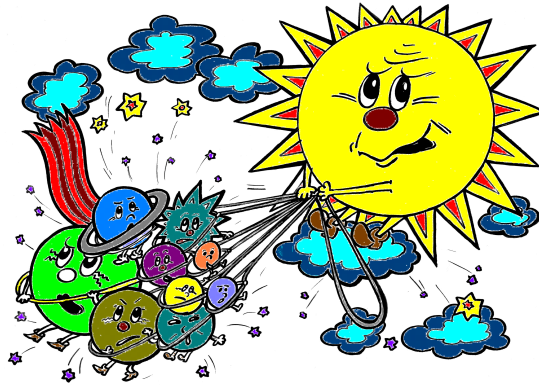


# Numerické simulace v astrofyzice



Petr Jelínek

Jihočeská univerzita, Přírodovědecká fakulta, České Budějovice,  
Česká republika

Astronomický ústav, Akademie věd České republiky v.v.i., Ondřejov,  
Česká republika

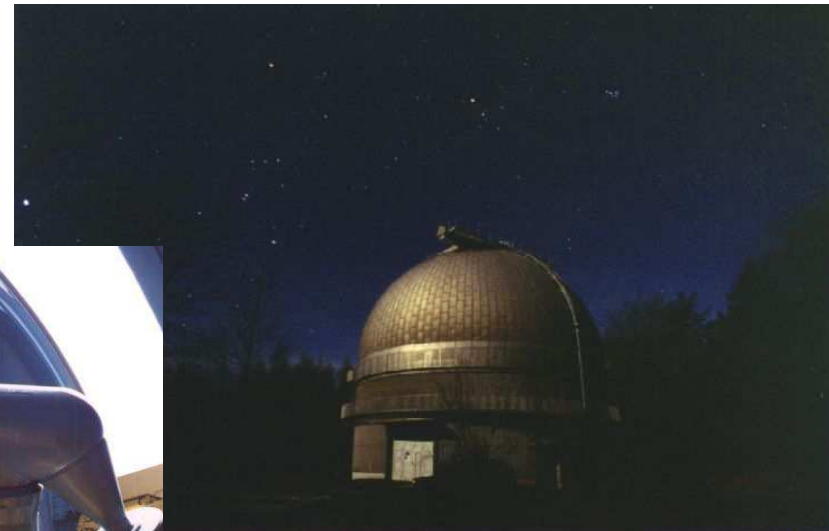


# Obsah

- Slunce a jeho vlastnosti
  - Vnitřní a vnější oblasti Slunce
- Procesy ve sluneční koróně
  - Ohřev sluneční koróny
- Vlny a oscilace ve sluneční koróně
- Numerické simulace ve sluneční fyzice
- *Numerické simulace procesů interakce HVCs s galaktickým diskem*
- Závěr

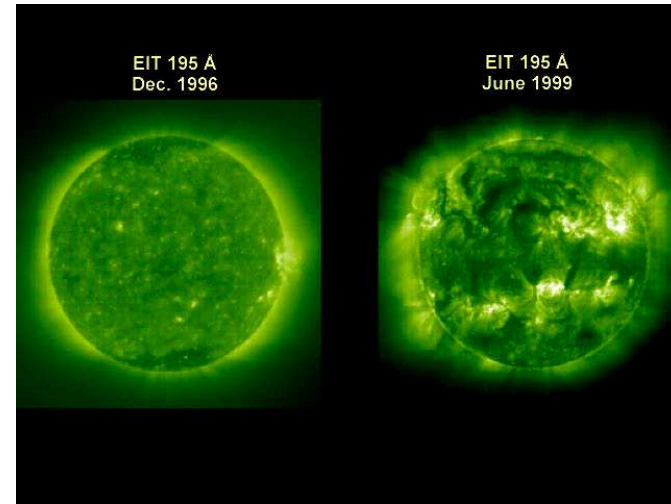
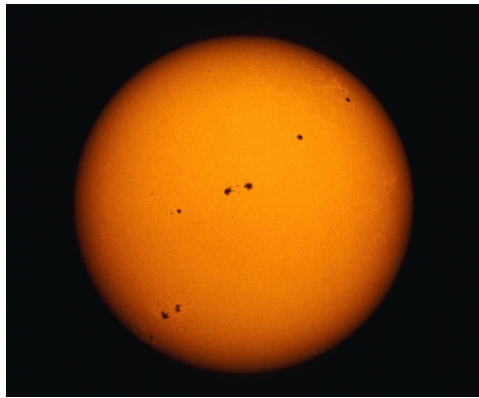
# Ondřejov

- Malá obec ležící asi 30 km od Prahy – <http://www.obecondrejov.cz/>
- Astronomický ústav AV ČR, v.v.i.
- Založen roku 1898, má 4 hlavní vědecká oddělení:
  - Sluneční fyzika
  - Stelární astronomie
  - Meziplanetární hmota
  - Galaxie a planetární systémy



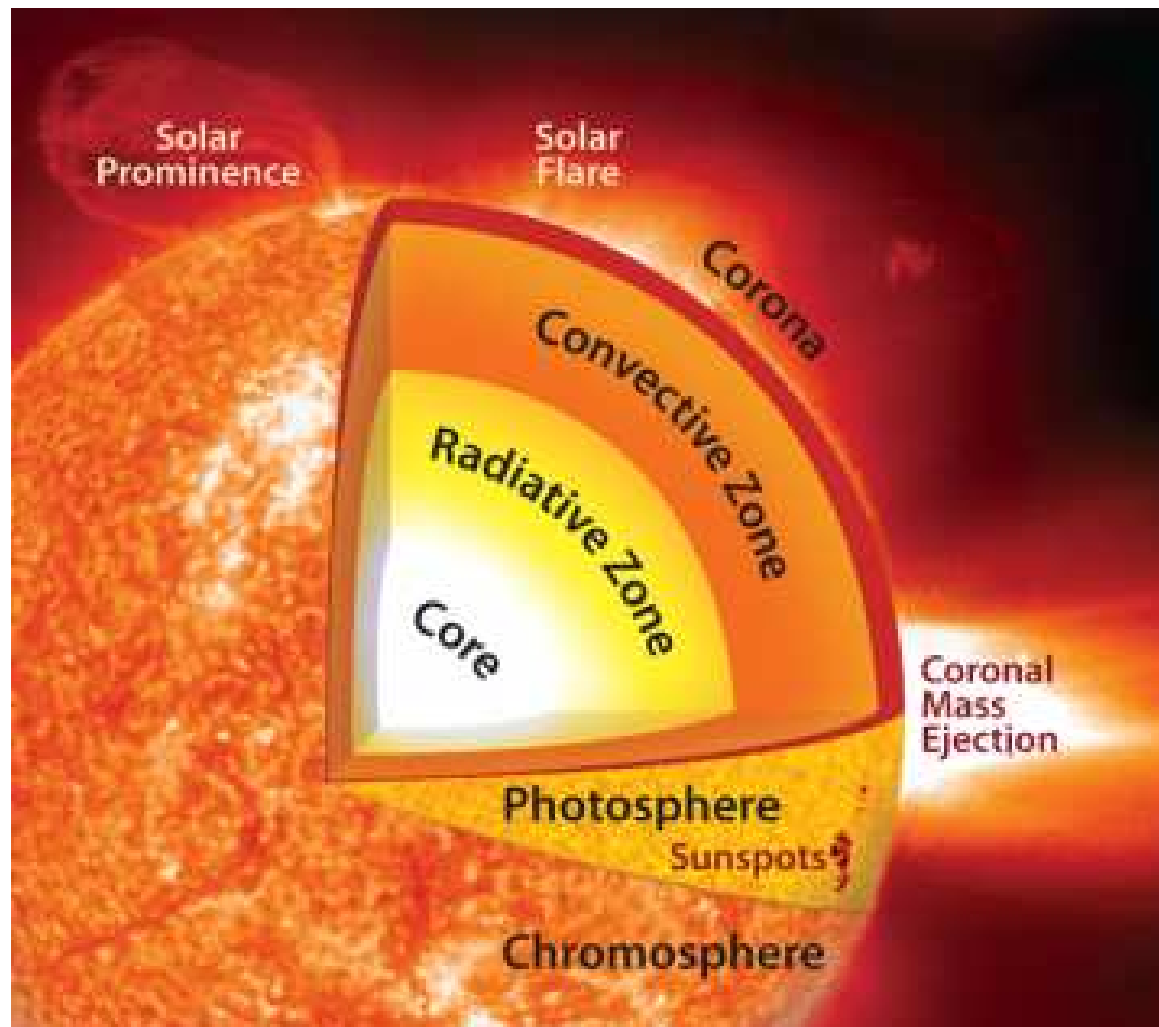
<http://www.asu.cas.cz/>

# Slunce



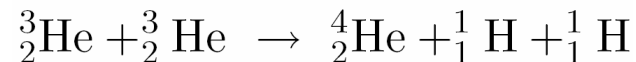
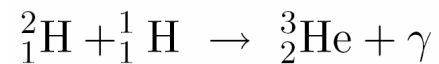
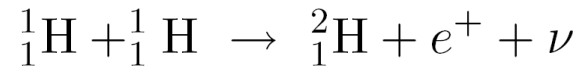
- Největší těleso ve sluneční soustavě
- Nejbližší hvězda Zemi, obrovský útvar složený z plazmatu – zdroj tepelného a světelného záření
- Jde o těleso, které je velice aktivní i když se to na první pohled vůbec nezdá...

# Stavba Slunce



# Vnitřní části Slunce

- **Jádro** – termonukleární reakce, slučování vodíku na helium



- **Vrstva v zářivé rovnováze** – přenos energie zářením

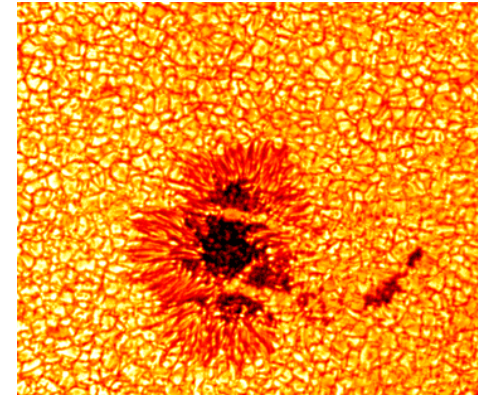
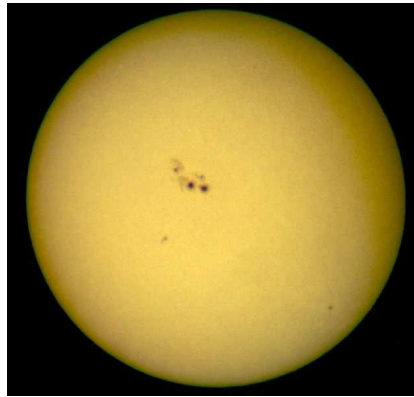
$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\bar{\kappa}L_r\rho}{16\pi4\sigma r^2T^3}$$

- **Konvektivní vrstva** – přenos energie konvekcí (prouděním)

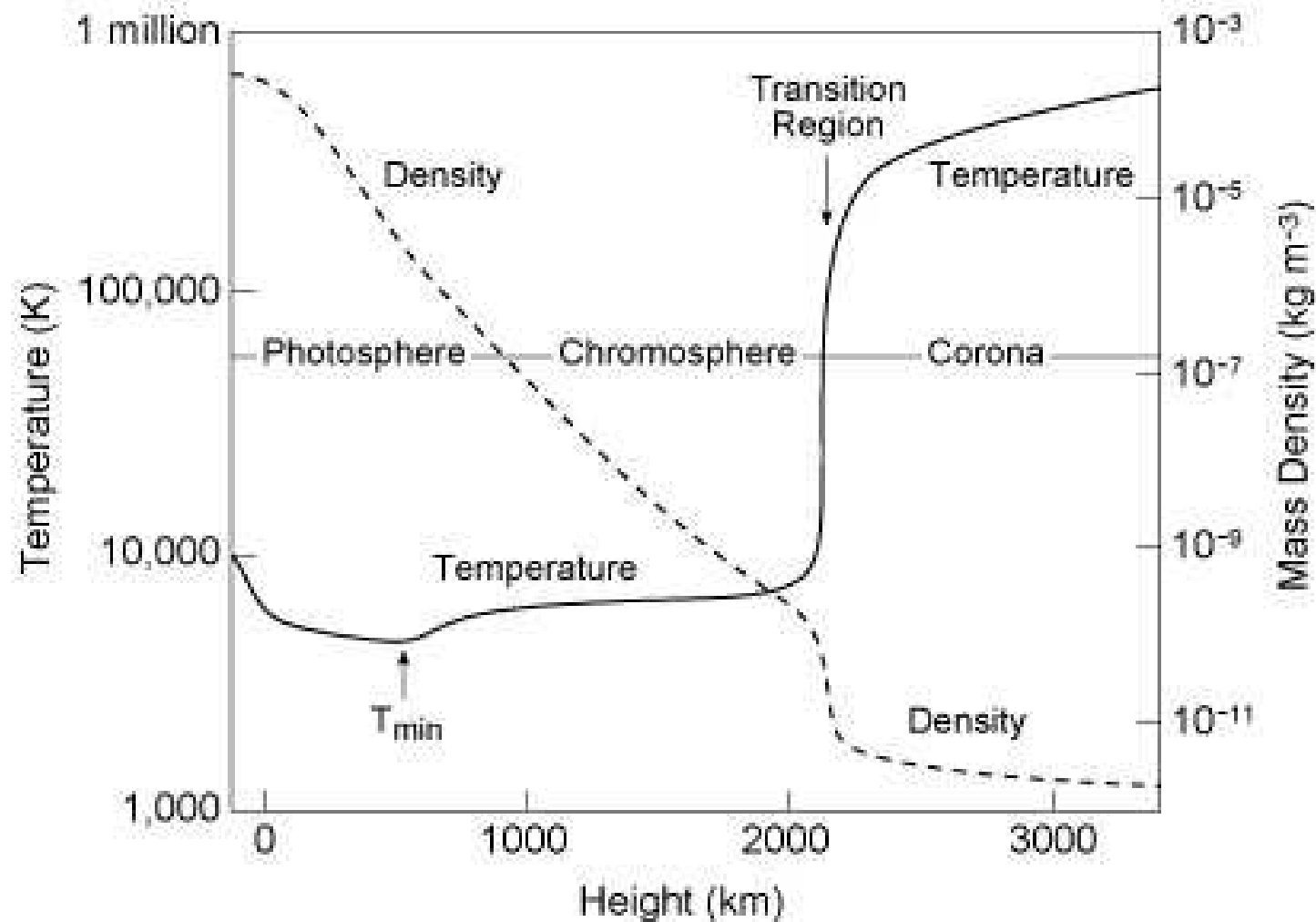
$$\frac{dT}{dr} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr}$$

# Atmosféra Slunce

- Fotosféra
- Chromosféra
- Koróna



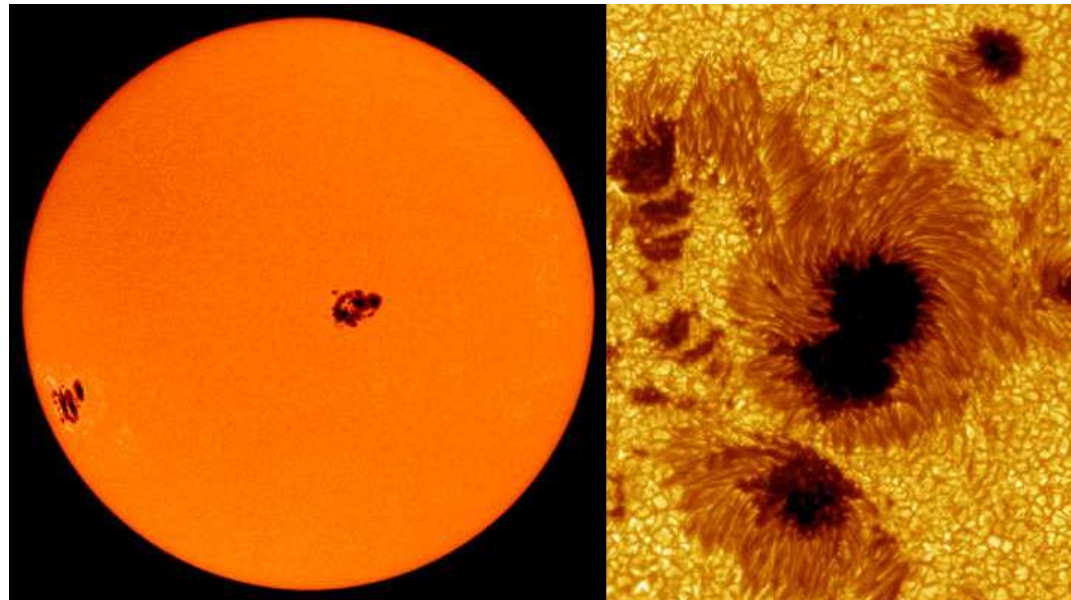
# Sluneční atmosféra





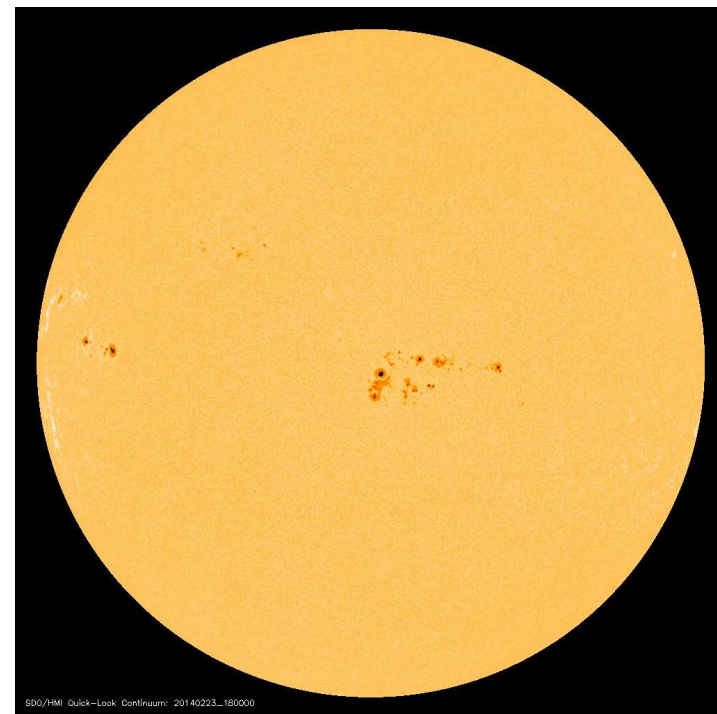
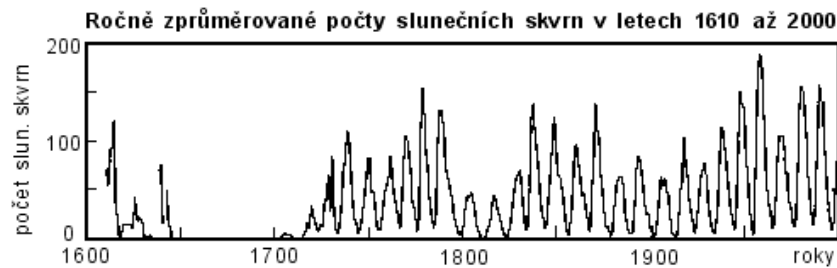
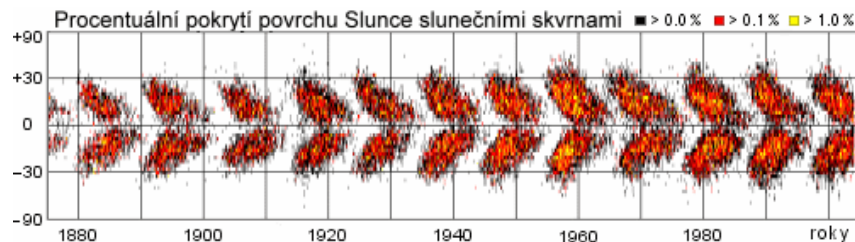
# Sluneční skvrny – I.

- Slunce vykazuje zhruba jedenáctiletou periodu, kdy nastává minimum nebo maximum sluneční aktivity
- Předposlední maximum sluneční aktivity nastalo v roce 2001, poslední (s velmi malou aktivitou) zřejmě v roce 2013 (???)



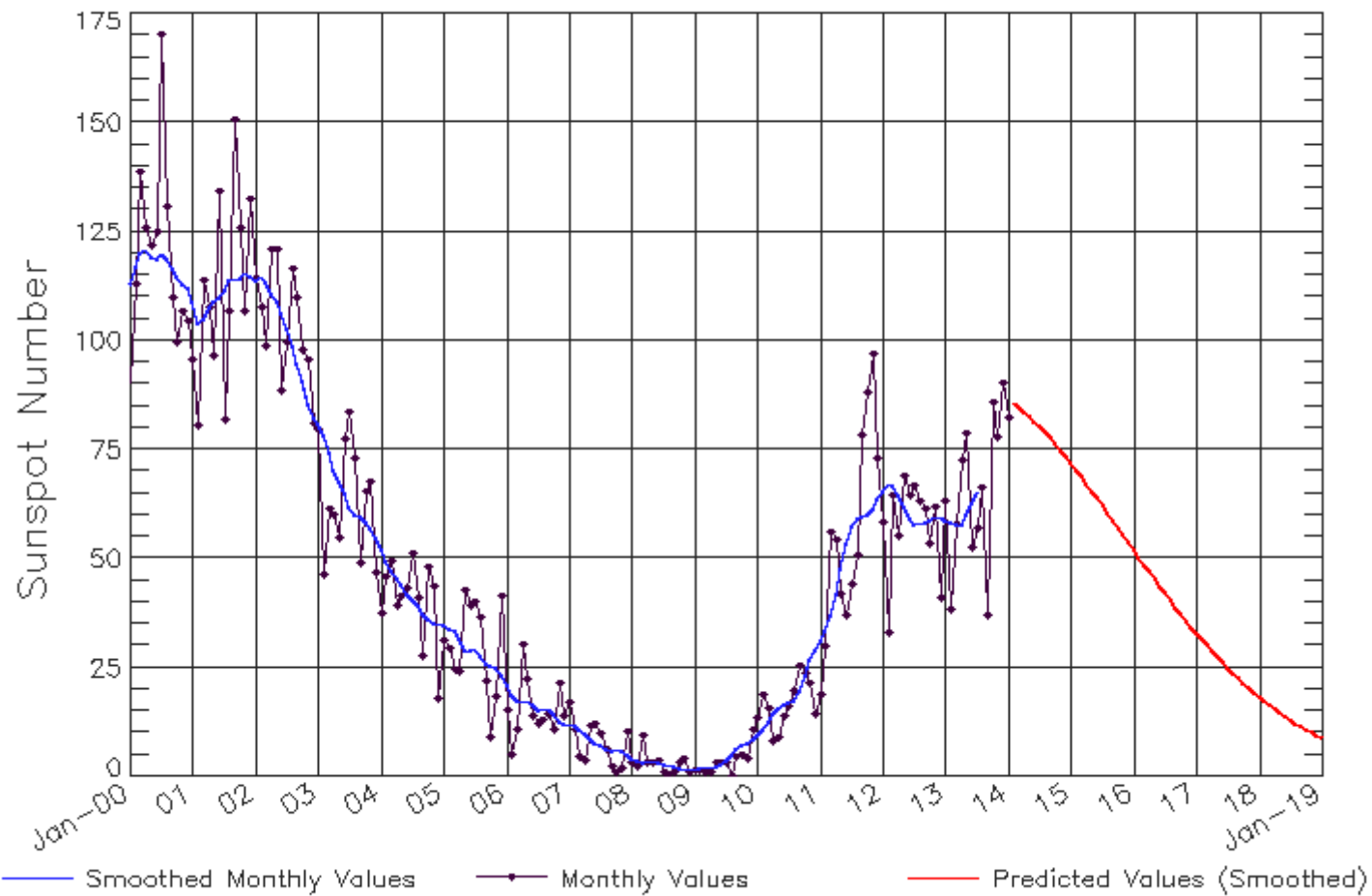
# Sluneční skvrny – II.

- V současné době bude počet skvrn na slunečním povrchu klesat až do doby, kdy nastane sluneční minimum
- Předpokládá se, že maximum 2013 sluneční aktivity s Wolfovým číslem kolem 90 bude mít nejnižší hodnotu od roku 1928 (Wolfovo číslo tehdy bylo 78)



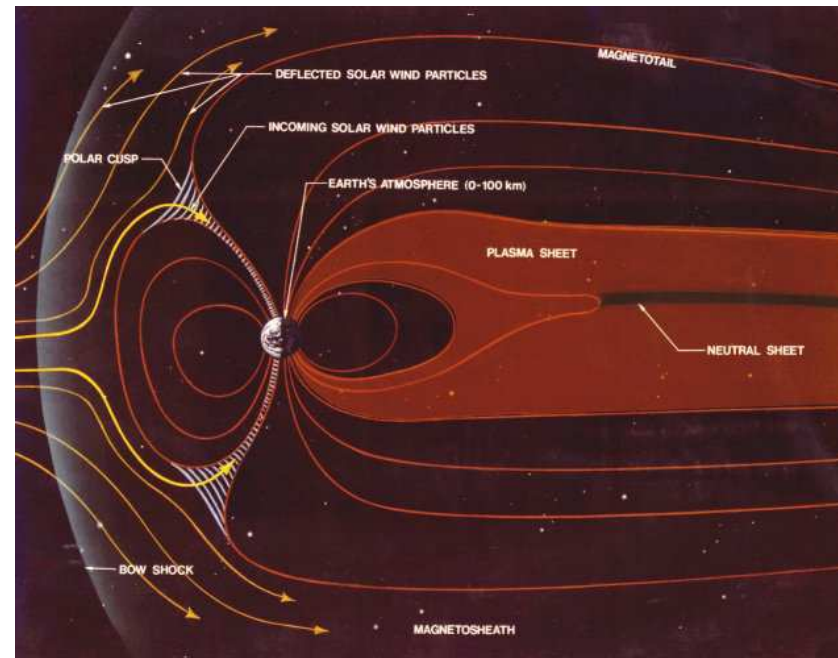
# Sluneční aktivita

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression  
Observed data through Jan 2014



# Projevy sluneční aktivity

- V období maxima sluneční aktivity můžeme pozorovat polární záře, dokonce i v našich zeměpisných šířkách (např. **17.11.1989** nebo listopad 2003)



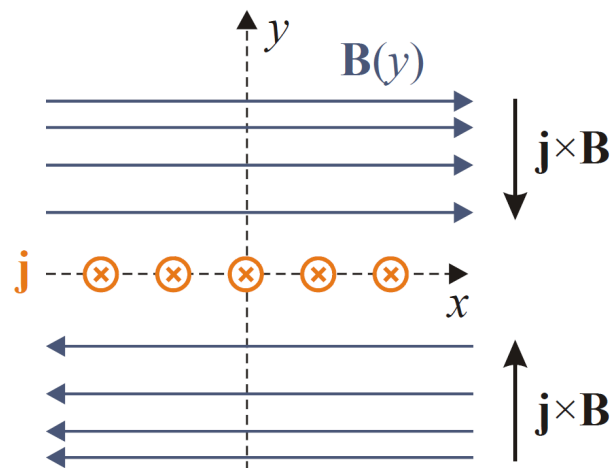


# Ohřev vyšších vrstev sluneční atmosféry

- Teplota fotosféry ~ 6000 K
- Teplota koróny ~ 1 – 3 MK (v erupcích až o řád vyšší)
- V současnosti existuje několik možných mechanismů vysvětlení tohoto jevu
  - **Rekonexe magnetického pole** – tzv. přepojování magnetických siločar
  - **Vlny a oscilace ve sluneční koróně** – pomalé a rychlé magnetoakustické vlny, Alfvénovy vlny

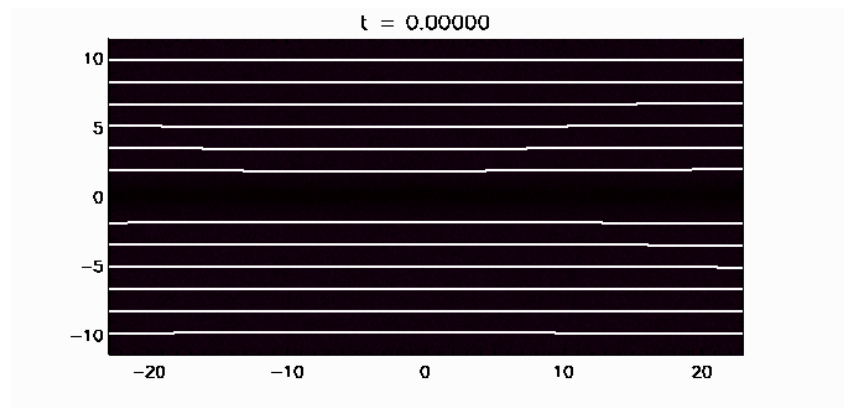
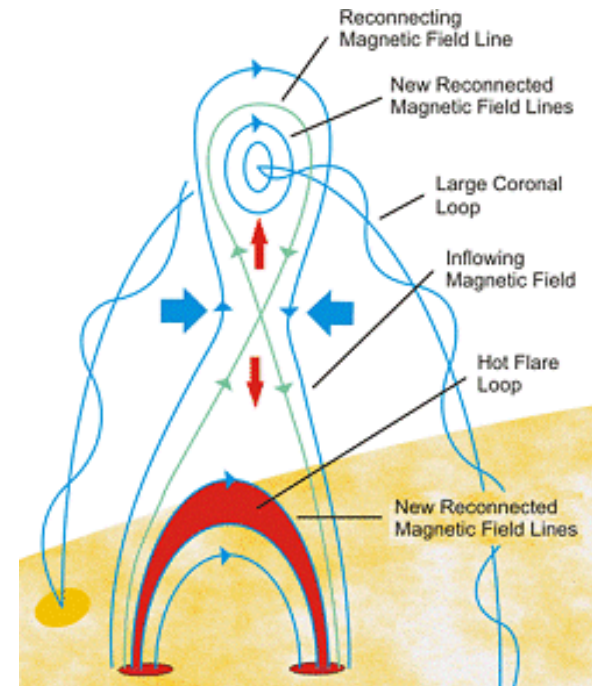
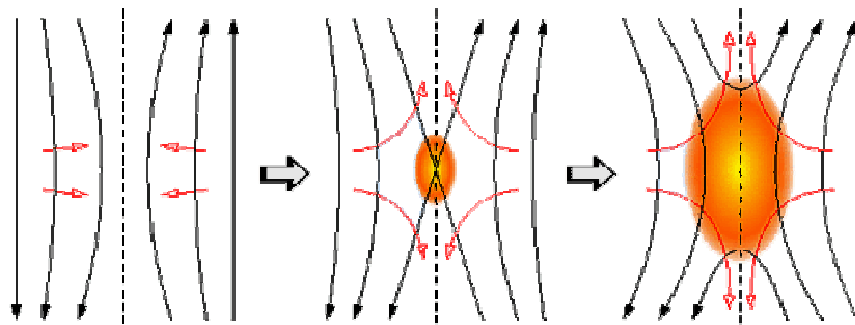
# Rekonexe magnetického pole

- Jde o proces přepojení magnetických siločiviek do jiné, energeticky výhodnější konfigurace – uvolní se magnetická energie ve formě tepla, které zahřeje okolní plazma
- K přepojování dochází v oblastech, kde magnetické siločáry míří opačným směrem, to je v astrofyzice velice časté – smyčky magnetického pole v koróně, magnetosféra Země, atd.



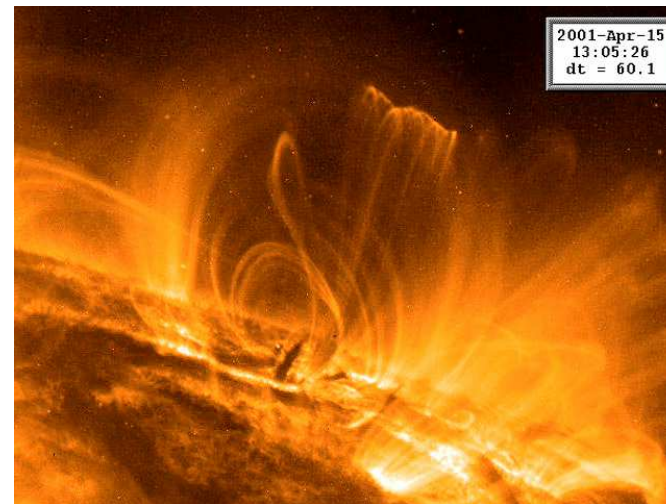
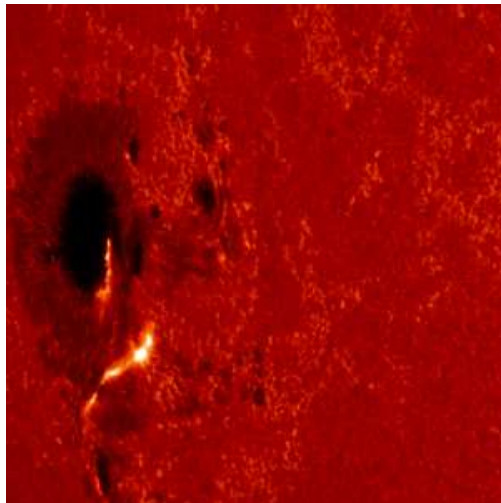


# Rekonexe magnetického pole



# Sluneční erupce

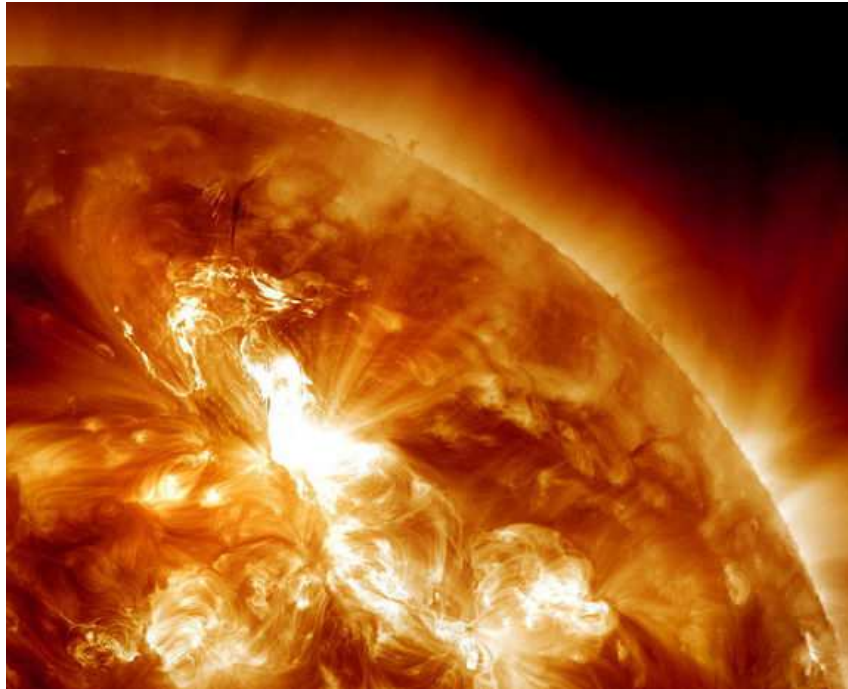
- Jedná se o náhlá zjasnění ve sluneční atmosféře, doprovázená uvolněním hmoty a obrovského množství energie
- Jsou to největší výbuchy ve sluneční soustavě, kdy se během několika desítek až stovek sekund uvolní energie až  $10^{25}$  J



- Sluneční erupce jsou nesmírně komplikované procesy a navíc se ukazuje, že by mohly být spouštěcím (nebo doprovodným) mechanismem pro tzv. vyvržení koronální hmoty



# Sluneční erupce

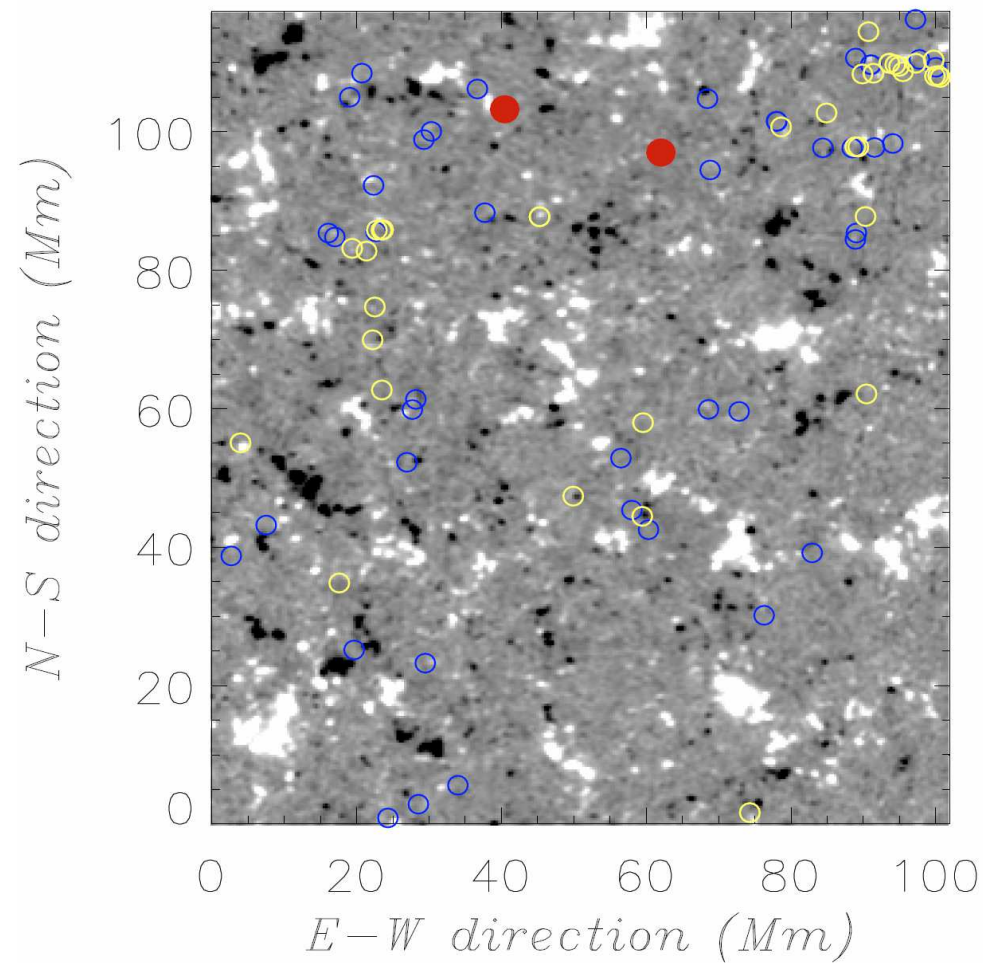


**M9 Solar Flare, January 23, 2012**



**X5.4 Solar Flare, March 7, 2012**

# Magnetogram SOT/Hinode





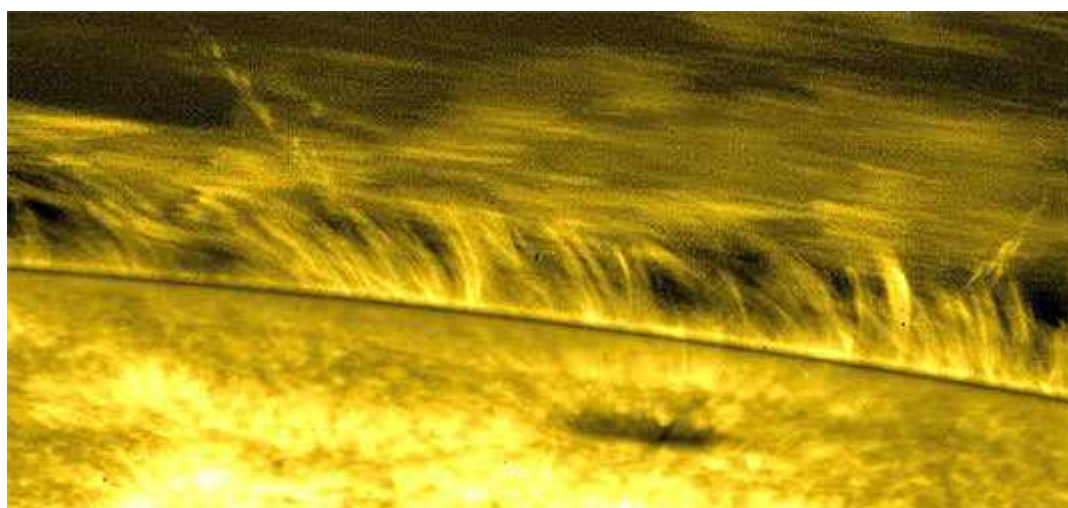
# Magnetoakustické vlny

- V plazmatu, stejně jako ve vzduchu se šíří vlny
- Šíření je ale komplikovanější, díky magnetickému poli, které do tohoto prostředí vnáší anizotropii
- V plazmatu tedy můžeme pozorovat hned tři vlnoplochy pro magnetoakustické vlny:
  - rychlé
  - pomalé
  - Alfvénovy
- Podle posledních výzkumů se ukazuje, že právě Alfvénovy vlny by mohly být hlavním procesem, zodpovědným za ohřev sluneční koróny

# Alfvénovy vlny

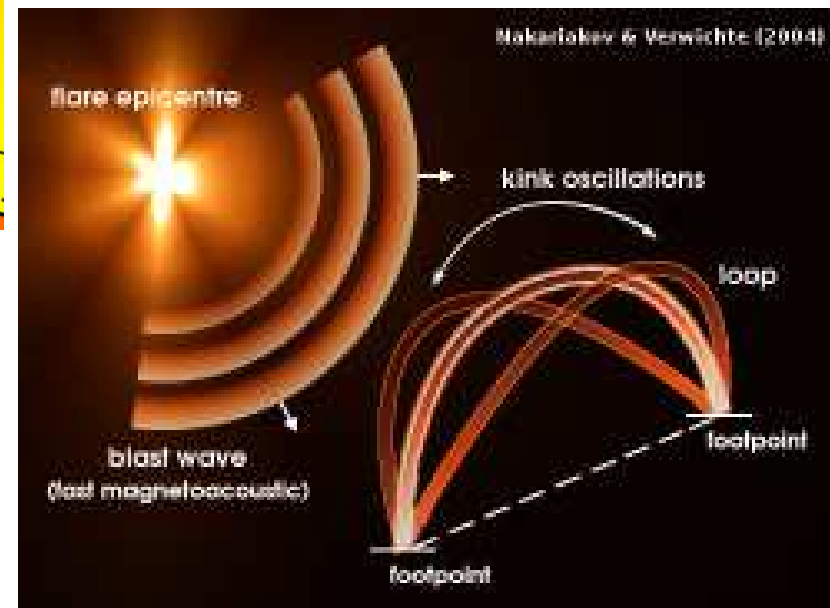
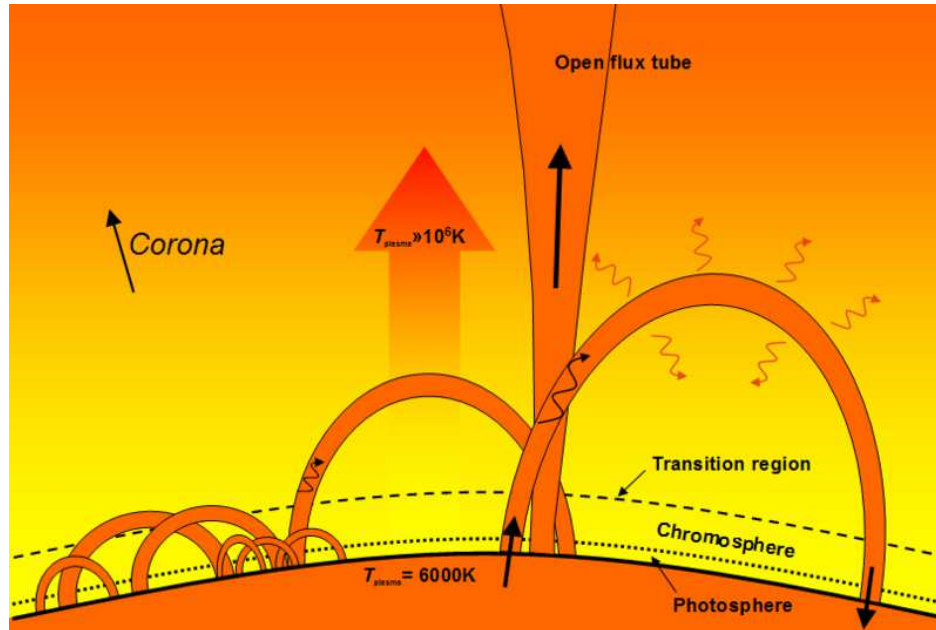


Hannes Alfvén (1908 – 1995)

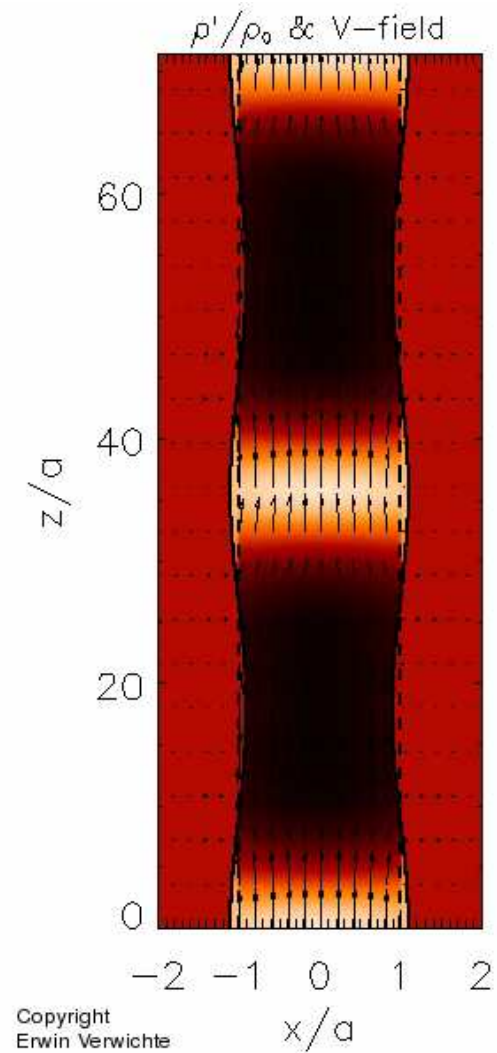
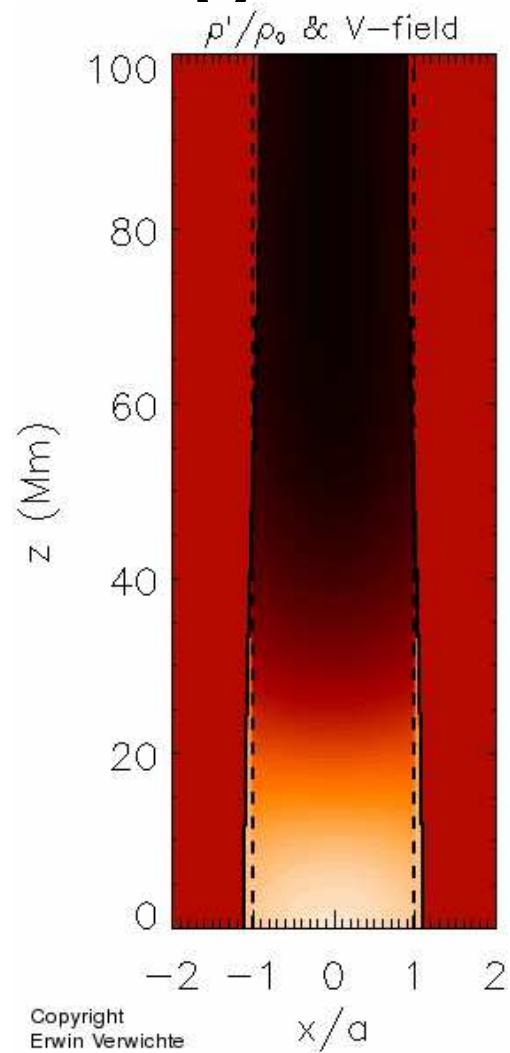




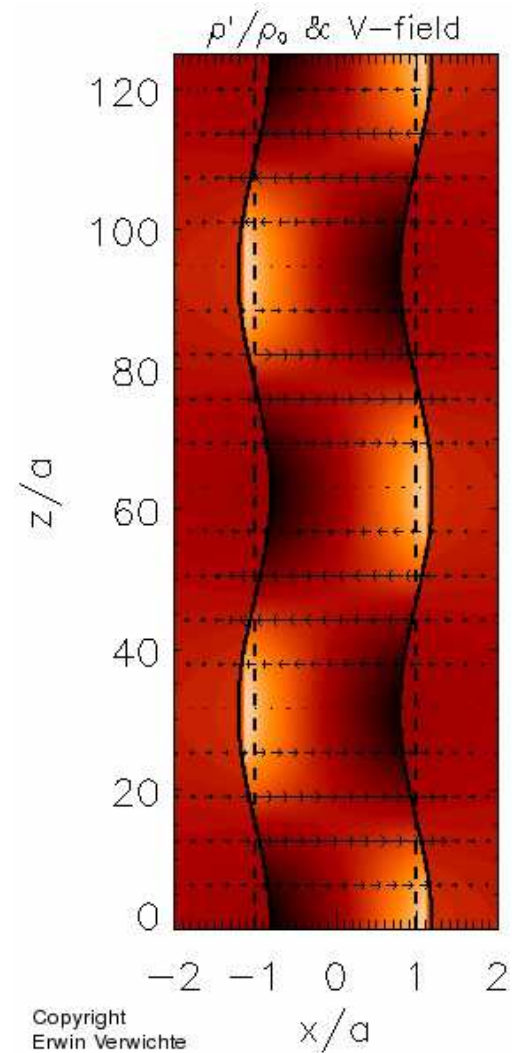
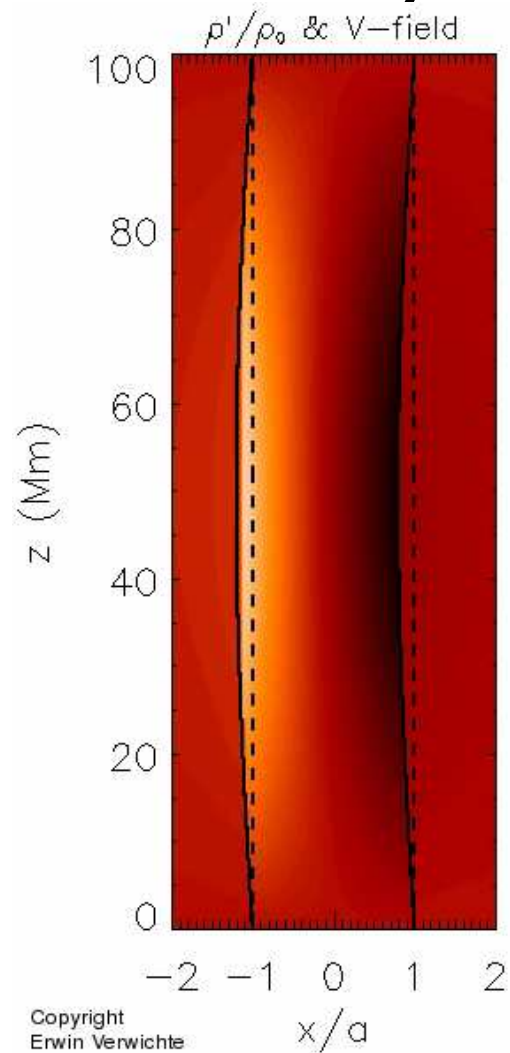
# MHD vlny ve sluneční koróně



# „Sausage“ módy

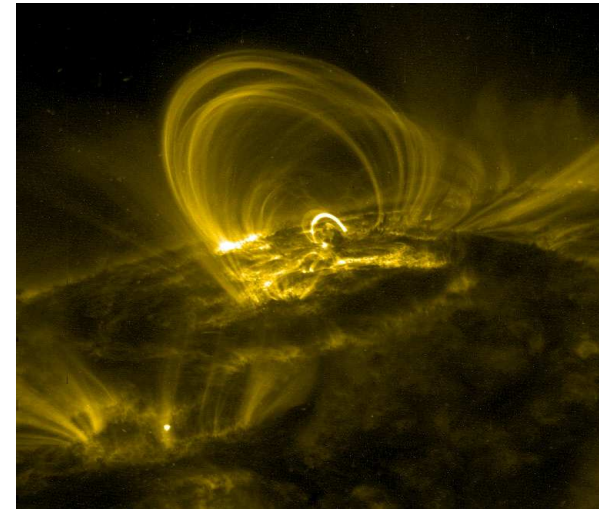


# „Kink“ módy



# Motivace pro studium

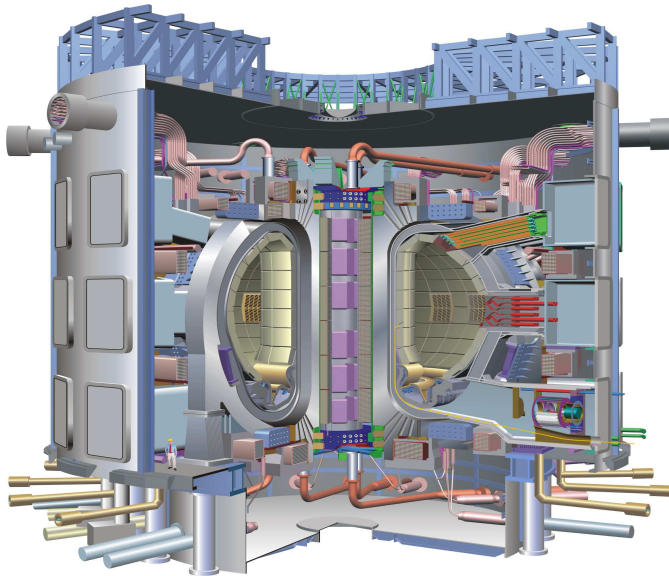
- Ve sluneční koróně jsou vlny a oscilace pozorovány již poměrně dlouhou dobu
- Jsou pozorovány ve viditelné oblasti spektra, v EUV, rentgenovském záření, rádiových vlnách, ...
- Důležitost takových pozorování tkví v možnosti diagnostiky sluneční koronální struktury (magnetické pole, hustota plazmatu, atd. )
- Různé módy oscilací byly pozorovány s vysoce citlivými přístroji na palubách kosmických sond, např. SUMER (SOHO), TRACE, SDO, Hinode





# Motivace pro studium

- Tyto studie jsou důležité nejen pro pochopení vln v koronálních smyčkách, ale též například pro pochopení dynamiky slunečního větru a dalších nevyřešených problémů sluneční fyziky



- Kromě pozorování (pozemských nebo ze sond) hrají velmi důležitou roli **numerické simulace**

# Motivace numerických simulací

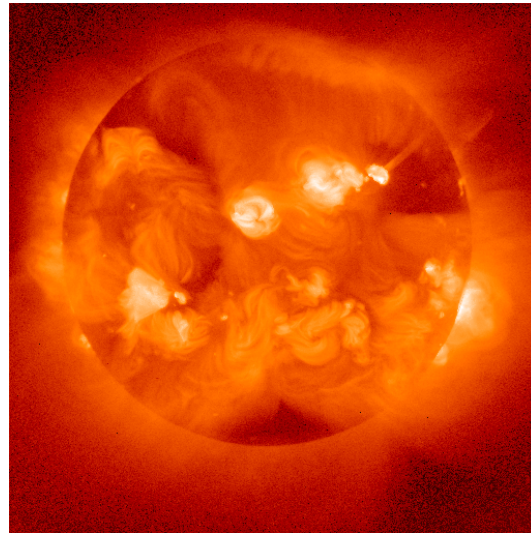
- „Das ganze tschechische Volk ist eine Simulantenbande.“

Poslušně hlásím, 1957 (J. Hašek, Osudy dobrého vojáka Švejka, 1922)



# Motivace numerických simulací

- Oscilace v koronálních smyčkách byly studovány analyticky, ale tyto studie jsou možné pouze pro idealizované situace, proto se začaly procesy zkoumat numericky
- Simulace jsou založeny na numerickém řešení rovnic magnetohydrodynamiky



# MHD rovnice

- V numerických modelech se popisuje pohyb plazmatu pomocí MHD rovnic

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v},$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

$$\frac{D\mathbf{B}}{Dt} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v},$$

$$\frac{De}{Dt} = -\gamma e \nabla \cdot \mathbf{v},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0.$$

$$D/Dt \equiv \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla$$

$$e = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho}$$

# Numerické řešení MHD rovnic

- MHD rovnice (1) – (4) se přetransformují do tzv. konzervativního tvaru

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\Psi)}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\Psi)}{\partial y} = 0 \quad \Psi = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_x \\ \rho v_y \\ B_x \\ B_y \\ U \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} = -\nabla_j \left[ \rho v_i v_j - \frac{B_i B_j}{\mu_0} + \delta_{ij} \left( \frac{B^2}{2\mu_0} + p \right) \right]$$

- Pro řešení MHD rovnic existuje celá řada numerických algoritmů včetně profesionálního software jako NIRVANA, ATHENA, FLASH, .... ([www.astro-sim.org](http://www.astro-sim.org))

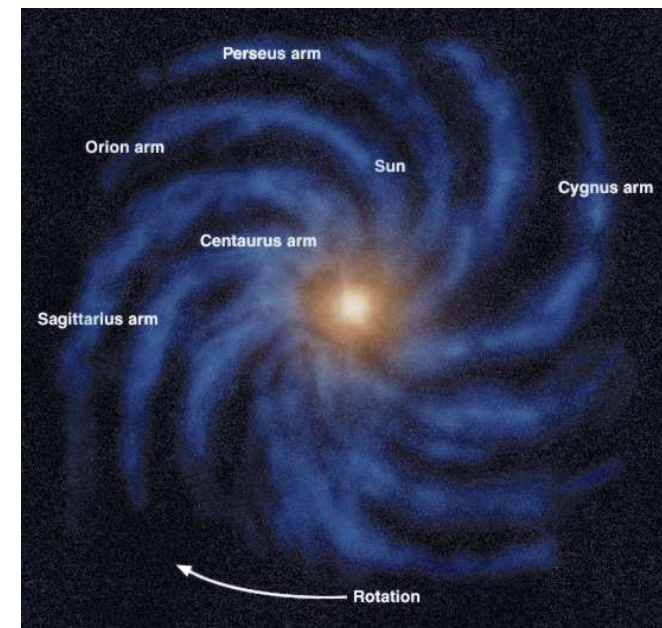
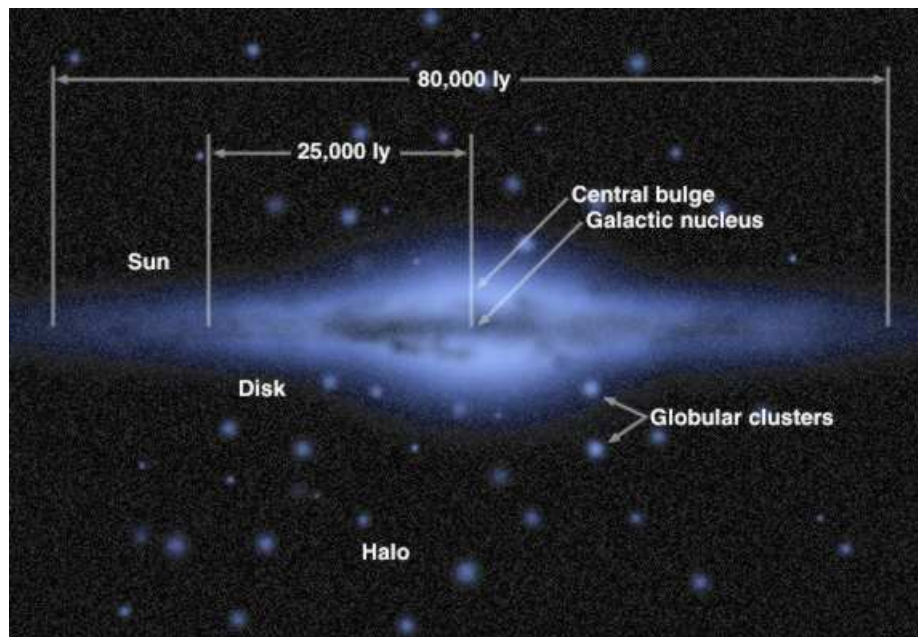


# Více o naší práci ...

- M. Karlický, P. Jelínek, H. Mészárosová, **Magnetoacoustic waves in the narrowband dm-spikes sources**, *Astronomy and Astrophysics* **529**, A96, 2011.
- P. Jelínek, M. Karlický, **Magnetoacoustic waves in diagnostics of the flare current sheets**, *Astronomy and Astrophysics* **537**, A46, 2012.
- P. Jelínek, M. Karlický, K. Murawski, **Magnetoacoustic waves in a vertical flare current-sheet in a gravitationally stratified solar atmosphere**, *Astronomy and Astrophysics* **546**, A49, 2012.
- M. Karlický, H. Mészárosová, P. Jelínek, **Radio fiber bursts and fast magnetoacoustic wave trains**, *Astronomy and Astrophysics*, **550**, A1, 2013.
- P. Jelínek, K. Murawski, **Numerical simulations of magnetoacoustic-gravity waves in the solar coronal curved magnetic field lines structure**, *MNRAS*, **435**, 2347, 2013

# Stavba a parametry Galaxie

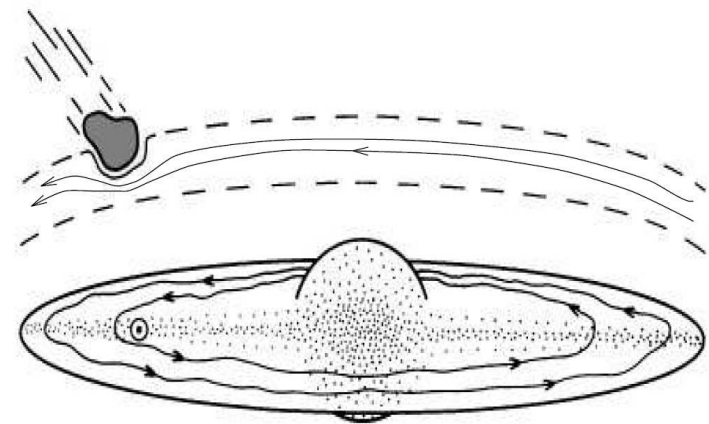
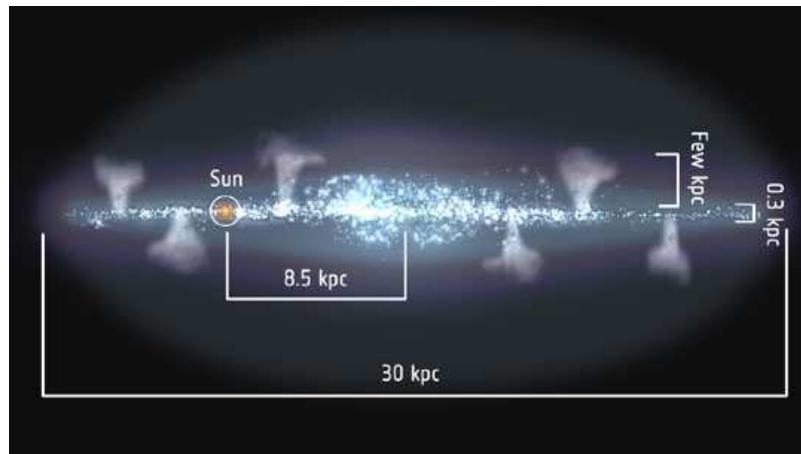
- Naše Galaxie se skládá z hvězd, hvězdokup (kulových, otevřených a hvězdných asociací), temné hmoty, a mezihvězdného prachu a plynu
- Hvězd se v naší Galaxii nachází zhruba 400 miliard, celkový zářivý výkon hvězd v Galaxii činí asi 20 miliard  $L_S$  ( $7,7 \cdot 10^{36}$  W)





# Galaktické fontány

- Exploze supernov v galaktickém disku zahřívají mezihvězdnou látku
- Plyn nad galaktickým diskem ( $\sim 1$  kpc) chladne (kondenzuje) a padá ve formě tzv. „High Velocity Clouds“ ( $\sim 200 \text{ km.s}^{-1}$ ) zpět na galaktický disk





# Numerické řešení

- Pro řešení tohoto problému se použijí opět MHD rovnice ve tvaru (1) – (7), pouze pohybová rovnice má nyní tvar:

$$\varrho \partial_t \vec{v} + \varrho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} + \underline{\underline{\varrho g}}$$

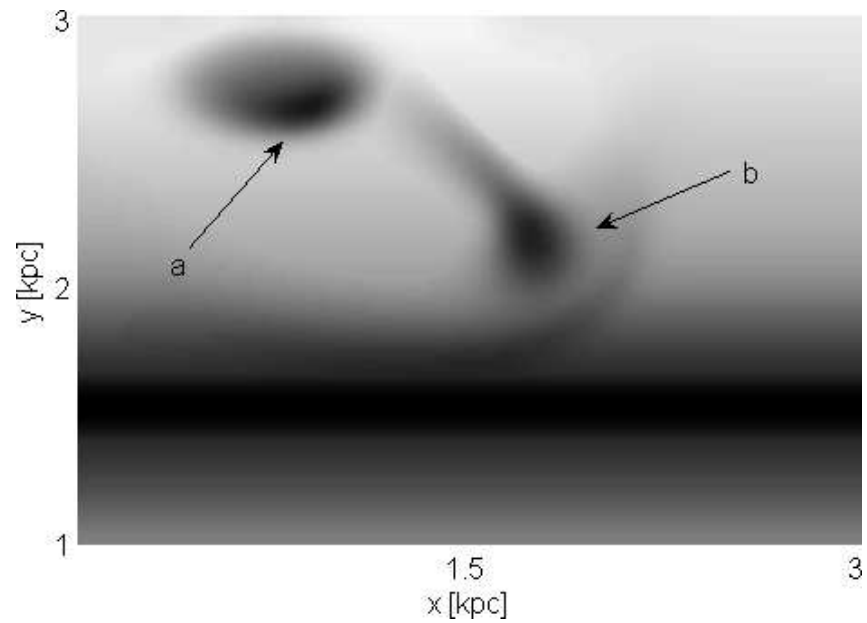
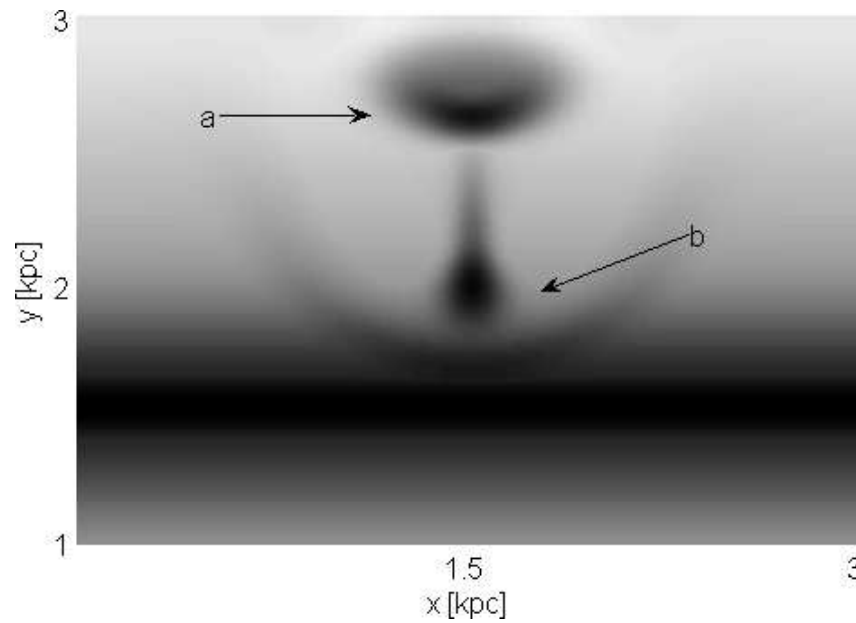
- Hustota se generuje podle vztahu (Santillán et al., 1999):

$$\varrho(y) = \varrho_0 \cdot \left[ 0.60 e^{-0.5 \left( \frac{y}{70 \text{ pc}} \right)^2} + 0.30 e^{-0.5 \left( \frac{y}{135 \text{ pc}} \right)^2} + 0.07 e^{-0.5 \left( \frac{y}{135 \text{ pc}} \right)^2} + 0.10 e^{-\frac{|y|}{400 \text{ pc}}} + 0.03 e^{-\frac{|y|}{900 \text{ pc}}} \right]$$

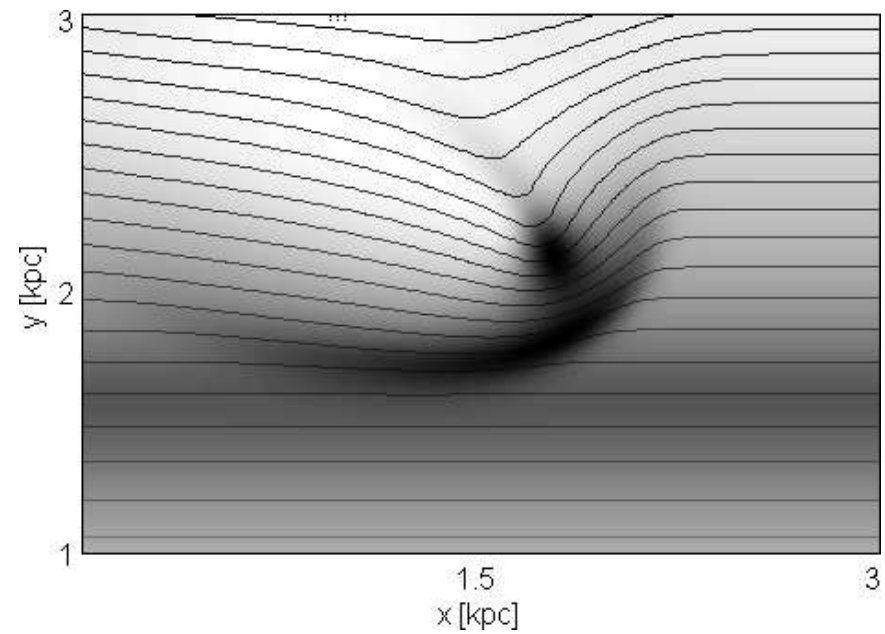
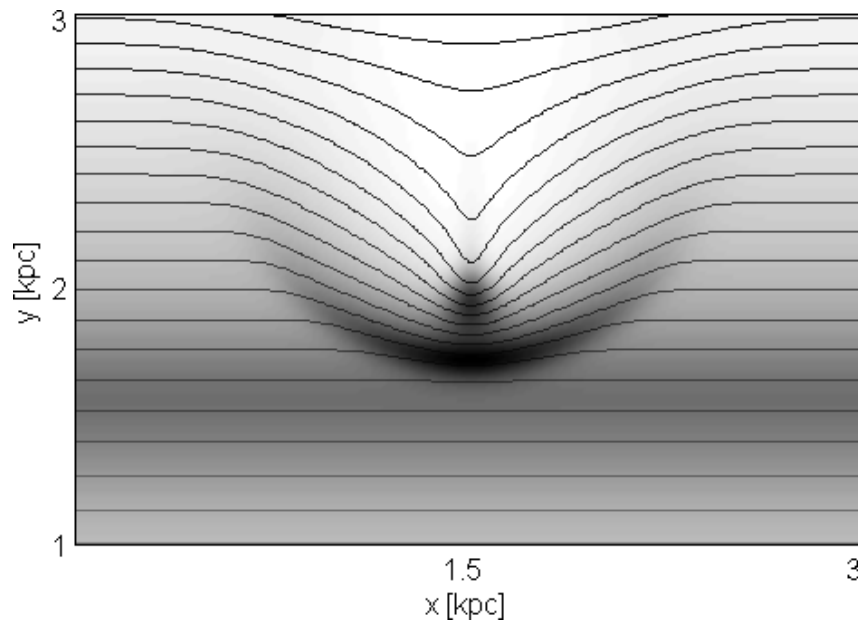
- Gravitační zrychlení (Santillán et al., 1999):

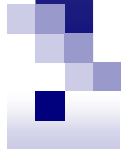
$$g(y) = 8 \cdot 10^{-11} \left( 1 - 0.52 e^{-\frac{|y|}{325 \text{ pc}}} - 0.48 e^{-\frac{|y|}{900 \text{ pc}}} \right)$$

# Srážky HVCs s galaktickým diskem – I.



# Srážky HVCs s galaktickým diskem – II.





Děkuji za pozornost

