

A close-up image of the Sun's surface, showing a large, bright, orange-red protuberance (prominence) on the right side. The word "PROTUBERANCIE" is overlaid in white text across the center of the image.

PROTUBERANCIE

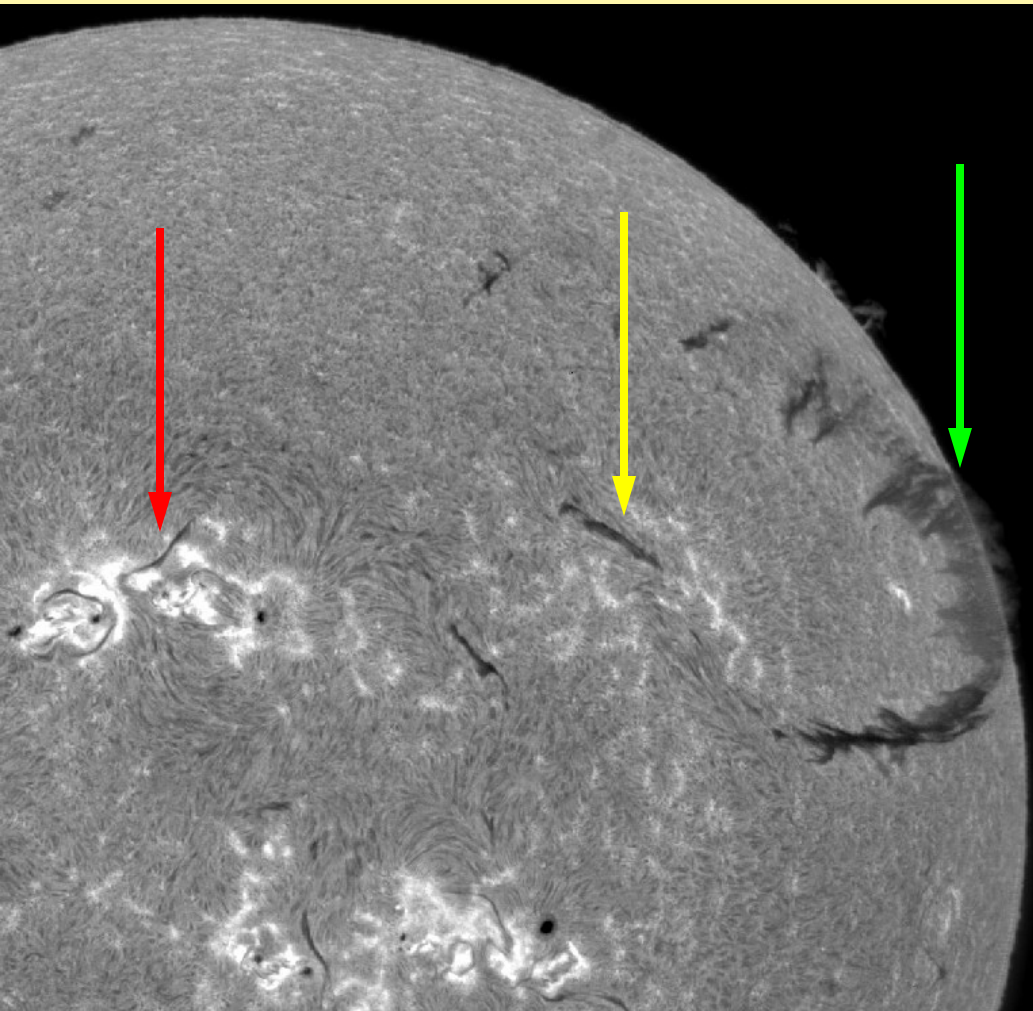


filamenty: tmavé štruktúry premietajúce sa na slnečný disk

protuberancie: žiariace štruktúry nad slnečným limbom

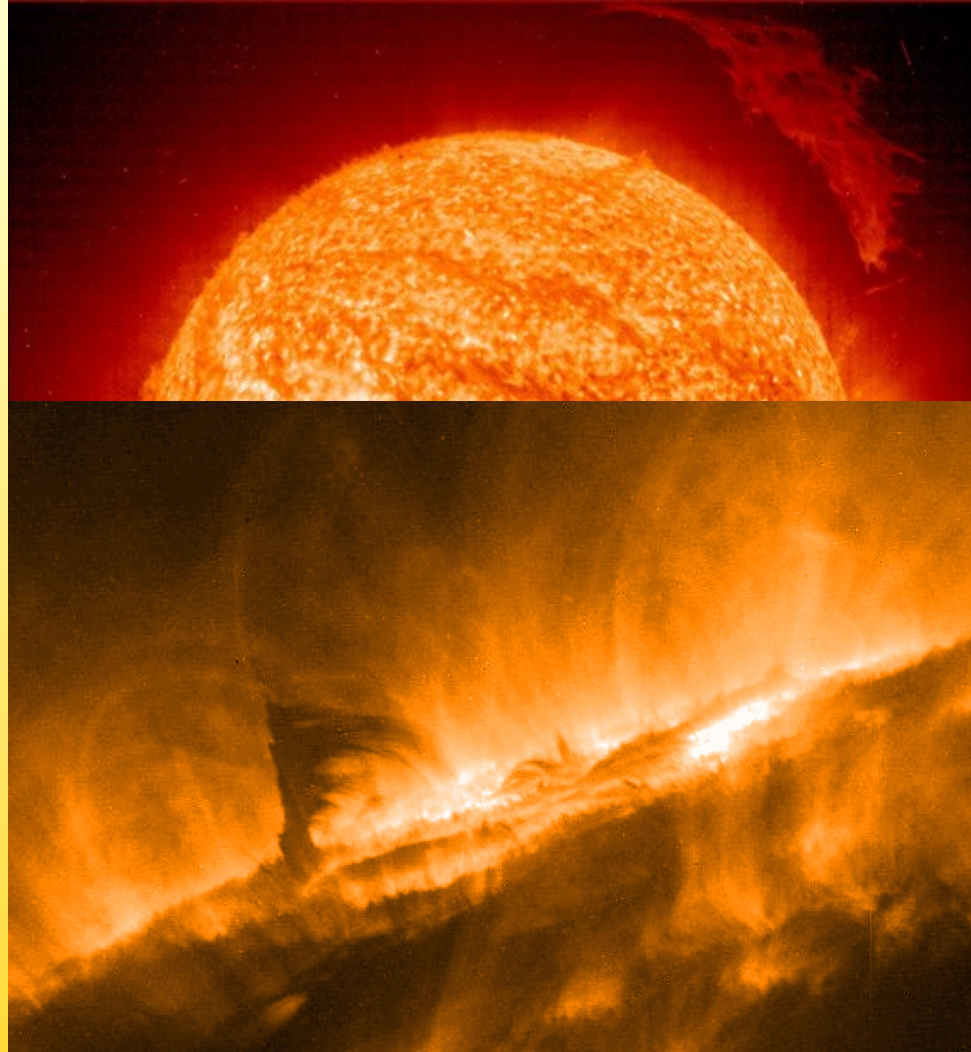
dva názvy pre ten istý útvar!

Pozorovanie: klasicky v H_{α} , prípadne v Ca II K... družicami v EUV



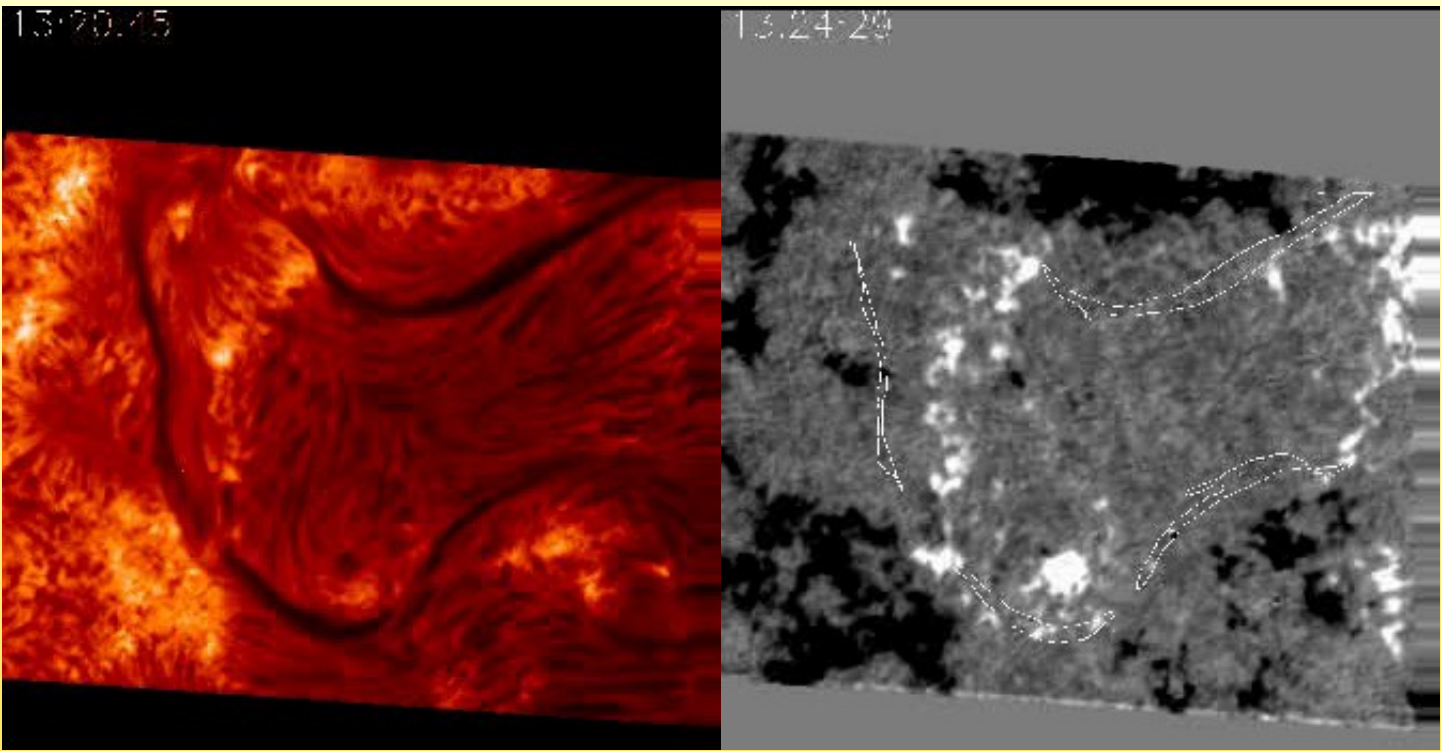
Protuberancie:

- **aktívne** – krátkožijúce, spojené s erupciami a aktivitou - spray, surges, koronálny dážď
- **kludné** - dlhožijúce - polárne filamenty, filamenty zóny škvŕn
- **prechodné** - filamenty nastupujúceho cyklu, filamenty škvŕn.



Nachádzajú sa v **koróne** ($T \sim 10^6 \text{ K}$, $n_e \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$), ale majú pre korónu netypické fyzikálne charakteristiky.

Protuberancie: $T \sim 10^4 \text{ K}$, $n_e \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, teda chladná plazma s nízkym stupňom ionizácie H. Popis emisie: non-LTE model.



Magn. pole (Zeemanov alebo Hanleho efekt):

kl'udné 0.5-40 G, väčšinou 3-8 G, $T \sim 6000$ K, $n_e \sim 10^{10}-10^{12}$ cm⁻³

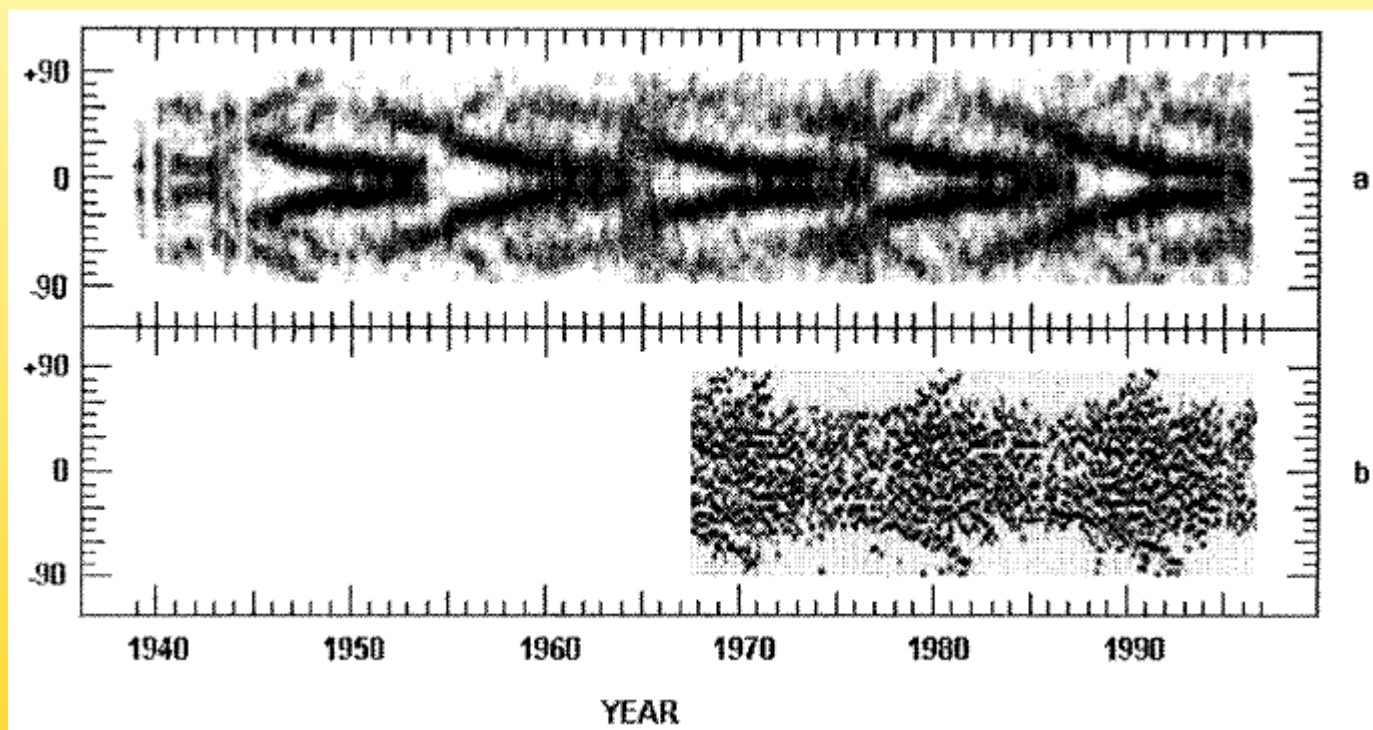
aktívne - až 200 G, obvykle do 100 G.

Ležia v blízkosti tzv. neutrálnej línie magnetického poľa, ale nie všade pozdĺž nej. Indukčné čiary magn. poľa nebývajú kolmé na neutrálnu líniu, ale mávajú sklon okolo 25°.

Vyskytujú sa obvykle v **polárnej korunke**, resp. na **polárnej vetve** alebo v **aktívnych stredných šírkach**.

zelená koróna

protuberancie



Relatívne stabilné útvary, rovnováha medzi gravitačnou a magnetickou silou.

Model filamentu (protuberancie)

...musí vysvetliť

Prenos žiarenia

Prečo a ako emituje žiarenie:
v chromosférických čiarach,
v prechodovej oblasti a v
koronálnych čiarach

Mechanizmus kondenzácie

Môže koronálne plazma
kondenzovať? Ako sa
udržiava nízka teplota plazmy
vo filamente?

**Jemná štruktúra
dynamika?**

Filament a magnetické pole

Väzba medzi magnetickým poľom
a existenciou a erupciou filamentu

Sila pôsobiaca proti gravitácii

Prečo nespadnú a prečo existujú
tak dlho?

Modely magnetického poľa protuberancií

$$P_{\text{protuberancia}} = P_{\text{korona}} \quad n_{\text{prom}} kT_{\text{prom}} = n_{\text{cor}} kT_{\text{cor}} \quad n_{\text{prom}} \gg n_{\text{cor}}$$

protuberancia musí spadnúť $-\nabla p = \rho g$

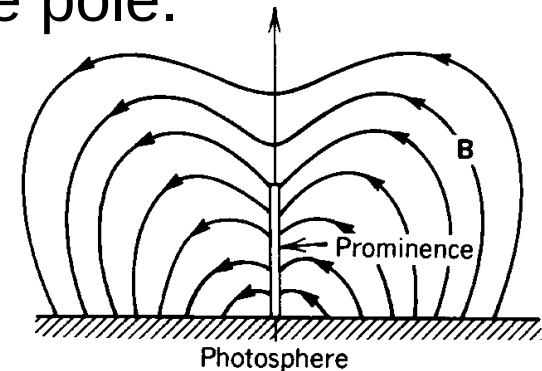
konšt. teda ρ musí byť tiež konšt.

Čo protuberanciu drží v koróne? Magnetické pole.

Dva základné modely:

1. Kippenhahn-Schlüter

2. Kuperus-Raadu



(a)

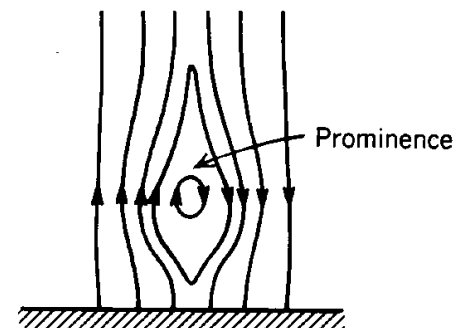


Fig. 10-6 Schematic diagrams illustrating (a) the K-S magnetic geometry, (b) the K-R geometry. Adapted from E. Priest, *Solar Magnetohydrodynamics*, D. Reidel, 1982.

1. Kippenhahn-Schlüter-ov model

$$0 = -\nabla p + \rho g z + j \times B$$

$$\vec{j} \times \vec{B} = \left(\frac{\nabla \times \vec{B}}{\mu} \right) \times \vec{B} = -\nabla \left(\frac{B^2}{2\mu} \right) + \frac{(\vec{B} \nabla) \vec{B}}{\mu}$$

$$\rho = \frac{\mu m_H}{kT} \quad p = \frac{\Lambda}{g} p$$

T, B_x, B_y - konštanty,

$B_z(x), \rho(x)$ - premenné

x-ová zložka: $-\frac{d}{dx} \left(p + \frac{B^2}{2\mu} \right) = 0$, z-ová zložka: $-\rho g + \frac{B_x}{\mu} \frac{dB_z}{dx} = 0$

hraničné podmienky: pre $x \rightarrow \pm \infty$ $p \rightarrow 0$ $B_z \rightarrow \pm B_{z\infty}$

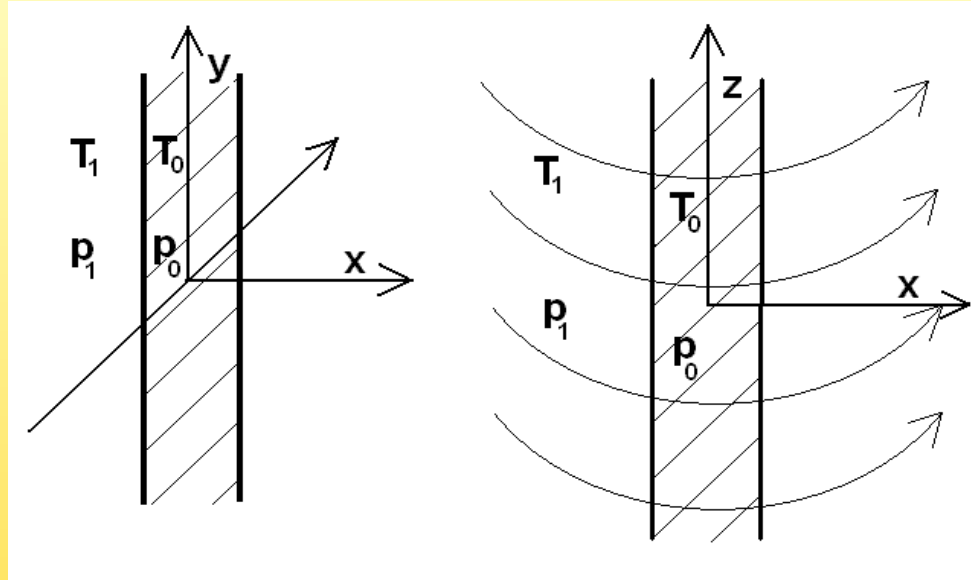
pre $x = 0$ $B_z = 0$

z rovnice pre x : $p + \frac{B^2}{2\mu} = \text{const.} = \frac{B_{z\infty}^2}{2\mu}$ resp. $p = \frac{B_{z\infty}^2 - B_z^2}{2\mu}$

Do rovnice pre z dosadíme za ρ :

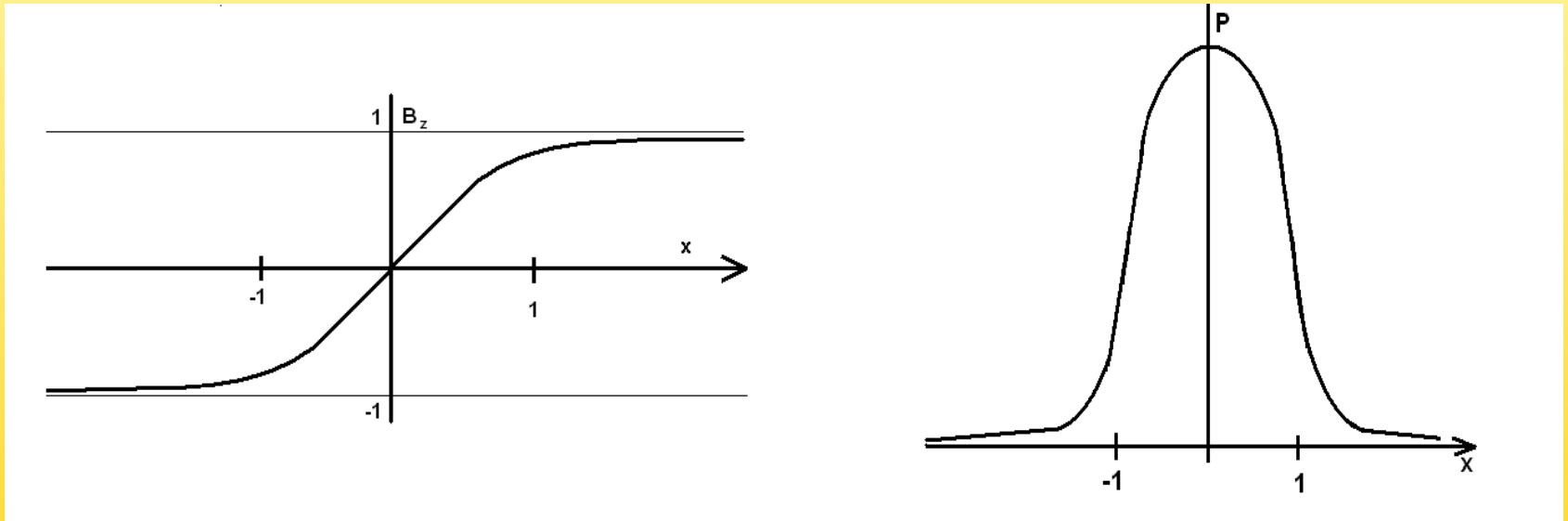
$$\Lambda \frac{B_{z\infty}^2 - B_z^2}{2\mu} + \frac{B_x}{\mu} \frac{dB_z}{dx} = 0$$

Riešením je: $\frac{B_z}{B_{z\infty}} = \text{tgh} \left(\frac{B_{z\infty}}{B_x} \frac{x}{\Lambda} \right)$



Pre tlak dostaneme vzťah:

$$p = \frac{B_{z\infty}^2}{2\mu} \left(1 - \operatorname{tgh}^2 \left(\frac{B_{z\infty}}{B_x} \frac{x}{\Lambda} \right) \right)$$



B_y má len pasívnu úlohu.

Predpoklad, že pre $x \rightarrow \pm \infty$ platí $p \rightarrow 0$, je nerealistický.

Ide o jednorozmerný model s $T = \text{konšt.}$!

2. Kuperus-Raadu-ov model

prúdová vrstva, odpudivá sila medzi dvoma vodičmi

sila: $\frac{\mu I^2}{4\pi h}$, kde $I = \frac{2B_\phi R\pi}{\mu}$

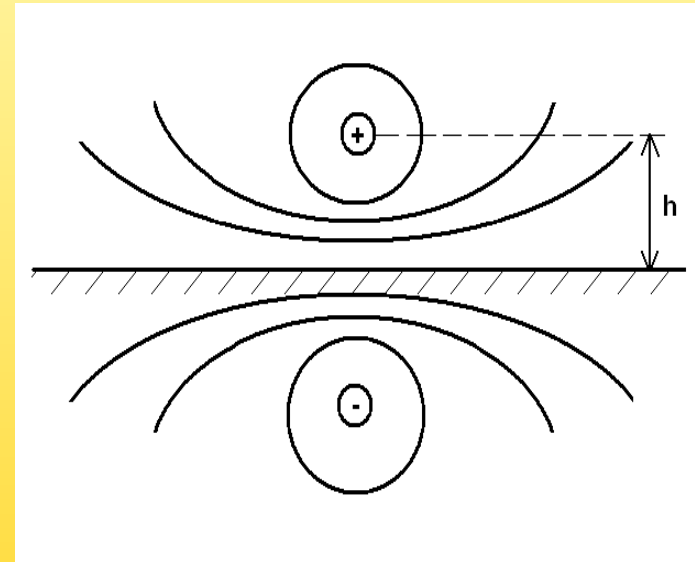
Platí $\frac{\mu I^2}{4\pi h} = \rho g$, resp. $\frac{B_\phi^2 R^2 \pi}{\mu h} = \rho g$

Pre $\rho \approx 10^{-10} \text{ kgm}^{-3}$ a $h \approx 10^5 \text{ km}$ dostávame $B_\phi \approx 6G$

Merania smeru magnetického poľa ukázali, že

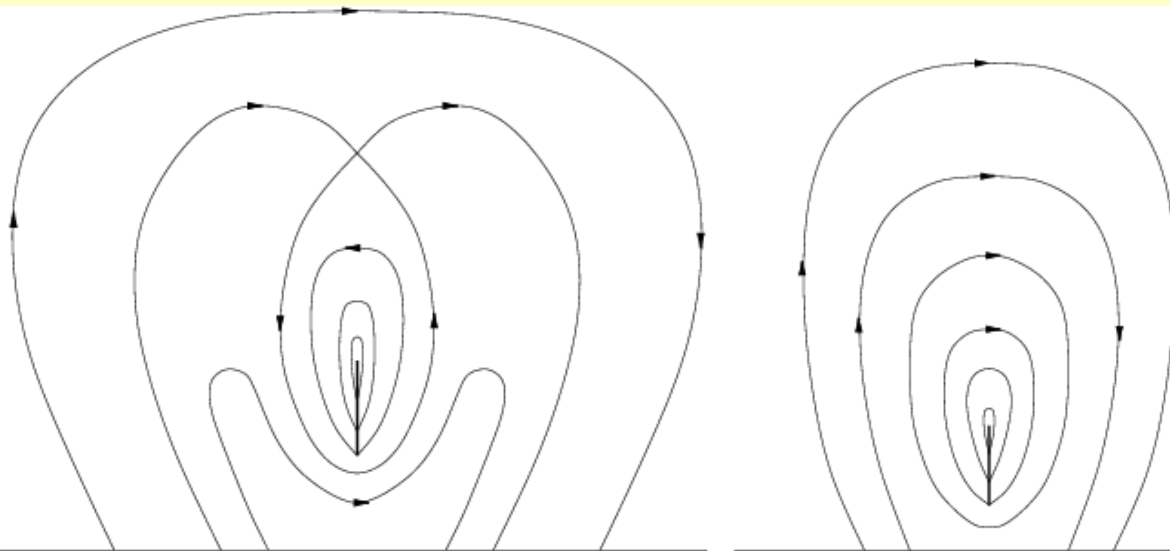
25 % K-S

75 % K-R

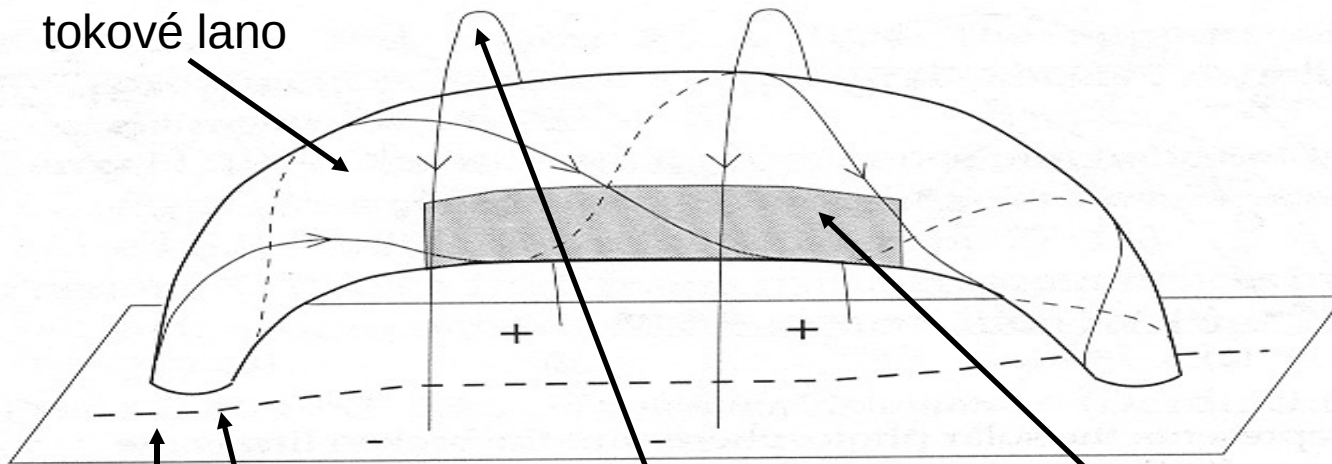


Modifikácie
2-D modelov...

OF, OX
topológie



tokové lano



3-D model
tokové lano

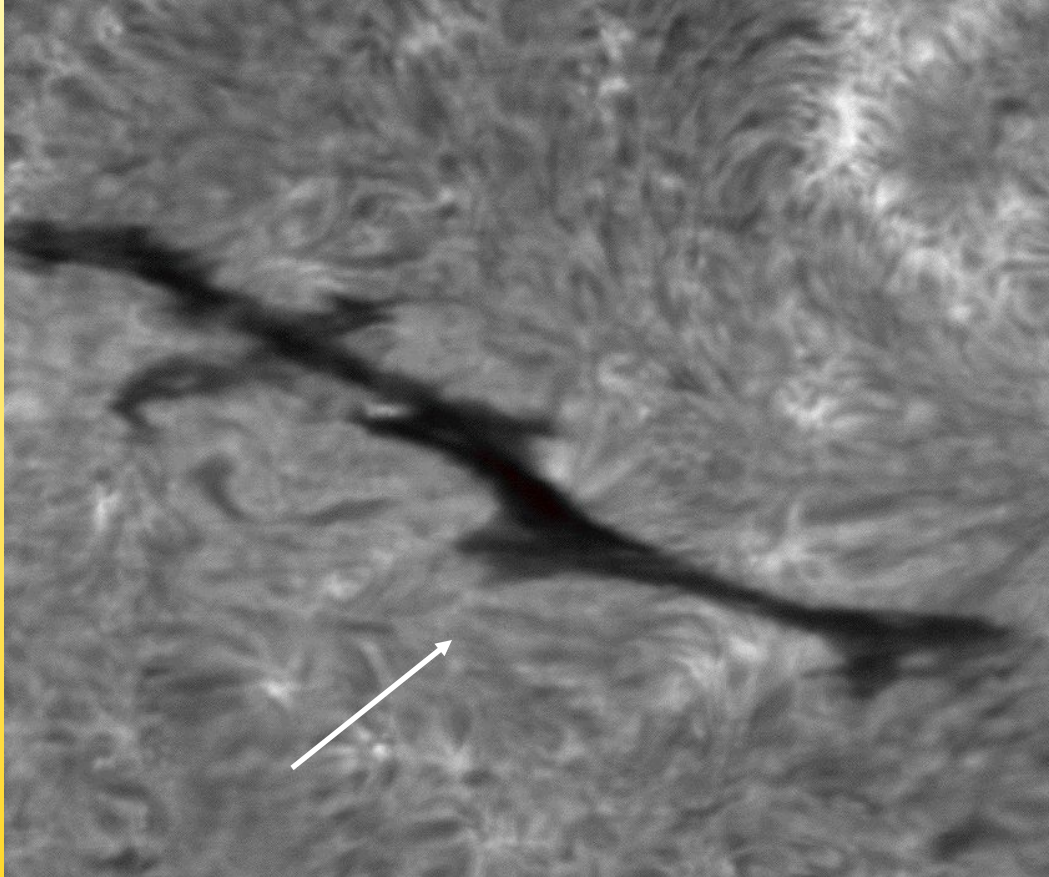
ukotvenie
tokového lana

potenciálová
arkáda

Neutrálna línia

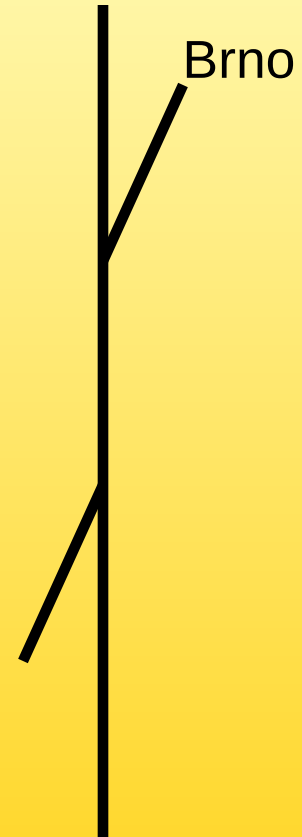
filament / protuberancia =
= plazma skondenzovaná
v magnetických jamkách
tokového lana

Nohy filamentu a chiralita

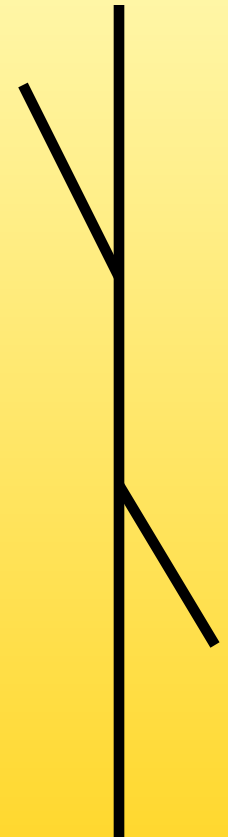


Nohy filamentu - bočné výčnelky
Vždy sú v blízkosti parazitickej polarity

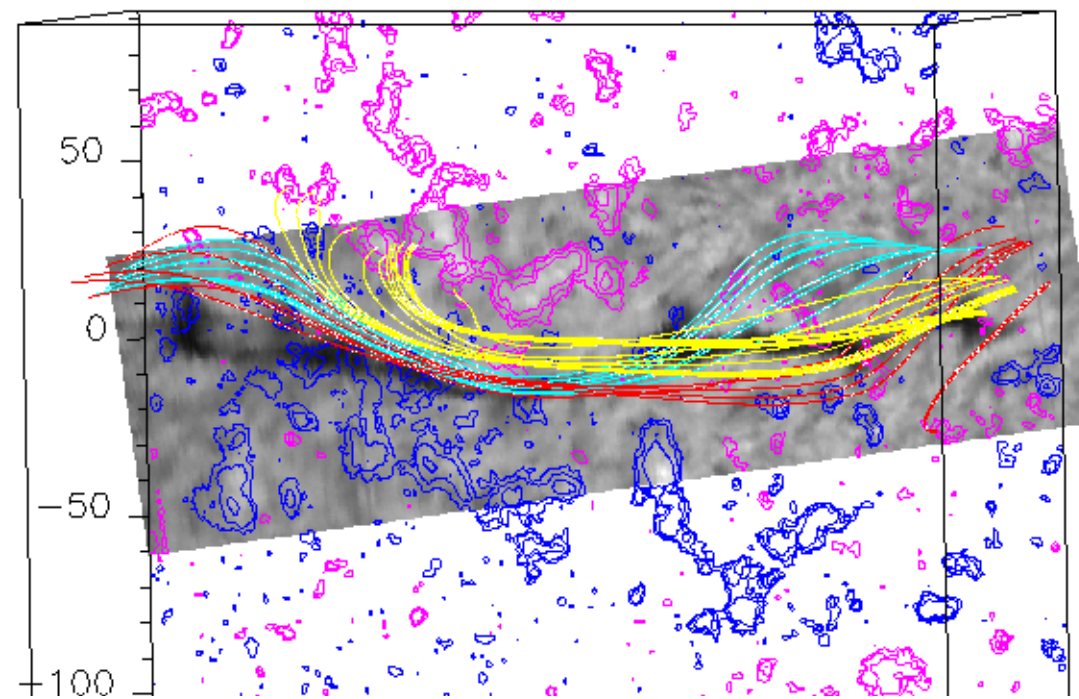
Praha



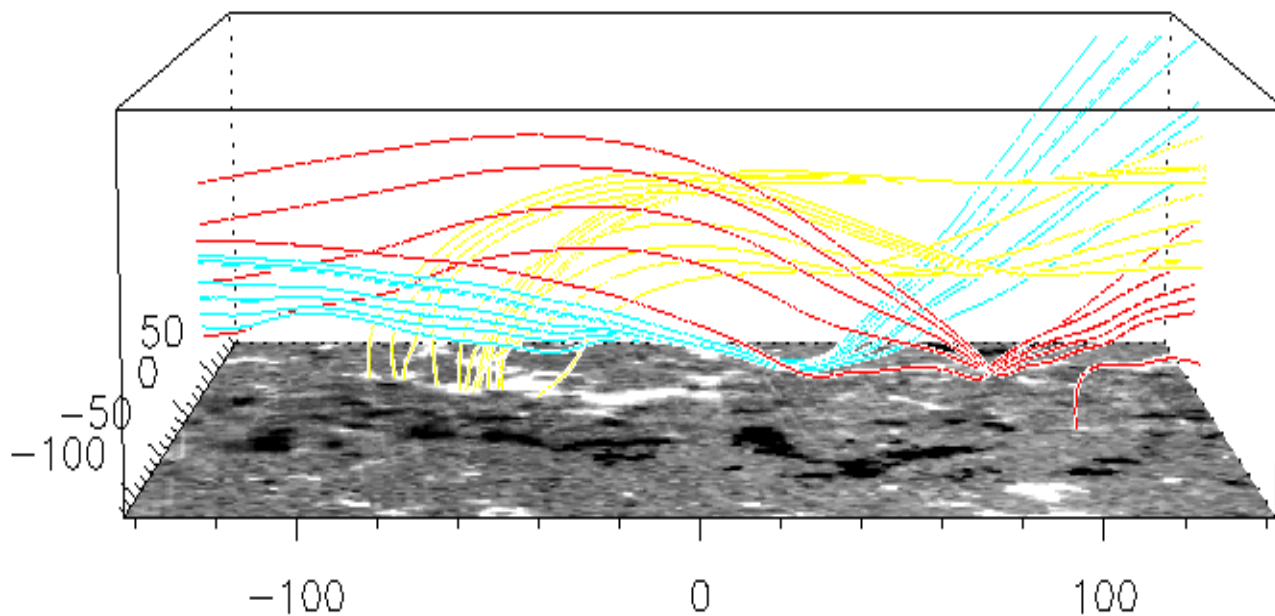
Bratislava



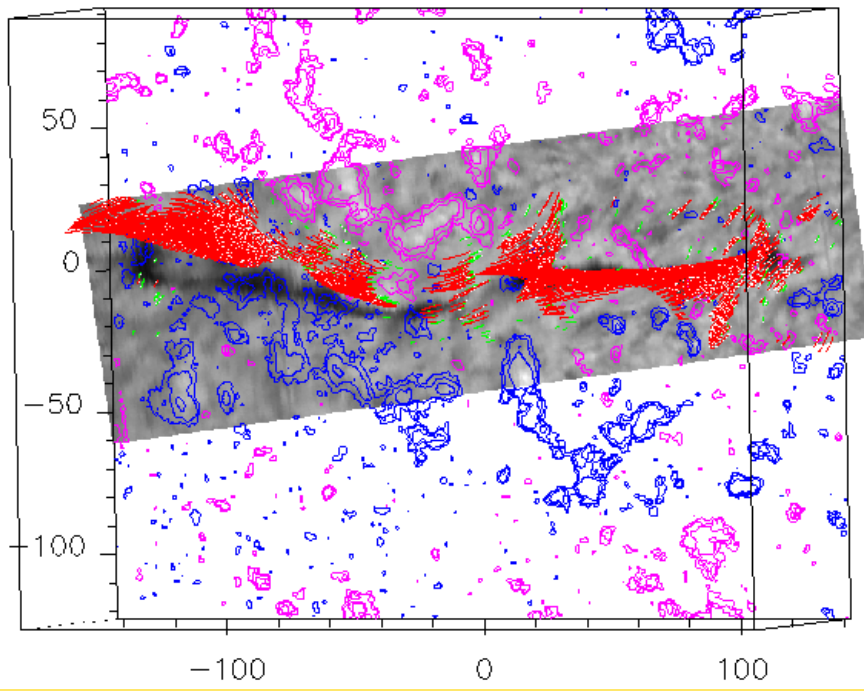
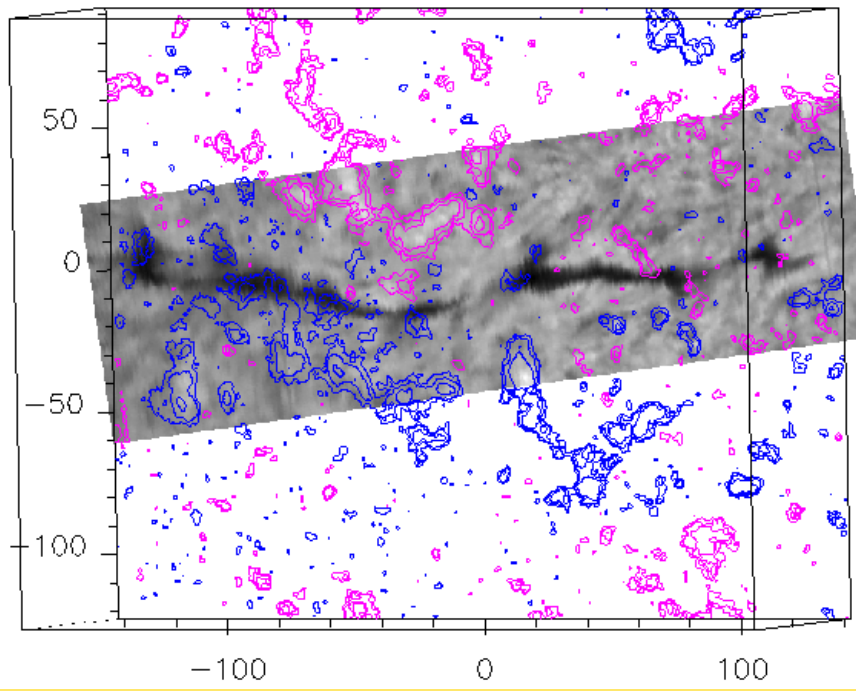
(anglická
diaľnica)



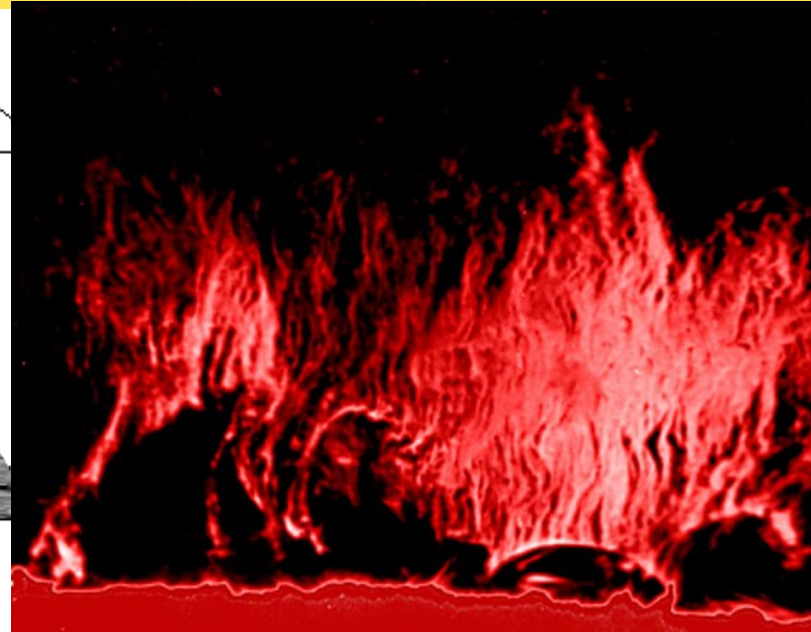
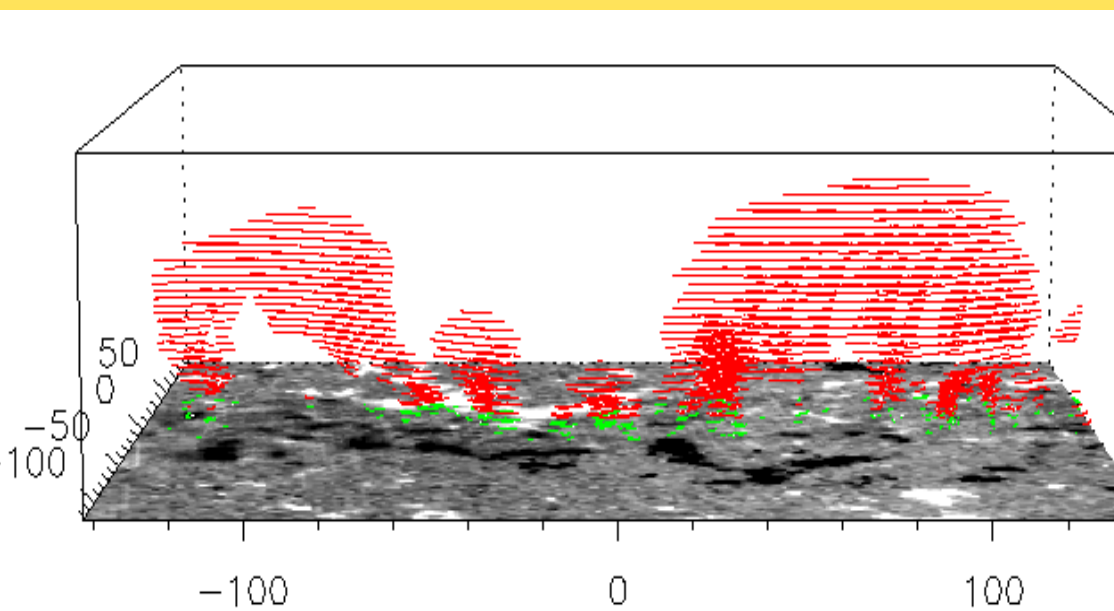
model tokového lana filamentu



- žltá: ukotvená časť
- modrá: ľavá noha
- červená: centrálna noha

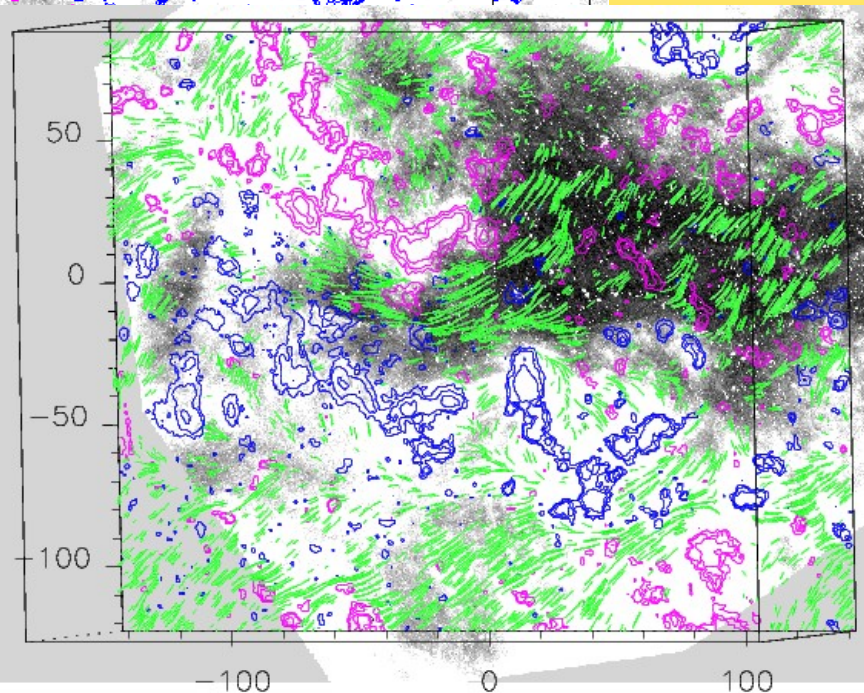
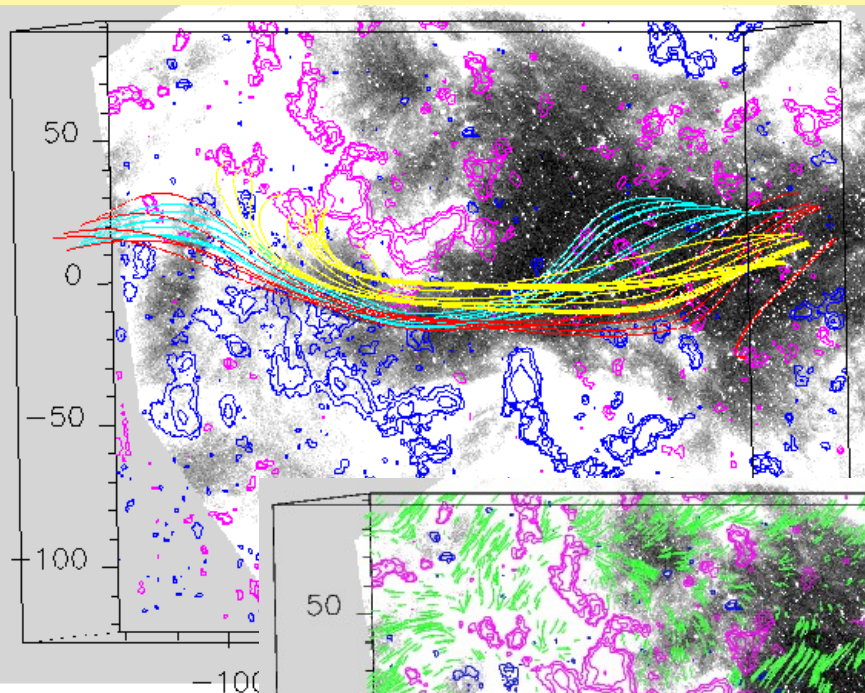


Distribúcia magnetických jamiek



EUV filamentárny kanál

je podstatne rozsiahlejší ako samotný filament



saturované
pozorovanie
TRACE
171 Å

Dobrý priestorový súlad medzi
tvorom tokového lana a
tmavou oblasťou v TRACE \Rightarrow
koronálna kavita

Pomerne dobrý súhlas medzi
polohou nízkoležiacich
magnetických jamiek
a najtmavšími plochami

Vysvetlenie:

Absorpcia chladnou plazmou
v magnetických jamkách
alebo
neprítomnosť horúcej zložky
koróny

Spektrum

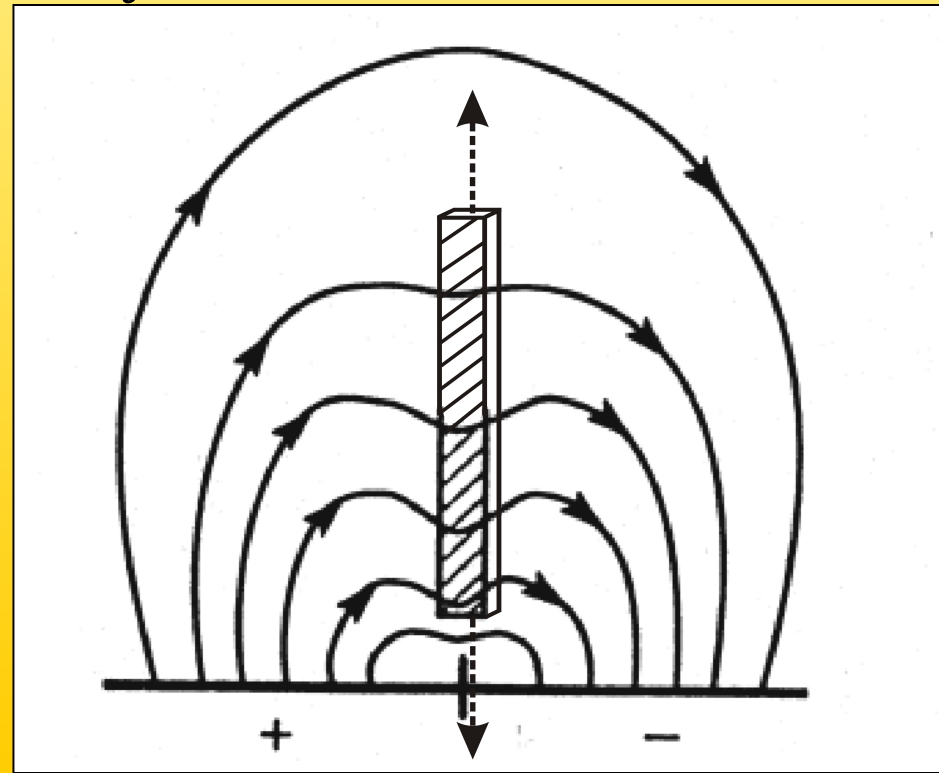
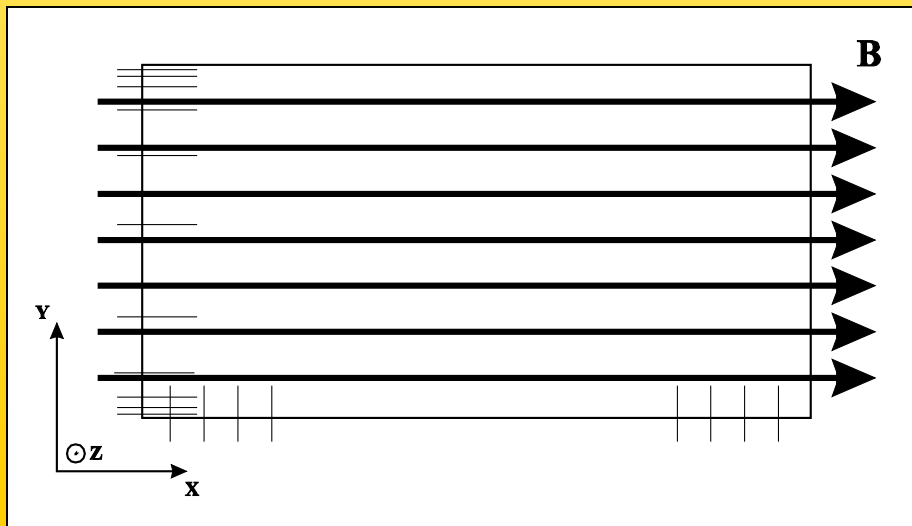
Pozorovacie dáta: spektrum (podobné chromosfére),
optické, EUV, hlavne čiary H

Na disku: absorpčné profily, na limbe: emisné, mnohé
vykazujú samoabsorpciu (v závislosti na τ).

V súčasnosti – non-LTE modely, $S_\nu = f(p, T, x, y, \nu)$

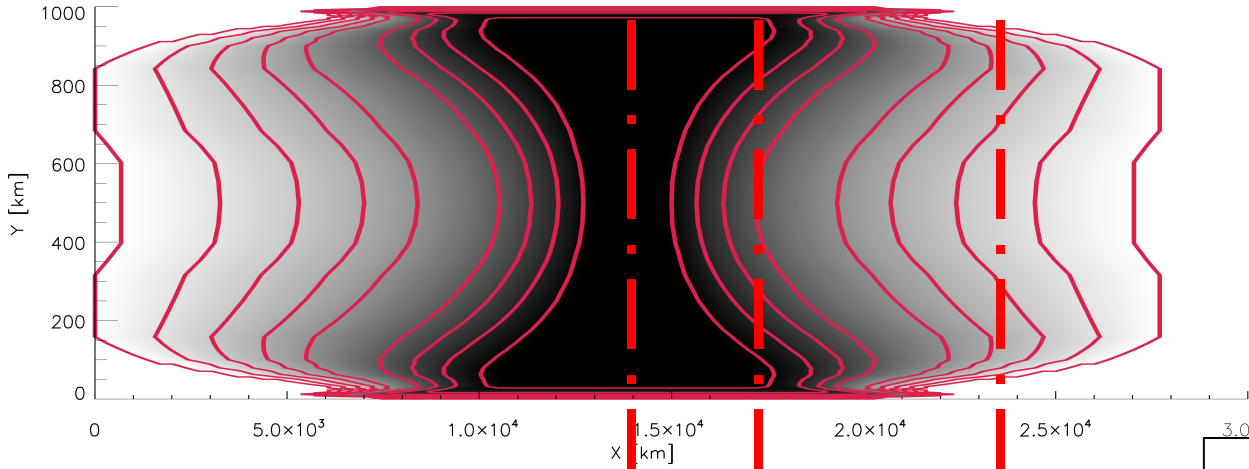
rovnice štatistickej rovnováhy

$$I_\nu = \int S_\nu e^{-\tau_\nu} d\tau_\nu$$



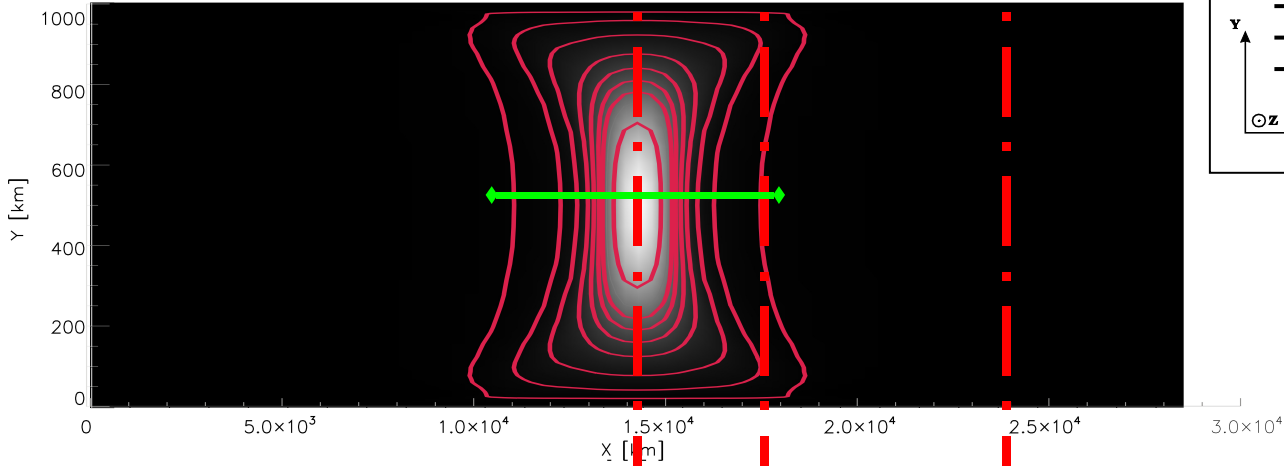
Variácie teploty a hustoty v rovine x-y

Temperature

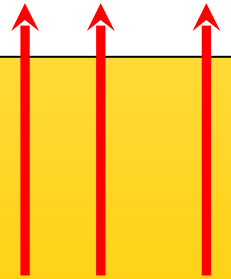
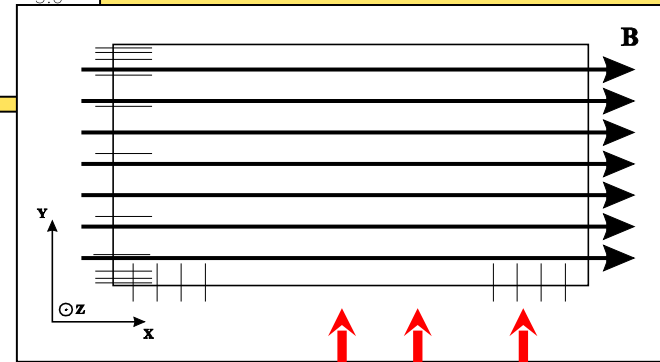
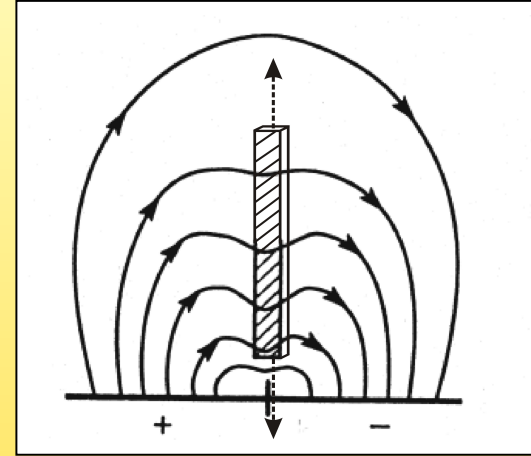


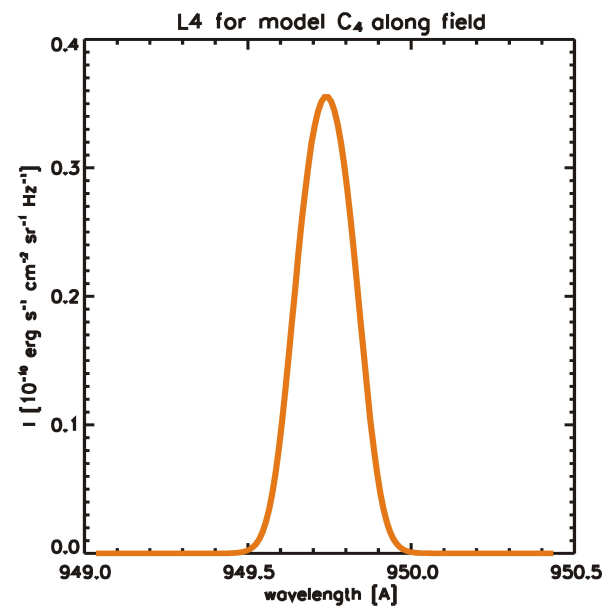
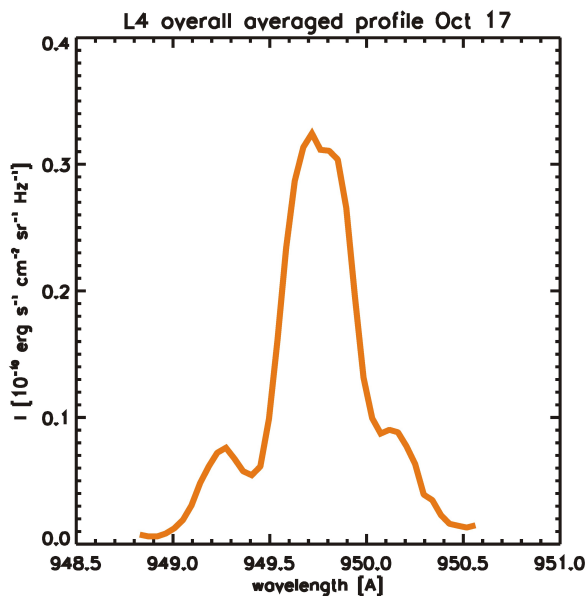
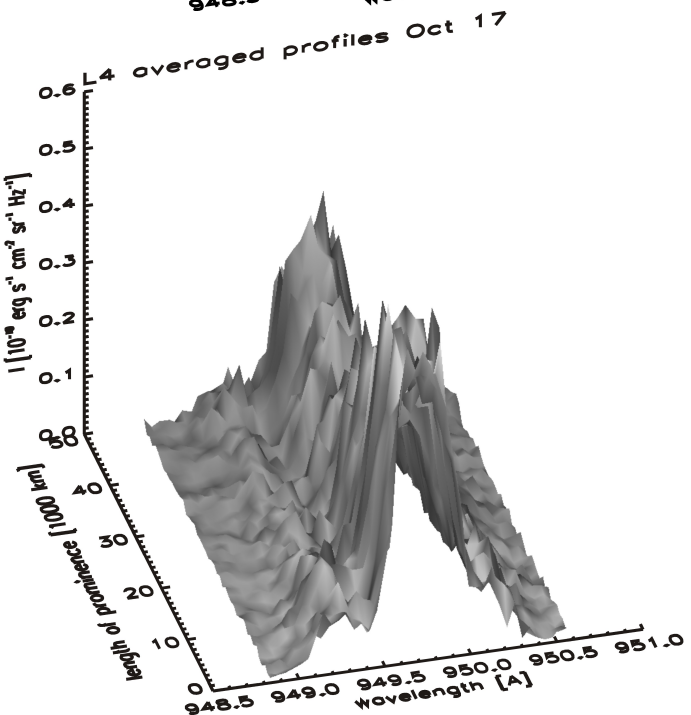
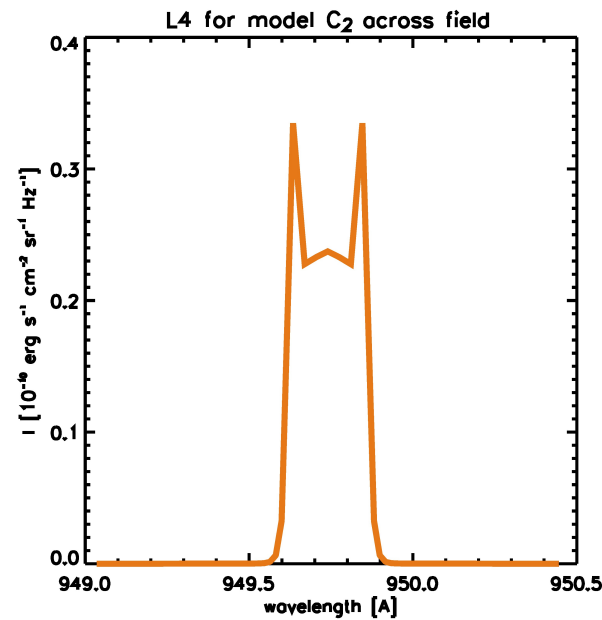
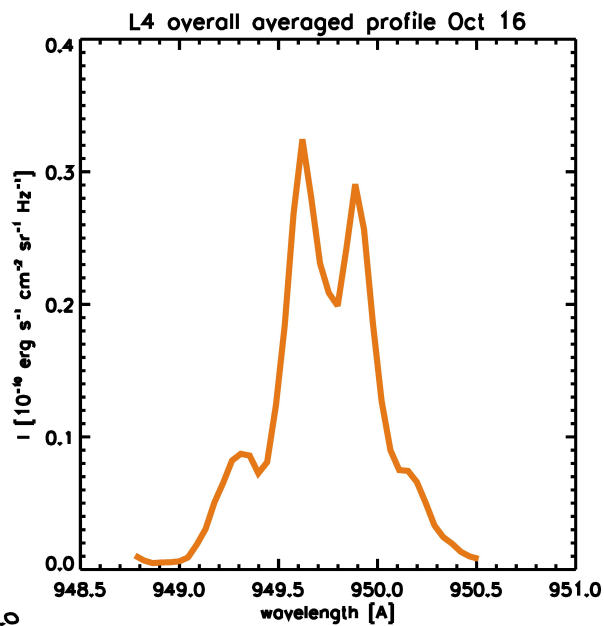
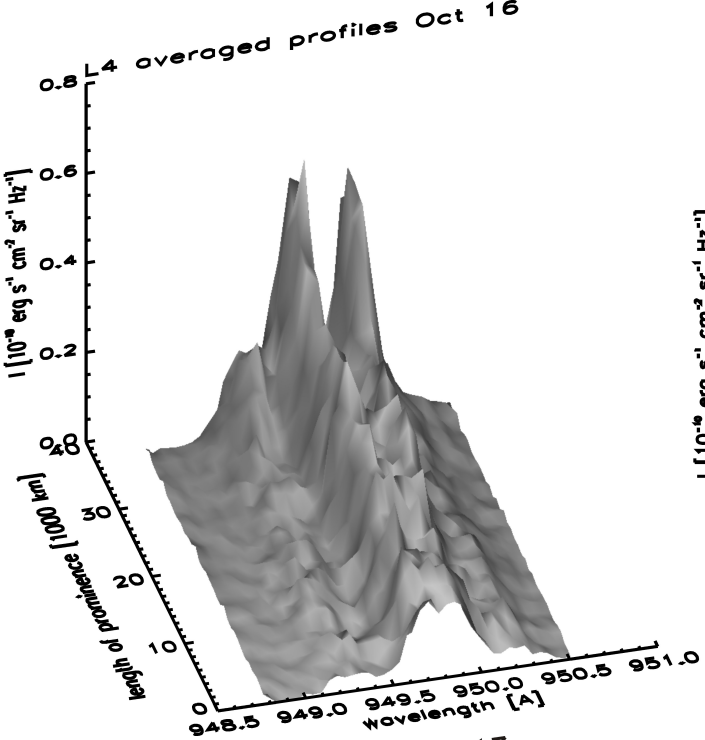
[10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000, 80000, 90000, 100000 K]

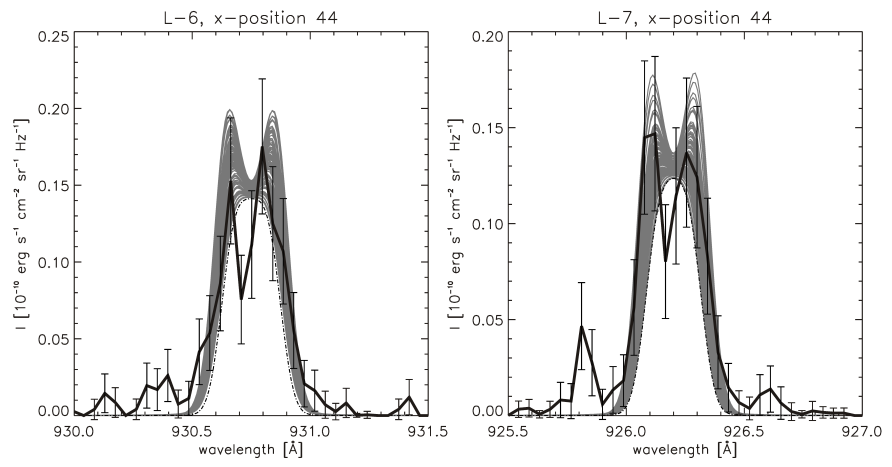
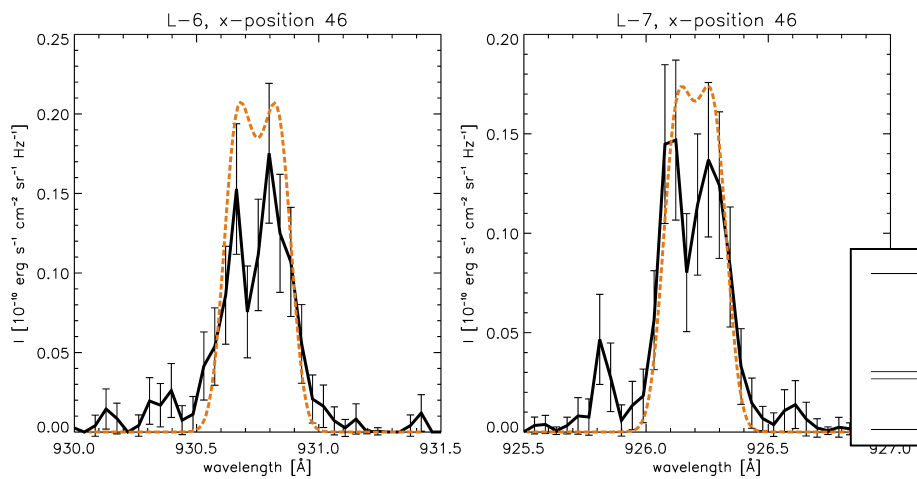
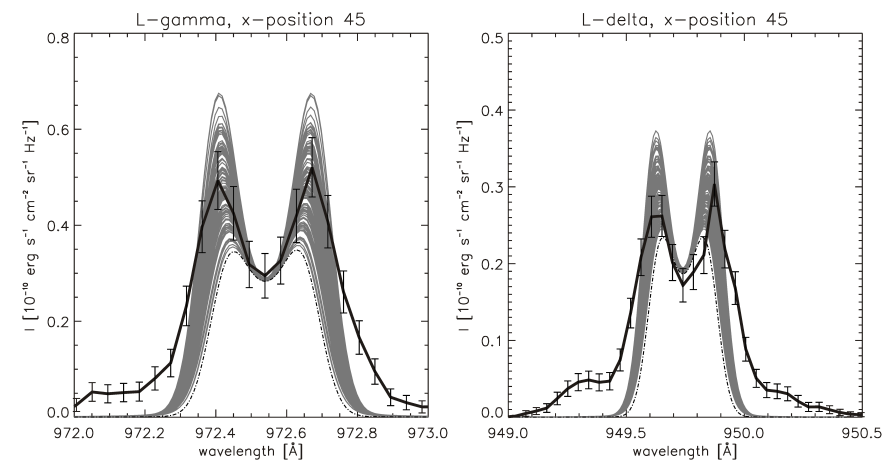
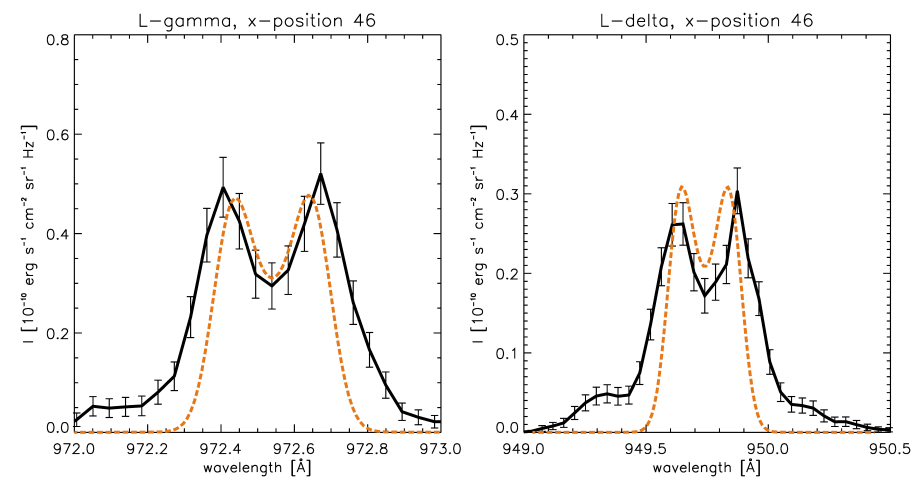
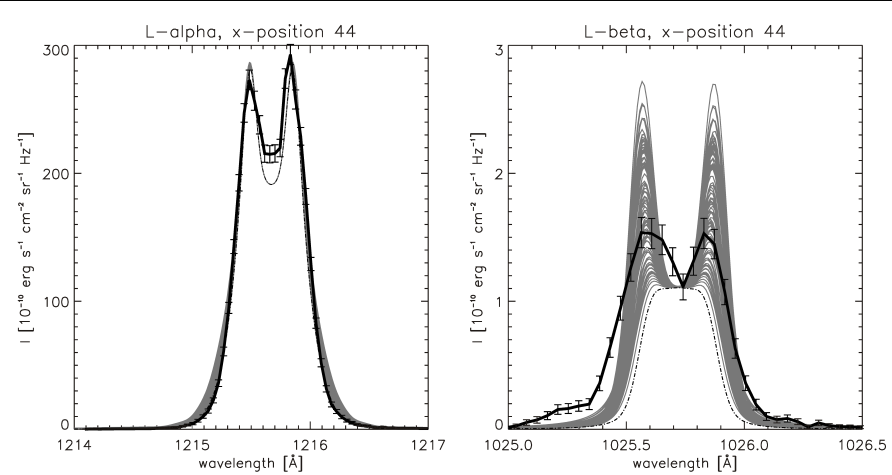
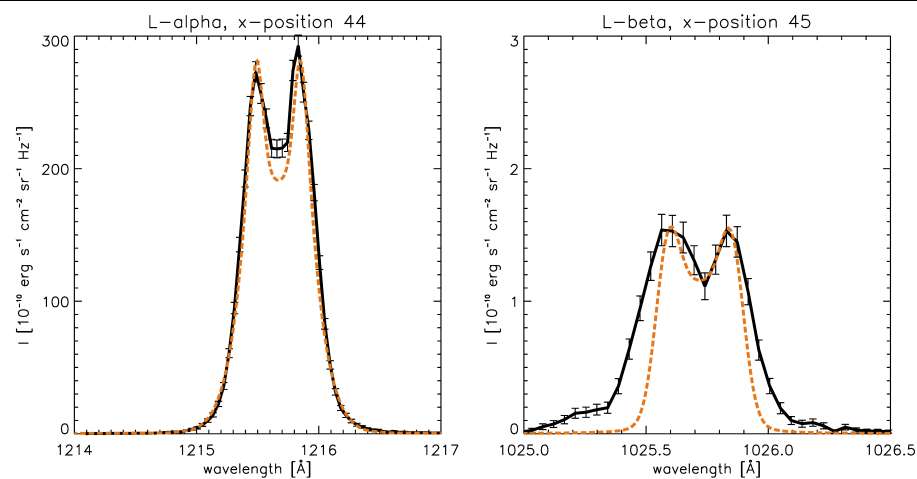
Density



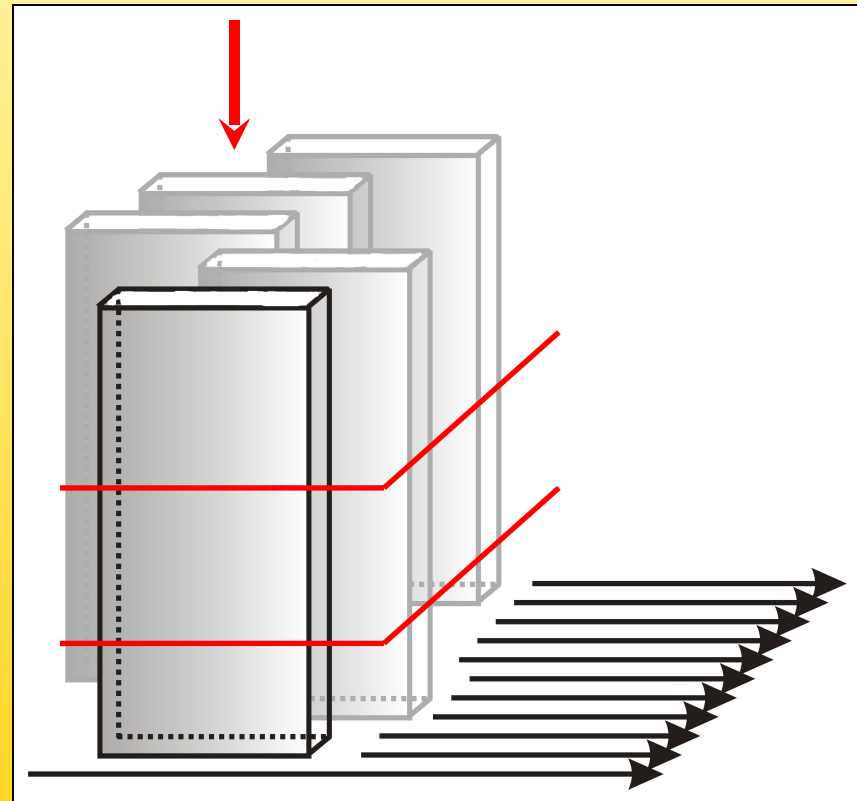
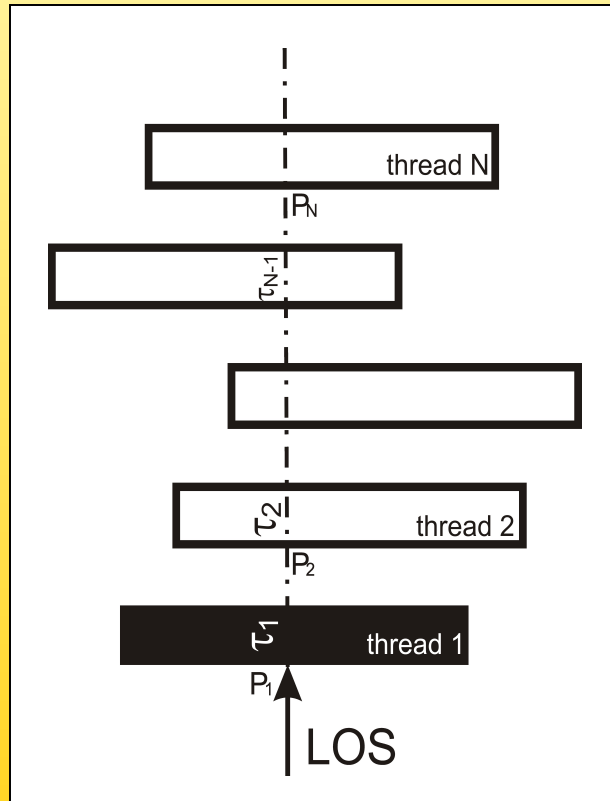
[0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 x 10e-13 g cm^-3]

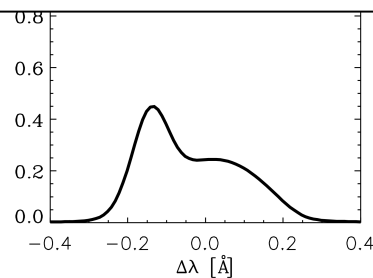
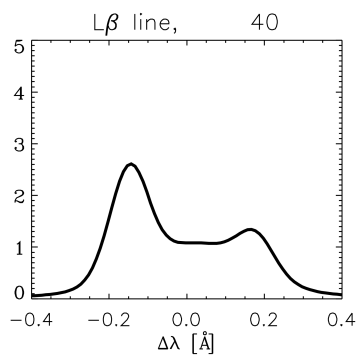
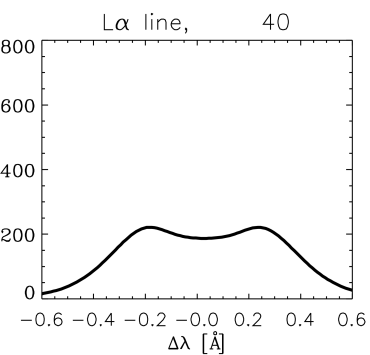
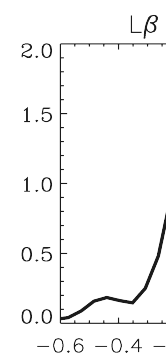
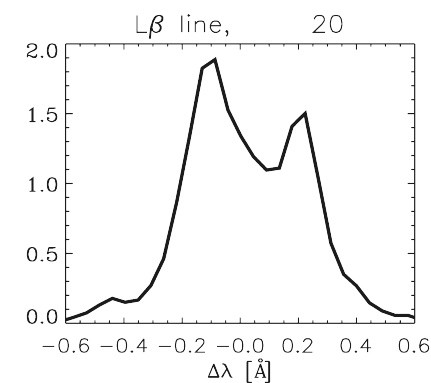
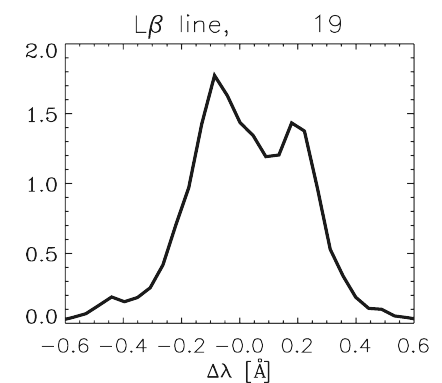
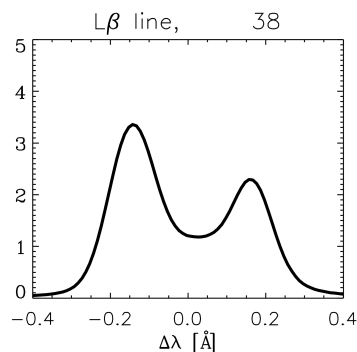
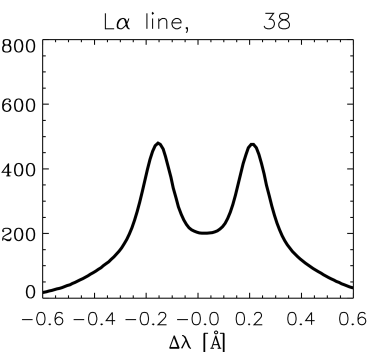
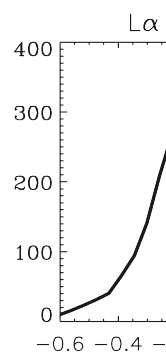
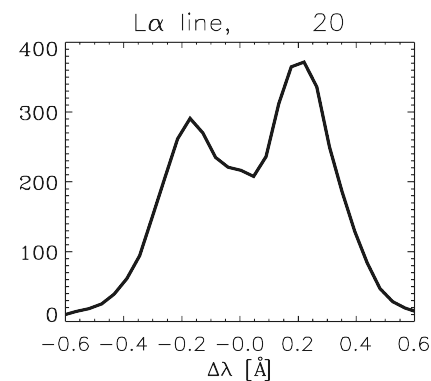
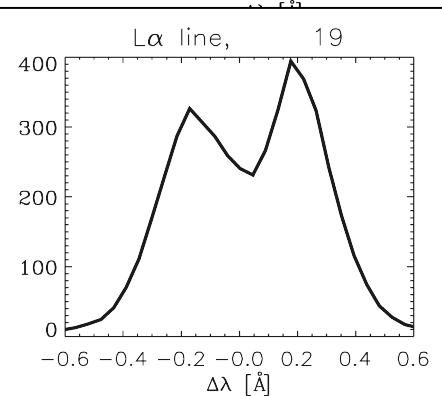
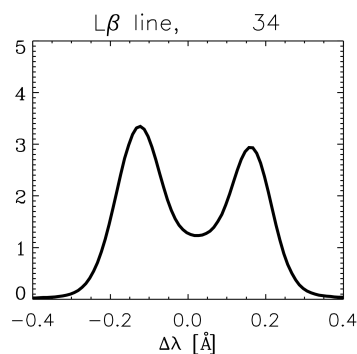
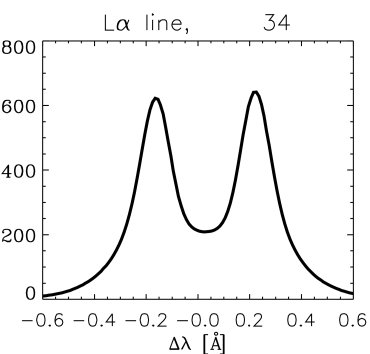
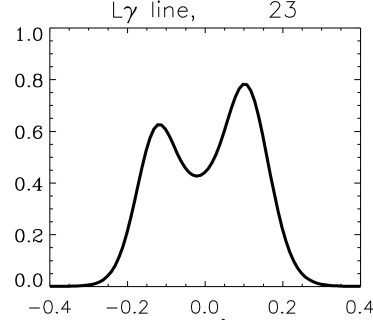
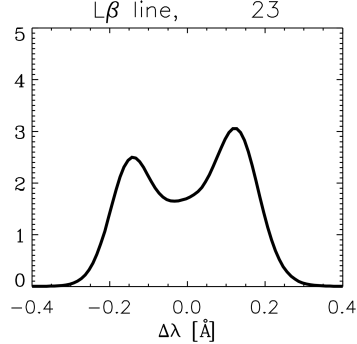
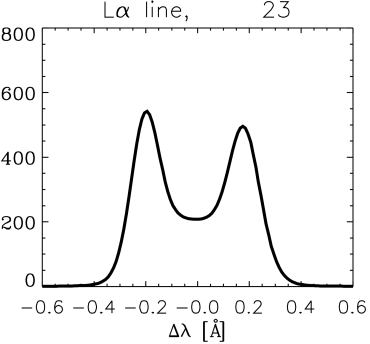




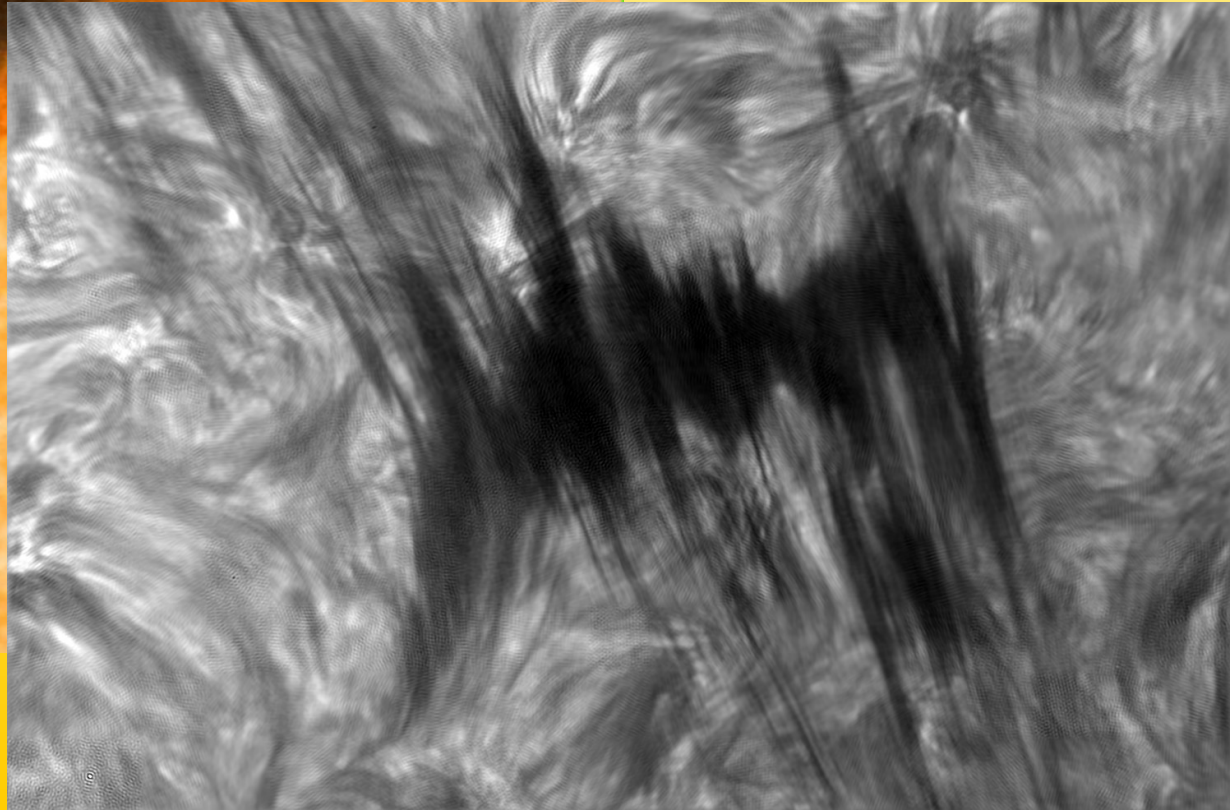
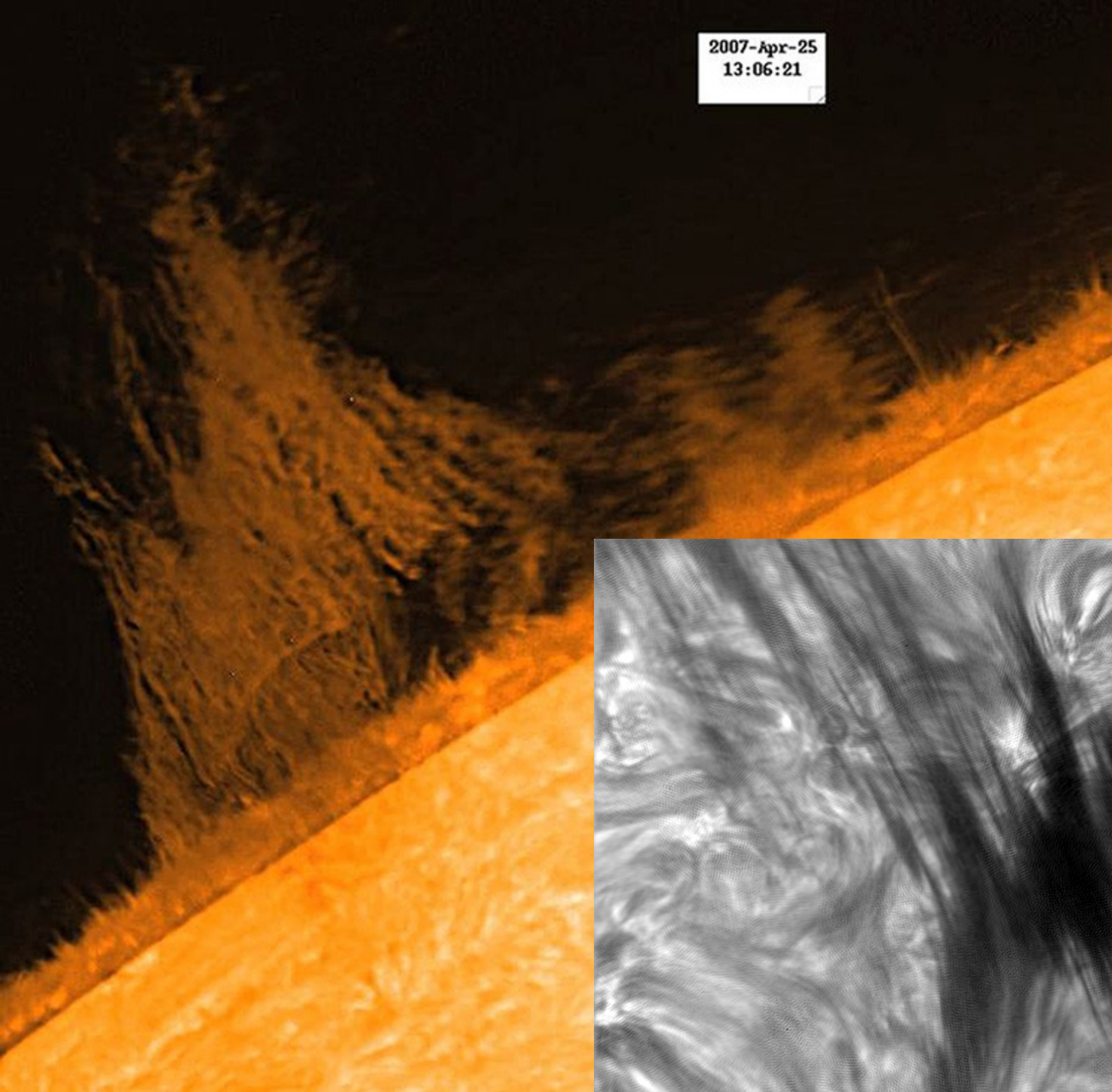


Multivláknový model





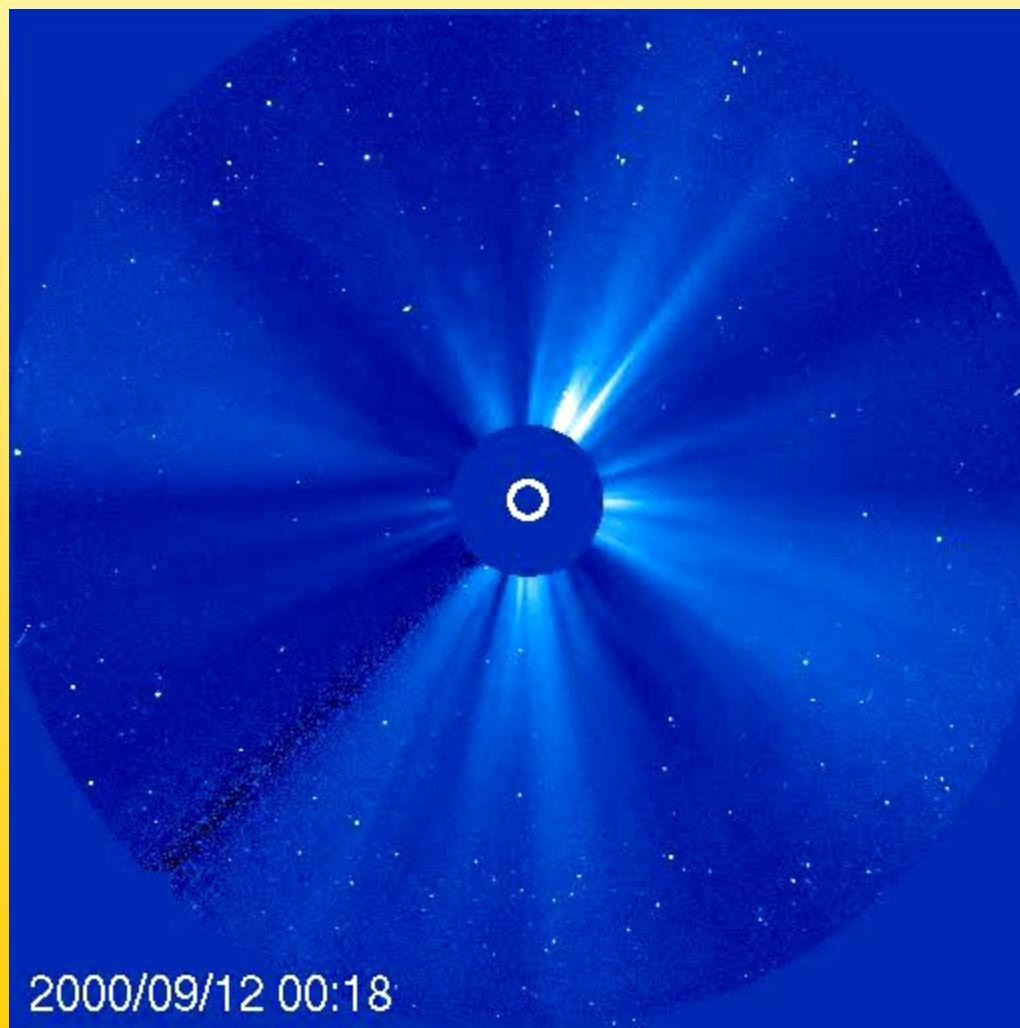
2007-Apr-25
13:06:21

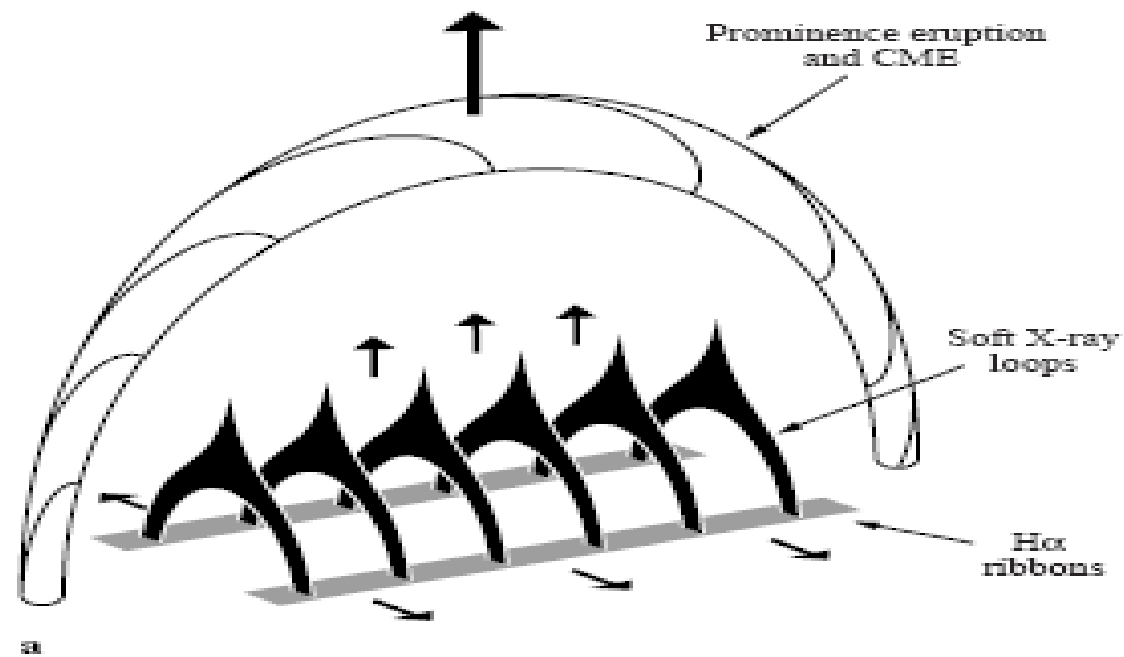


Dynamika protuberancií

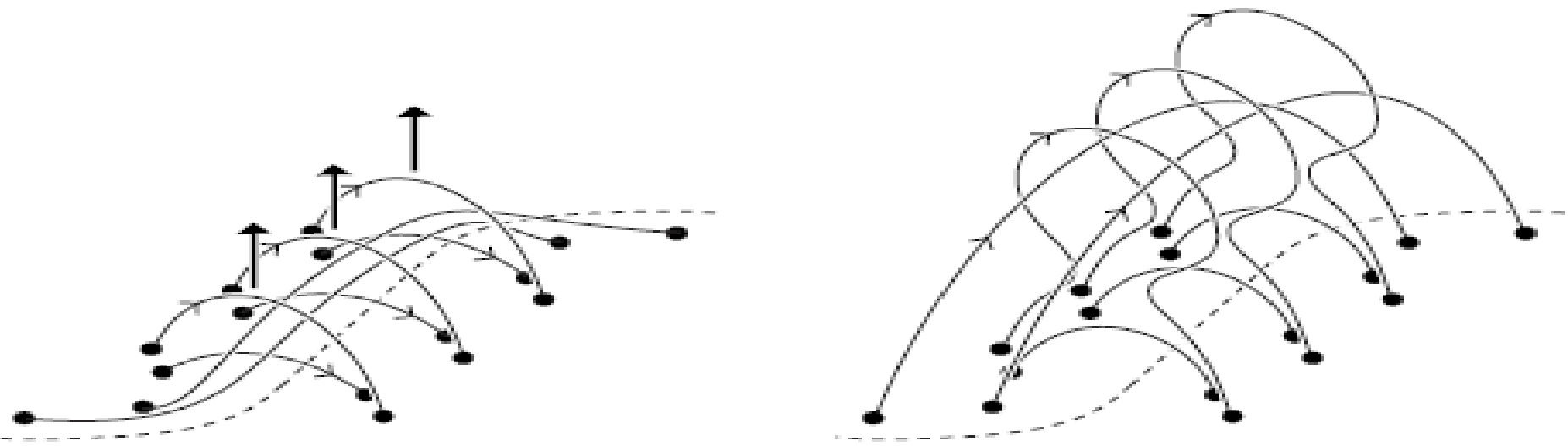
Relatívne stabilné útvary, rovnováha medzi gravitačnou a magnetickou silou. Napriek stabilite sa aj v kludných protuberanciách pozorujú pohyby plazmy s vysokými rýchlosťami. **Uzlíky a kondenzácie:** až 5 kms^{-1} nadol . **Dopplerovské rýchlosti:** pohyb materiálu v smere osi protuberancie a do škvŕn v blízkosti ukotvenia. (video!)

Erupcie protuberancií bývajú spojené CME (nie každé CME je spojené s erupciou filamentu), s urýchlením častíc, uvoľnením energie - často s tzv. dvojvláknovou erupciou





a

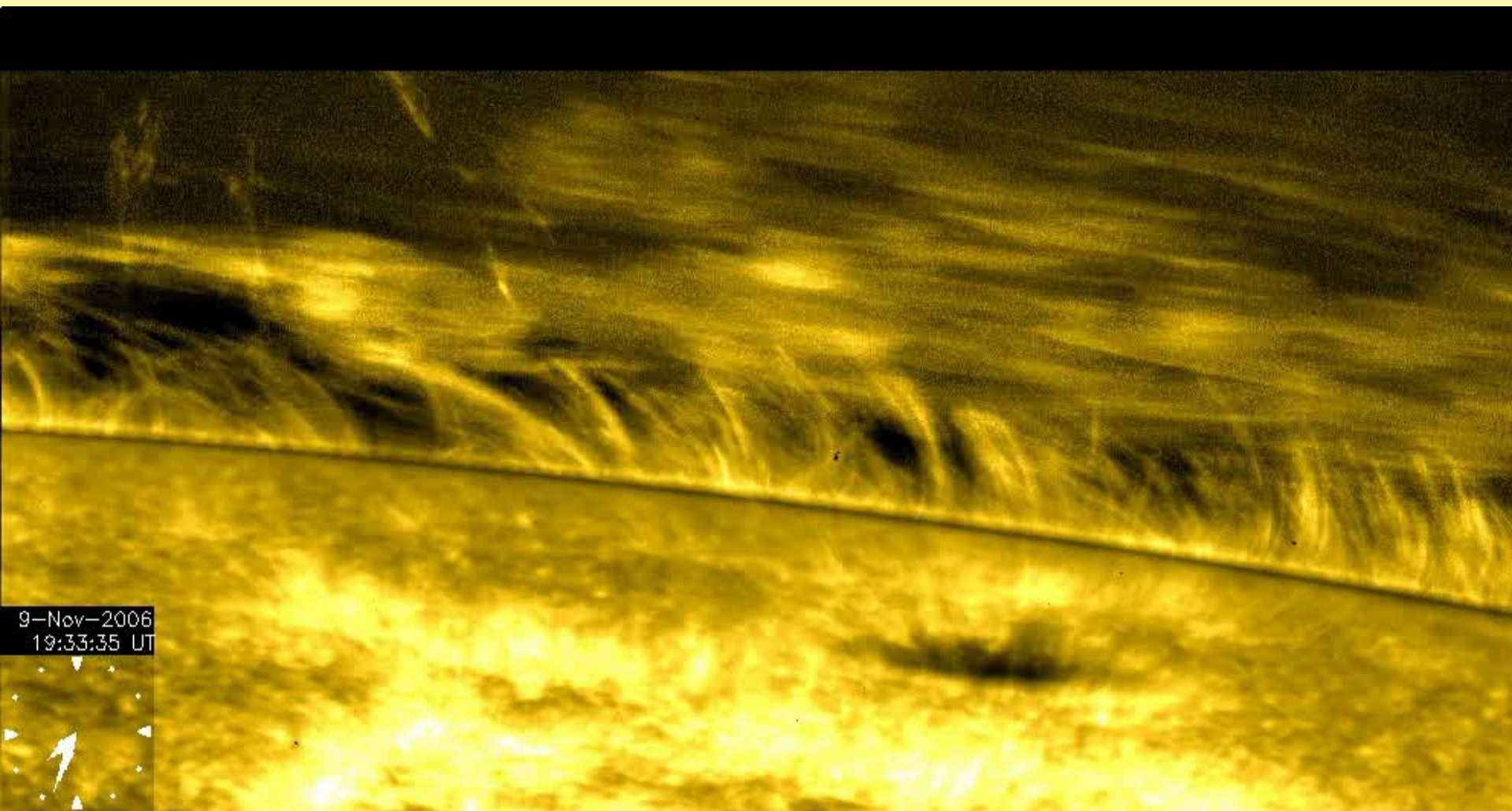


b

Fig. 1. Overall picture for an eruptive flare: a some key observational features; b the behaviour of the magnetic field lines, showing the initial rise of a sheared arcade due to nonequilibrium (*left*) and the onset of reconnection below the rising flux tube (*right*)

Dynamika

- Celková hmota niekoľkých kludných protuberancií je porovnateľná s celkovou hmotou koróny
- Protuberancie môžu byť vizualizované ako statické štruktúry v ktorých spontánne kondenzuje okolitá plazma
- Rapídny odtok hmoty indikuje prítomnosť iného zdroja hmoty – možno z chromosféry (napr. sifónový efekt spôsobený rozdielnym gradientom tlaku v ukotveniach filamentu).
- Istý podiel na sile pôsojacej proti gravitácii môžu mať Alfvénove vlny
- Rýchly zánik filamentu: hlavne zmena geometrie magnetického poľa, čo môže viesť až k erupcii a CME.



9-Nov-2006
19:33:35 UT



Ďakujem za pozornosť

