

# 11. Koróna, sluneční vítr

Sluneční fyzika  
LS 2007/2008

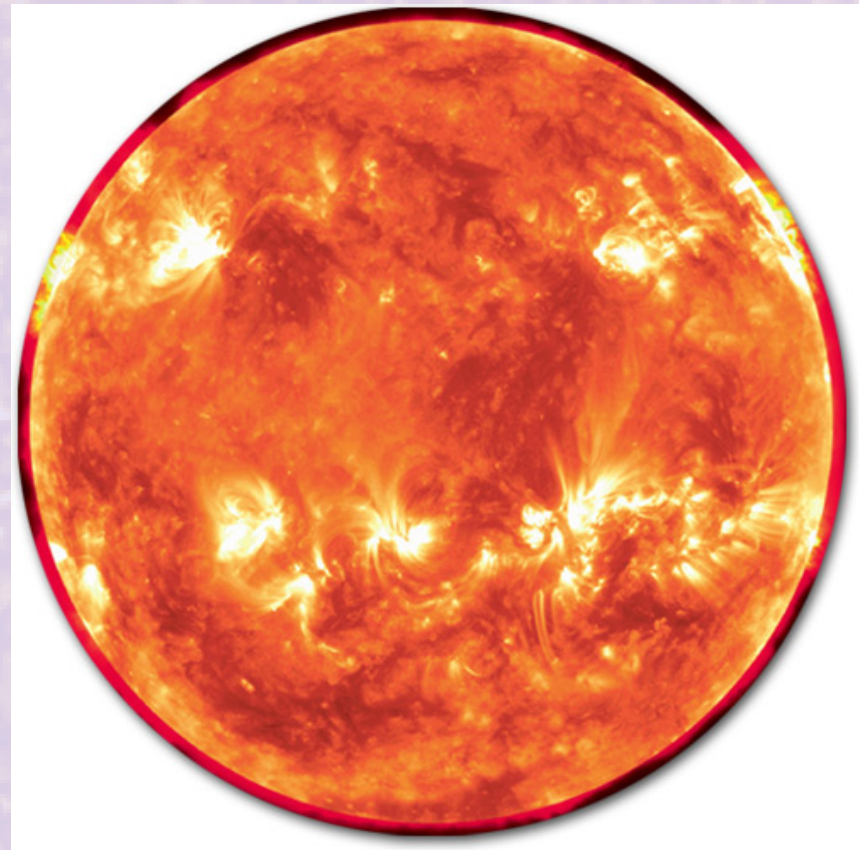
**Michal Švanda**

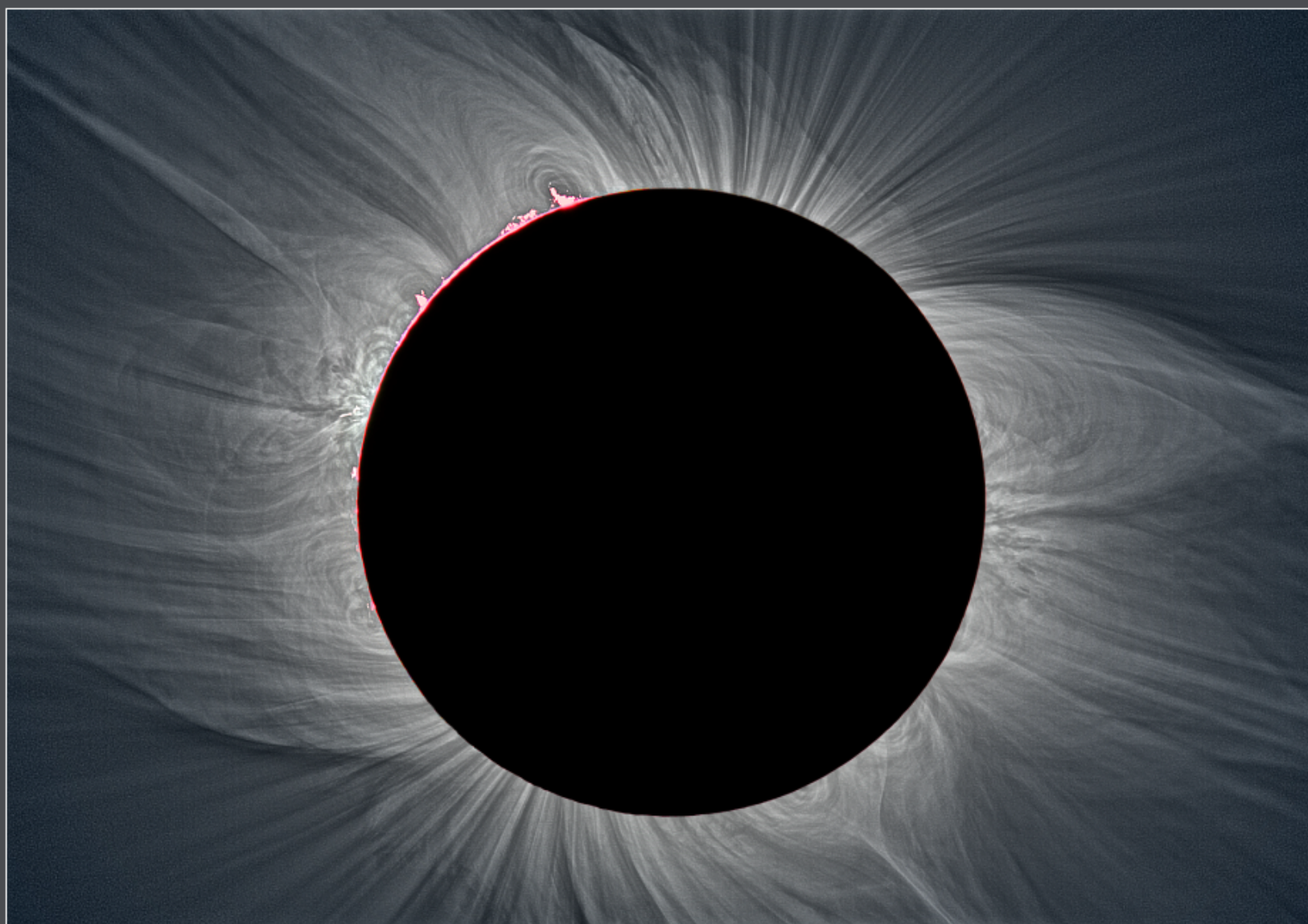
Astronomický ústav MFF UK  
Astronomický ústav AV ČR



## Přechodová oblast

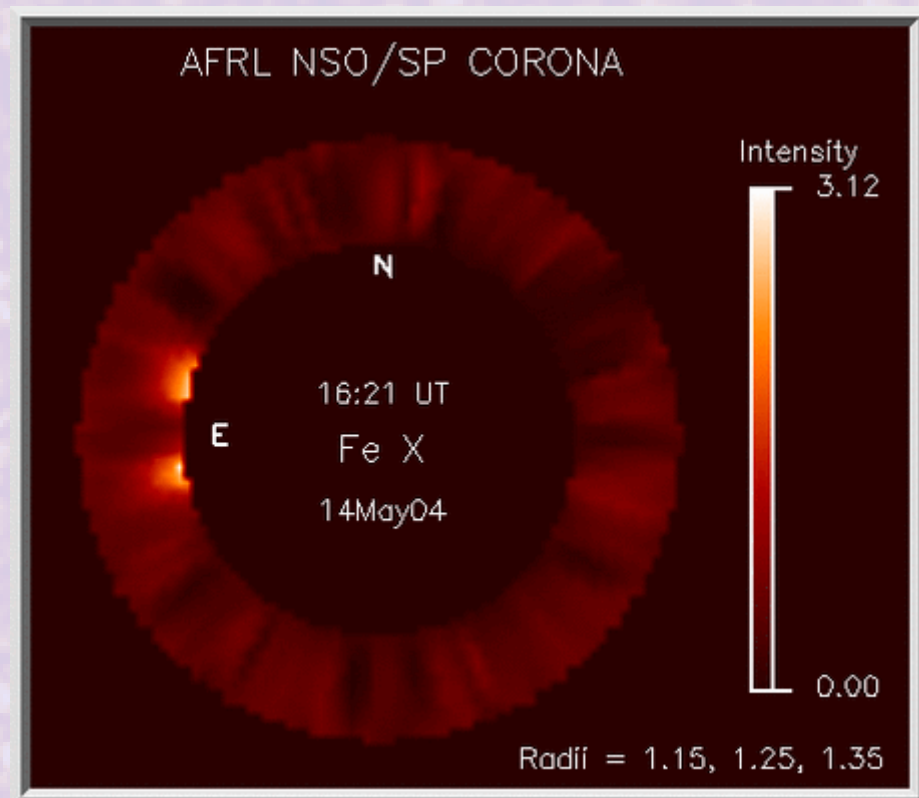
- Změna teplotní režimu mezi chromosférou ( $10^4$  K) a korónou ( $10^6$  K)
- Nehomogenní, pohyby (doppler-shift), vývoj
- S výškou se nehomogenity stírají – rozpínající se trubice magnetického pole?





# Složky koróny

- F – Fraunhoferovy čáry
- K – kontinuum – vysoká teplota, čáry rozmyty pohyby
  - Polarizovaná
    - Thomsonův rozptyl na volných elektronech
- E – emisní
  - Vlastní záření, velmi slabá
  - Zakázané čáry i v optické oblasti spektra
    - Zelená koróna
    - „Korónium“ = Fe X (637,5 nm)
- T – termální emise částic prachu



# Empirický profil intenzity

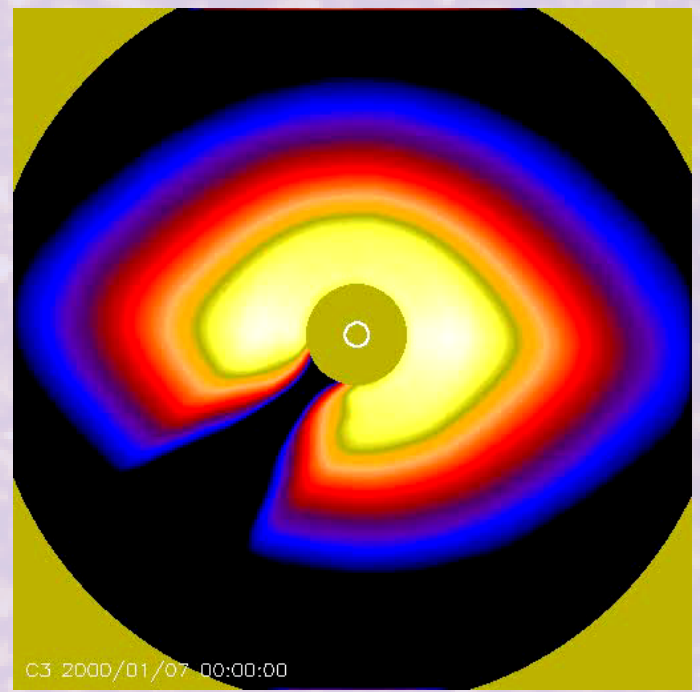
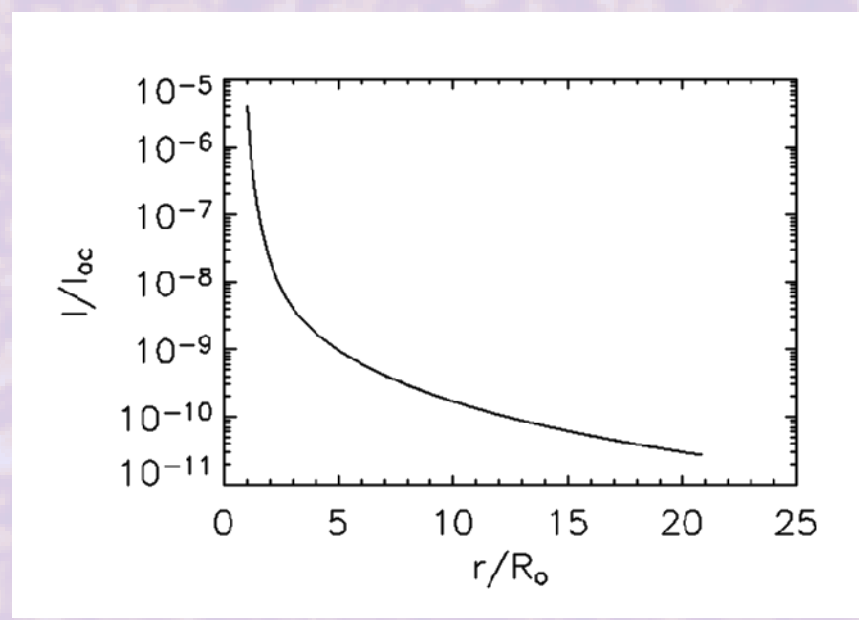
$$\frac{I}{I_{oc}} = 10^{-6} \left( \frac{0,0532}{x^{2,5}} + \frac{1,424}{x^7} + \frac{2,565}{x^{17}} \right)$$

F-koróna                      K-koróna

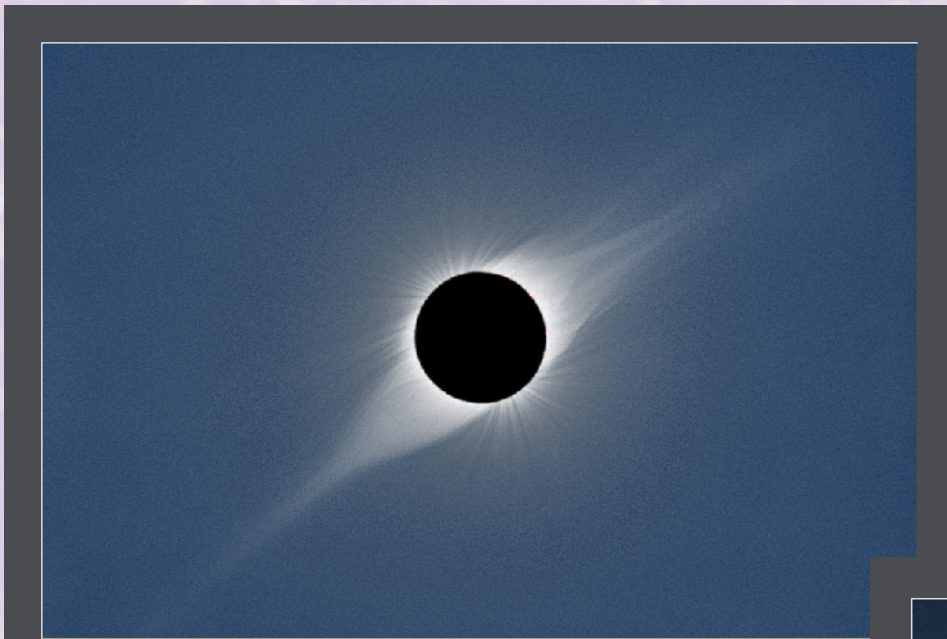
$$x = \frac{r}{R_0}$$

Pro Thomsonův rozptyl:

$$E_k \sim \sigma_T n_e R_o I_{oc}$$
$$E_k(R_o) \sim 10^{-6} I_{oc}$$
$$\rightarrow n_e \sim 4 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$$



# Koróna v minimu/maximu

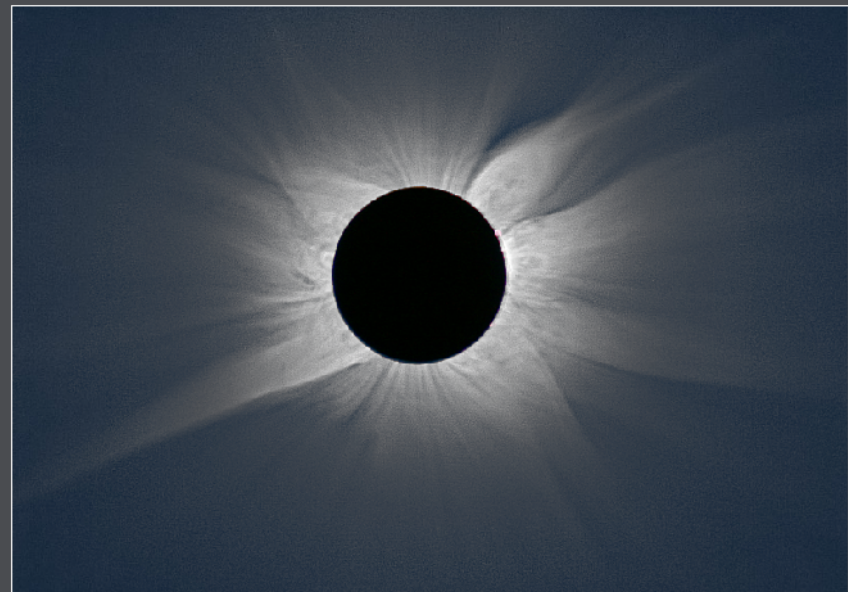


Total Solar Eclipse 1995

© 1995 Vojtech Rušin © 2004 Miloslav Druck

← Minimum (1995)

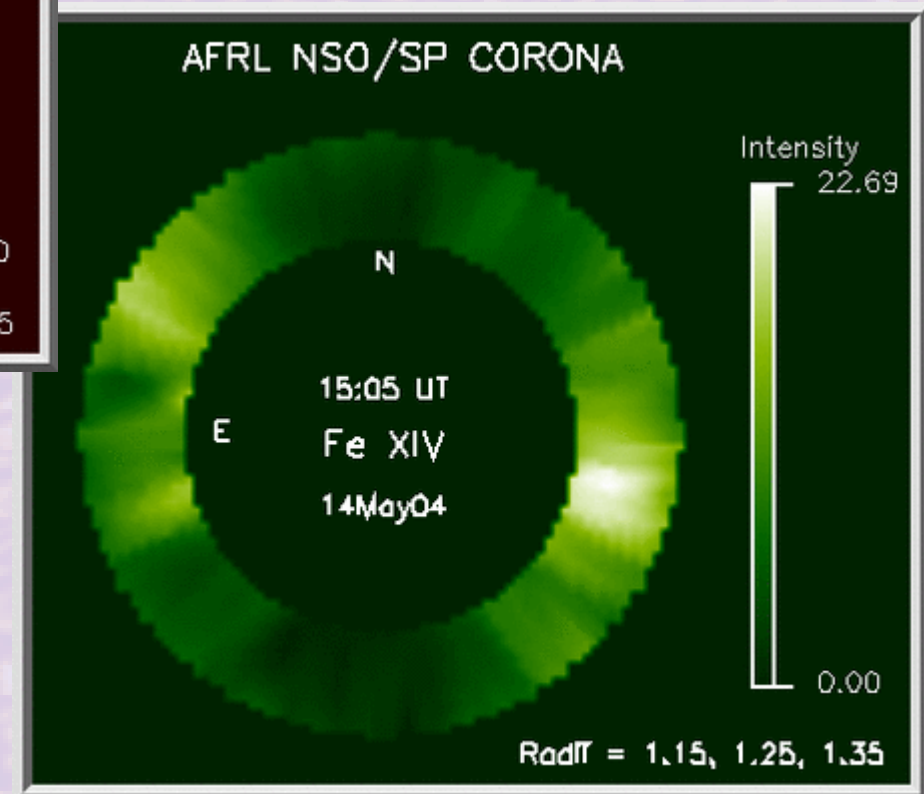
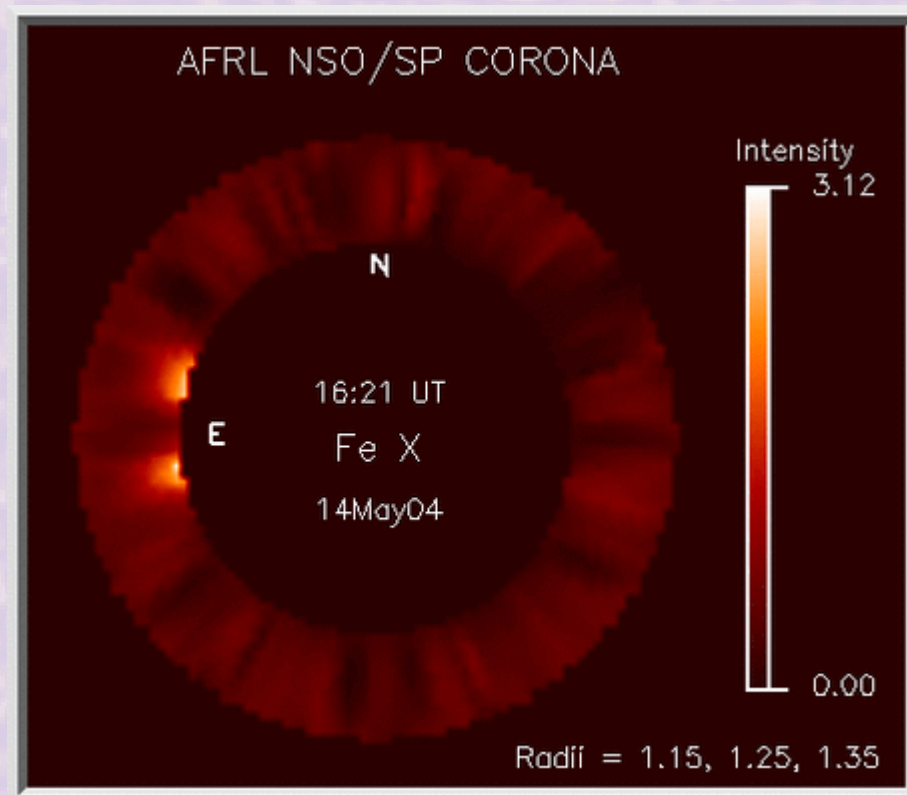
Maximum (2003) →



Total Solar Eclipse 2003

© 2003 David Finlay © 2005 Miloslav Druckmüller

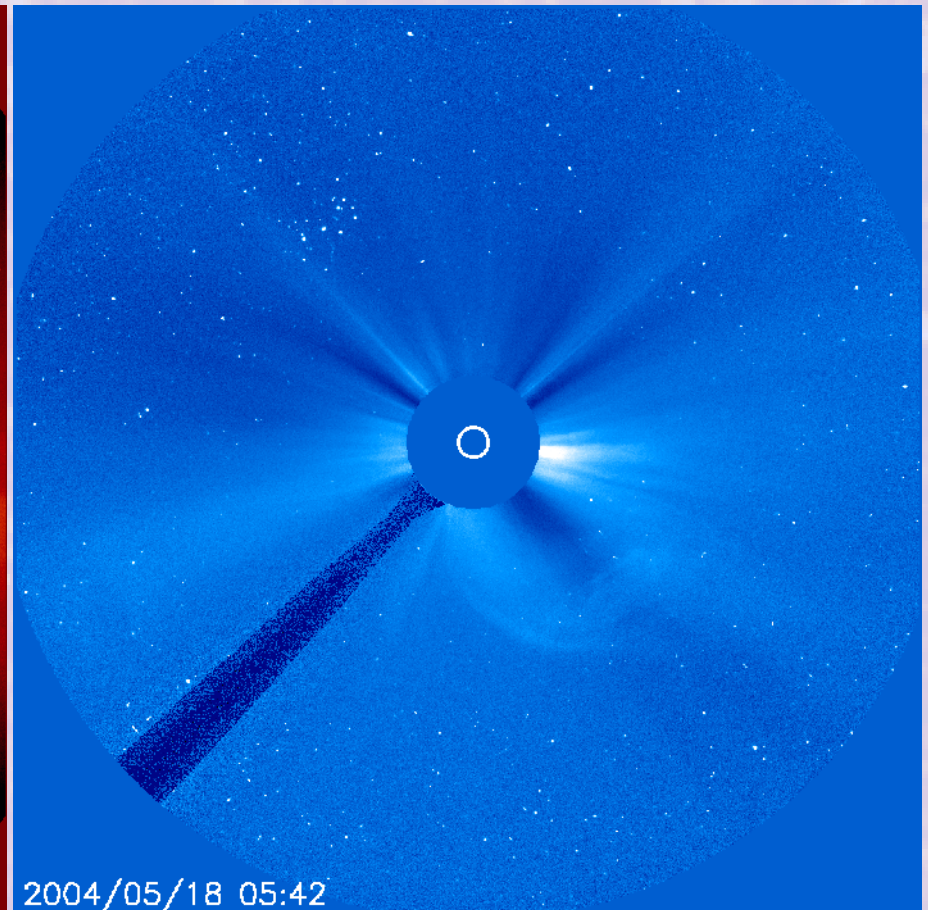
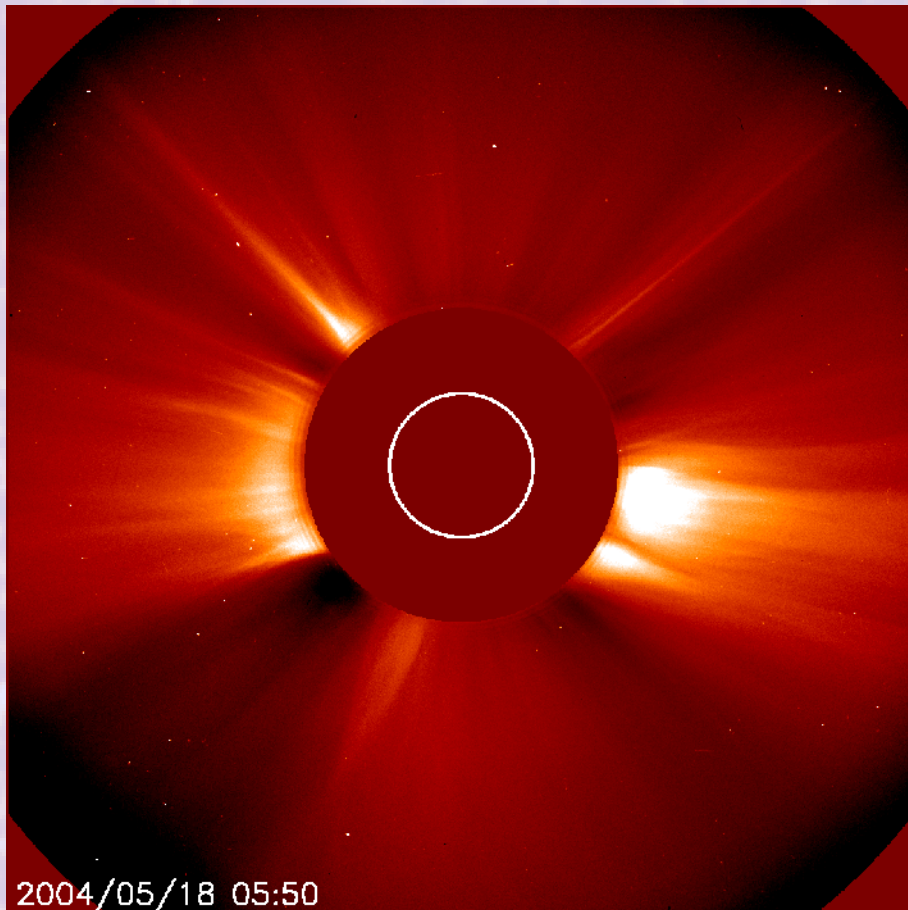
# Zakázané čáry



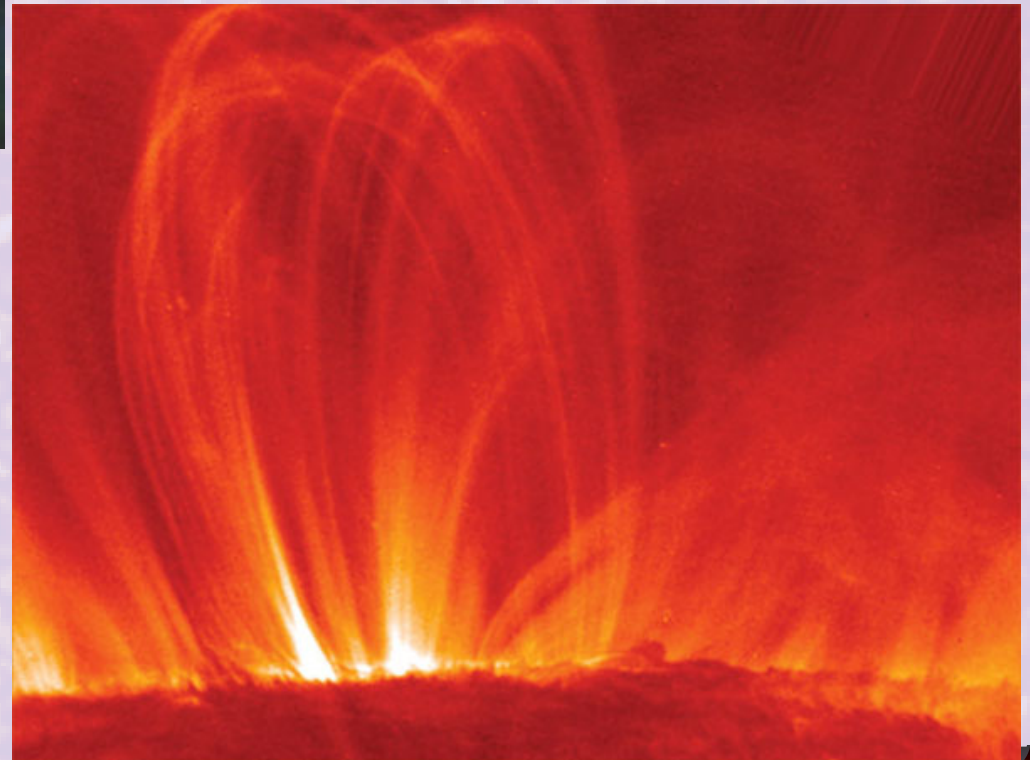
# Zelená koróna





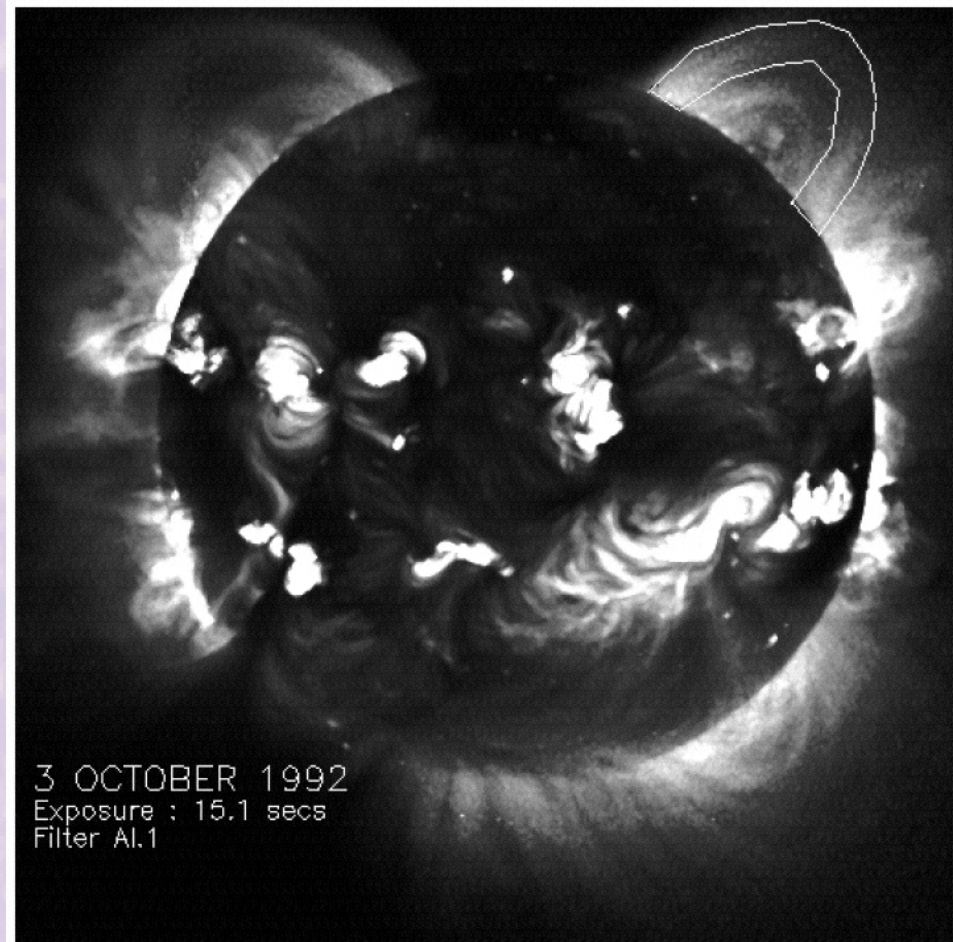


# TRACE



# Ohřev koróny proudy podél smyček

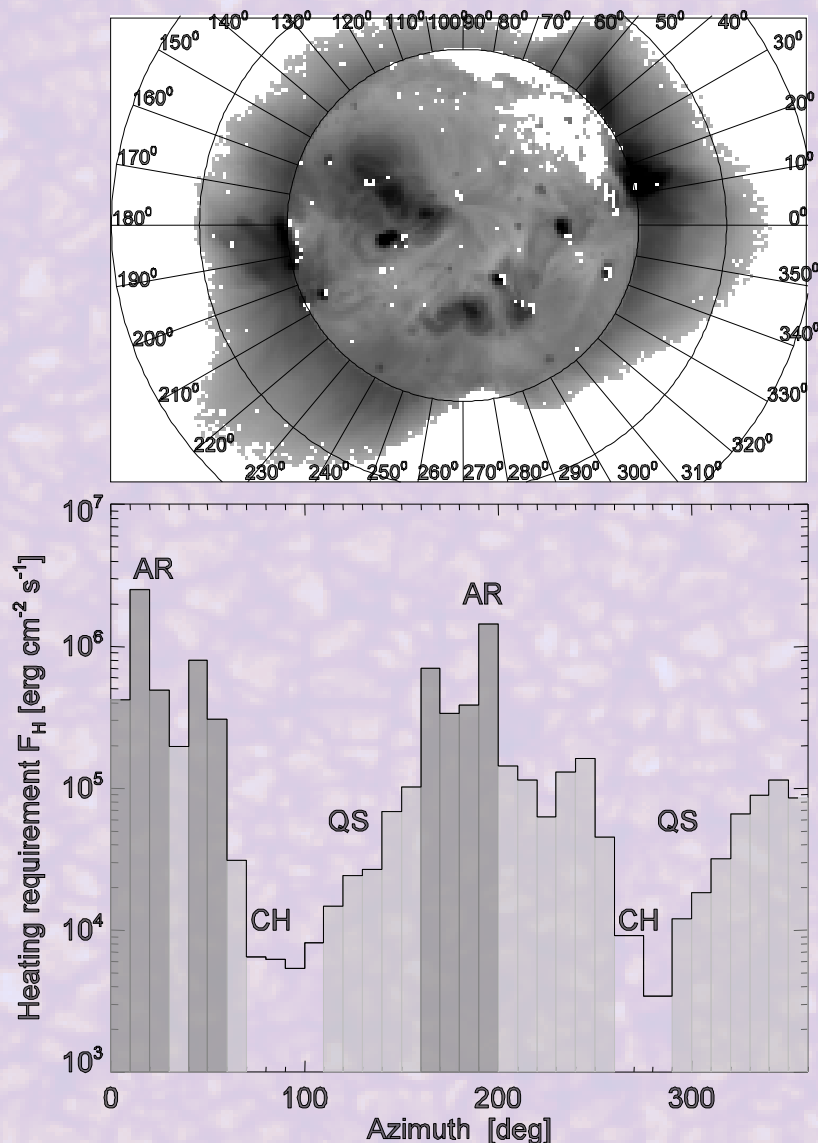
- Priest et al. (2000)
- Ohřev je balancován teplem vedeným podél smyček, diskutovány různé zdroje energie



# Kolik energie je potřeba

- Kolik energie je potřeba dodat v jednotlivých sektorech pozorování koróny z 26. 8. 1992

- AR = aktivní oblast
- QS = klidné Slunce
- CH = koronální díra



# Uvažované mechanismy koronálního ohřevu

Coronal Heating Models (adapted from Mandrini et al. 2000)

Physical process

References

## *DC Stressing and Reconnection Models:*

- Stress-induced reconnection
- Stress-induced current cascade
  - Stress-induced turbulence

Sturrock & Uchida (1981)  
Parker (1983, 1988)  
Van Ballegooijen (1986)  
Heyvaerts & Priest (1992)

## *. AC Wave Heating Models:*

- Alfvénic resonance
- Resonant absorption
  - Phase mixing
  - Current layers
- MHD Turbulence
- Cyclotron resonance

Hollweg (1985, 1991)  
Ionson (1978, 1982, 1983), Mok (1987))  
Heyvaerts & Priest (1983)  
Galsgaard & Nordlund (1996)  
Inverarity & Priest (1995b)  
Hollweg (1986), Hollweg & Johnson (1988)

## *. Acoustic Heating:*

- Acoustic waves

Schatzman (1949)  
Kuperus, Ionson, & Spicer (1981)

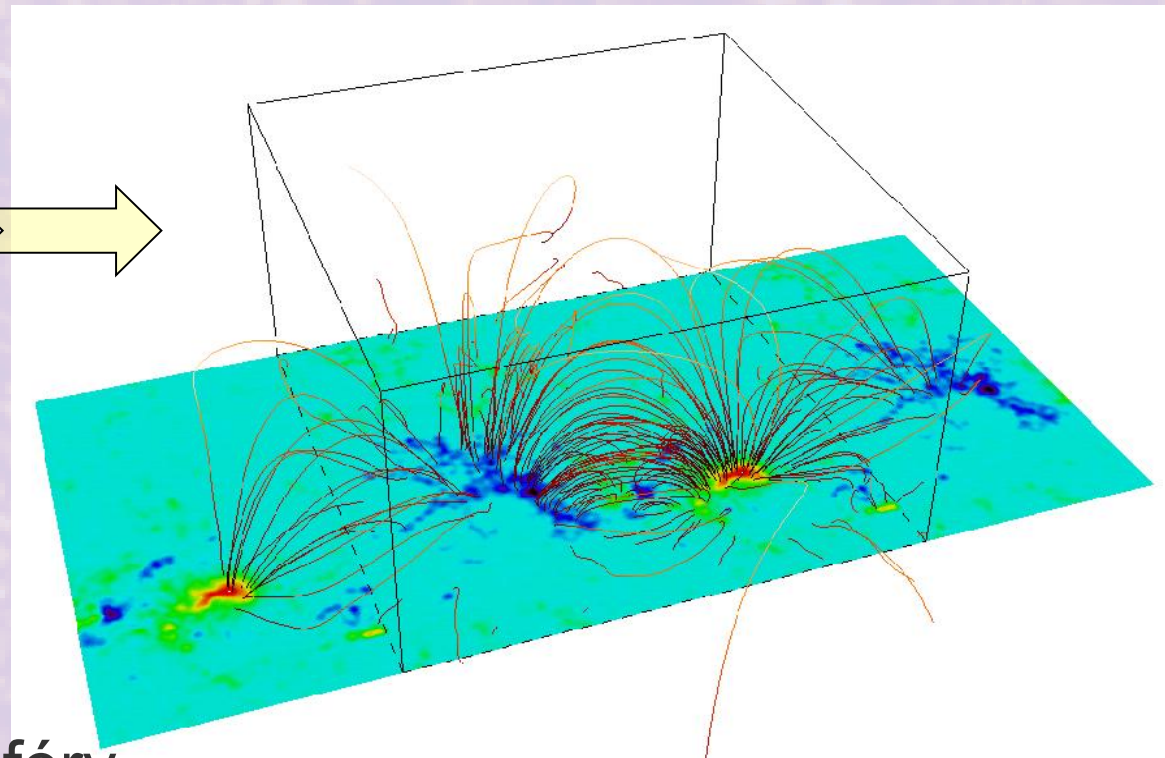
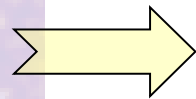
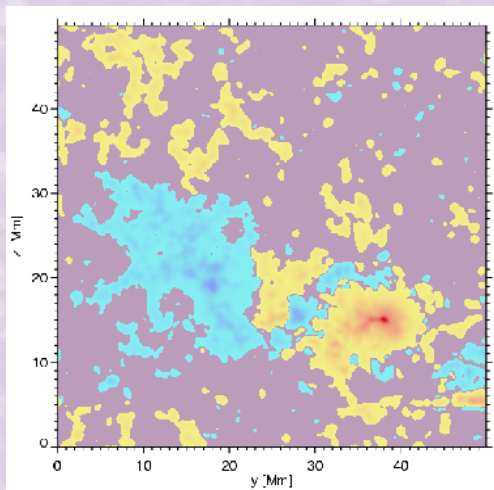
## *. Chromospheric Reconnection:*

## *. Velocity Filtration:*

Litvinenko (1999)  
Scudder (1992a,b; 1994)

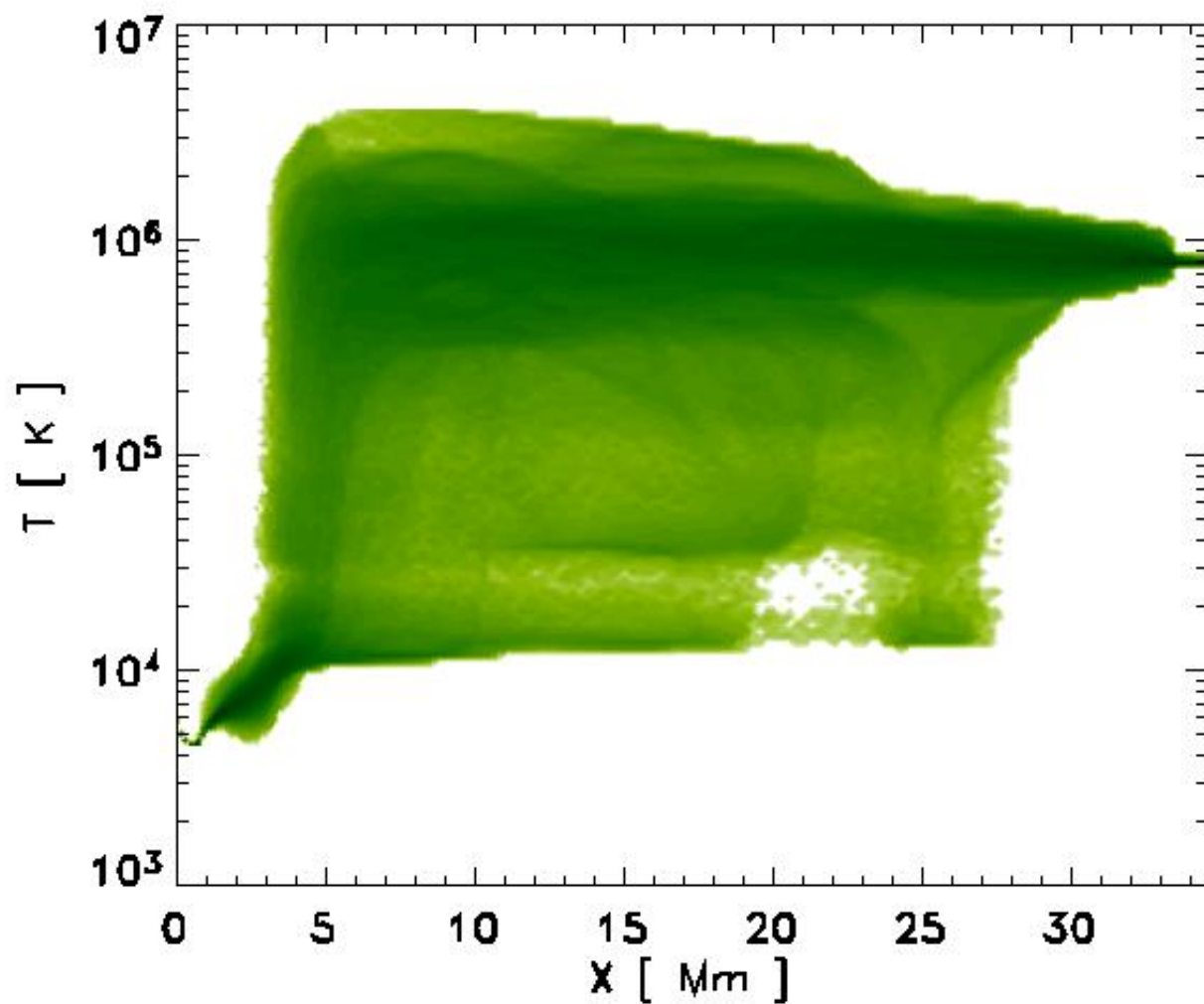
## 3-D simulace (Gudiksen, Nordlund)

- Magnetické pole AR 9114 – potenciální extrapolované, měřené rychlostní pole – ze sledování granulí

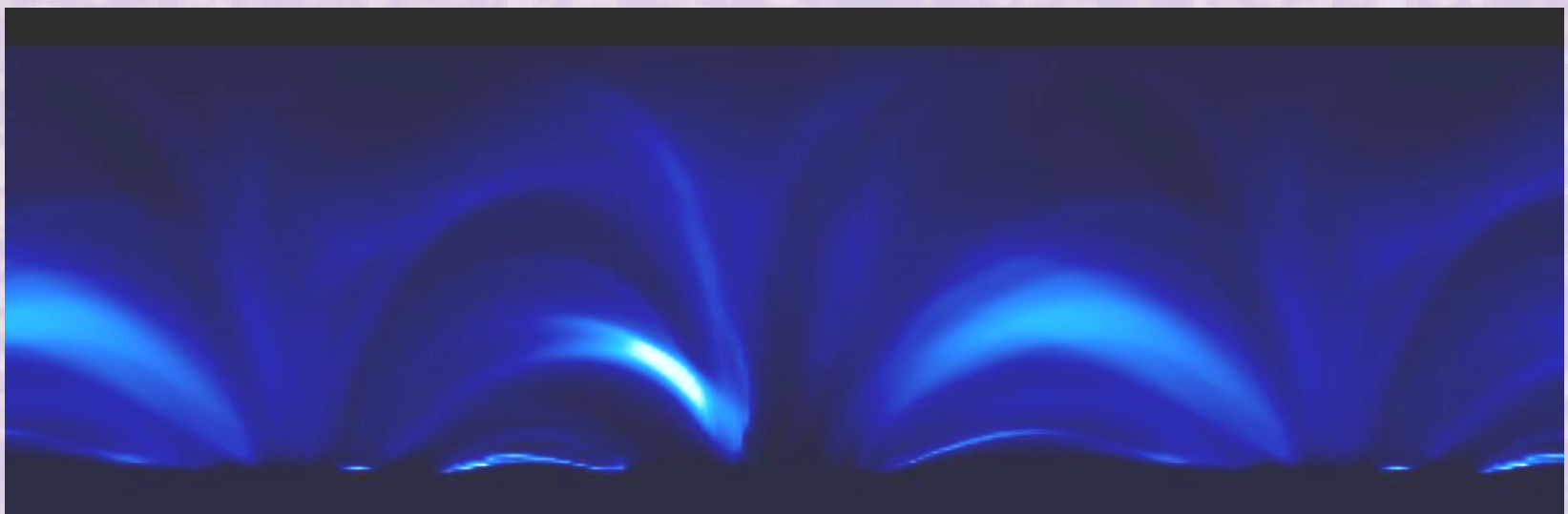
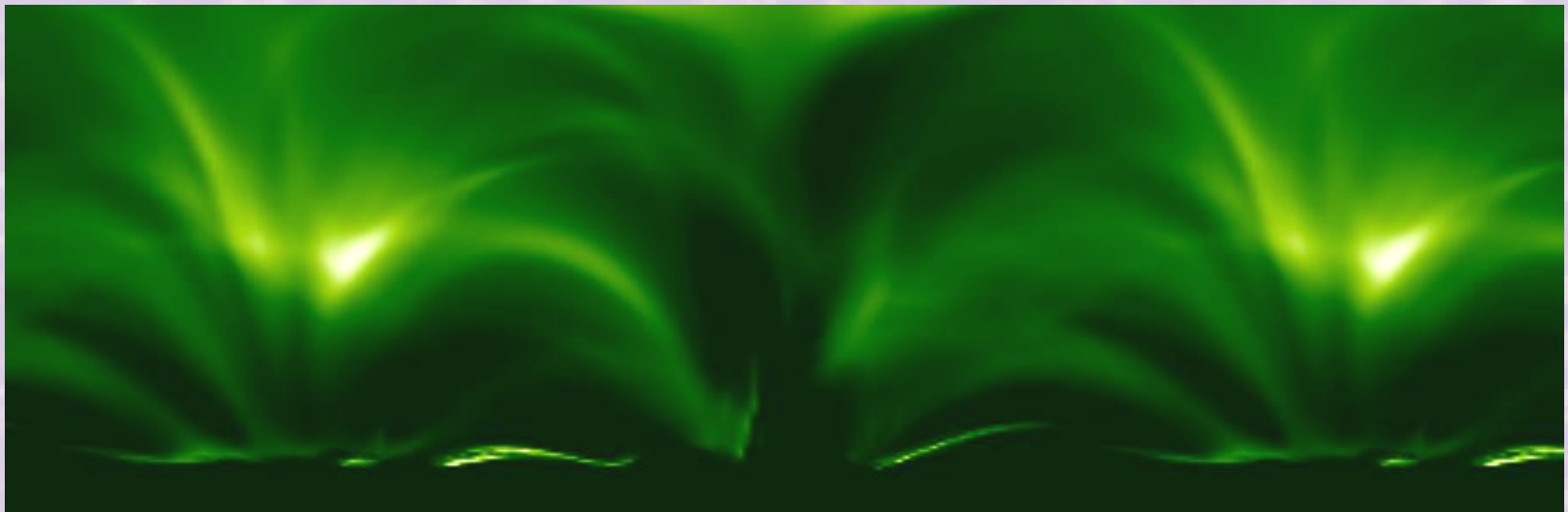


- VAL model atmosféry
- Realistická fyzika (vodivost plazmatu, zářivé ochlazování)
- Plně 3-D kompresibilní MHD simulace

# Výsledné rozdělení teplot



# Syntetické „snímky“ TRACE





- 3-D MHD, with observed photospheric velocities and an actual AR magnetic field unavoidably produces a loop-structured, million degree corona
- Additional improvements can only increase the heating
  - Increased numerical resolution
  - Emerging flux
  - Systematic AR velocity fields

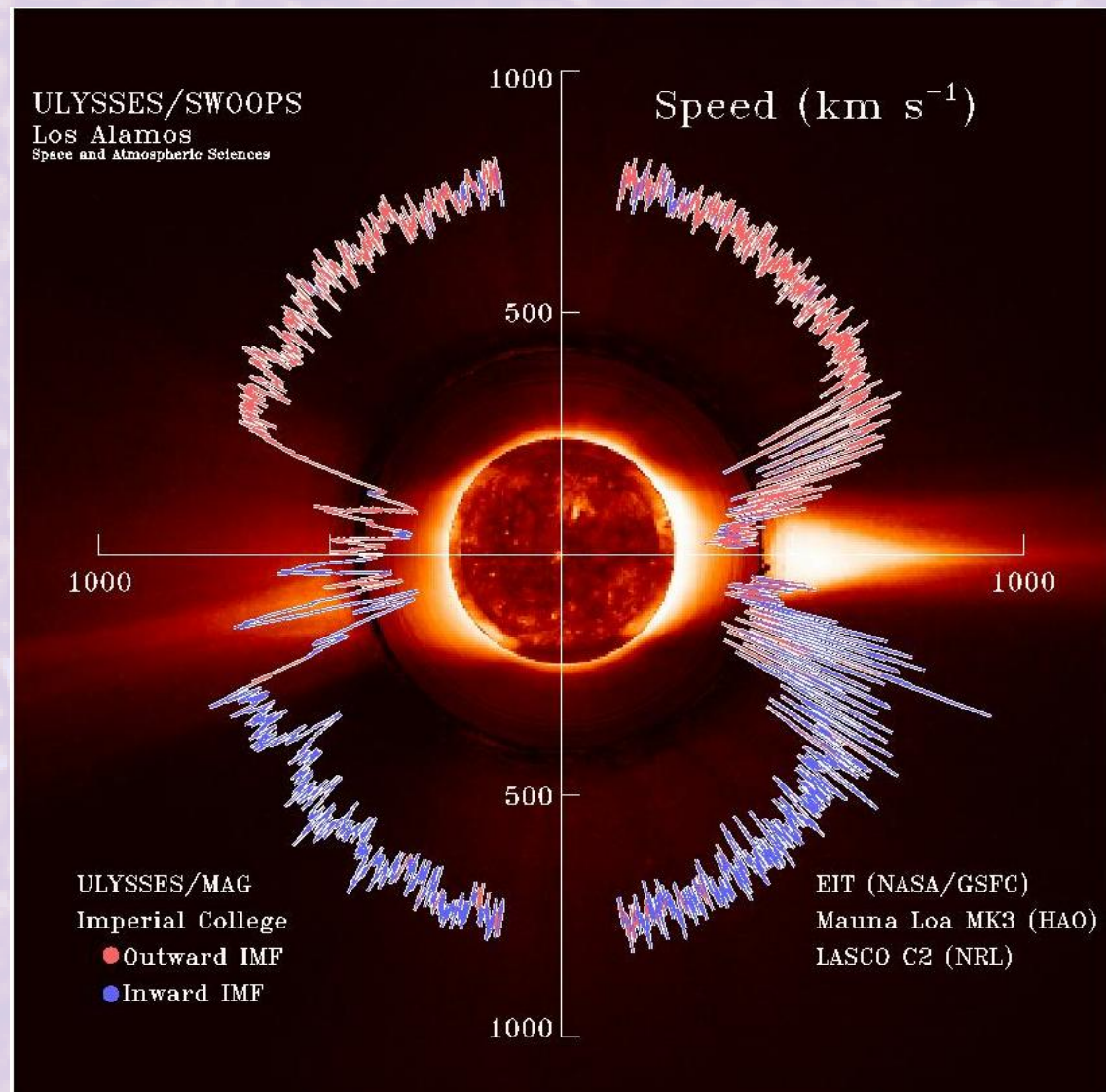
# Mini, mikro, nano

	<b>Energie [J]</b>	<b>Teplota [MK]</b>	<b>Hustota elektronů [m<sup>-3</sup>]</b>
<i>Velké erupce</i>	$10^{23}-10^{26}$	8–40	$0,2-2 \times 10^{17}$
<i>Mikro-erupce</i>	$10^{20}-10^{23}$	1–8	$0,2-2 \times 10^{16}$
<i>Nano-erupce</i>	$10^{17}-10^{20}$	1–2	$0,2-2 \times 10^{15}$

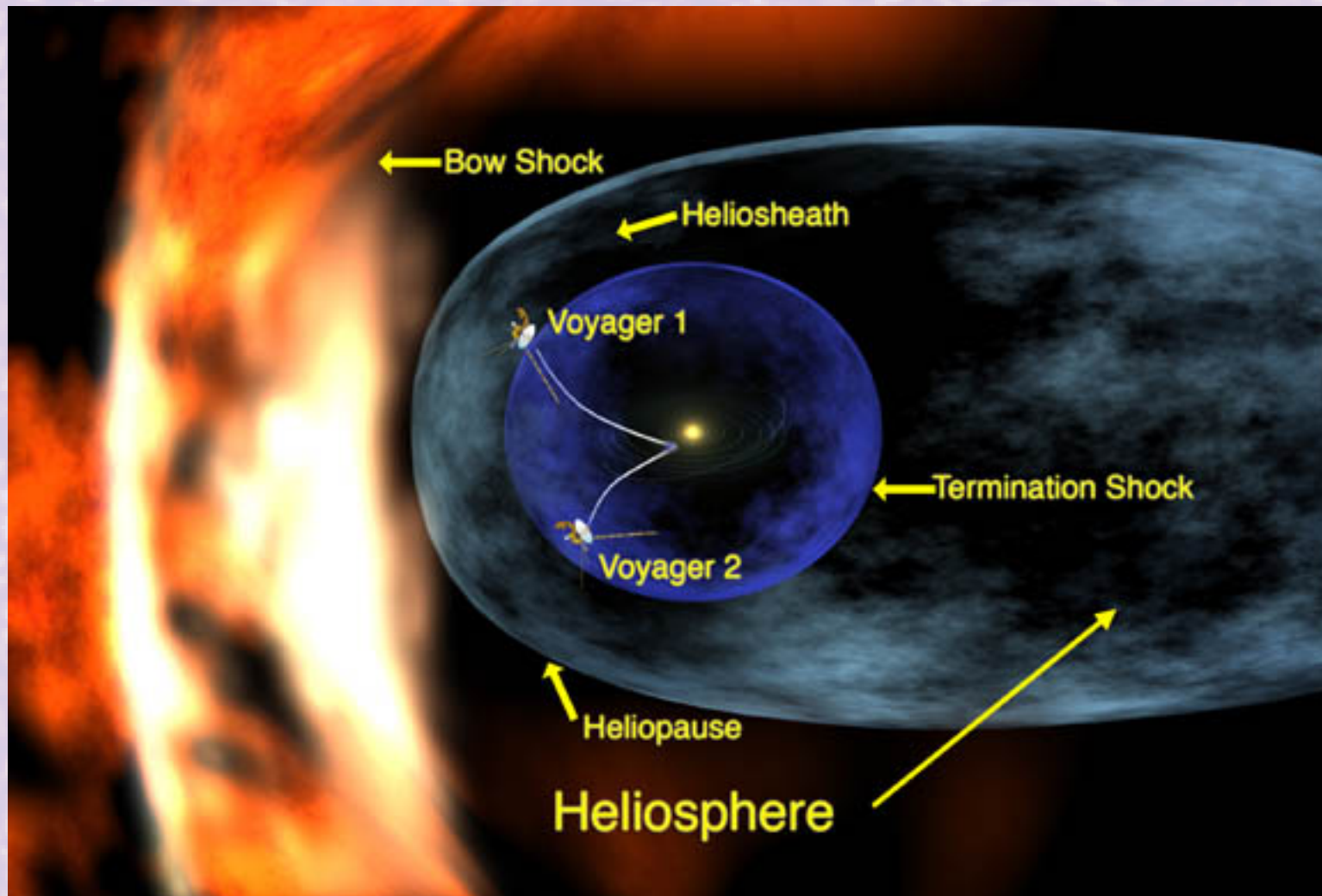
- Polovina 20. století -- „sluneční částicové záření“ jako prostředek k vysvětlení geomagnetických bouří
- Geomagnetické bouře – nárůst meziplanetárního magnetického pole obvykle dva dny po erupci
  - Musí existovat jakési elektrické spojení mezi Zemí a Sluncem
- 1950 – Biermann – iontové stopy komet míří vždy od Slunce
  - Existence stálého toku částic, které to umožní, energie fotonů nestačí
  - Potřeba velkých rychlostí a velkých hustot (nefyzikální)
- Chapman (1957) – statická koróna
- Parker (1958) – dynamická koróna

# Pomalý/rychlý

- Pomalý – uzavřené pole, cca 400 m/s
- Rychlý – otevřené pole (koronální díry), cca 700 m/s
- Explosivní události – rychlost až 1200 m/s
- Ulysses – sonda na heliopolární dráze

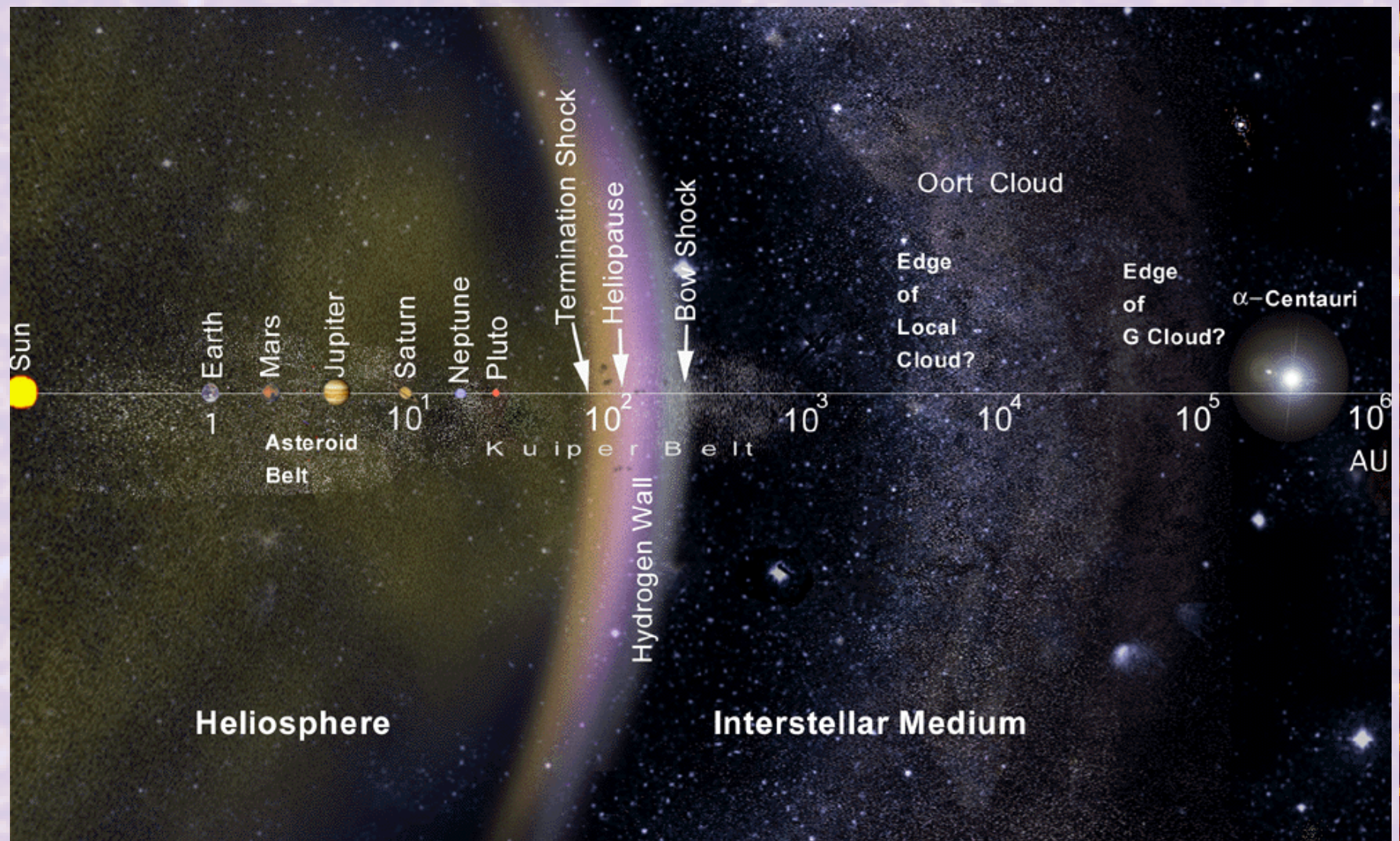


# Heliosféra

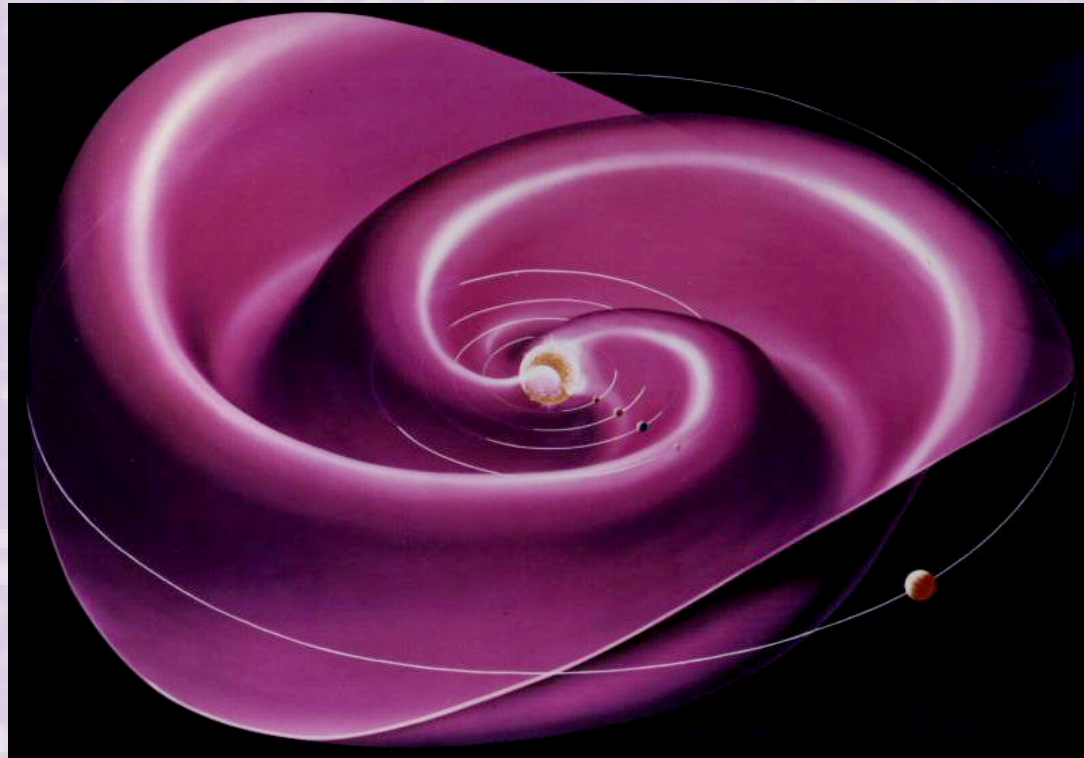


- **Termination shock** (terminační vlna) – nadzvukový sluneční vítr je zpomalován pod rychlost zvuku působením mezihvězdného prostředí
- **Heliosheath** (heliosférický plazmový chvost, heliosférická obálka) – oblast podzvukového slunečního větru, vliv okolí způsobuje tvar „kometry“
- **Heliopauza** – přímé setkání obou médií, hranice heliosféry
- **Bow shock** (čelní rázová vlna) – heliosféra se pohybuje mezihvězdným prostředím, na jejím čele vzniká turbulentní oblast, v níž je zvýšený tlak způsobený pohybem heliosféry – rázová vlna

# Blízký prostor z hlediska vlivu Slunce



- Rozhraní polarit meziplanetárního magnetického pole (IMF)
- Pole má tvar spirál (důsledek rotace Slunce)
  - Parkerovy spirály
- Proud celkově ~3 GA
- Vede k **sektorové struktuře IMF**





- Perspektivní obor
  - Hodně peněz
  - „Aplikovaná sluneční fyzika“
- Sledování stavu IMF v okolí Země
- Geomagnetické bouře
- Polární záře
- Ionosférické poruchy
- Poruchy elektroniky
- Poruchy dálkových vedení

