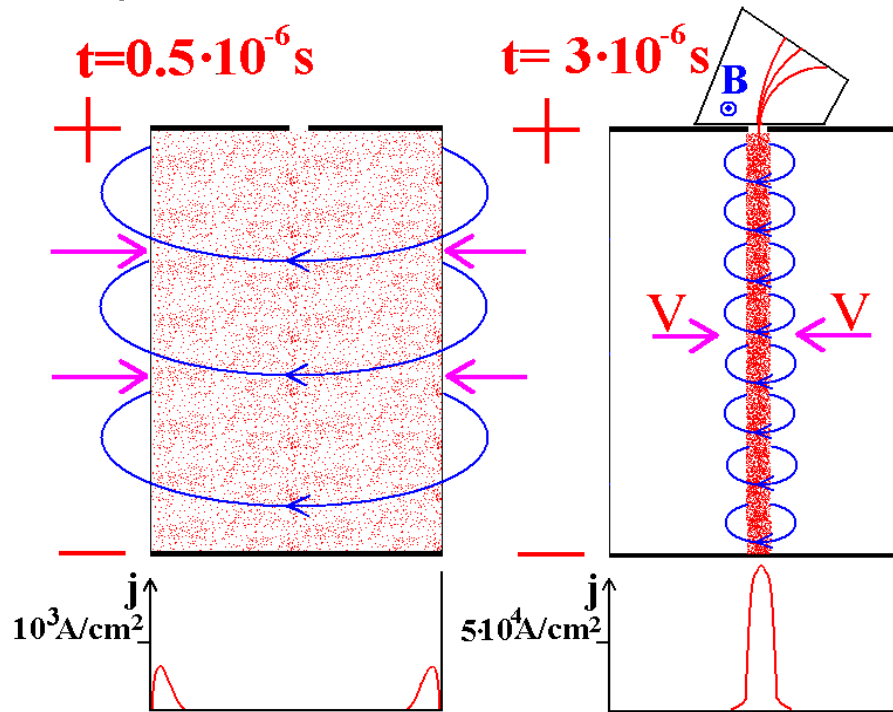
Podgorny, Balabin, Podgorny, Vashenyuk
Journ. Atm. Solar-Ter. Phys. V. 72. P. 988 (2010)



Плоская область
($0.4 < x < 0.5, 0.075 < y < 0.175, z = 0.5$)
т. е. пересечение области
($0.4 < x < 0.5, 0.075 < y < 0.175, 0.45 < z < 0.55$),
в которой проводится расчет
ускорения частиц, с плоскостью $z = 0.5$.



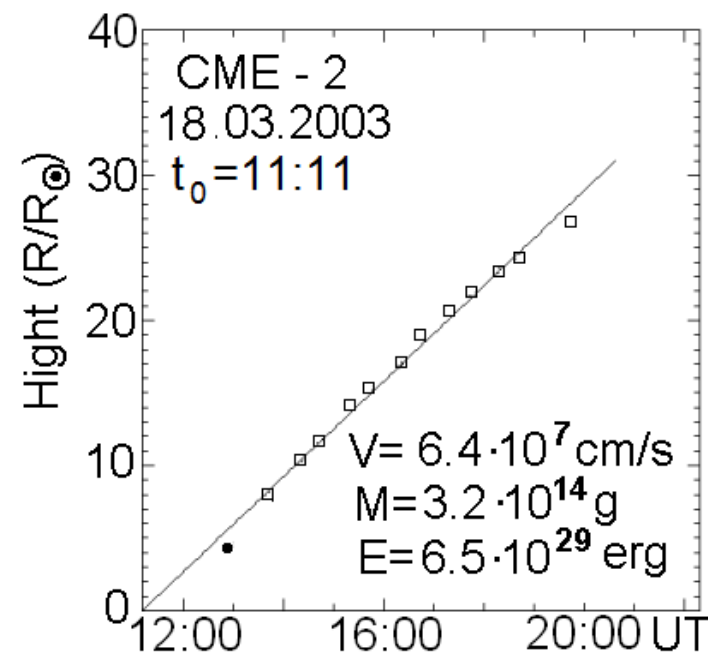
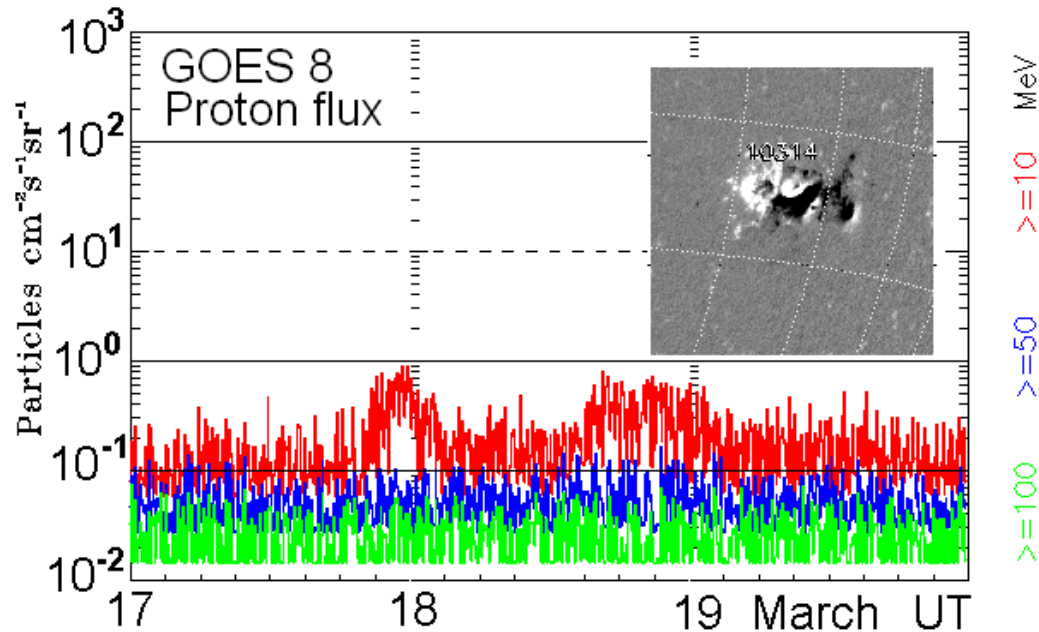
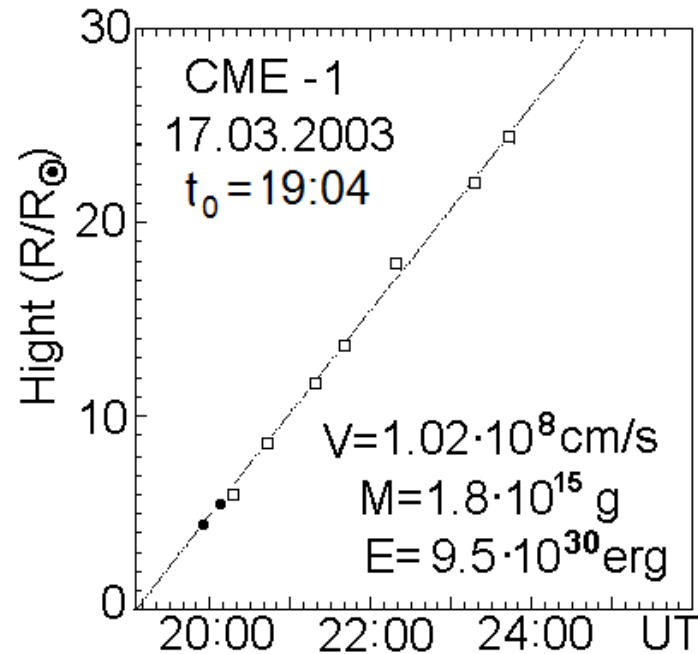
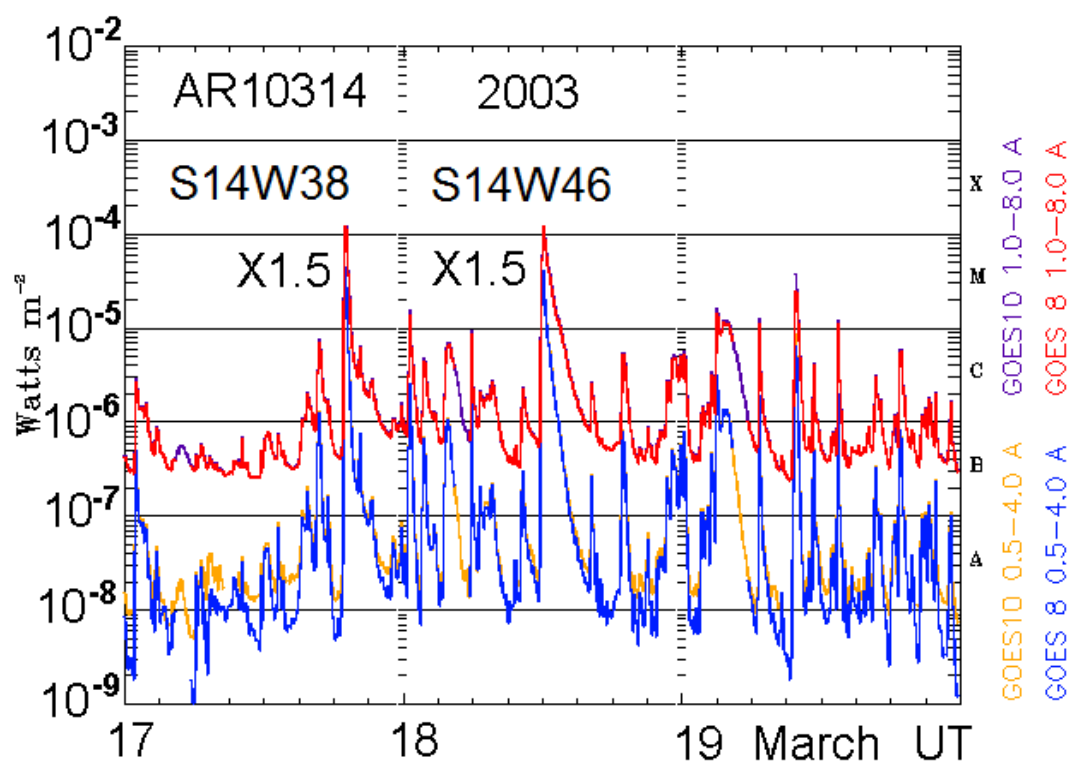
Сжатие газового разряда собственным магнитным полем при токах в сотни кА приводит к генерации электрического поля Лоренца, направленном вдоль оси разряда. Энергия ускоренных частиц ~ 300 кэВ при приложенной разности потенциалов ~ 15 кэВ.

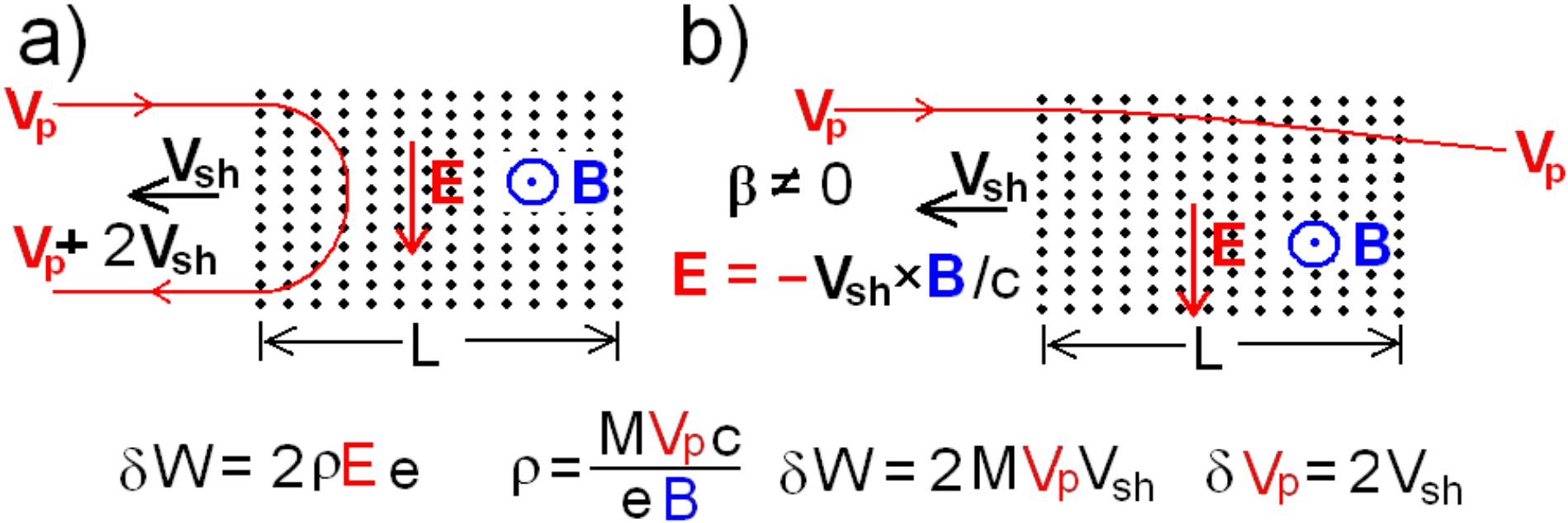


$\Phi = 15$ kV
 $dI/dt = 10^{11}$ A/s
 $I_{\max} = 200$ kA
 $W > 300$ keV
 $E = -V \times B / c$
 $V \sim 10^7$ cm/s
 $B_{\max} \sim 4 \cdot 10^4$ G
 $E \sim 4 \cdot 10^3$ V/cm

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

Игорем Максимовичем в составе коллектива, руководимого Л. А. Арцимовичем, была впервые получена в лаборатории плазма с температурой 1 000 000 градусов и обнаружено нейтронное излучение при разряде в дейтерии. Коллектив ученых, сделавших это открытие, был представлен к награждению Ленинской премией.





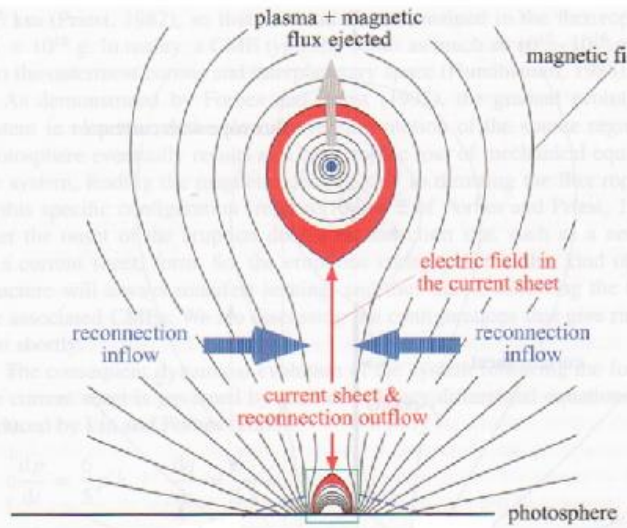
Для Ферми ускорения частицы необходимо, чтобы размер магнитного облака (толщина ударной волны) L превосходил ларморовский радиус частицы ρ . В противном случае частица пронизывает магнитное облако. Максимально достижимая энергия соответствует равенству ларморовского радиуса $\rho \sim W/300B$ размеру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

Солнечные космические лучи ускоряются электрическим полем в токовом слое во время основного вспышечного процесса. Открытие на звездах карликах класса G "супервспышек", энергия которых на 3-4 порядка превышает энергию вспышек на Солнце, указывает на возможность одинакового механизма генерации галактических и солнечных космических лучей.

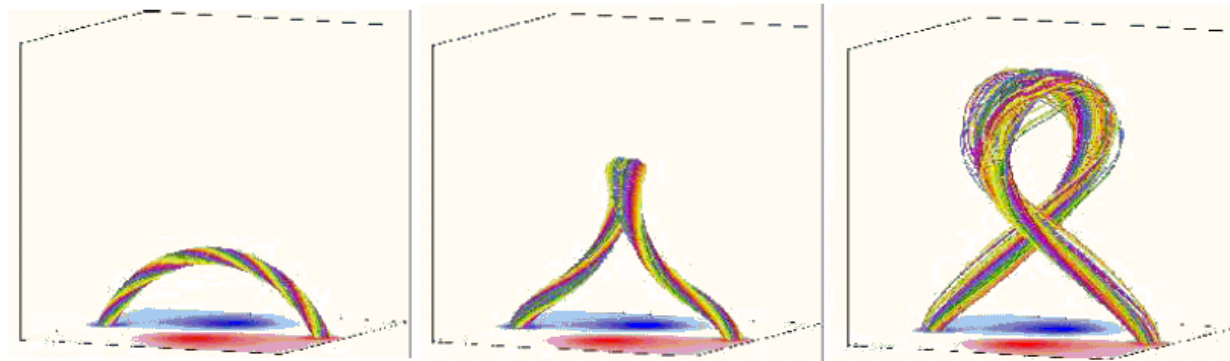
Examples of alternative models of the solar flare

CME-FLARE ASSOCIATION DEDUCED FROM CATASTROPHIC MODEL OF CMES

Lin 2004



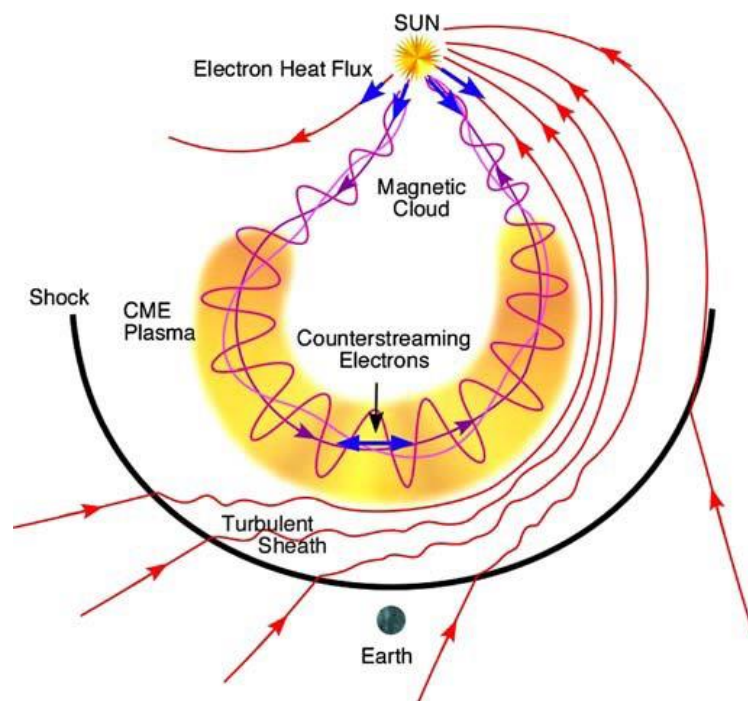
T. TÖRÖK AND B. KLIEM 2005



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.

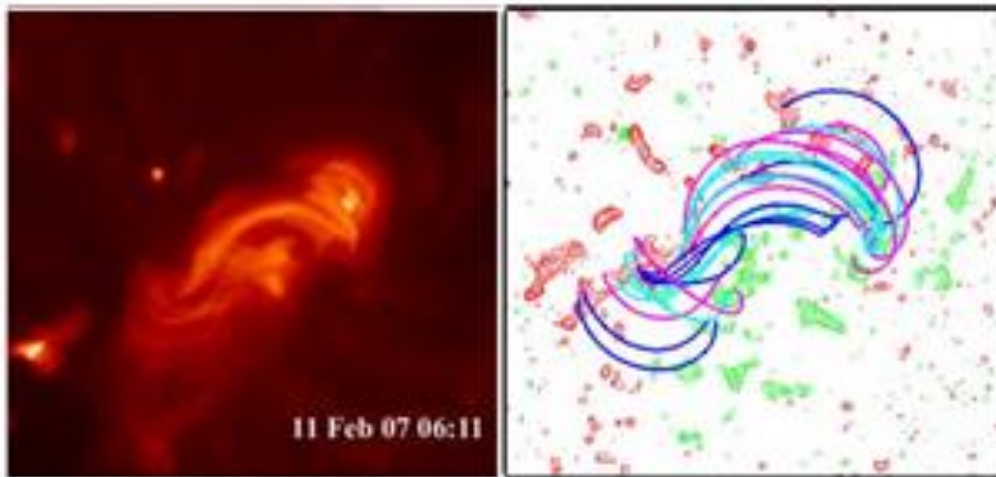
Dumbovic M. Utilizing galactic cosmic rays to understand the Sun-to-Earth evolution of CMEs. VarSITI Symposium. София, Болгария. июнь, 2019



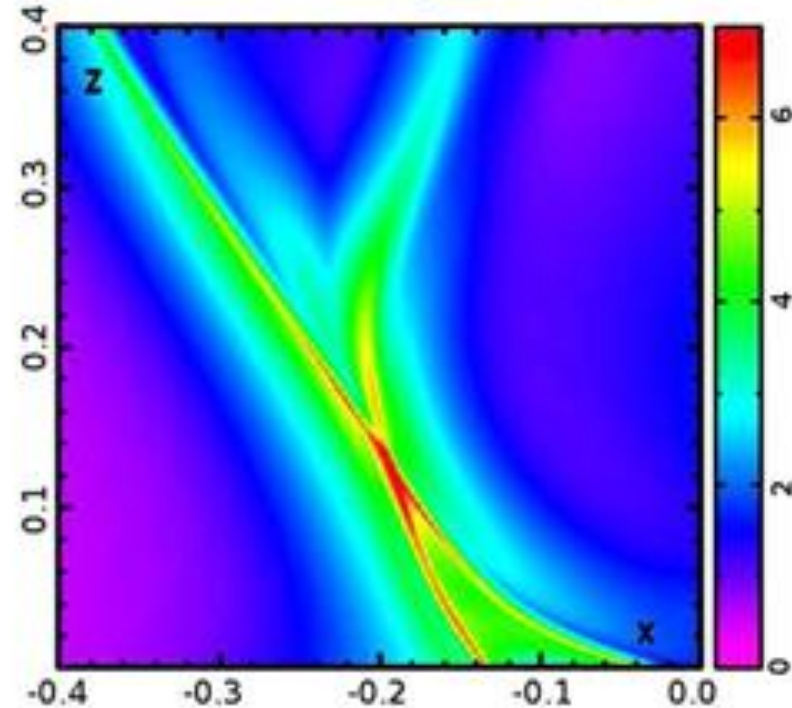
Из доклада Матей Думбовик: По измерениям на спутниках магнитное поле в 70% выбросов не имеет скрученной структуры.
(Жгут не появляется)

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

SAVCHEVA, VAN BALLEGOOIJEN, DeLUCA, APJ 744:78, 2012

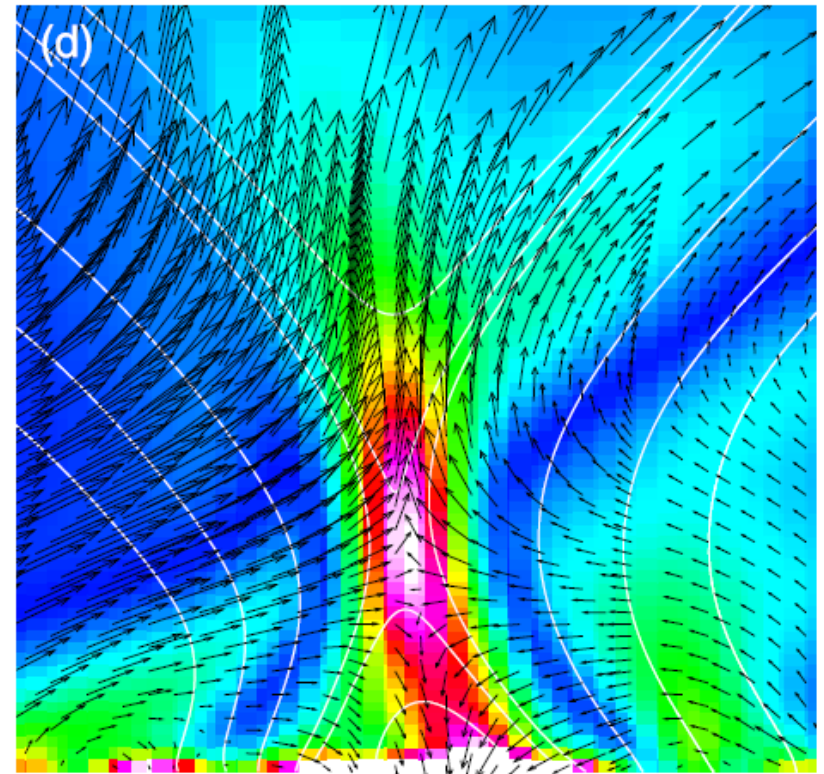
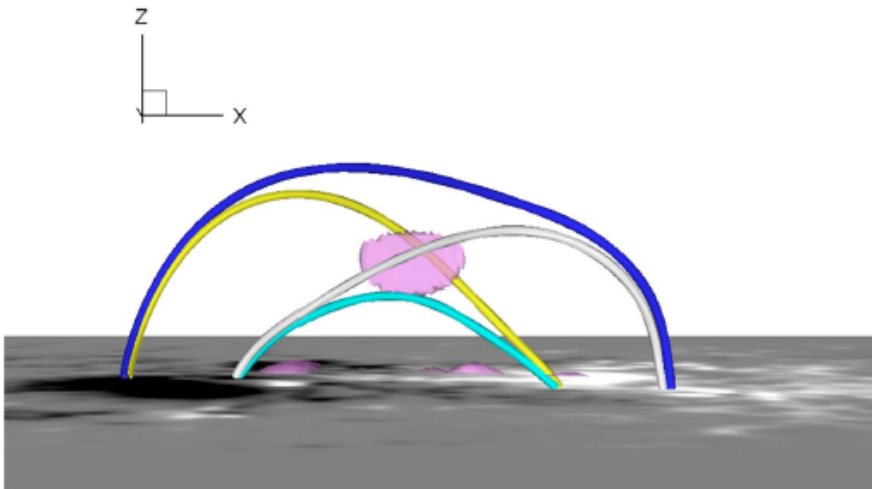


Savcheva et al. ApJ, 750:15, 2012



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

Yang Feng, Qiang Hu, Aiying Wang, Fenshi Wei

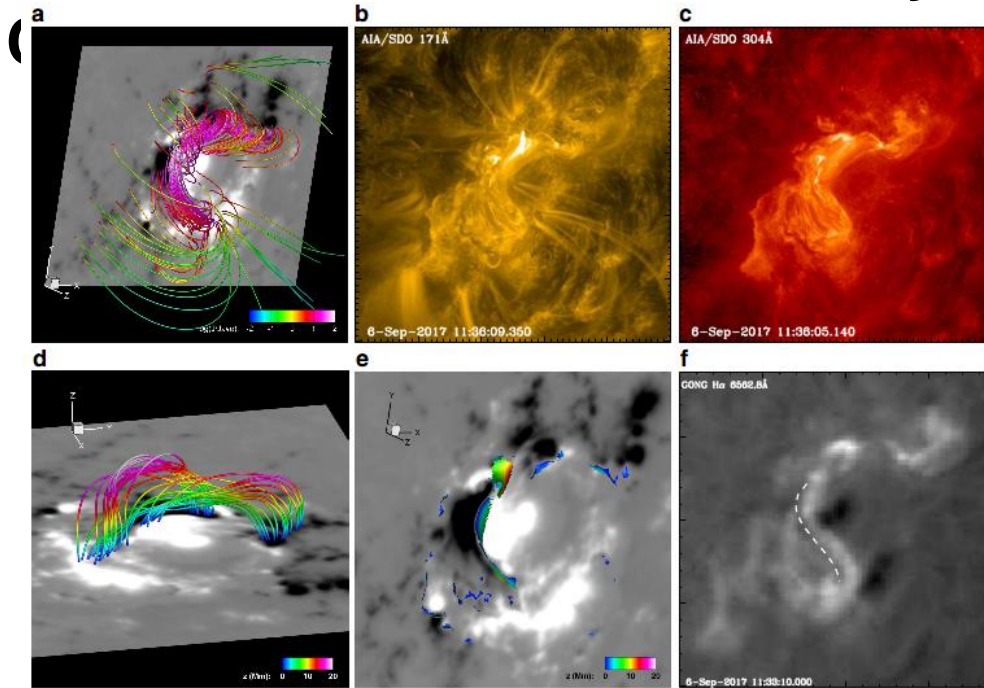


Figure 2: Comparison of the reconstructed magnetic field with the observed features of the solar corona prior to the flare. (a) SDO view of sampled magnetic field lines of the NLFFF reconstruction. The color of the lines represents the value of current density J (normalized by its average value J_{ave} 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 α image of the AR. The dashed curve denotes the location of a long filament.

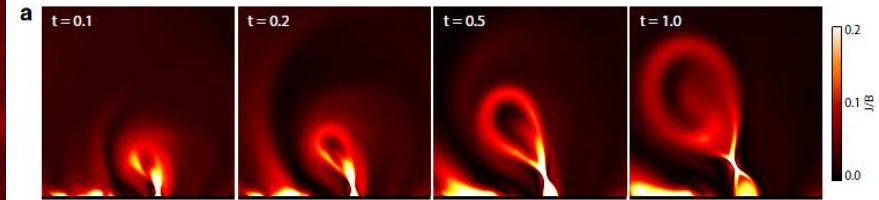


Figure 4: Temporal evolution of the eruptive structure in 2D view. Distribution of current density on the vertical cross section (the $y = 0$ plane). Here the current density is normalized by local magnetic field strength, which provides a high contrast of thin current layers with other volumetric currents.

Продолжается работа, направленная на исследование механизма генерации и распространения СКЛ и их прогноза

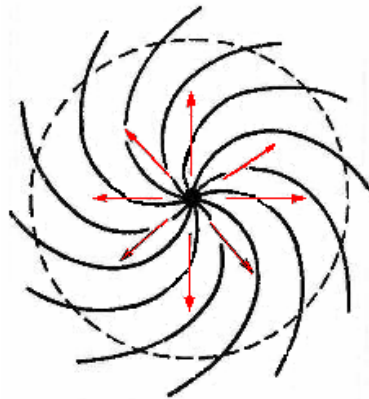
- Изучение механизма солнечной вспышки и положения вспышки в короне над активной областью путем численного МГД моделирования вспышечной ситуации в солнечной короне над активной областью, при котором наблюдаемое на солнечной поверхности распределение магнитного поля берется в качестве граничных условий
- Изучение механизма ускорения частиц во время вспышки и возможности их выхода из области сильного магнитного поля в короне путем расчета траекторий частиц в электрическом и магнитном полях, полученных в результате МГД моделирования
- 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 анализа наблюдательных данных проведенного И.М. Подгорным

В результате анализа наблюдательных данных, И.М. Подгорным получены типичные времена прихода космических лучей и нарастания фронта импульса от западных и восточных вспышек.

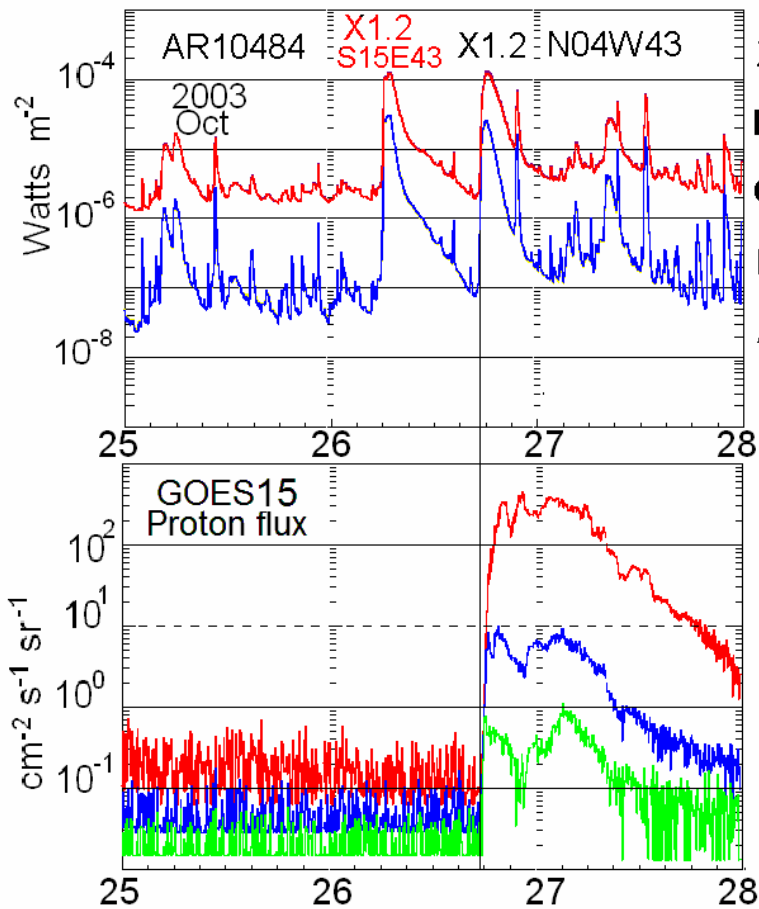
Времена для солнечных космических лучей

	Время задержки	Время нарастания фронта	Продолжительность потока протонов
Западные вспышки	15 - 20 мин	15 - 30 мин	~ 3 суток (max ~ 9 суток)
Восточные вспышки	3 - 5 час	~1 суток	~ 3 суток (max ~ 9 суток)

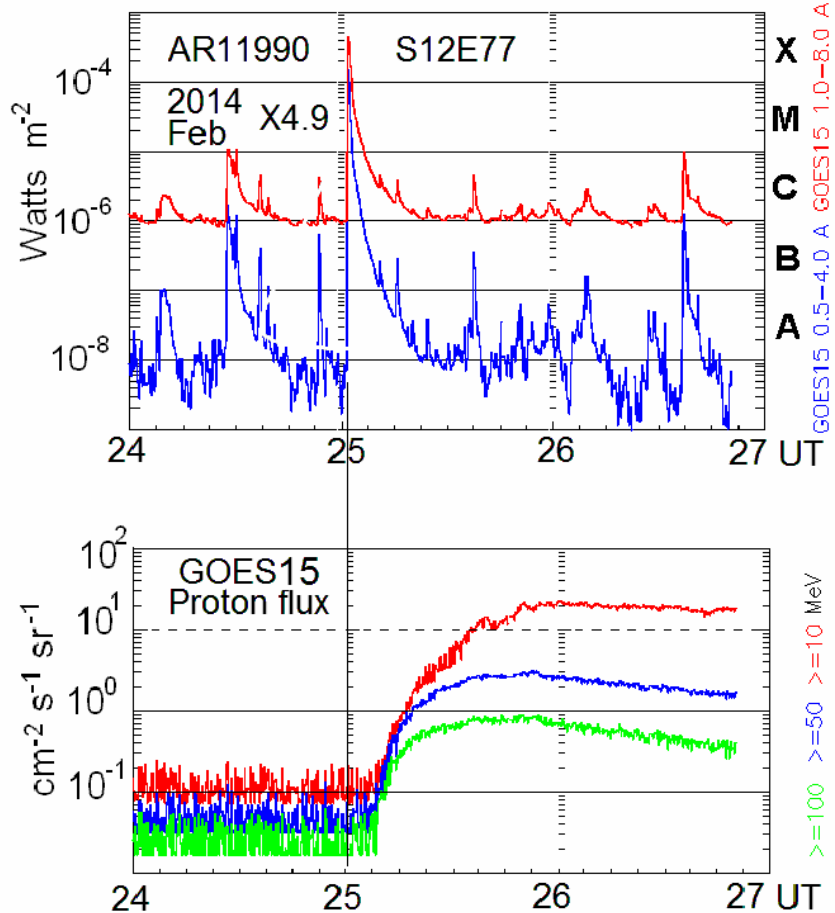
Длительность генерации ускоренных протонов, определенная по γ -излучению, равна длительности вспышки $t_{SF} \sim 10-30$ мин.



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



X
M
C
B
A
GOES15 0.5-4.0 A GOES15 1.0-8.0 A



X
M
C
B
A
GOES15 0.5-4.0 A GOES15 1.0-8.0 A

>=100 MeV
>=50 MeV
>=10 MeV

Наша цель:

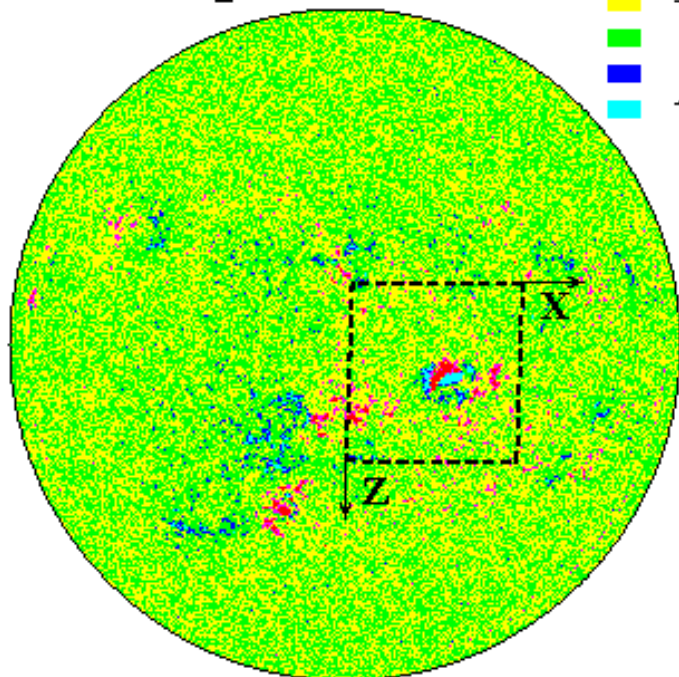
Определить механизм солнечной вспышки непосредственно путем МГД моделирования в короне над реальной активной областью.

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

27-05-2003 20:47:59
 fd_M_96m_01d.3789.0013.fits
 B_0 = -1.1810

В в Гауссах

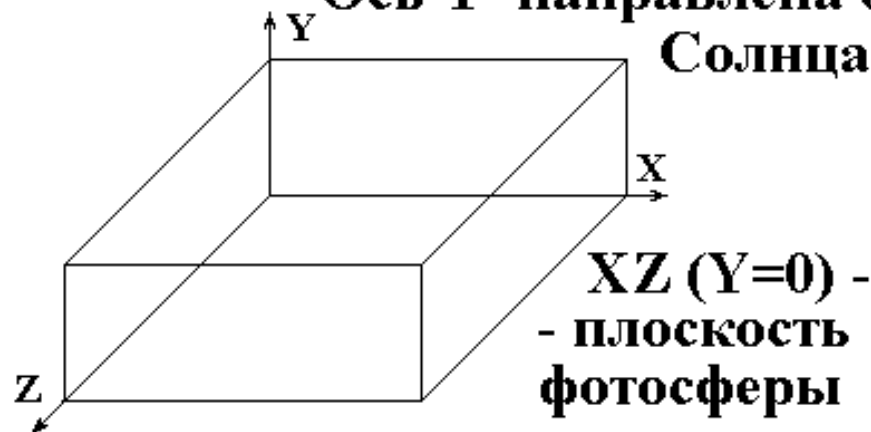
■	$B < -150$
■	$-150 < B < -50$
■	$-50 < B < 0$
■	$0 < B < 50$
■	$50 < B < 150$
■	$150 < B$



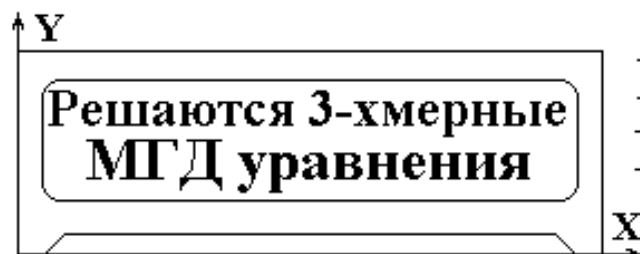
--- ОБЛАСТЬ В КАРТИННОЙ ПЛОСКОСТИ

РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ В КОРОНЕ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

Ось Y направлена от Солнца



Сечение $Z=\text{const}$



Нефотосферная граница:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{V}_\perp \text{ из } \text{div} \mathbf{V} = 0 \\
 & \mathbf{V}_\parallel \text{ из } \partial j / \partial n = 0 \\
 & \partial \rho / \partial n = 0 \\
 & \partial V / \partial n = 0 \\
 & \partial T / \partial n = 0
 \end{aligned}$$

Фотосферная граница:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{V}_\parallel \text{ из вычисленного потенц. поля для наблюдаемого} \\
 & \mathbf{V} \text{ вдоль луча зрения; } \mathbf{V}_\perp \text{ из } \text{div} \mathbf{V} = 0; \rho = \text{const}; \\
 & \partial V / \partial n = 0; \partial T / \partial n = 0
 \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

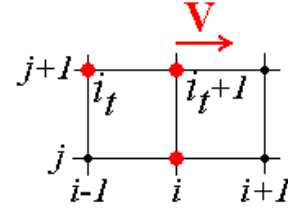
44, 407, 2000 47, 696, 2003 52, 666, 2008

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

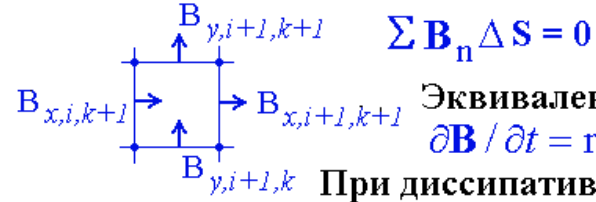
Принципиальное отличие численных методов, реализованных в программе **ПЕРЕСВЕТ**. Основная цель – построение **наиболее устойчивой конечно-разностной схемы**. **Устойчивость** должна оставаться для **как можно большего шага Δt** , чтобы максимально ускорить вычисления. При этом не ставится цели достичь высокой точности аппроксимации дифференциальных уравнений конечно-разностной схемой.

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 $[\text{div} \mathbf{B}] = 0$

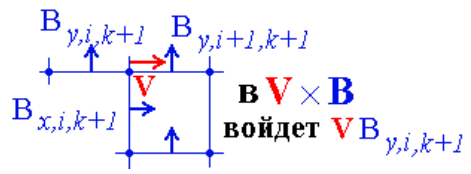


$$\mathbf{u}_i^{(i_t+1)j+1} = \mathbf{u}_i^j - \mathbf{v} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{u}_i^{(i_t)j+1} - \mathbf{u}_{i-1}^{(i_t)j+1})$$



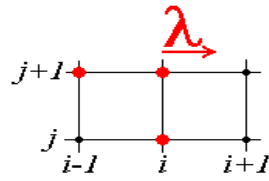
Эквивалентность уравнений $\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + v_m \Delta \mathbf{B}$ и $\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - v_m \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B})$
 При диссипативной релаксации магнитно поля плотность 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)
- Используя специальные методы повышения порядка аппроксимации (FCT, TVD)
- Так же Лагранжевы схемы с пересчетом путем интерполяции на каждом шаге



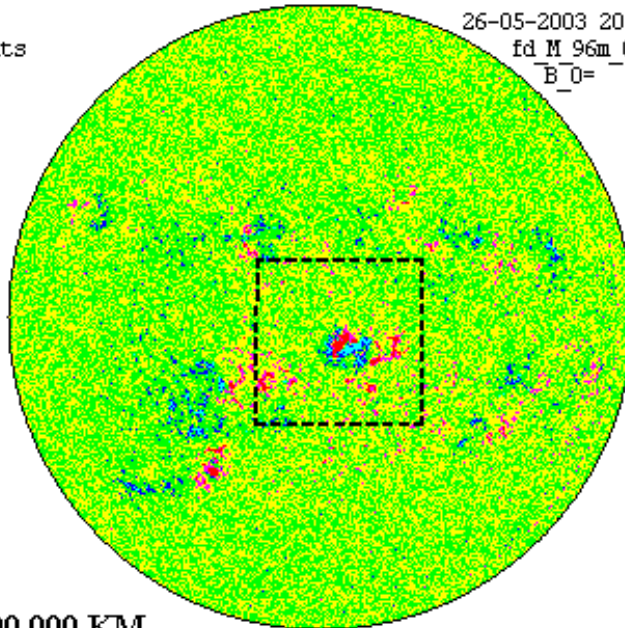
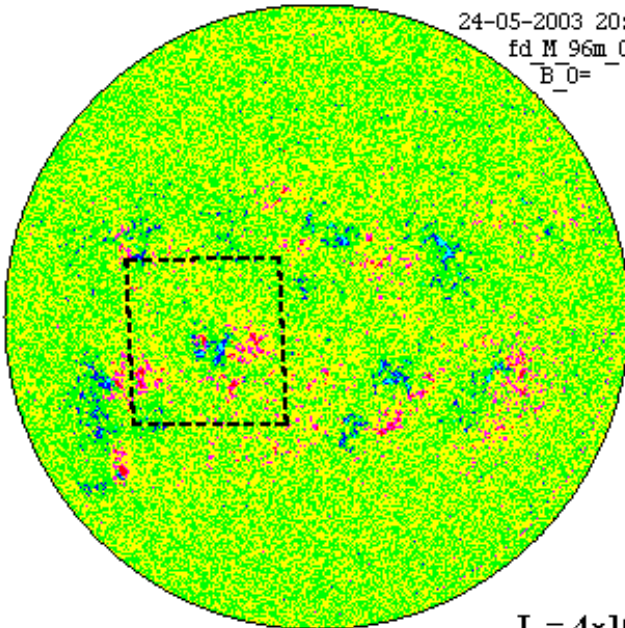
$$\mathbf{w}_i^{j+1} = \mathbf{w}_i^j - \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{w}_i^j - \mathbf{w}_{i-1}^j)$$

- 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 $\mathbf{v} (B_{y,i+1,k+1} + B_{y,i,k+1}) / 2$

SET OF FLARES MAY 27-29, 2003

AR 10365

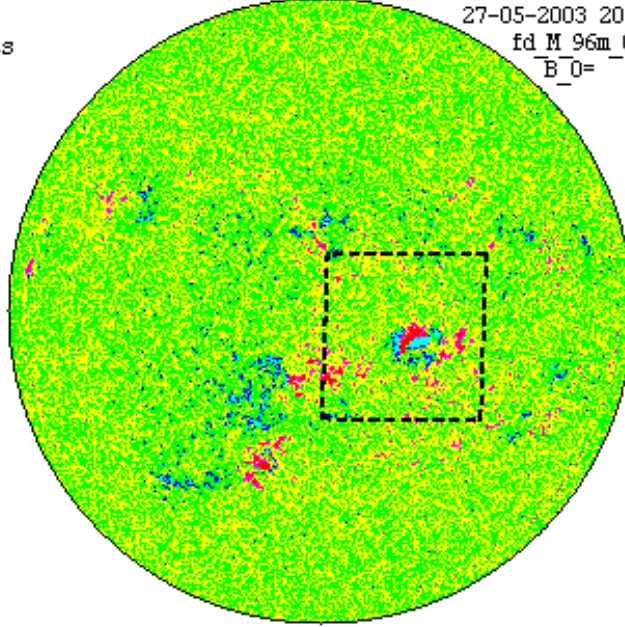
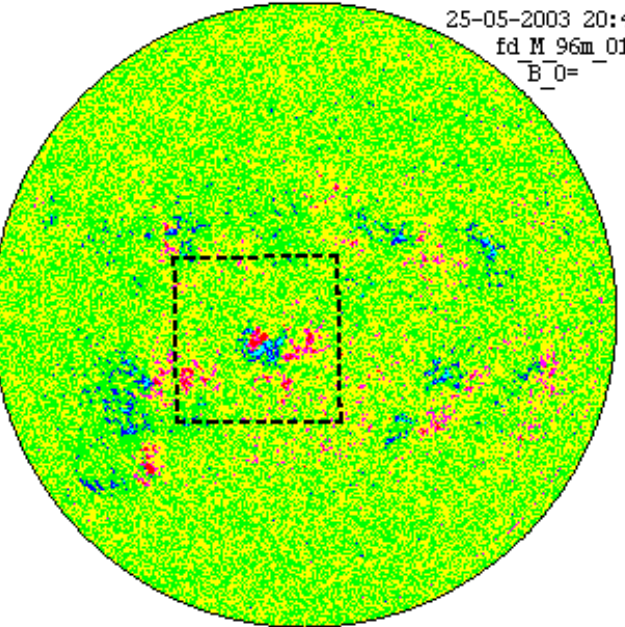


B IN GAUSSFES

Red	$B < -250.0000$
Dark Red	$-250.0000 < B < -200.0000$
Red-Orange	$-200.0000 < B < -150.0000$
Orange	$-150.0000 < B < -100.0000$
Orange-Yellow	$-100.0000 < B < -50.0000$
Yellow	$-50.0000 < B < 0.0000$
Light Green	$0.0000 < B < 50.0000$
Green	$50.0000 < B < 100.0000$
Dark Green	$100.0000 < B < 150.0000$
Cyan	$150.0000 < B < 200.0000$
Light Cyan	$200.0000 < B < 250.0000$
Dark Cyan	$250.0000 < B$

MAXIMUM B LEVEL IS 250.0000
 DELTA B IS 50.0000
 12 INTERVALS
 6 POSITIV (NEGATIV) INTERVALS
 --- REGION IN PICTURE PLANE

$L = 4 \times 10^{10}$ CM = 400 000 KM



B IN GAUSSFES

Red	$< B < -150.0000$
Dark Red	$-150.0000 < B < -50.0000$
Orange	$-50.0000 < B < 0.0000$
Light Green	$0.0000 < B < 50.0000$
Green	$50.0000 < B < 150.0000$
Cyan	$150.0000 < B$

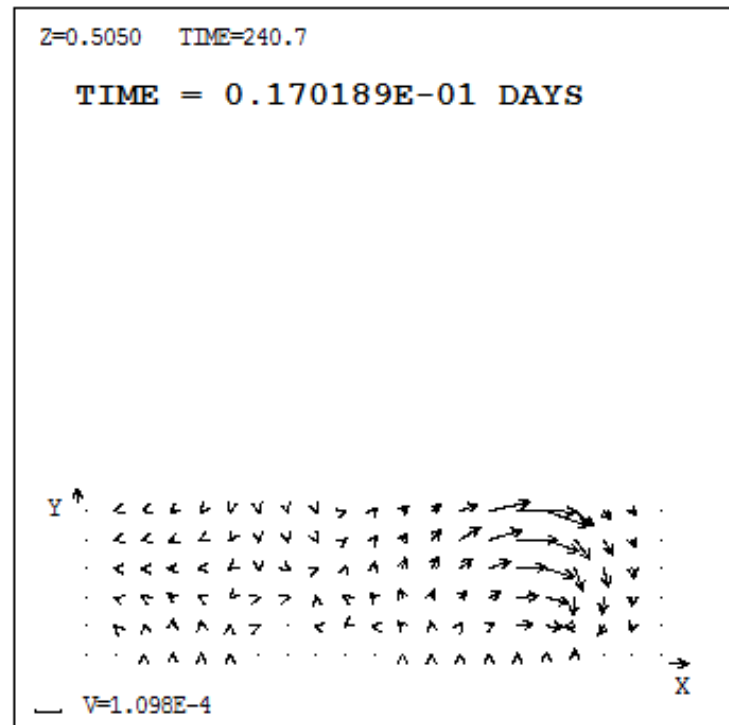
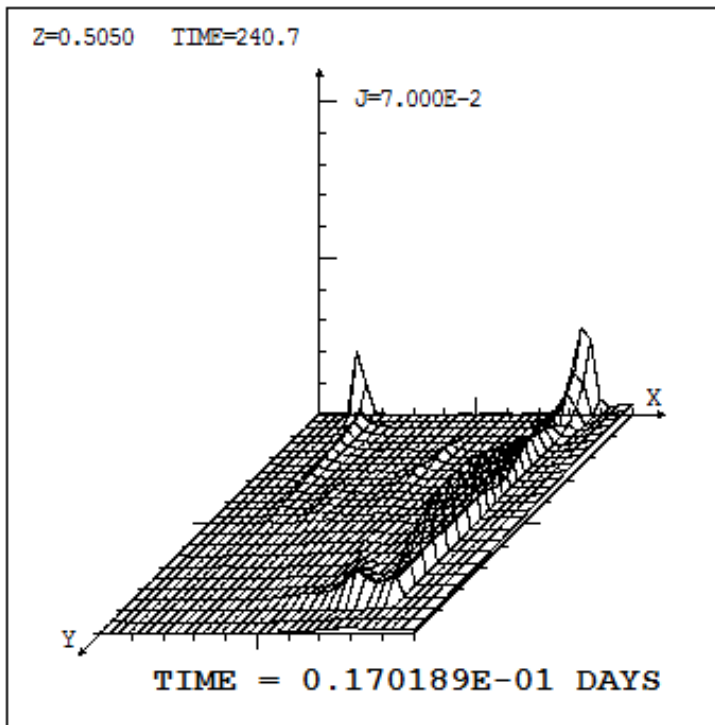
--- REGION IN PICTURE PLANE

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

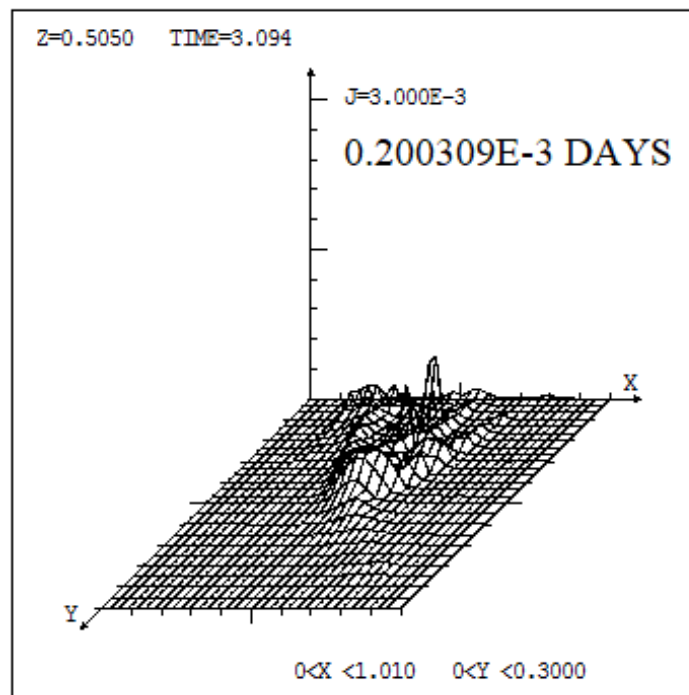
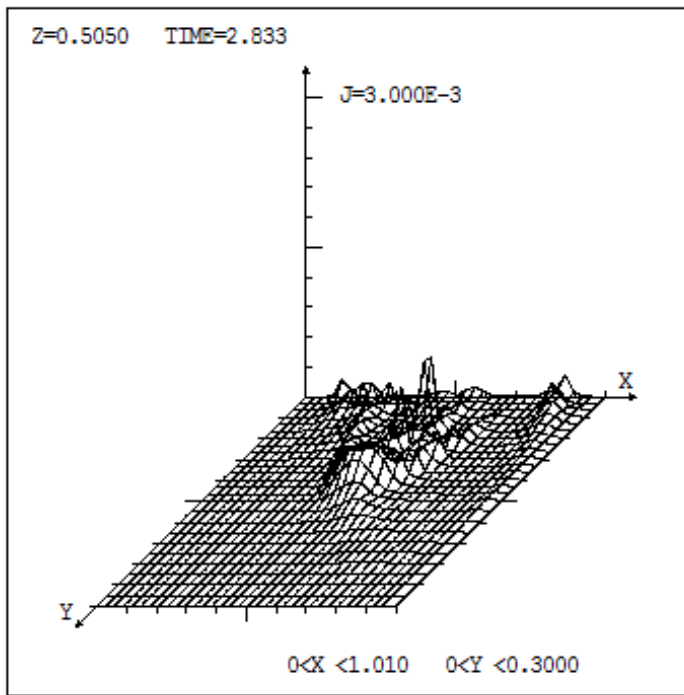
Эти величины зависят от:

- **Математического метода:** Вида разностной схемы (в пределах заданного типа схем, которые абсолютно неявны и консервативны относительно магнитного потока) и параметров разностной схемы, прежде всего обычной и магнитной искусственной вязкости, которая применяется, в основном, вблизи границы (где всегда возникают трудности с правильным заданием всех граничных условий).
- **Скорости вычислений данного процессора,** у нас это, прежде всего скорость вычисления потоков графических карт (GPU), которые осуществляют параллельные расчеты.
- **Алгоритма распараллеливания вычислений,** в частности, расположение и пересылка массивов на графической карте, являющихся, по существу, копиями массивов распределений всех величин в расчетной области, содержащихся в основной памяти компьютера.



Но сначала, необходимо избавиться от достаточно сильных возмущений, вызванных неустойчивостями на нефотосферной границе.

Расчеты показали, что такие неустойчивости могут приводить к остановке расчета из-за сильного роста величин или к явно неправильному решению из-за появления сильных нефизических возмущений сначала в области короны с малым магнитным полем, окружающую основную область, а затем их проникновения в основную область короны со значительным магнитным полем.



Возникает необходимость стабилизировать такие неустойчивости, возникающие на нефотосферной границе.

Эта задача решена благодаря применения следующих методов:

- 1. Ограничение скорости втекания плазм в расчетную область через нефотосферную границу.**
- 2. Применение искусственной вязкости (обычной и магнитной) вблизи нефотосферной границы.**
- 3. Неизменность магнитного поля краях границы расчетной области, относительно потенциального поля, используемого для задания граничных условий.**

Шаг по времени τ не должен значительно превосходить время из условия Куранта τ_K :

$\tau < h / (V_{MV} + V_{MA})$. 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 τ должен быть меньше τ_K (времени из условия Куранта), несмотря на то, что используется абсолютно неявная схема (по-видимому из-за того, что: система уравнений с перекрестными членами, метод итераций).

ПРИМЕР ПЕРЕКРЕСТНЫХ ЧЛЕНОВ

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = -\frac{\partial(V_y B_x)}{\partial y} + \frac{\partial(V_x B_y)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial B_y}{\partial x} \right)$$

Искусственная вязкость

Artificial viscosity

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

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

Самые оптимальные параметры трудно выбрать в процессе расчета, т.к. параметров несколько и шаг τ_K изменяется в процессе расчета. Расчеты показали, что вполне оптимальным является используемый в настоящее время набор параметров:

- **Шаг по времени** $\tau = 0.4 \cdot 10^{-7}$ суток (шаг Куранта τ_K изменяется от 0.45×10^{-7} до 0.79×10^{-7} в процессе расчета, а зависимости деталей правил его определения вблизи границы).

- Искусственная вязкость (обычная и магнитная) $\nu = 3 \cdot 10^{-3}$.

- Точность решения неявной схемы $\varepsilon = 10^{-7}$, при которой выполняется 3 итерации. При этом, чтобы избежать неустойчивость, время от времени следует ставить на небольшой промежуток (~ 100 шагов по времени) $\varepsilon = 10^{-10}$, при этом будет выполняться ~ 60 итераций.

Искусственная вязкость

Artificial viscosity

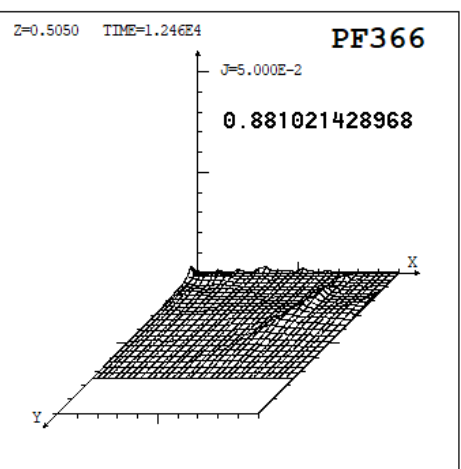
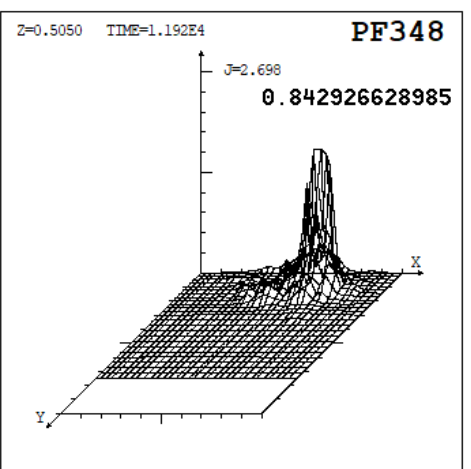
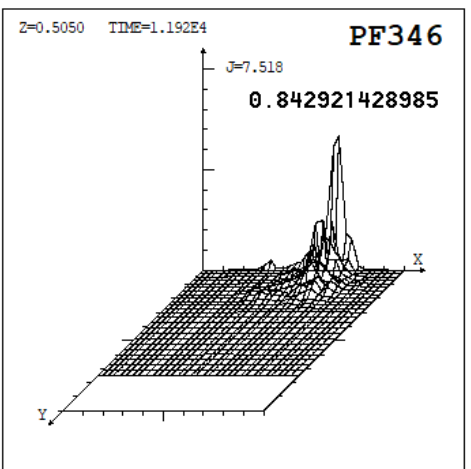
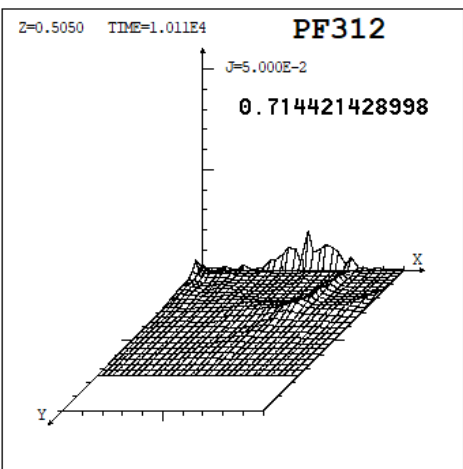
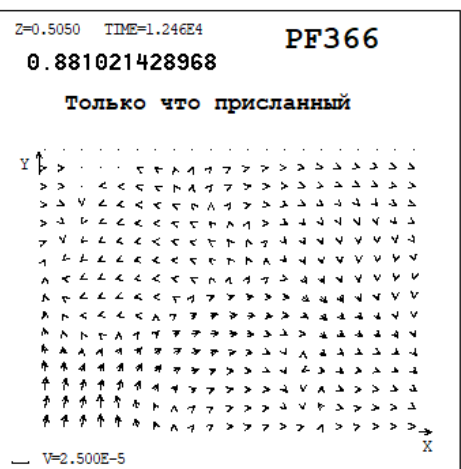
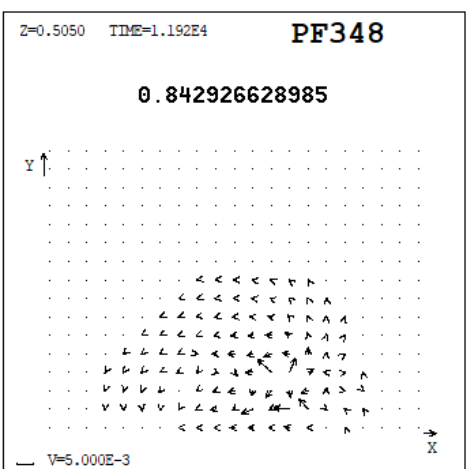
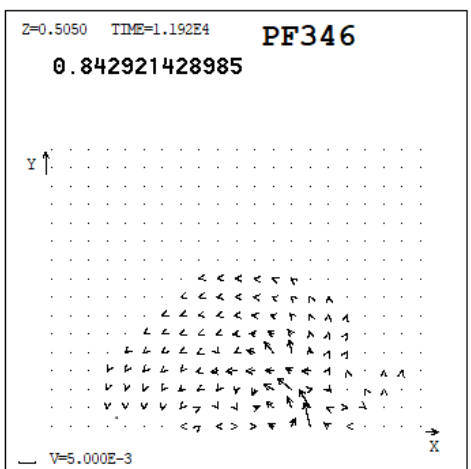
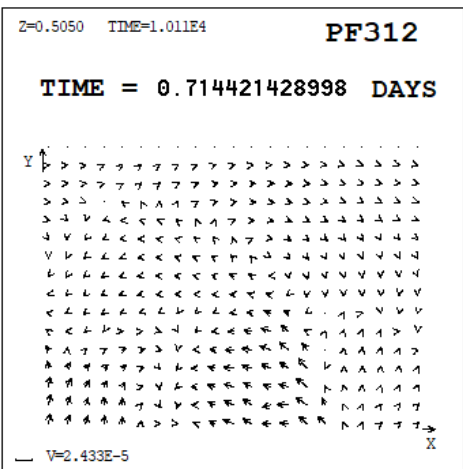
$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \nu_m \Delta \mathbf{B} + \nu_{m \text{ artif.}} \Delta \mathbf{B}$$

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

Как будет представлено ниже, выбранное вычислительное оборудование и алгоритм распараллеливания, дают время расчета одной итерации 0.0282 - 0.0302 сек.

В результате сейчас мы можем получить время расчета эволюции в течении суток над АО - 21 сутки (при мерее благоприятных условиях оно может быть увеличено на 7% - 10%). Для прогноза, это время должно быть меньше суток - нужно работать над дальнейшей оптимизацией, есть резервы.

При невыполнении условий на параметры сетки (прежде всего, при слишком большом временном шаге) вблизи фотосферной границы возникает численная неустойчивость, в результате которой в корону распространяется неестественно большое возмущение.



Однако, если после возникновения неустойчивости вернуться к выбранным параметрам разностной схемы, то неустойчивость стабилизируется и вызванное неустойчивостью сильное возмущение в короне исчезнет. Это говорит о качестве предложенной разностной схемы.

3) Время расчета одной итерации

Зависит от:

- Скорости вычислений данного процессора**
- Алгоритма распараллеливания вычислений**

Необходимо решить следующие задачи (в основном решены, численное МГД моделирование в короне над АО в реальном масштабе времени стало возможным, однако в дальнейшем предстоит совершенствование методов с целью повышения скорости расчета):

- 1) Выбор вычислительного оборудования**
- 2) Оптимизация алгоритма распараллеливания вычислений**

1) Выбор вычислительного оборудования

Задачу ставил на расчет А.В. Борисенко на арендованных в облаках суперкомпьютерах с современными графическими платами (GPU) для распараллеливания вычислений V100 (Volta-100), P100 (Pascal-100), Titan-100.

Он обладают высокой скоростью вычислений каждого потока. Использование современного языка Фортран PGI (Portland Group – Фортран, созданный специально для распараллеливания с использованием графических плат GPU) дало возможность применить методы **Оптимизация алгоритма распараллеливания вычислений**, представленные в 2) (параллельное вычисление в точках пространственной сетки в последовательно выбираемых трехмерных блоках, передача большого количества (~100) параметров в подпрограммах, осуществляющих распараллеливание на графических платах).

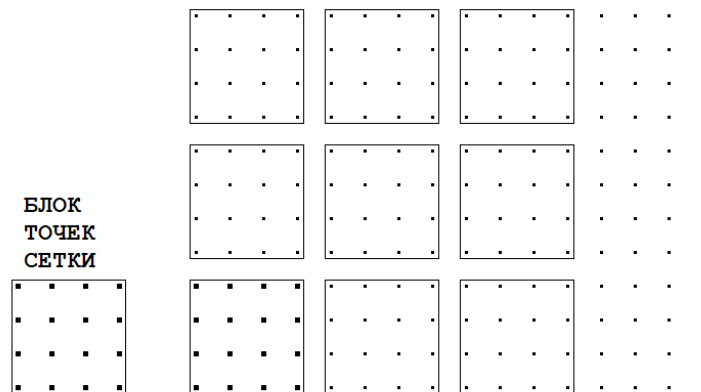
Использование ранее графической платы M2050 нашего собственного "суперкомпьютера" позволило научиться распараллеливанию вычислений на примере решения уравнения Пуассона (итерации по тому же принципу, что и для МГД уравнений, но очень сильно упрощенные). Однако использование методов оптимизации алгоритма распараллеливания вычислений, представленных в 2) и даже распараллеливание решения сложной системы МГД уравнений без использования этих методов (одномерные блоки с использованием единой нумерации точек трехмерной сетки) для платы M2050 и более старого транслятора PGI Фортран (который может использоваться для M2050) невозможно.

2) Для оптимизации алгоритма распараллеливания вычислений проведено более 20 модернизаций программы, в результате которых скорость расчета возросла в 7.5 раза и стала в 120 раз большей скорости расчета не распараллеленной программы, в которой реализована эта же разностная схема.

Применялись следующие методы:

1.2 Параллельное вычисление в точках пространственной сетки в последовательно выбираемых трехмерных блоках

1.2а Параллельное вычисление в точках **двумерной** сетки в последовательно выбираемых **двумерных** блоках (у нас применяется для распараллеливания вычисления граничных условий на поверхностях - границах трехмерной расчетной области).



2.2 Передача большого количества (~100) параметров в подпрограммах, осуществляющих распараллеливание на графических платах

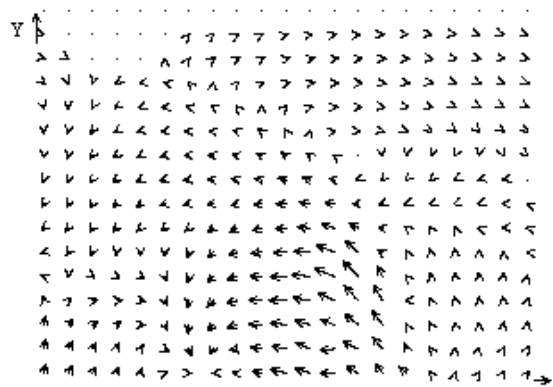
3.2 Минимизация пересылок массивов распределений всех величин в расчетной области и вспомогательных массивов, между памятью на графической карте (массивы с атрибутом DEVICE) и основной памятью компьютера.

После всех модернизаций в течение всего численного решения МГД уравнений нет пересылки между памятью графической карты и основной памятью компьютера (такую пересылку нельзя избежать только при записи результатов расчета в файл, она может быть осуществлена только из основной памяти, и происходит раз в несколько тысяч шагов, так что практически не отнимает времени расчета).

Z=0.5050 TIME=9829

PF309

TIME = 0.694921428987 DAYS

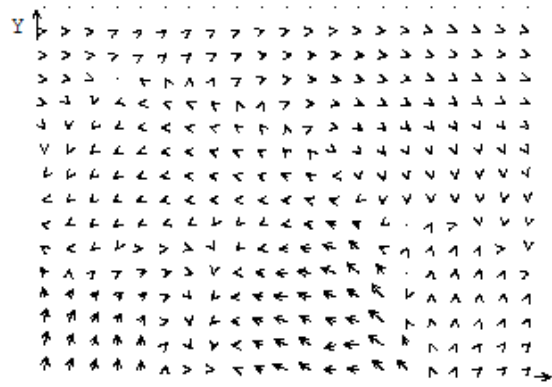


— V=2.830E-5

Z=0.5050 TIME=1.011E4

PF312

TIME = 0.714421428998 DAYS

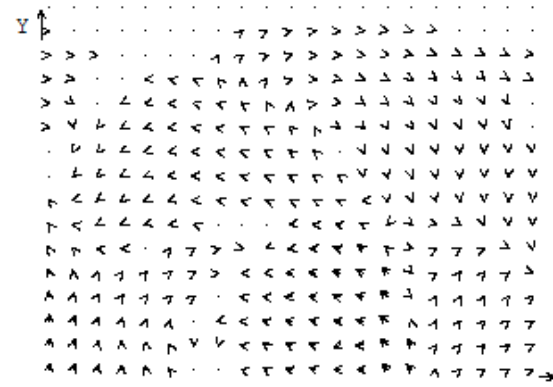


— V=2.433E-5

Z=0.5050 TIME=1.079E4

PF325

0.762921429027 DAYS

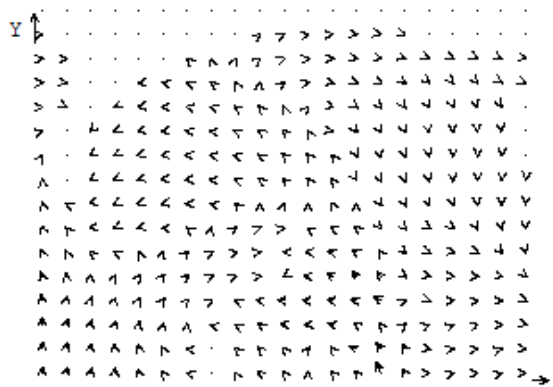


— V=5.000E-5

Z=0.5050 TIME=1.158E4

PF340

0.818921428998

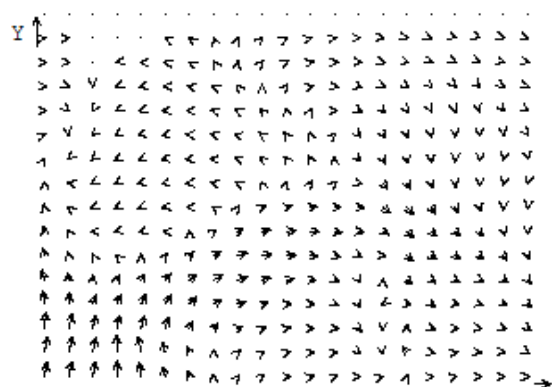


— V=5.000E-5

Z=0.5050 TIME=1.246E4

PF366

0.881021428968

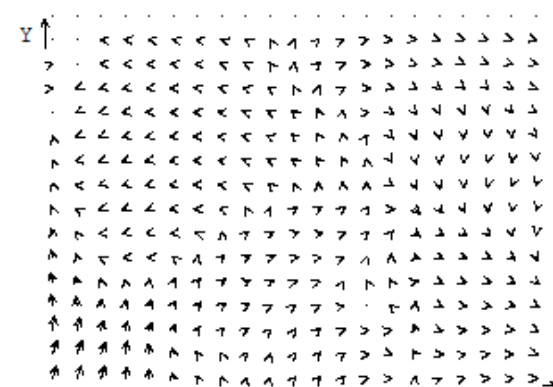


— V=2.500E-5

Z=0.5050 TIME=1.413E4

PF3

0.999201428906



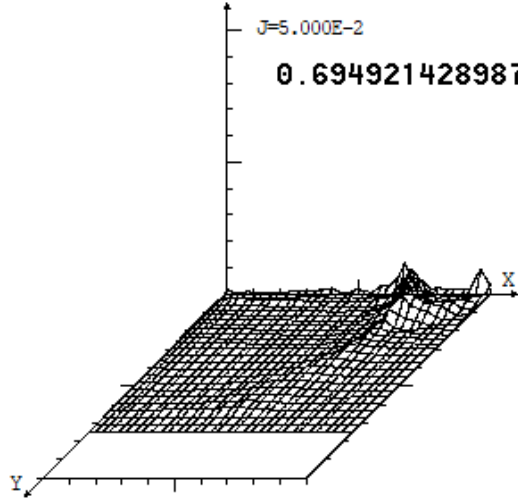
— V=2.500E-5

Z=0.4250 TIME=9829

PF309

J=5.000E-2

0.694921428987

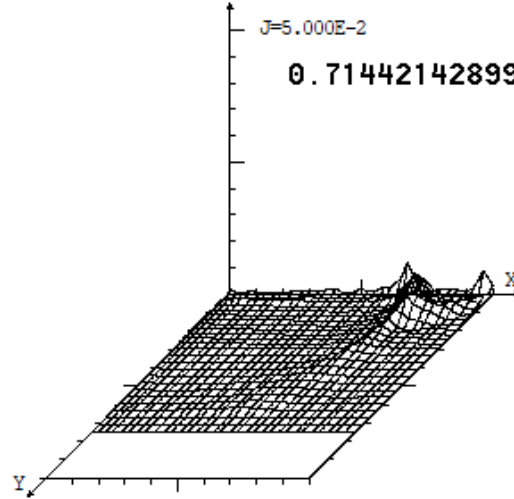


Z=0.4250 TIME=1.011E4

PF312

J=5.000E-2

0.714421428998

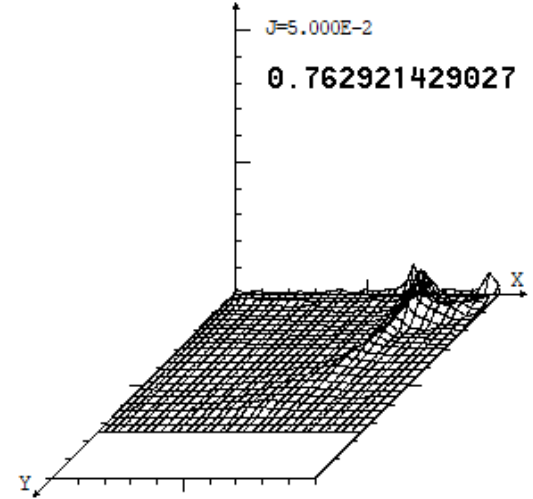


Z=0.4250 TIME=1.079E4

PF325

J=5.000E-2

0.762921429027

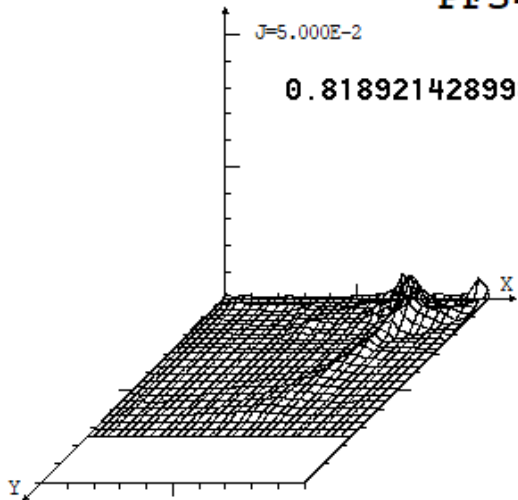


Z=0.4250 TIME=1.158E4

PF340

J=5.000E-2

0.818921428998

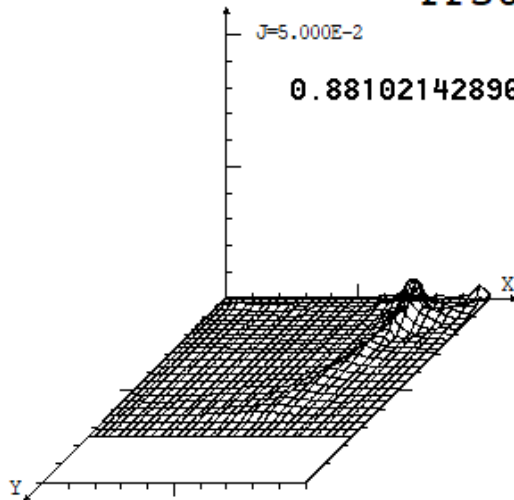


Z=0.4250 TIME=1.246E4

PF366

J=5.000E-2

0.881021428968

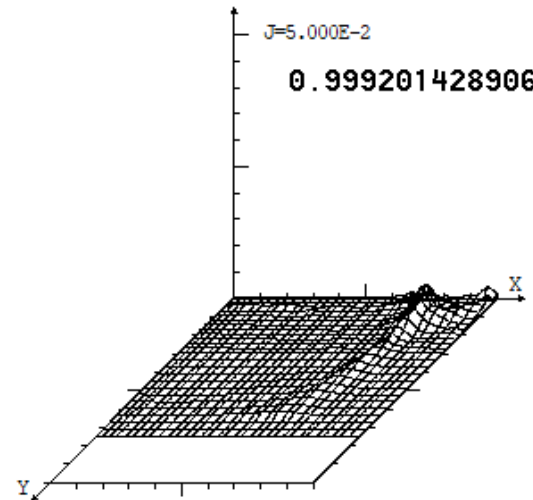


Z=0.4250 TIME=1.413E4

PF3

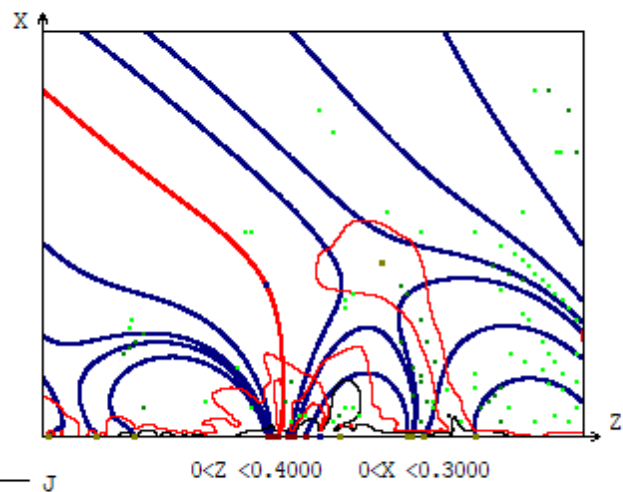
J=5.000E-2

0.999201428906

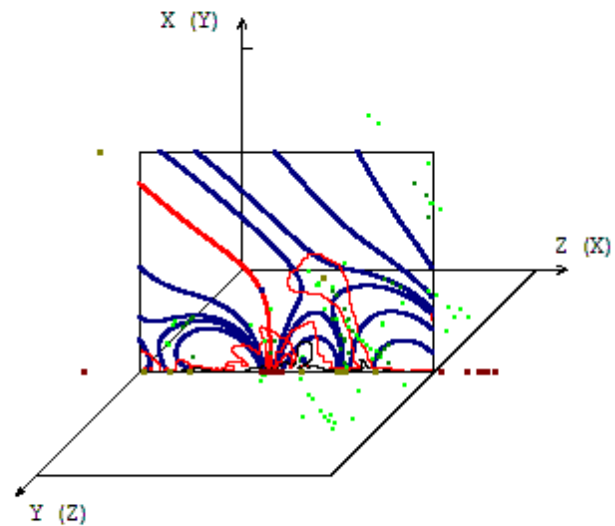


TIME=9311

TIME = 0.658305778965 DAYS

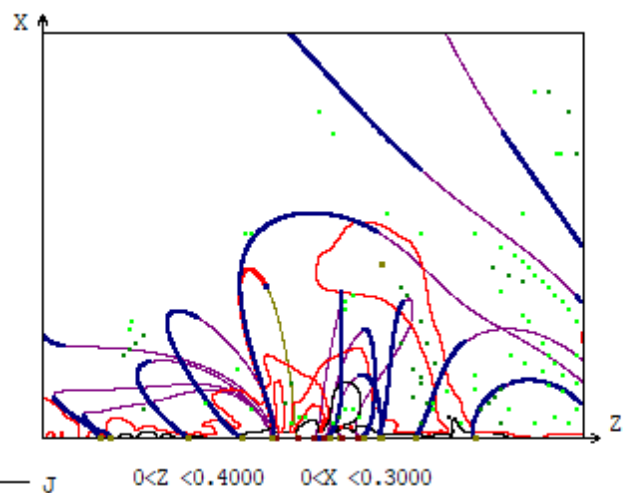


TIME = 0.658305778965 DAYS

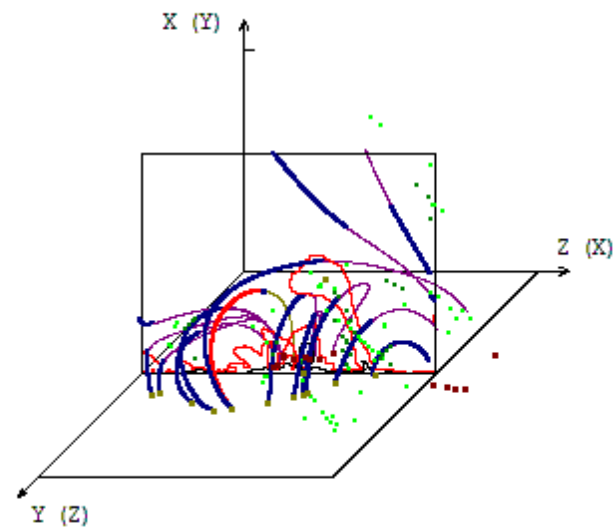


TIME=9311

TIME = 0.658305778965 DAYS

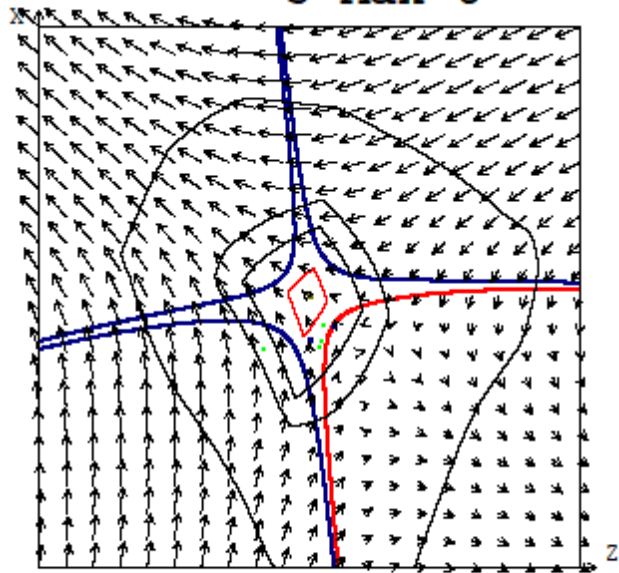


TIME = 0.658305778965 DAYS



TIME=9311

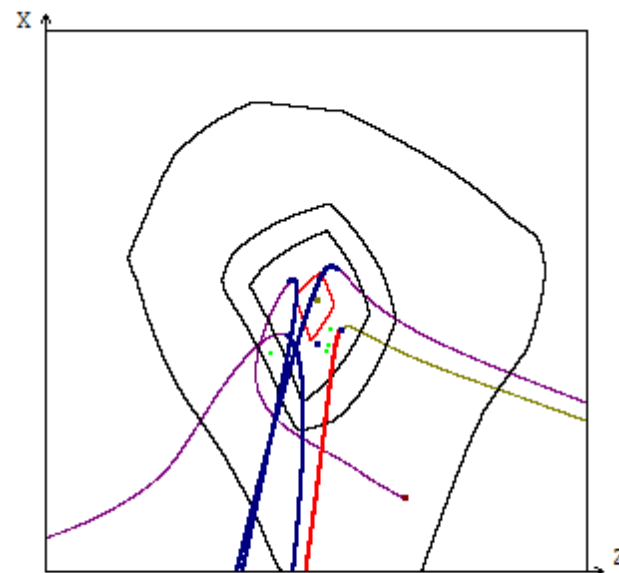
J Max 6



— J

— V=1.887E-5

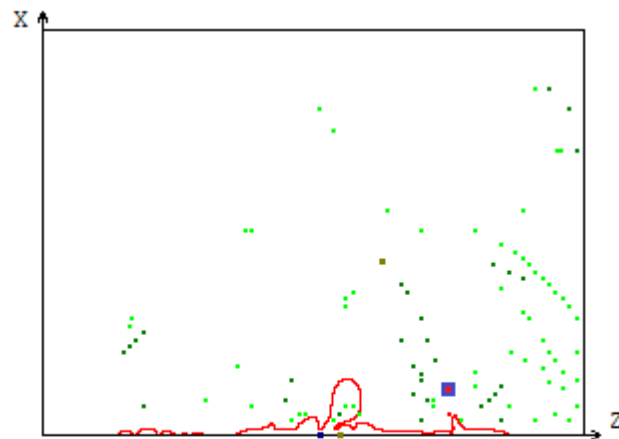
TIME=9311



— J

TIME=9311

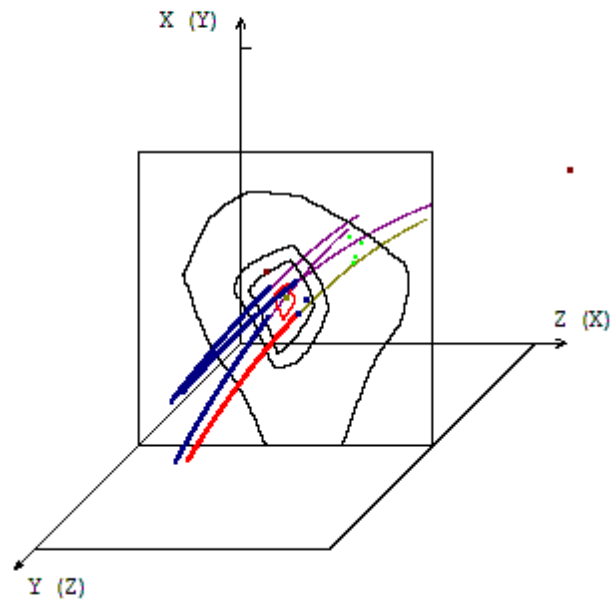
- B-VEC = -0.2929E-01 -0.2016 0.7981E-01
 XYZ-POINT = 0.5750 0.5240E-01 0.5350
 ВЫСОТА 21000 KM



— J

■ - J Max 6

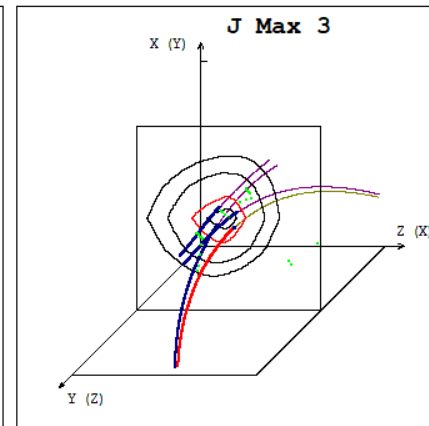
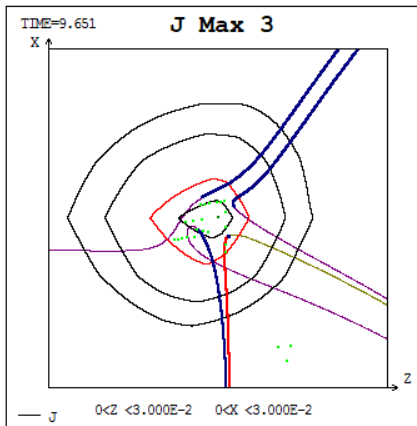
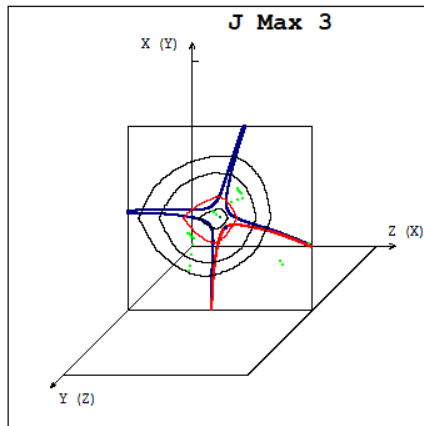
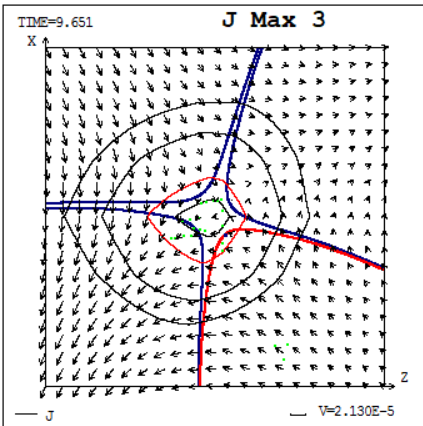
X (Y)



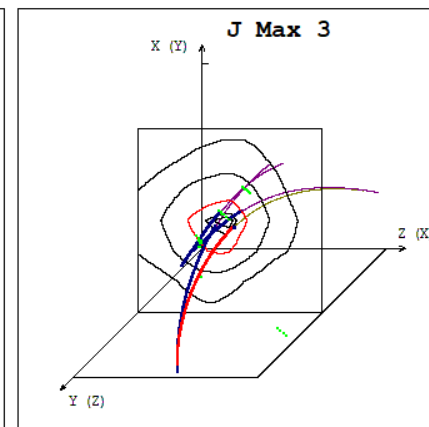
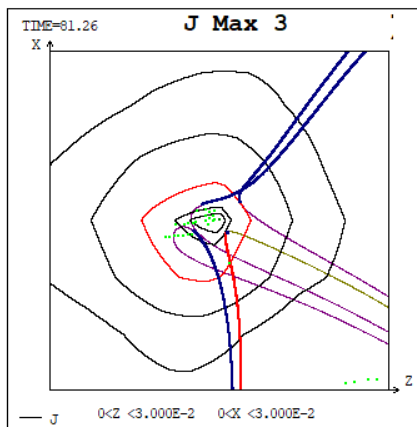
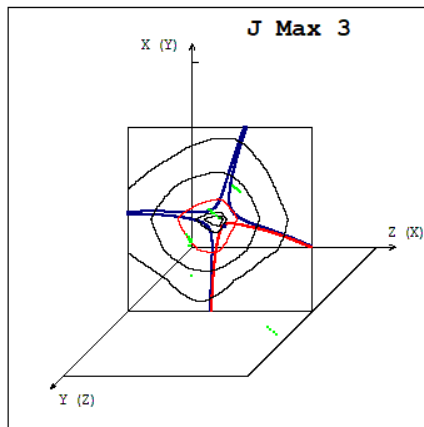
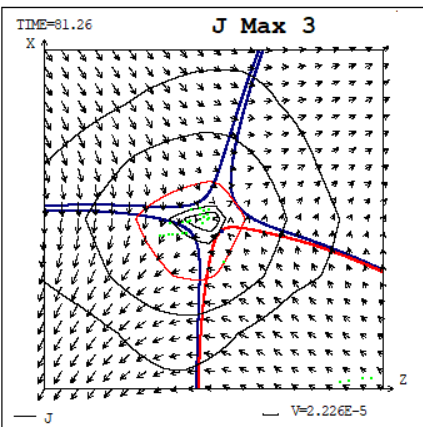
Y (Z)

Z (X)

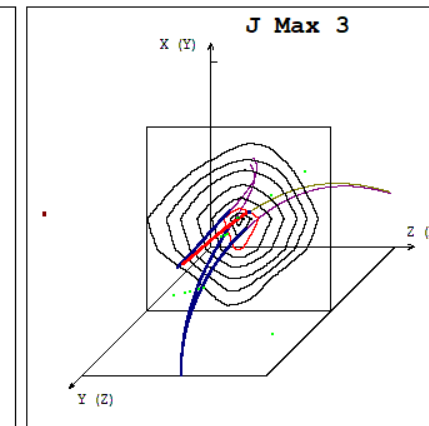
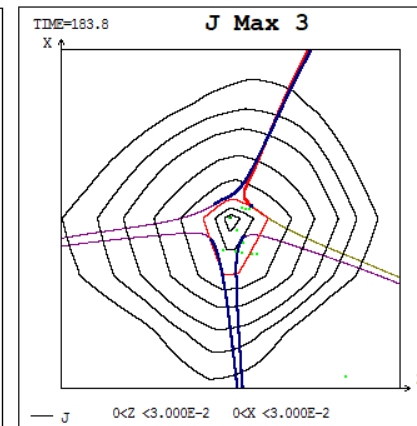
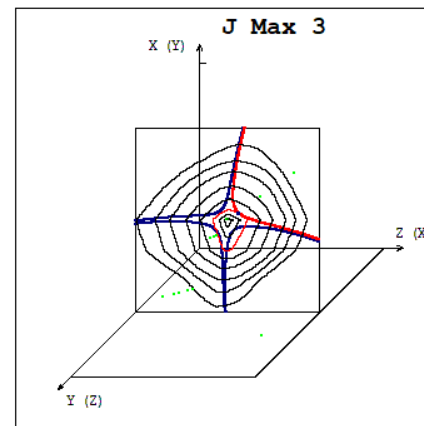
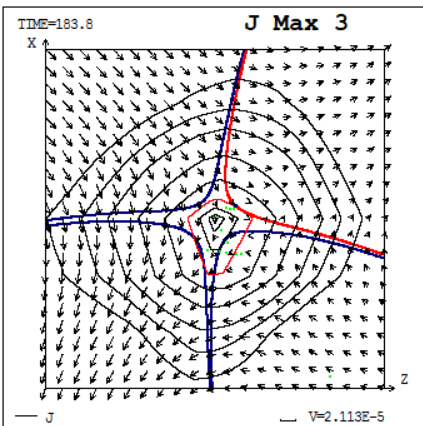
TIME = 0.682E-3 DAYS



TIME = 0.574E-2 DAYS



TIME = 0.012 DAYS



Выводы

- 1. Солнечные космические лучи ускоряются электрическим полем $E = V \times B/c$ в токовом слое в солнечной во время солнечной вспышки, поэтому для изучения механизма генерации СКЛ не**
- 2. Продолжена разработка методов МГД моделирования вспышечной ситуации в солнечной короне над активной областью, необходимых для изучения механизма солнечных вспышек. Предложенные методы позволяют провести МГД моделирование в короне в реальном масштабе времени за обозримое время (для МГД моделирования одних сутки эволюции в короне сейчас необходимо 21 суток расчета).**
 - 2а. Проведена оптимизация алгоритма параллельных вычислений**
 - 2б. Выбраны оптимальные параметры для используемой абсолютно неявной конечно-разностной схемы, консервативной относительно магнитного потока.**
- 3. Проведен расчет эволюции плазмы и поля в корне над АО 10365 в течение первых 1.2 суток эволюции, когда вспышек еще не было. Расчет не показал появления ярко выраженных токовых слоев даже при достаточно сильных возмущениях на фотосфере (превосходящих реальные возмущения, которые появились вследствие численных неустойчивостей в процессе выбора оптимальных параметров разностной схемы). В нескольких максимумах плотности тока была обнаружена конфигурация X-типа, с течением плазмы, которое должно привести к образованию токового слоя, однако в ходе дальнейшей эволюции такие конфигурации исчезали (возможно, возникали микровспышки).**
- 4. Проведенная работа выявила возможности дальнейшей оптимизации методов, с целью дальнейшего уменьшения времени расчета.**

**Спасибо за
внимание!**