

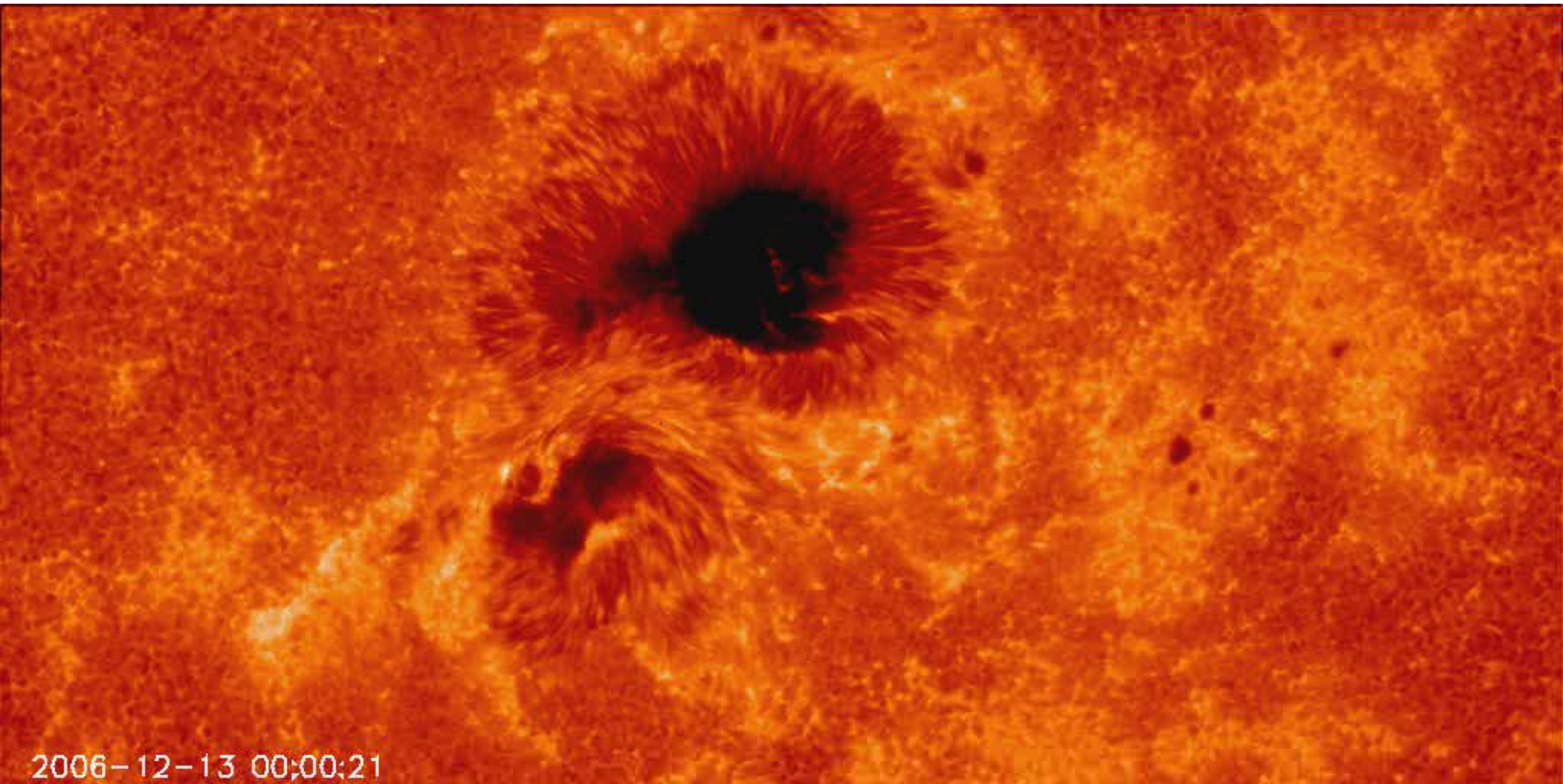
Sluneční erupce

Michal Švanda
Sluneční fyzika LS 2014/2015

Energetické jevy na Slunci

- 1. září 1859 – R. Carrington
 - Během zakreslování skupin slunečních skvrn si povšiml významného zjasnění, které trvalo cca 5 minut. Den poté zasáhla Zemi geomagnetická bouře.
 - Pozorování bílé erupce
- Erupce
 - Energetické jevy, uvolňuje se až 10^{25} J energie během maximálně pár desítek minut
 - Pozorování v optickém oboru na H α čáře (chromosférické erupce, nejčastěji dvojitá vlákna, vlákna se od sebe rozestupují)
 - UV, rentgenové a rádiové záření – svědek netermálních procesů
 - Spojováno s rekonexí magnetického pole

Erupce z Hinode



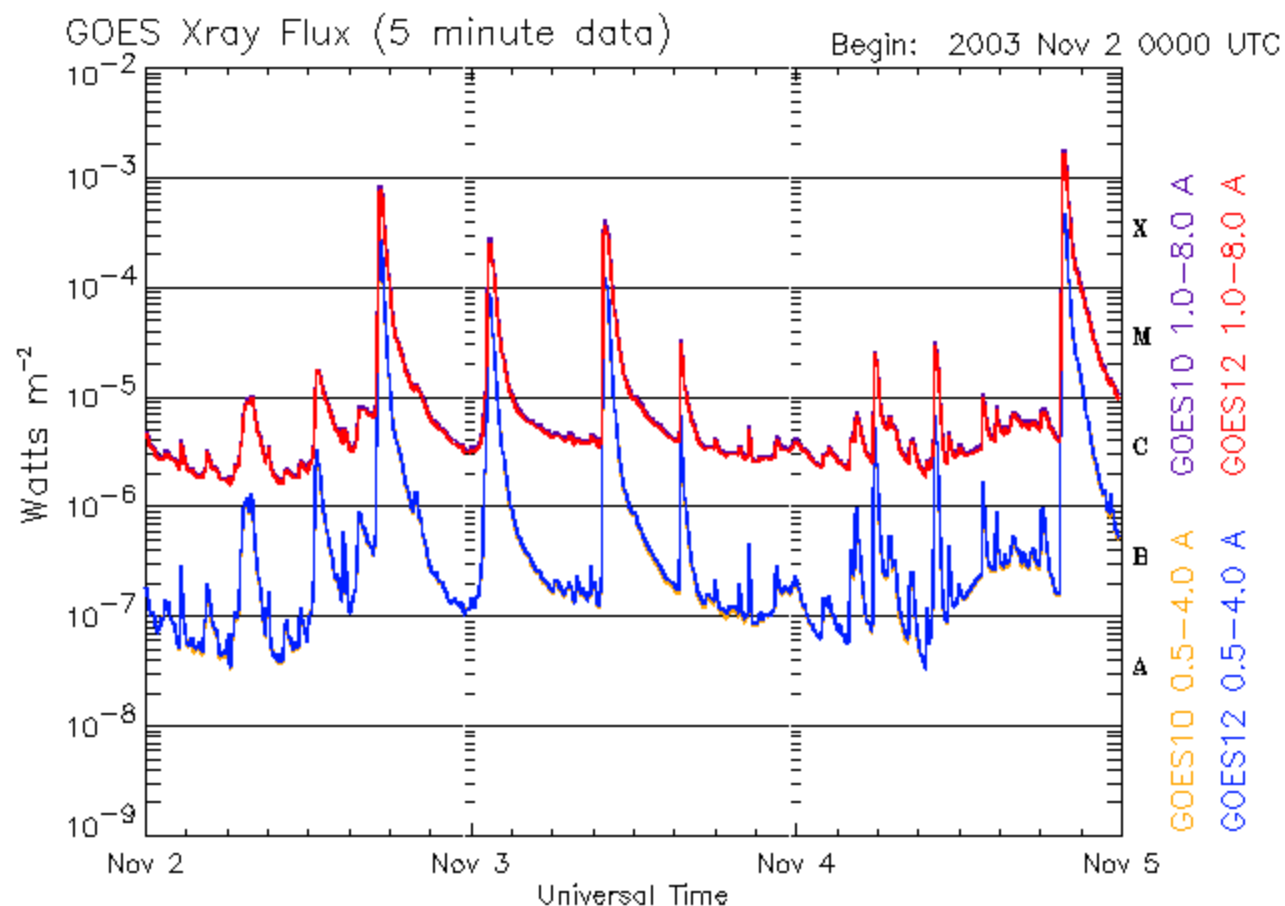
2006-12-13 00:00:21

Klasifikace erupcí

- Energetická
 - Tok energie v pásu 0,1–0,8 nm
 - A–X

- Podle plochy
 - S ($< 2^{\circ 2}$), 1,
 - 2, 3,
 - 4 ($> 25^{\circ 2}$)

- Podle intenzity
 - F, N, B



Updated 2003 Nov 4 23:56:03 UTC

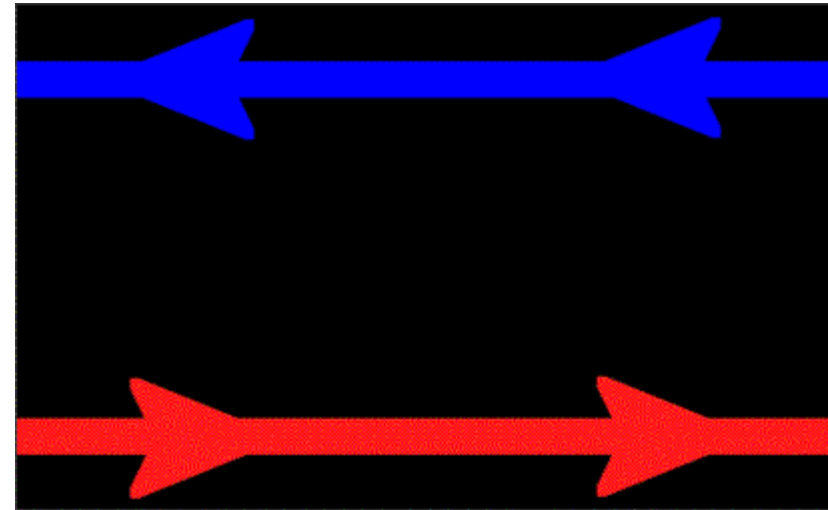
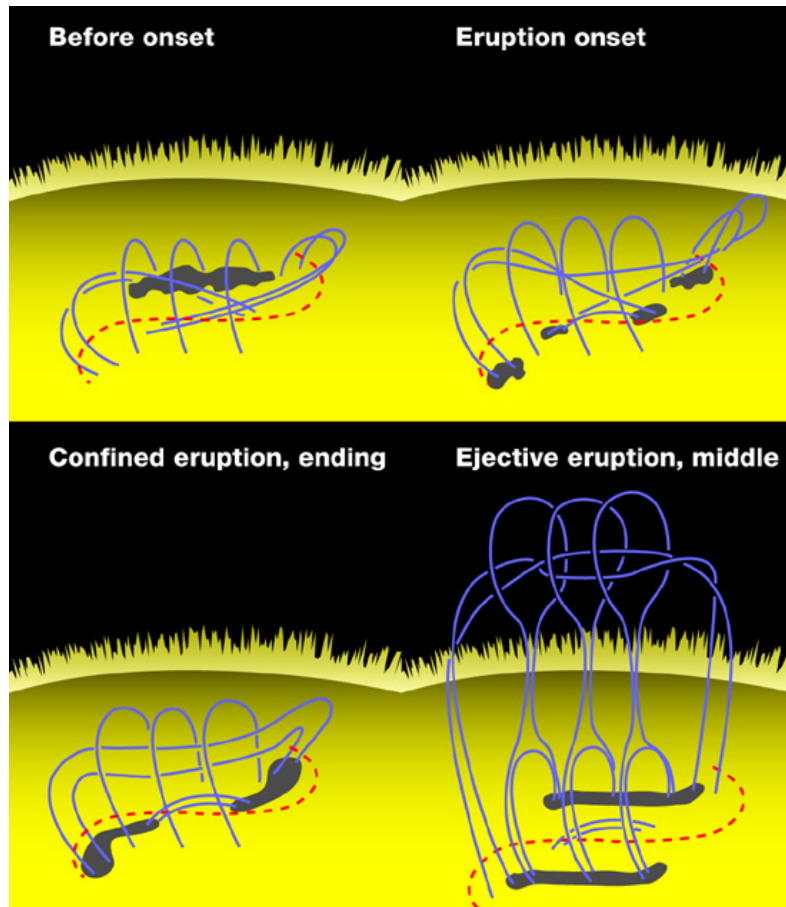
NOAA/SEC Boulder, CO USA

Disipace magnetických polí

- V oblasti proudových vrstev, které jsou formovány pohyby plazmatu. Deformace magnetických polí zvyšuje volnou energii, lokální deformace $\Delta\mathbf{B}$ produkuje proudovou vrstvu.
- Rapidní disipace nastane v místě, kde Maxwellův tensor produkuje proudovou vrstvu směrem klesající tloušťky.
- Explosivní disipace nastává v okolí singulárních bodů magnetického pole ($\mathbf{B} = 0$), kde k disipaci může dojít i přes nízkou rezistivitu.

Rekonexe magnetického pole

- Změna topologie magnetického pole, volná energie uvolněna ve formě energie a

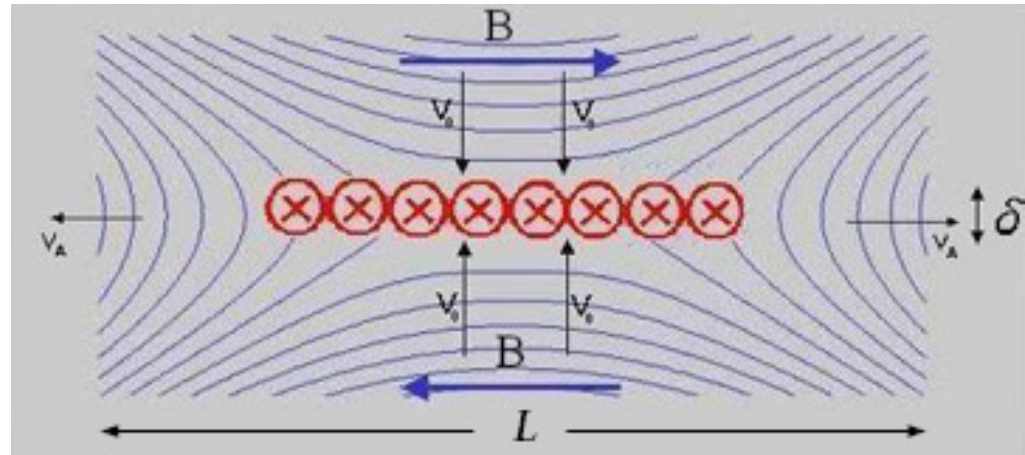


- Ukládání volné energie do konfigurace pole
 - Např. fotosférickými pohyby

Sweet-Parker vs. Petschek

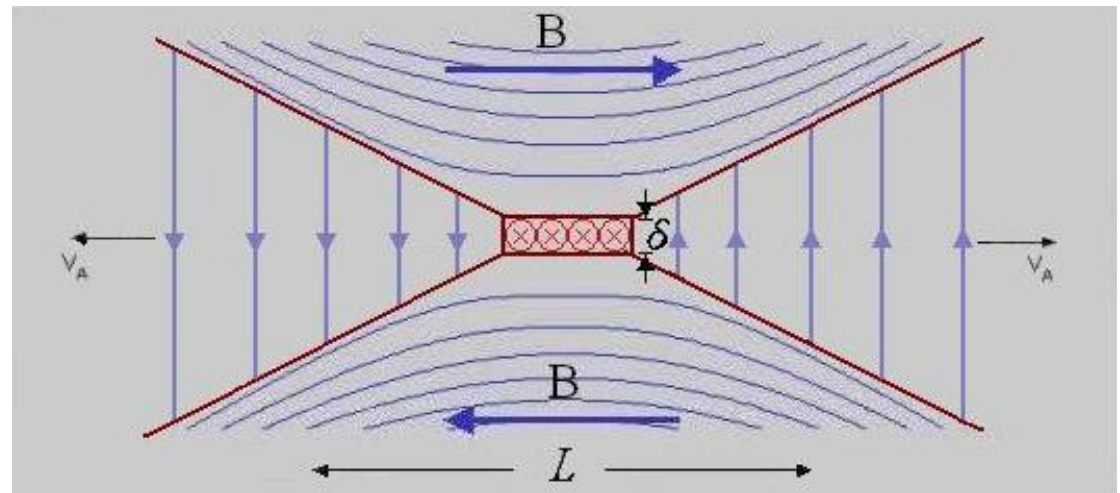
- Sweet-Parker (1957)

- Nedostatečná rychlost



- Petschek (1964)

- Modifikace morfologie
- Produkuje dostatečnou rychlost

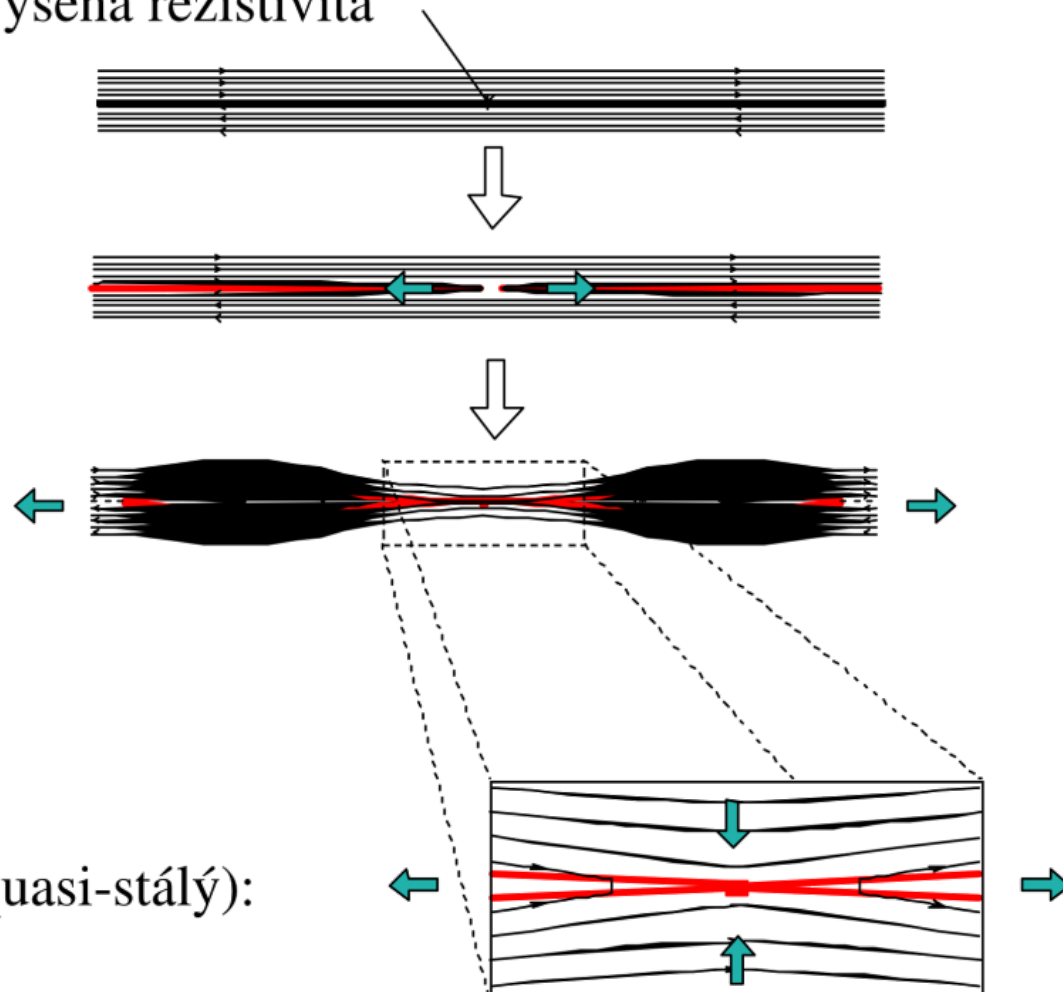


- Anomální rezistivita

- Důsledek plazmových nestabilit v oblastech proudové plochy, pokud rychlost elektronů dosáhne rychlosti plazmových vln

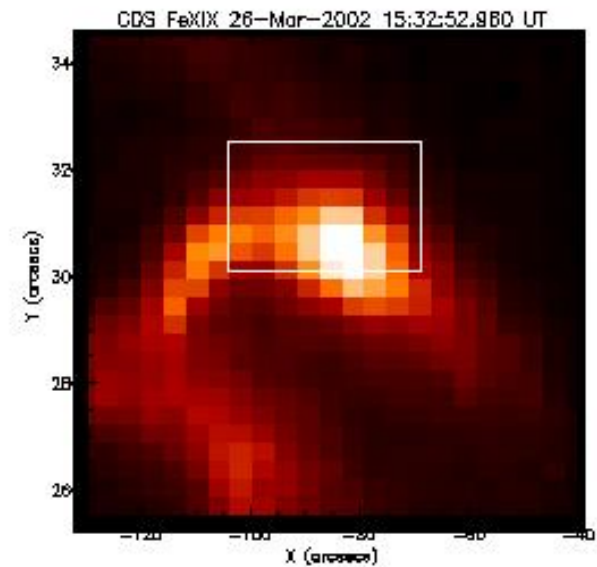
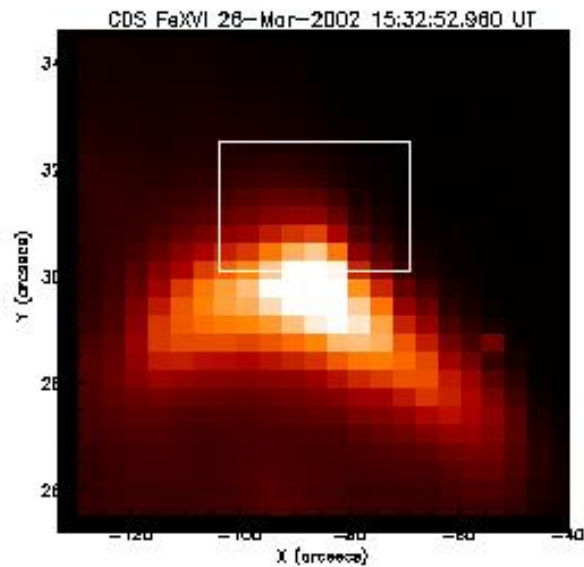
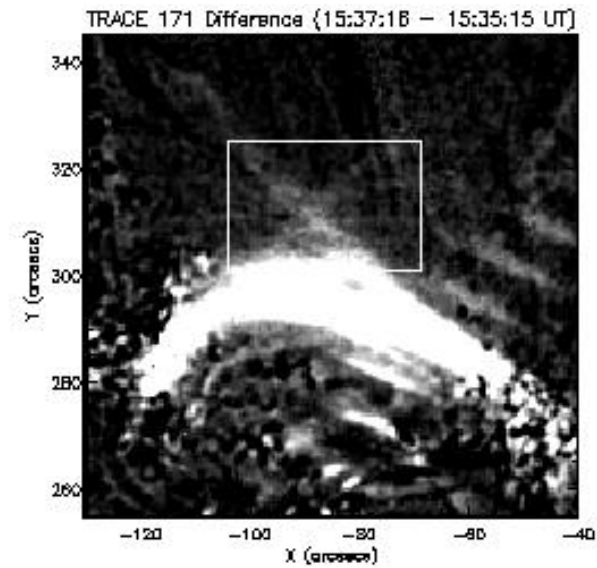
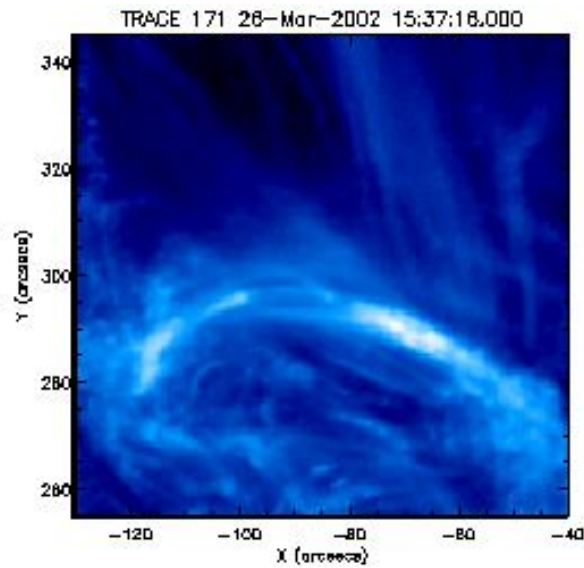
Interpretace Petschekova řešení

dočasně zvýšená rezistivita



Petschek (quasi-stálý):

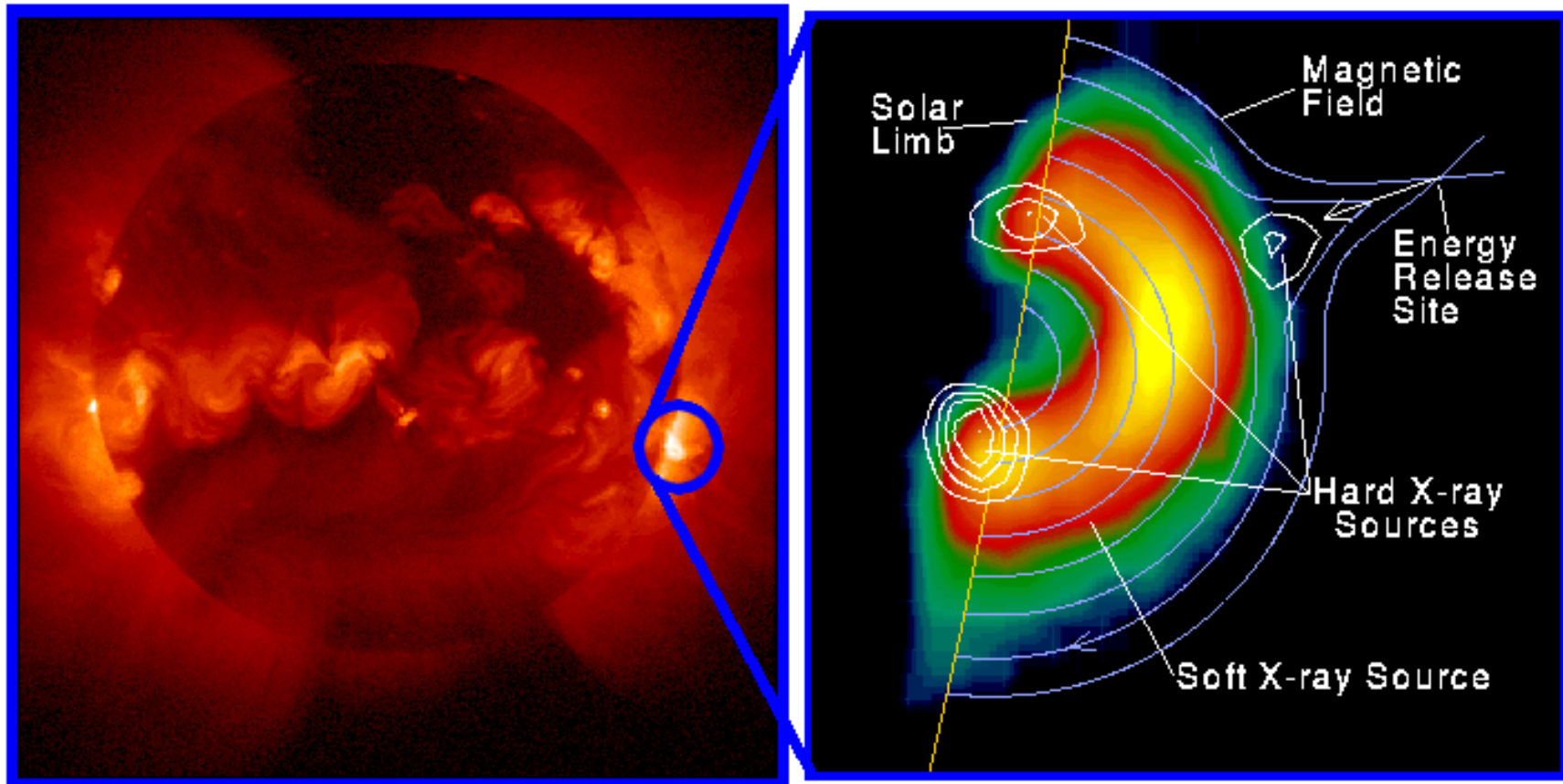
X-point



Kaspová struktura



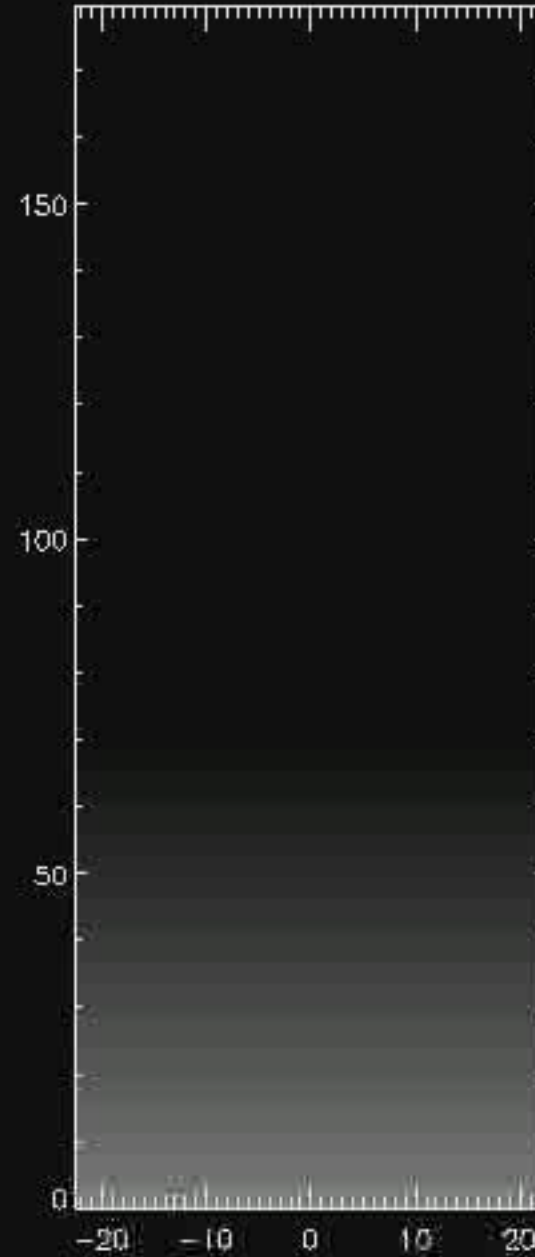
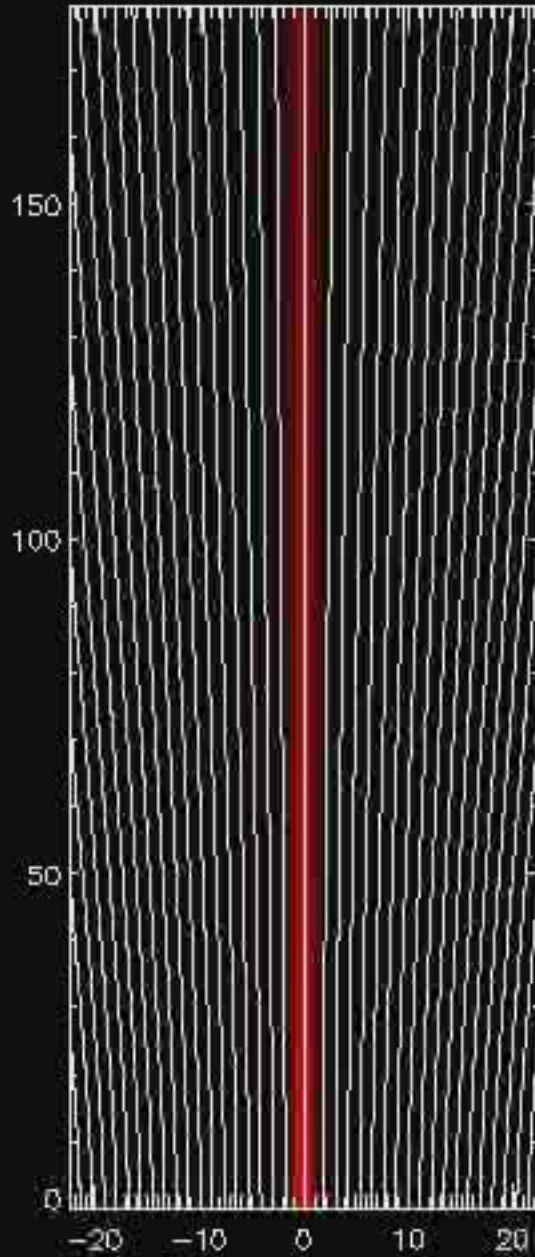
SXR vs. HXR



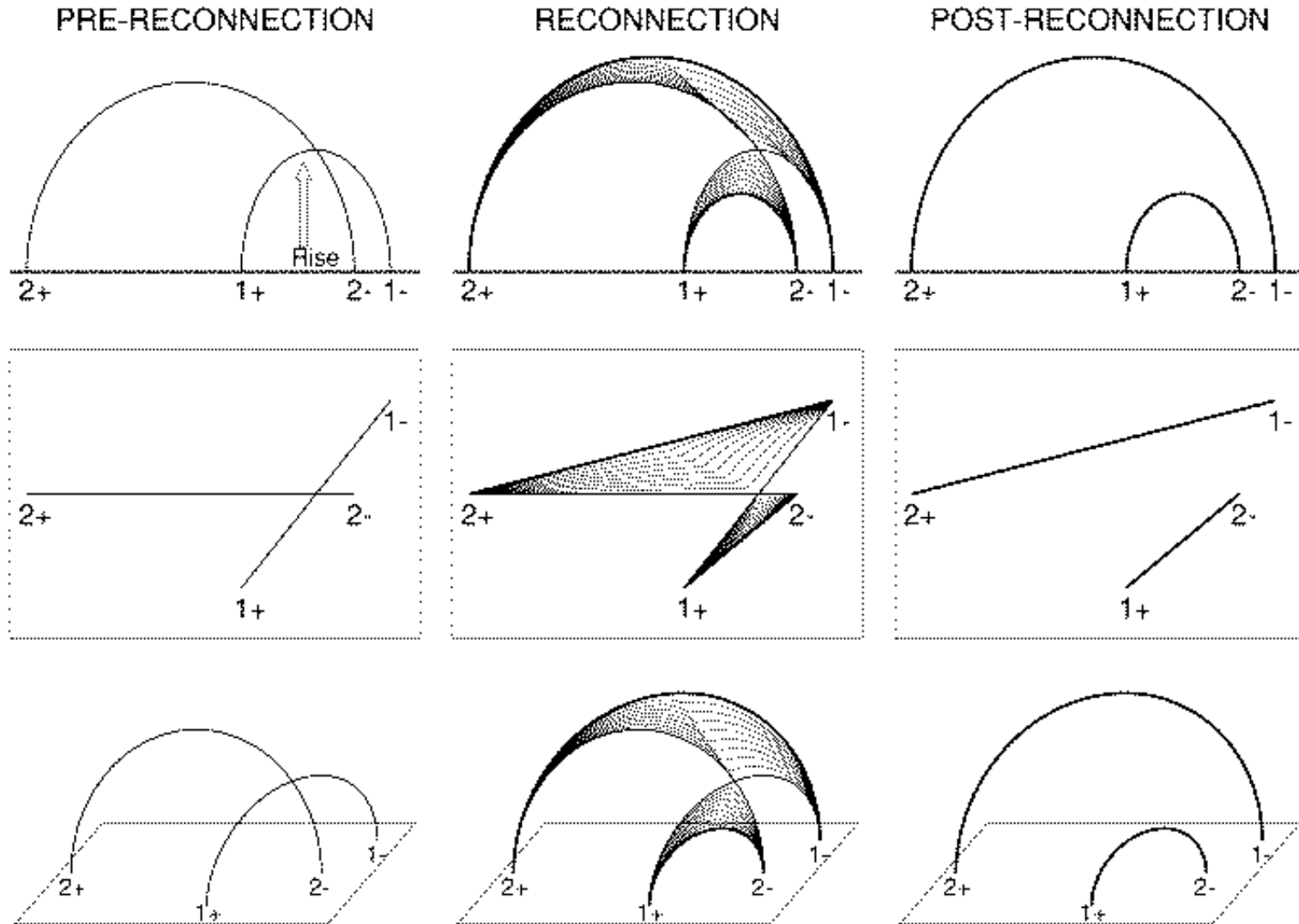
Yohkoh X-ray Image of a Solar Flare, Combined Image in Soft X-rays (left) and Soft X-rays with Hard X-ray Contours (right). Jan 13, 1992.

Simulace rekonexe

Barta & Karlický, 2008



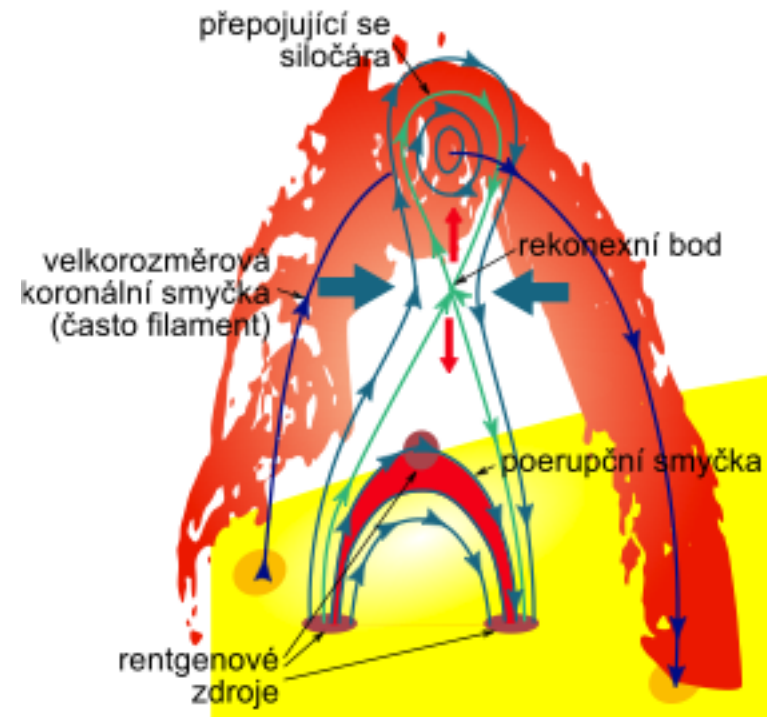
Rekonexe v kvadrupólní konfiguraci



- Odpovídá vynořování nového pole do starého existujícího – konfigurace δ slunečních skvrn

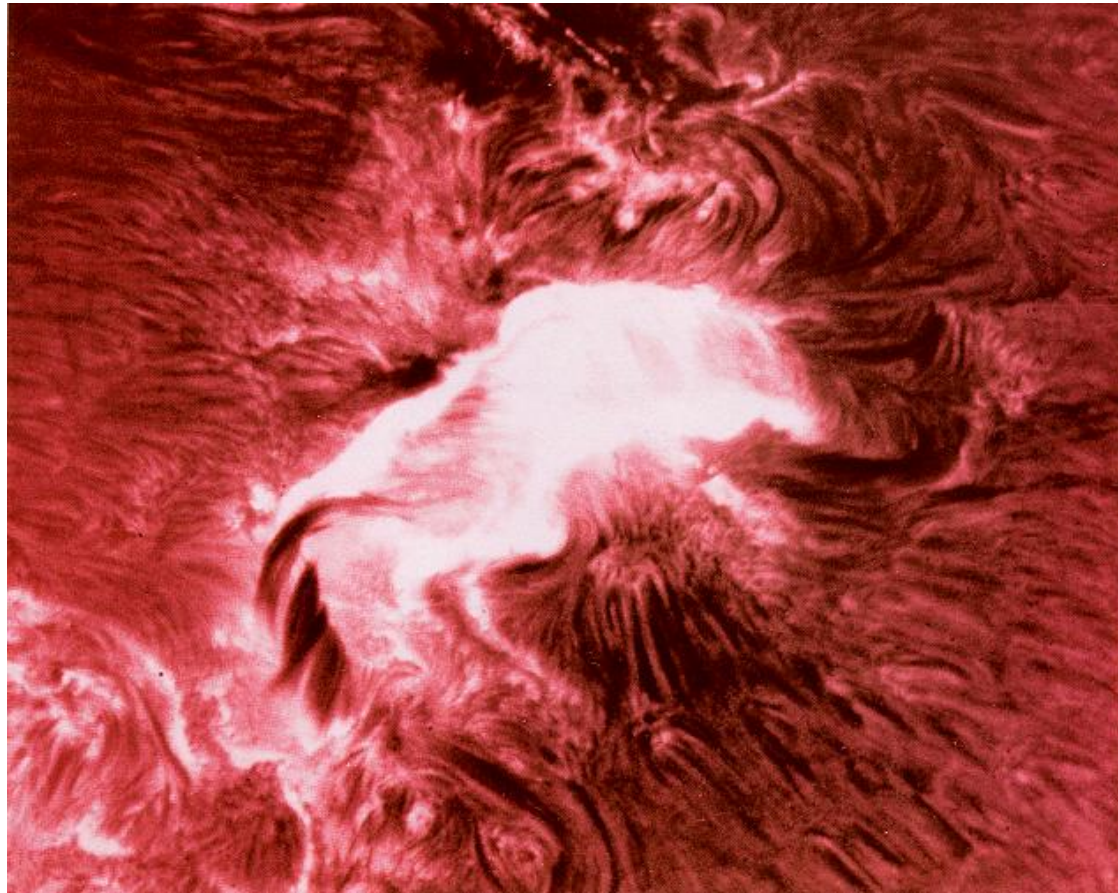
Standardní model sluneční erupce

- CSHKP (Carmichael, Sturrock, Hirayama, Kopp, Penuman) model
- Rekonexe v koróně
- Smyčky v UV a X záření
- Zjasnění v chromosféře jako důsledek bombardování částicemi
 - Vysvětluje filamenty i jejich vzdalování
 - Bílá erupce?
- Post-flare loops
- CME jako průvodní jev?

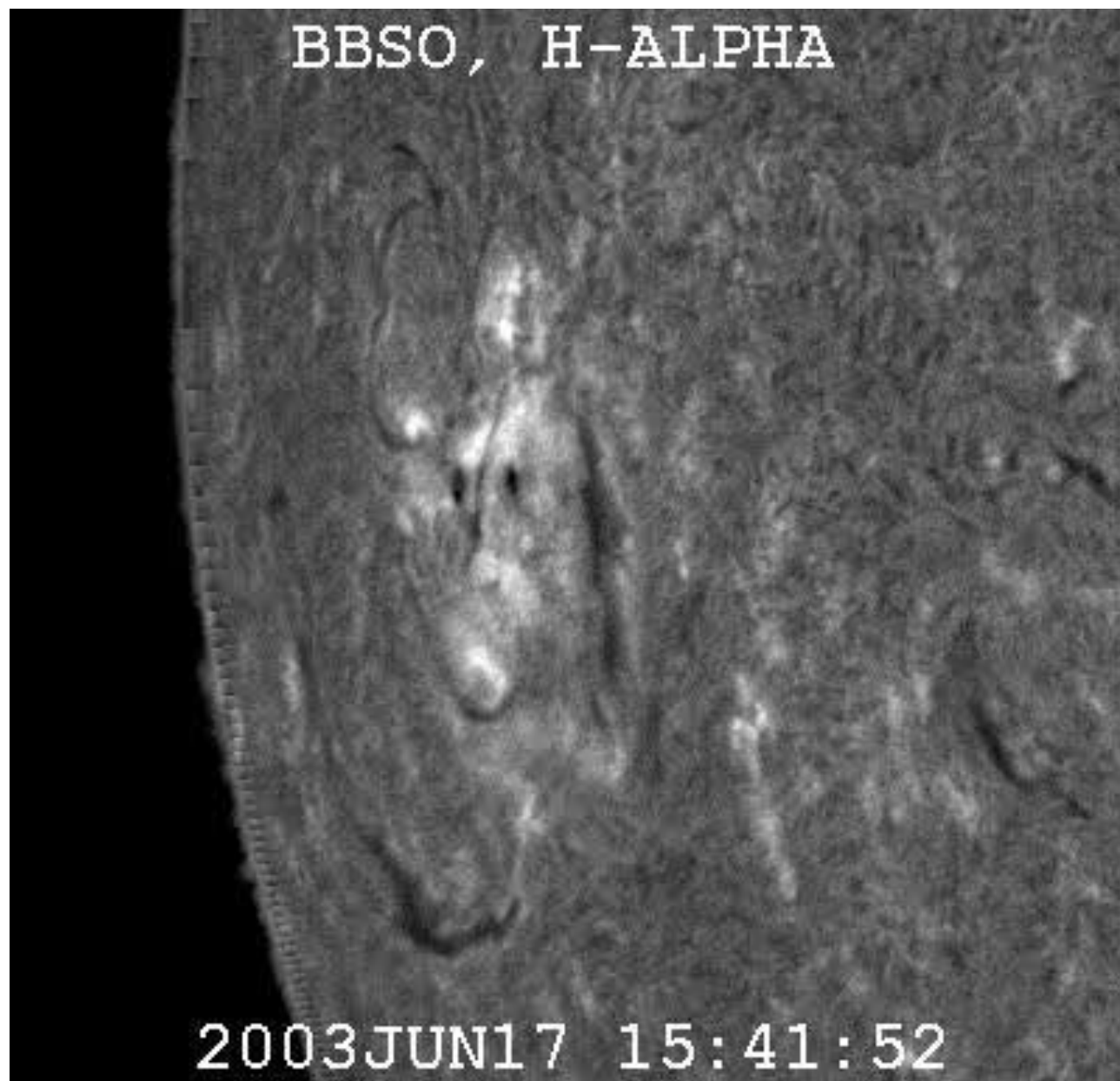


Erupce v H α

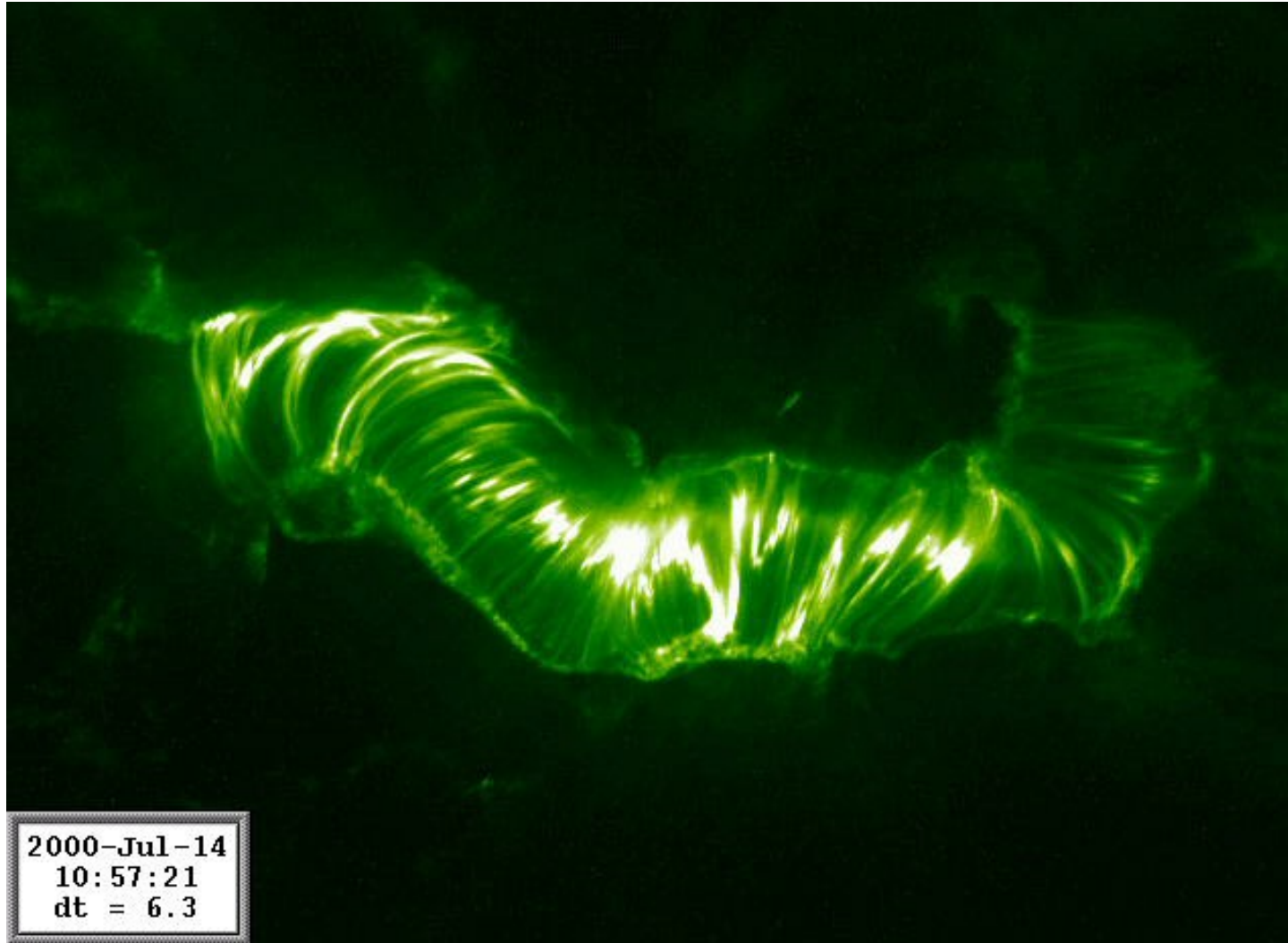
- Zjasnění = ohřev bombardováním částicemi z koróny
- Dvě vlákna – toky podél formujících se poerupčních smyček
- Bílá erupce = bombardování až fotosféry



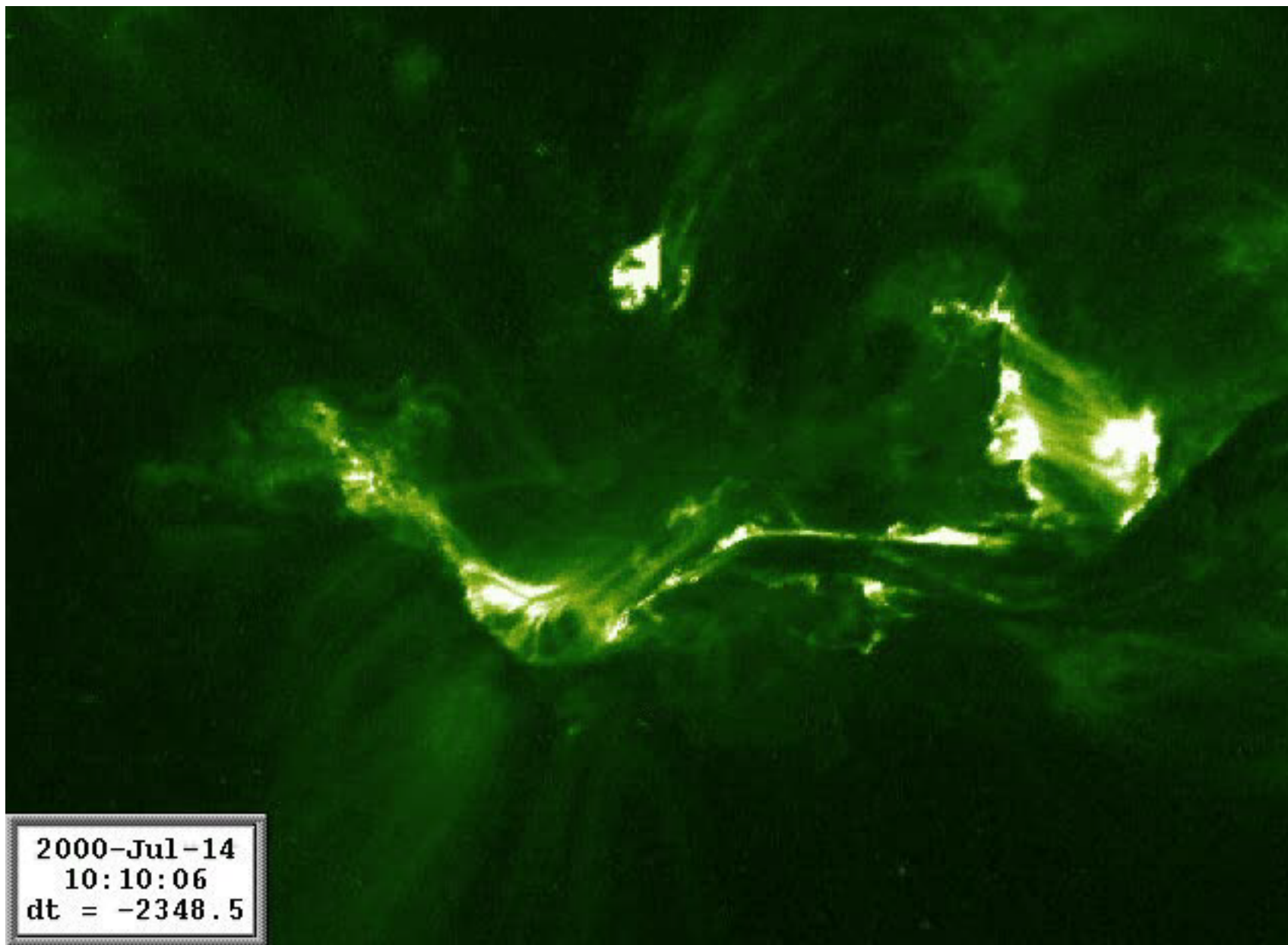
Erupce v H α : animace



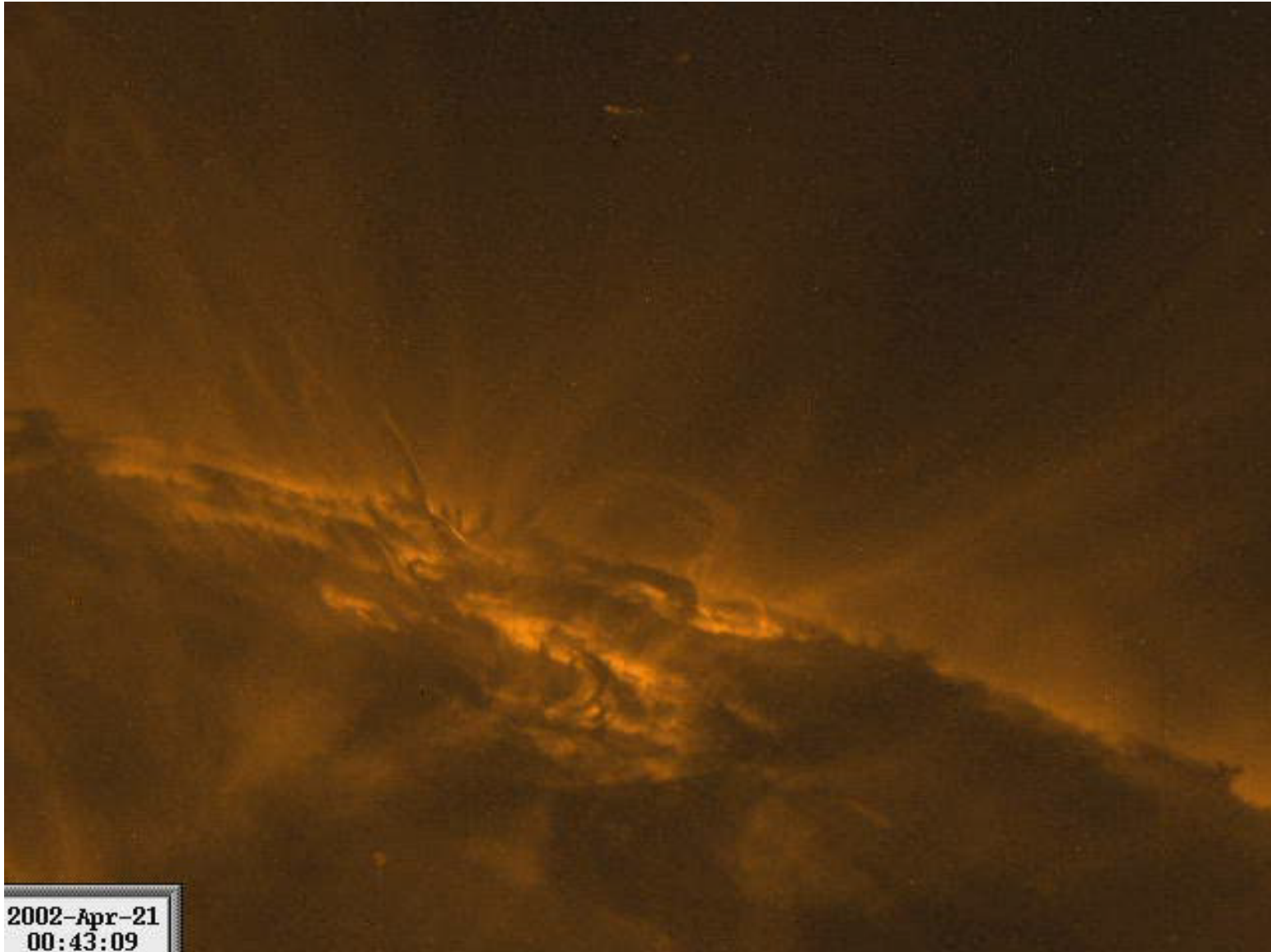
Poerupční smyčky v EIT



Poerupční smyčky: video



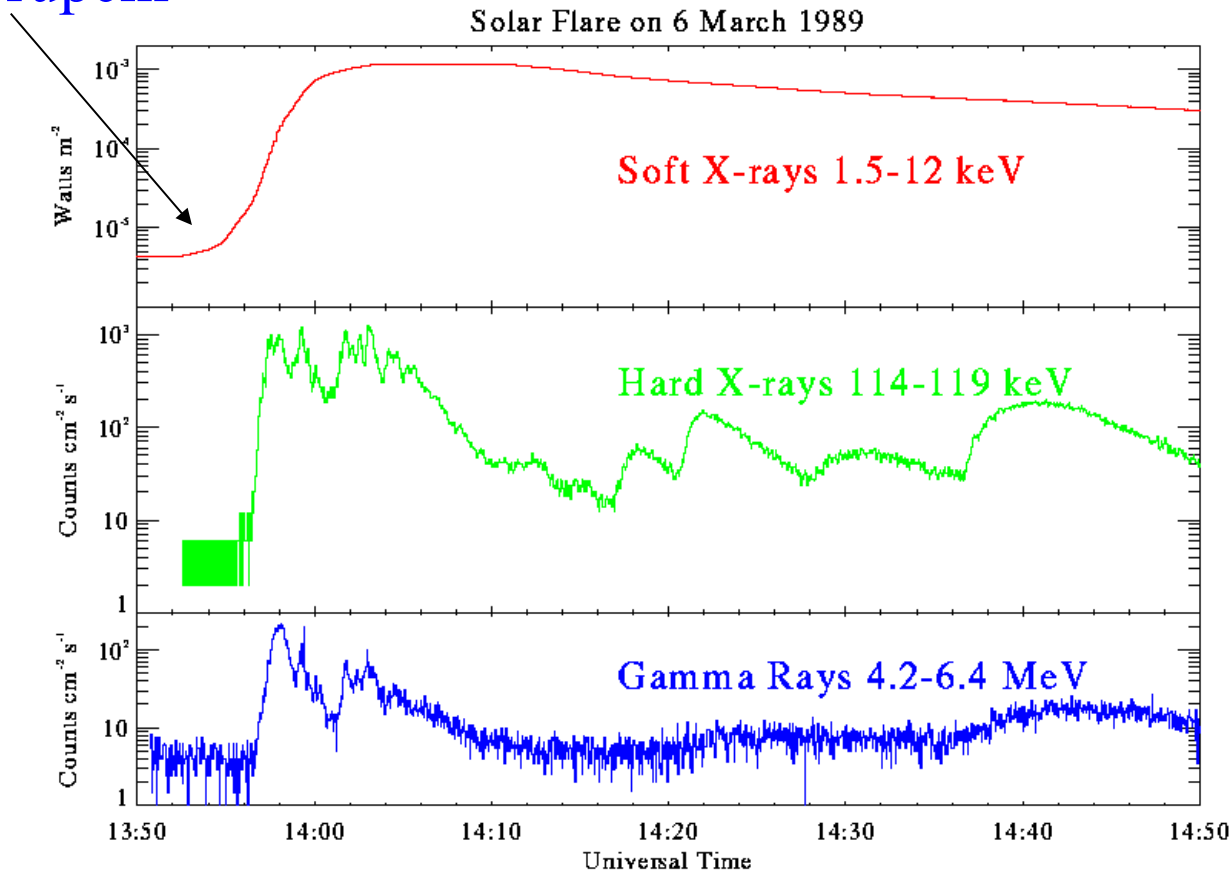
Formace poerupčních smyček: TRACE



2002-Apr-21
00:43:09

Fáze erupce

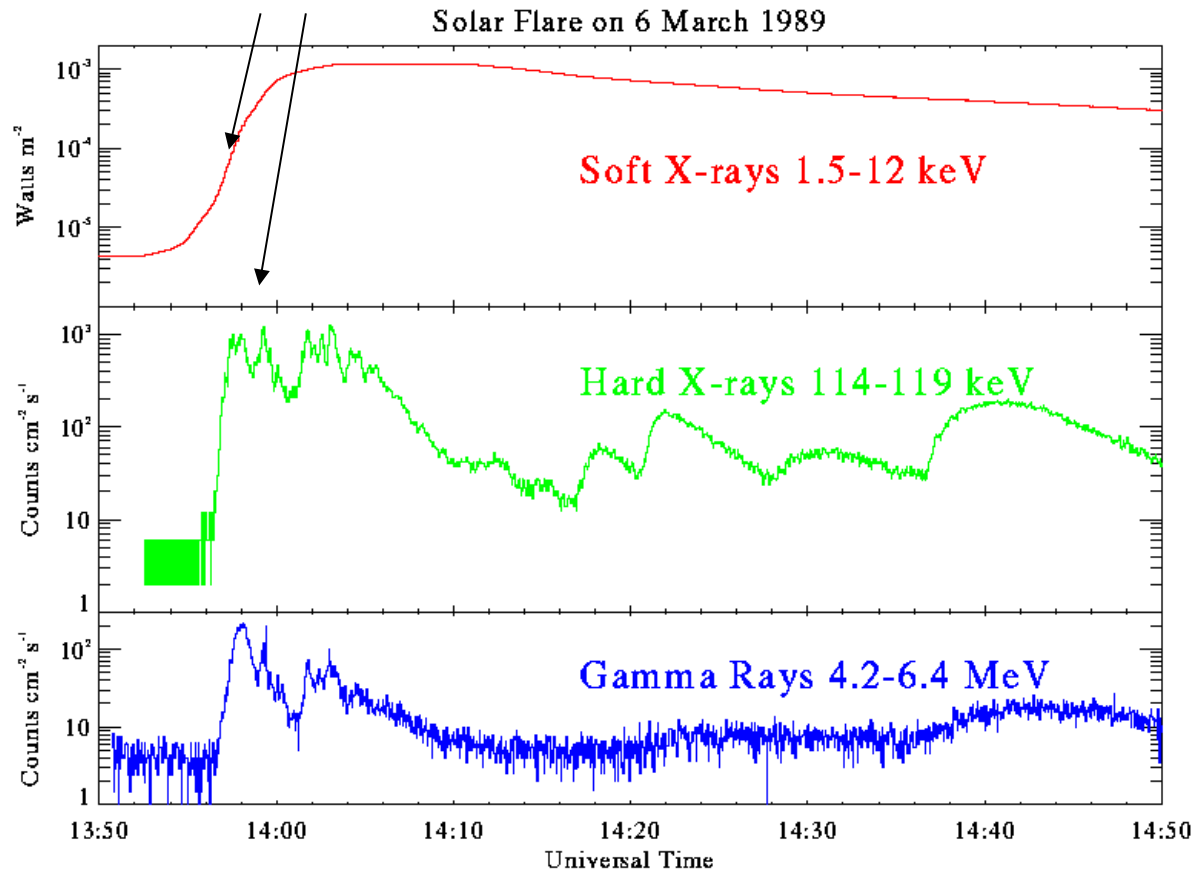
Přederupční



Krátká zjasnění v EUV a SXR, zřejmě aktivace magnetického provazce smyčkovou nestabilitou

Fáze erupce

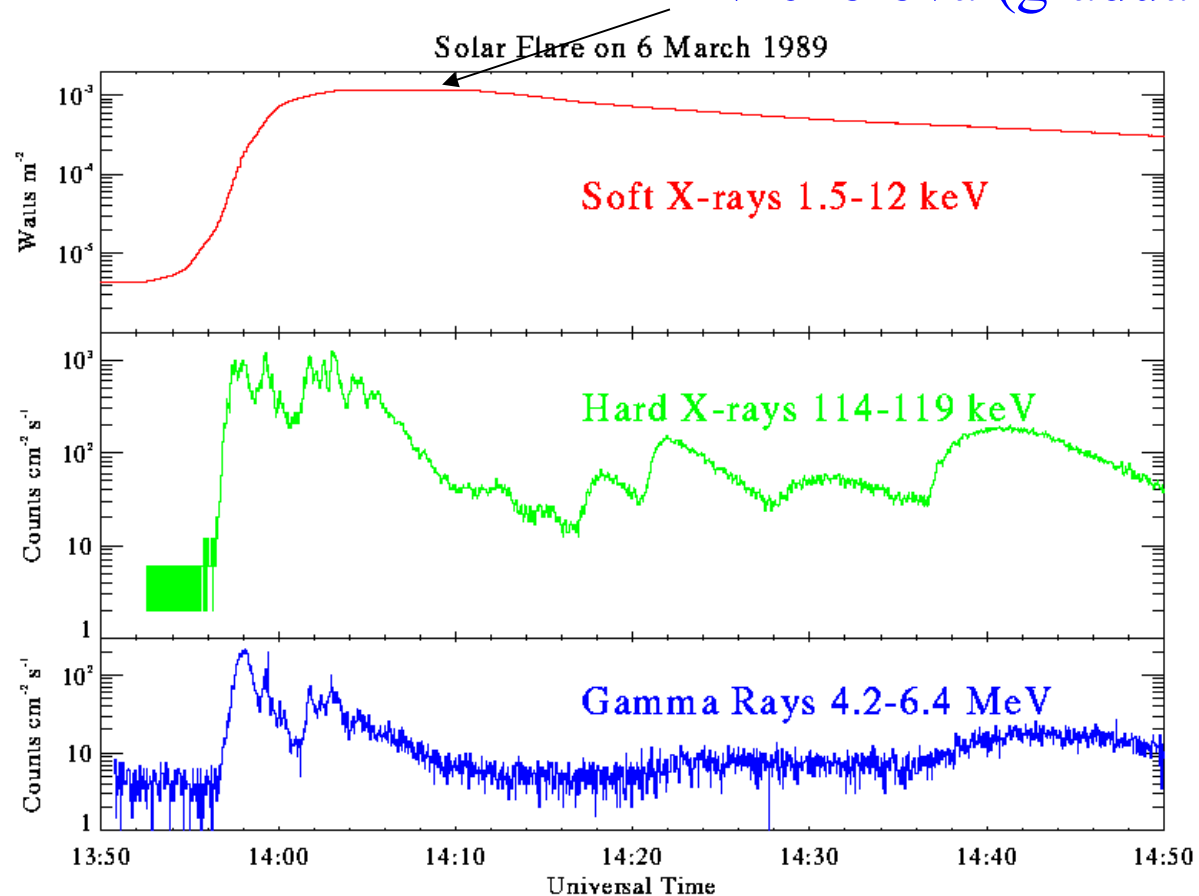
Impulsní



Vertikální pohyb provazce, proudová vrstva, ostrůvková nestabilita, v ostrůvkách probíhá fraktálně rekonexe
Formuje se arkáda poerupčních smyček, chromosféra se vypařuje, formují se chromosférická vlákna

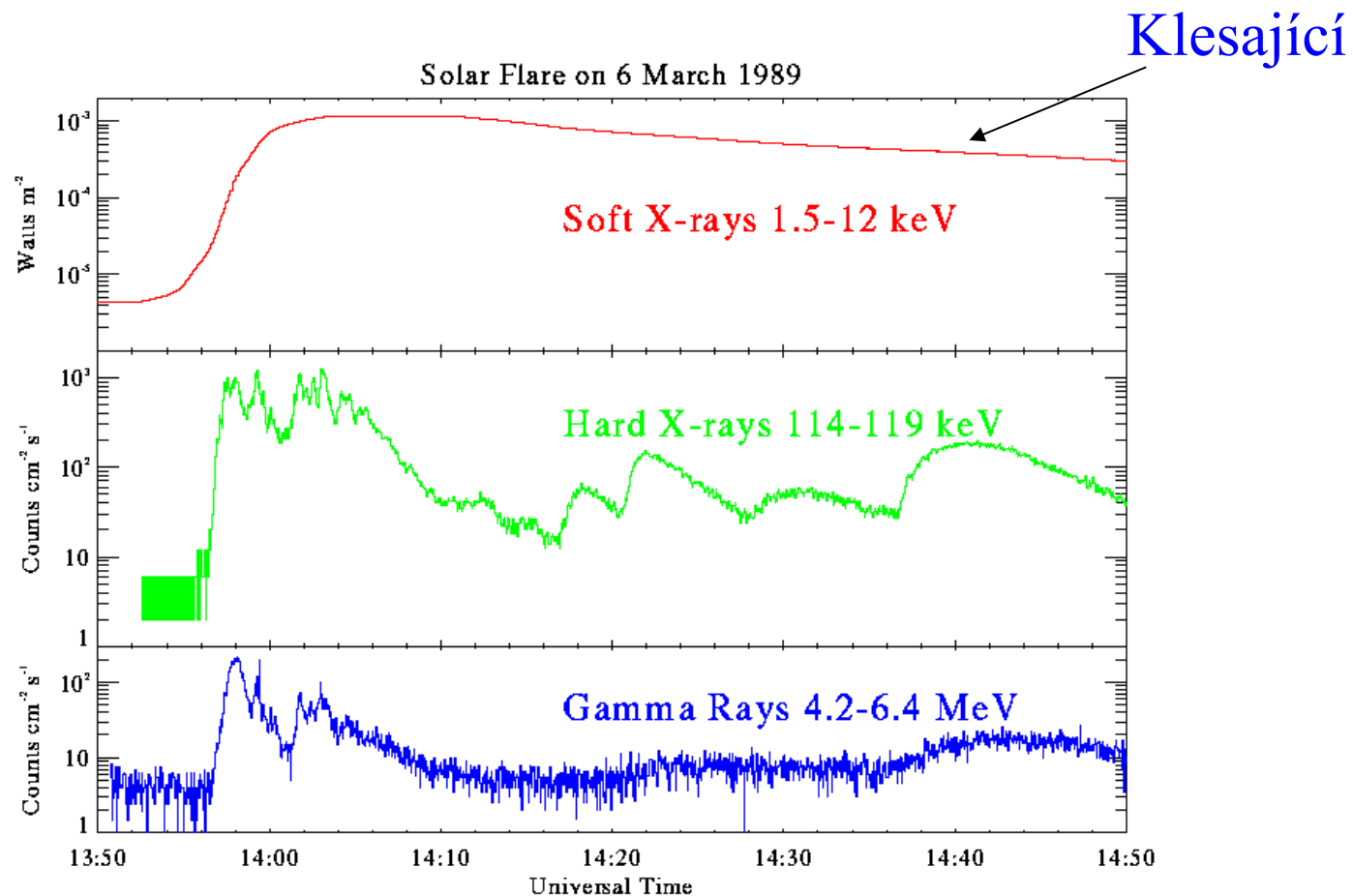
Fáze erupce

Vrcholová (graduální)



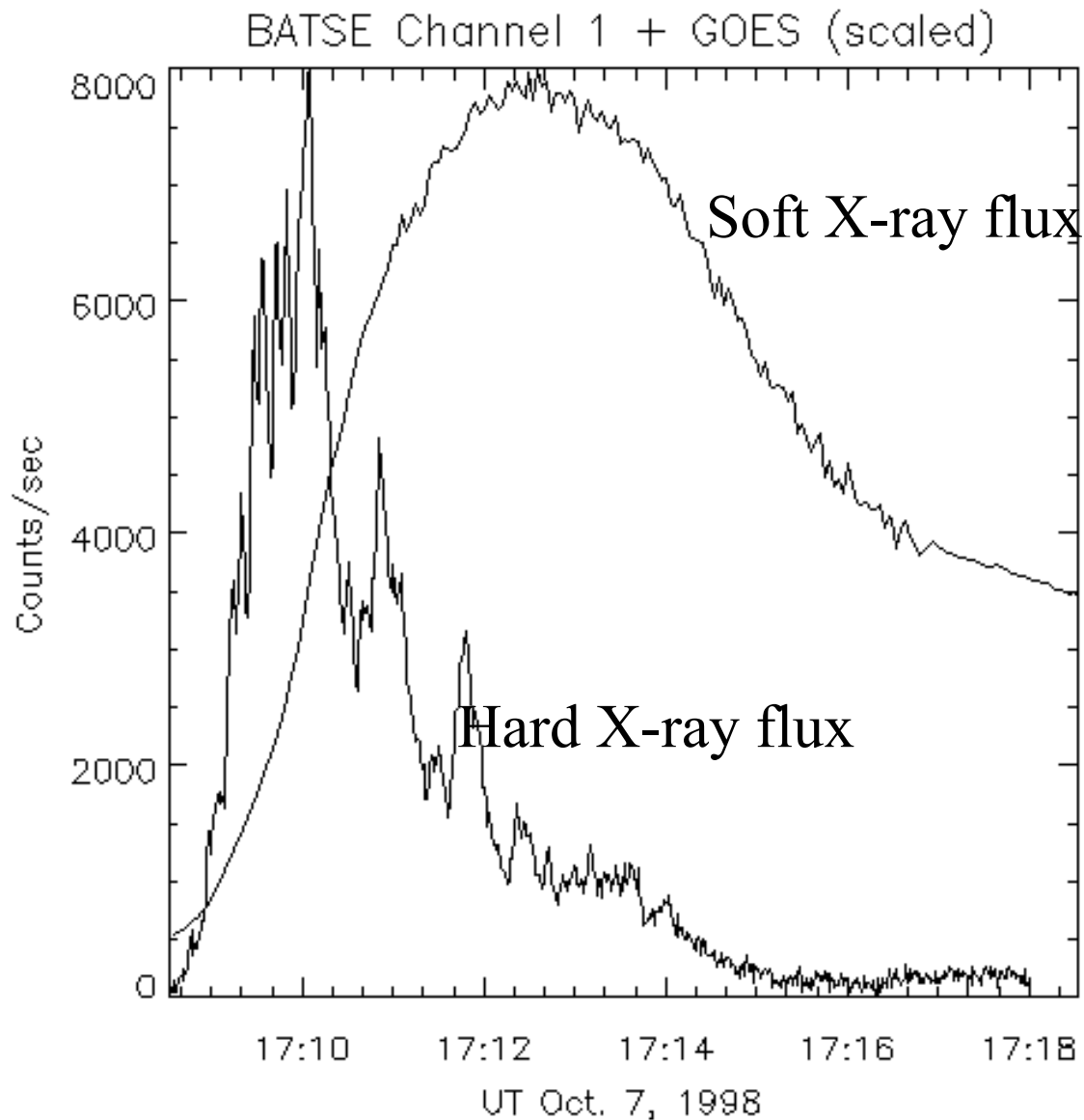
Smyčky postupně odříznuty od rekonexe a svazků, posun dále od neutrální linie. Smyčky začínají chladnout (chladné pod horkými), objevují se v chromosféře (chladné poerupční smyčky)

Fáze erupce



Postupné chladnutí, při teplotě kolem 100 kK křivka zářivých ztrát tenkých čar dosahuje maxima, katastrofické chlazení, odtok plazmatu z arkády poerupčních smyček

Neupertův efekt



- Během rostoucí fáze je SXR tok integrálem centimetrového radiového toku od počátku erupce

- Podobně mezi SXR tokem integrálem HXR toku (HXR i radiová emise relativistickými elektrony)

$$F_{SXR}(t) \propto \int_{t_0}^t F_{HXR}(t') dt'$$

- Pouze pokud není chlazení

Problémy standardního modelu

- Počet netermálních elektronů v erupci: Z HXR emise odhad nutných toků elektronů $\sim 10^{34}$ až 10^{36} s^{-1} . Tedy pro dobu trvání 100 až 1000 sekund nutné počty až 10^{39} elektronů nutných k urychlení. To je skoro počet všech (!) elektronů v koróně
- Transport elektronů z koróny do chromosféry znesnadňován zpětným proudem (důsledek kvazineutrálnosti plazmatu), excitací elektrostatických vln a řady nestabilit
- **Modifikace modelu**
 - Dodatečná akcelerace stochastickými poli
 - Dodatečná akcelerace ve smyčkách s helikálním polem (podél smyčky)
 - Dodatečná akcelerace interakcí s plazmovými vlnami
- **Alternativa** Nositelem nejsou elektrony, ale rázy torzních Alfvénovských vln

Erupce = komplex jevů



Apr 17 2002 23:59:32