

Koróna, sluneční vítr

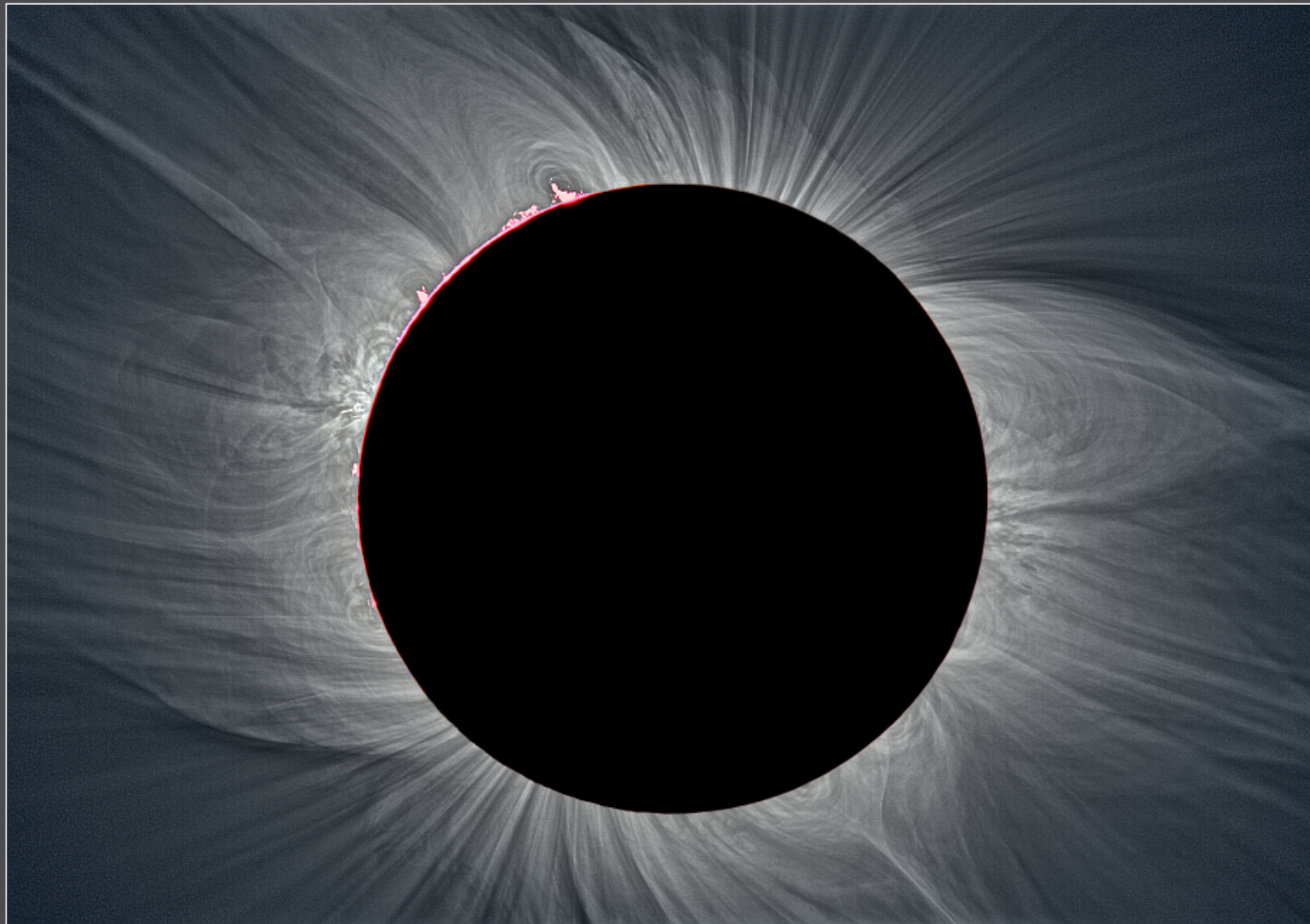
Michal Švanda
Sluneční fyzika LS 2014/2015

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?



Koróna

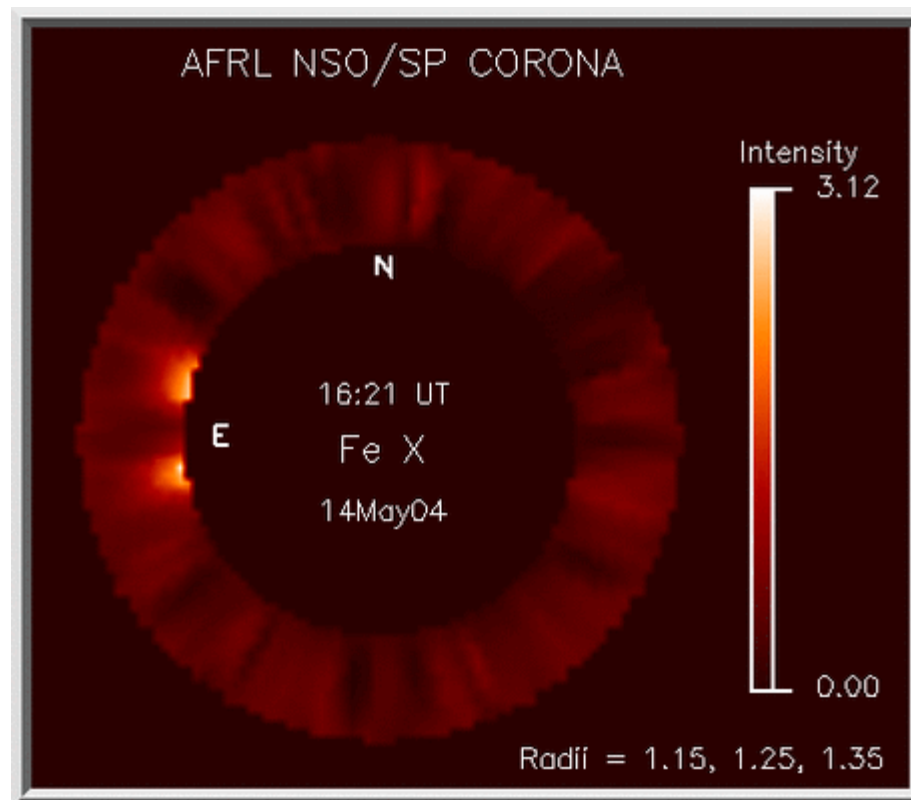


Total Solar Eclipse 2006

© 2006 Miloslav Druckmüller, Peter Aniol

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



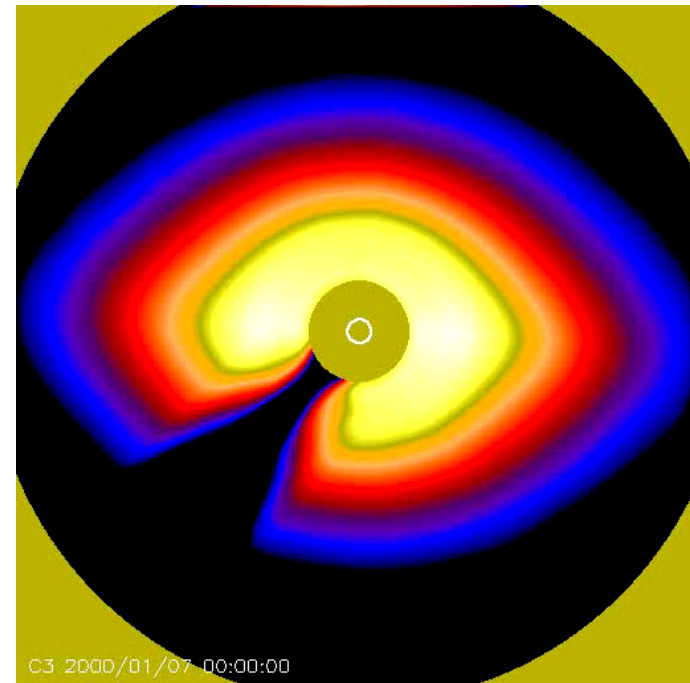
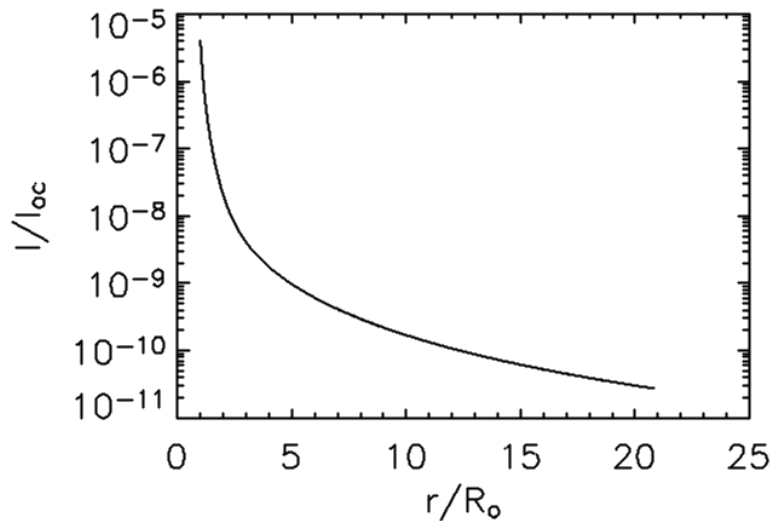
Empirický profil intenzity

$$\frac{I}{I_{0c}} = 10^{-6} \left(\frac{0.0532}{x^{2.5}} + \frac{1.425}{x^7} + \frac{2.565}{x^{17}} \right)$$

F-koróna

K-koróna

Pro Thomsonův rozptyl:



C3 2000/01/07 00:00:00

Koróna v minimu / maximu

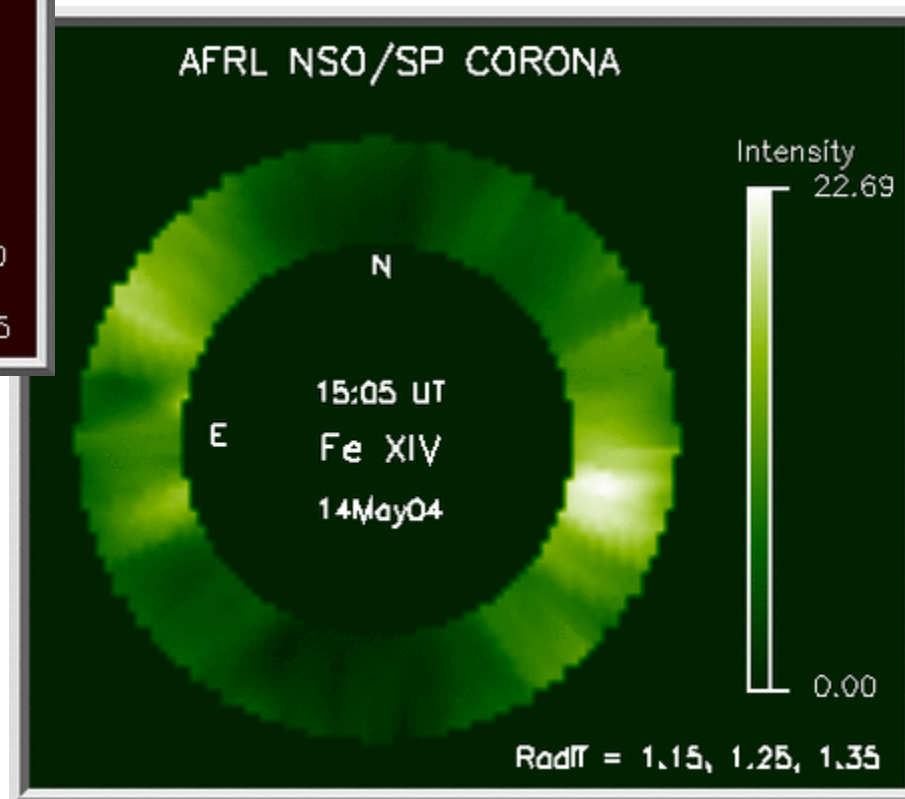
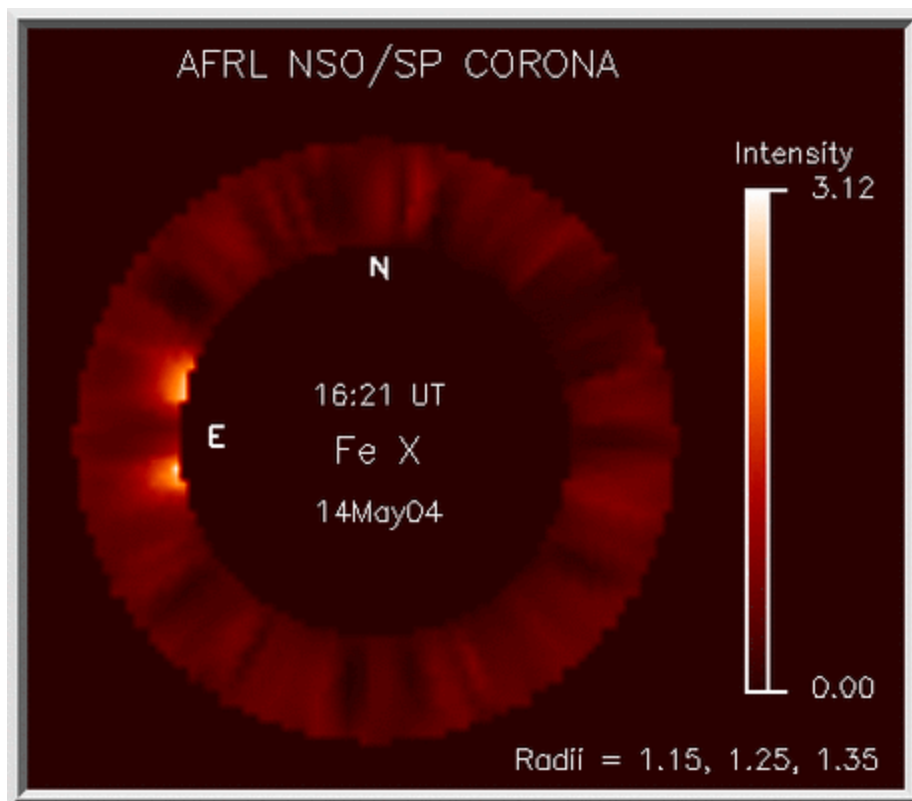


← Minimum (1995)

Maximum (2003) →



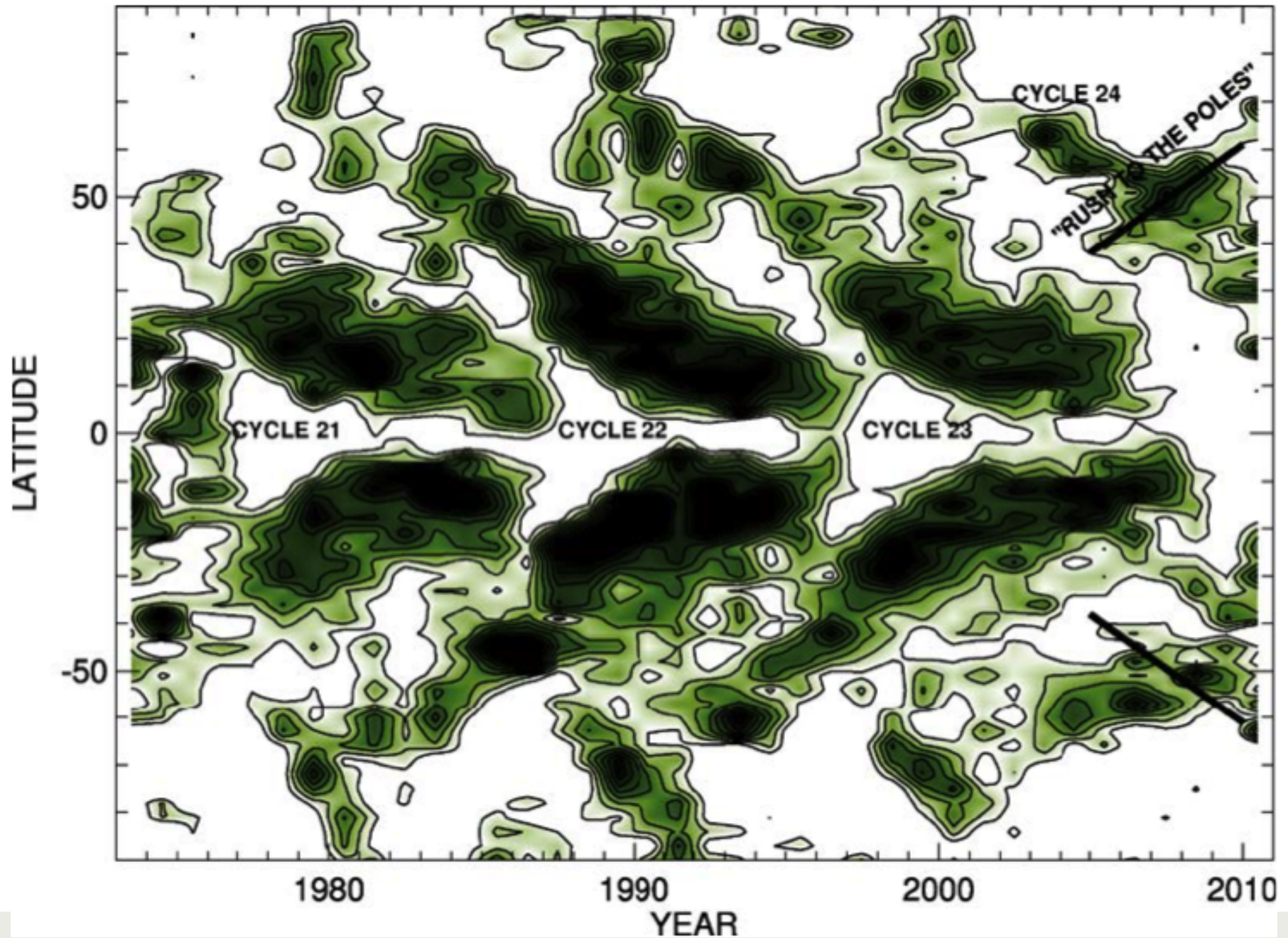
Zakázané čáry



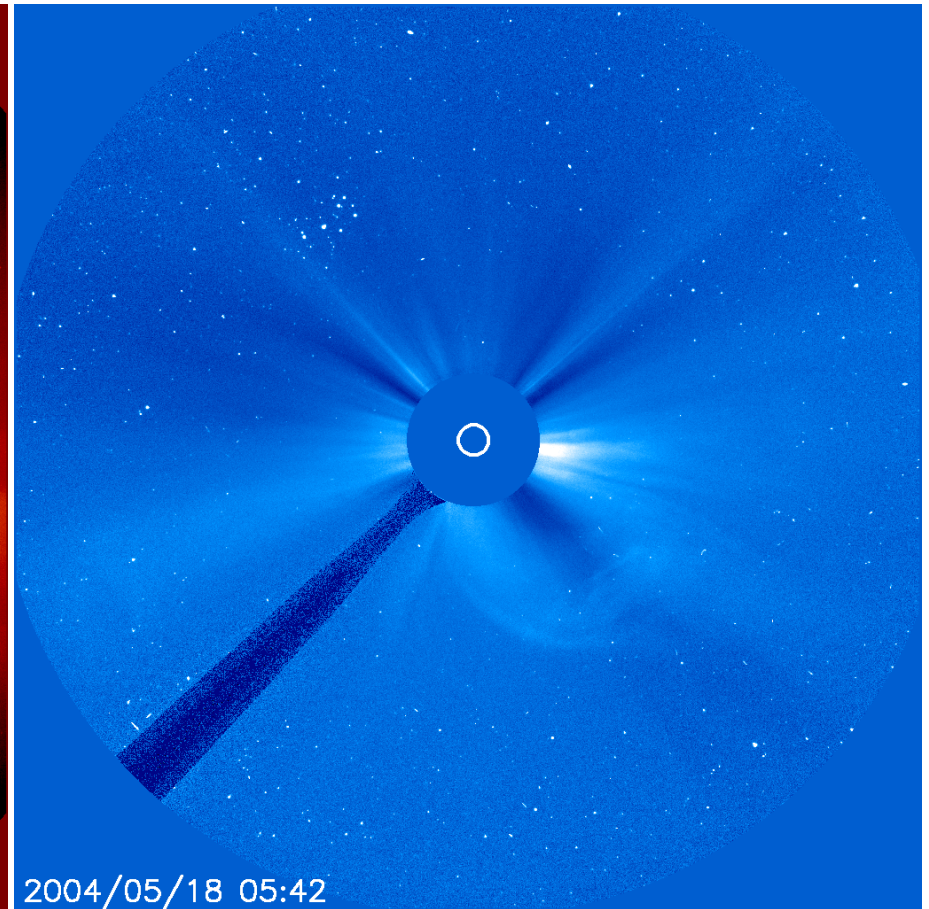
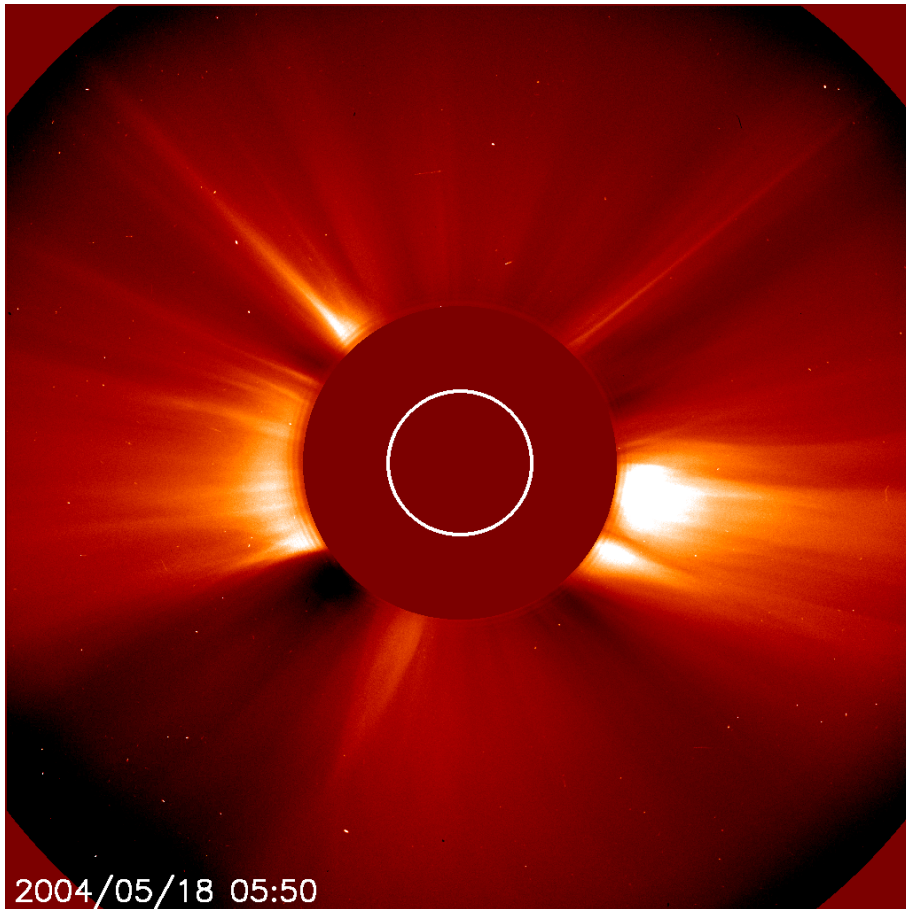
Zelená koróna



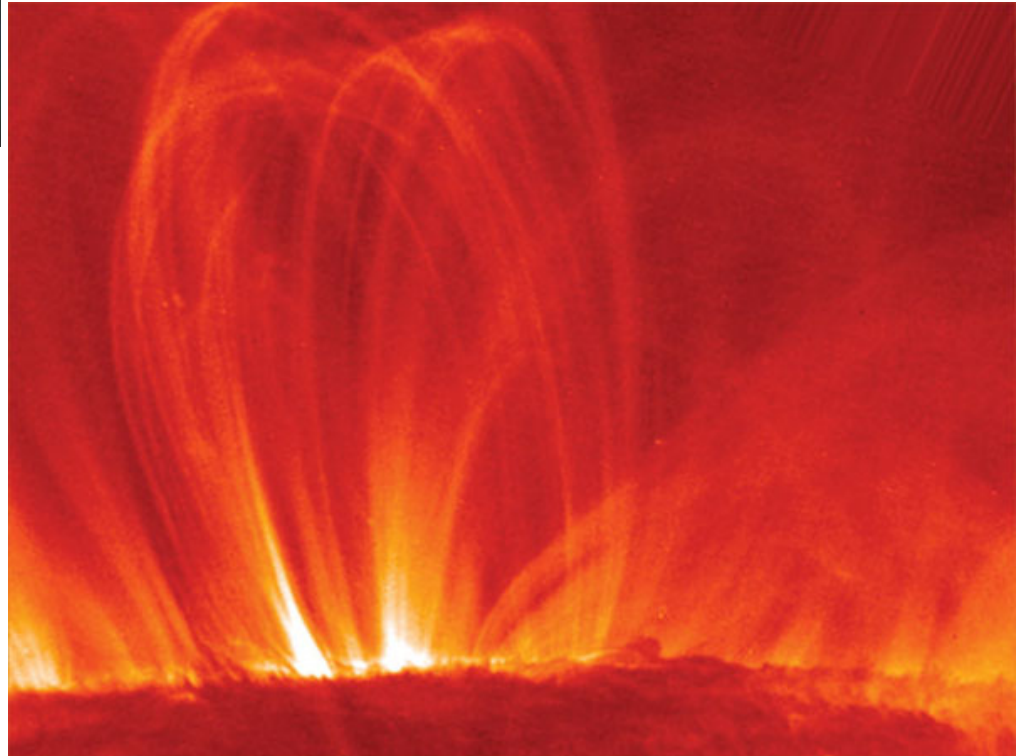
Zelená koronální čára respektuje 11letý cyklus



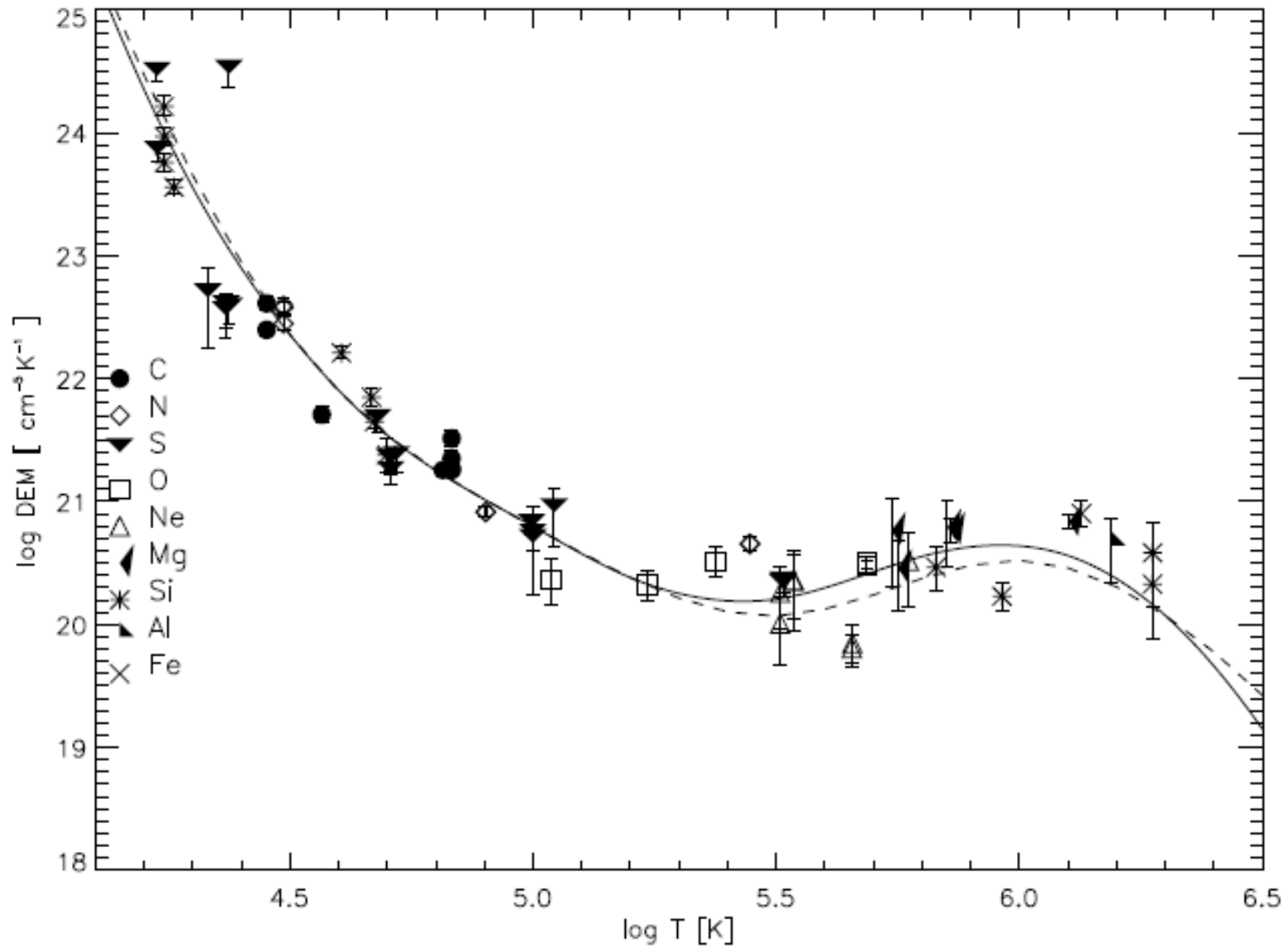
LASCO@SoHO



TRACE



DEM



Koronální ohřev

- Koróna je horká, fotosféra chladná, odporuje 2. termodynamické větě
- Je třeba koronální ohřev – cca 1 kW/m² potřeba (více v aktivních oblastech, méně v koronálních děrách)
- Tři skupiny modelů
 - Nemagnetické: disipace akustických vln
 - Magnetické “stejnoseměrné”: disipace el. proudů, rekonexe
 - Magnetické “střídavé”: vlny

Nemagnetické

- Povrchová konvekce vytváří spektrum vln
- Hustota materiálu klesá, tedy amplituda vln narůstá
- Vznikají rázové vlny
- Ty se rozpadají vysoko v atmosféře – ohřev koróny

- Tento mechanismus může vysvětlit ohřev chromosféry, ohřev koróny však spíše ne (vlny ztratí energii v chromosféře, do koróny pronikne minimum)

Magnetické DC

- Elektrické proudy podél smyček nesou energii, nepotenciálová část magnetického pole obsahuje energii
- Rozpad Joulovým teplem
- Rozpad rekonexemi (pomalé, nejsou vidět jako erupce)
- Rozpad erupcemi (nano-, piko-,...)

Mini, mikro, nano

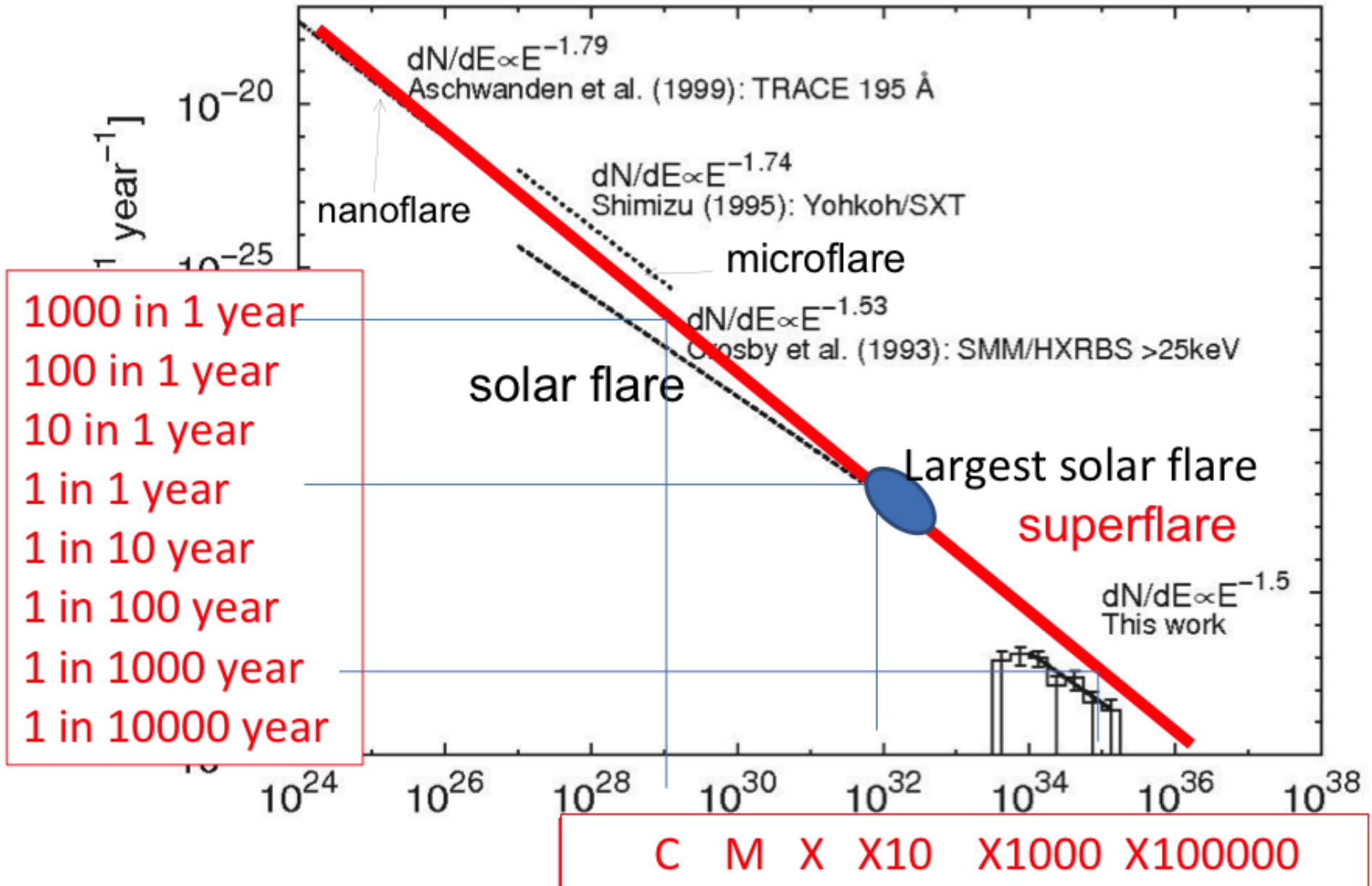
- Velké erupce
 - $E \sim 10^{23}-10^{26}$ J
 - $T \sim 8-40$ MK
 - $n \sim 2-20 \times 10^{16}$ m⁻³

- Mikro-erupce
 - $E \sim 10^{20}-10^{23}$ J
 - $T \sim 1-8$ MK
 - $n \sim 2-20 \times 10^{15}$ m⁻³

- Nano-erupce
 - $E \sim 10^{17}-10^{20}$ J
 - $T \sim 1-2$ MK
 - $n \sim 2-20 \times 10^{14}$ m⁻³

- Piko-erupce, supererupce ?

Četnost erupcí podle energie (Nogami 2012)



Magnetické AC

- Magnetoakustické a Alfvénovy vlny
- **Problém:**
 - magnetoakustické vlny ochotně disipují, ale obtížně procházejí chromosférou (nízká hustota materiálu a podléhají reflexi zpět do fotosféry), tedy nemohou nést dostatečné množství energie.
 - Alfvénovy vlny snadno procházejí chromosférou, ale neochotně disipují
 - *Numerické simulace:* Alfvénovy vlny mohou konvertovat na magnetoakustické v přechodové vrstvě
- Až do vypuštění SOHO žádný důkaz vln v koróně. SOHO – vlny 100 mHz s cca 10 % potřebné energie. Nové přístroje (Hinode, AIA): vlny s nižšími frekvencemi, až 1-10 Hz, objeveny v nižší atmosféře, mají možná dost energie

22 modelů koronálního ohřevu

- Mandrini et al. (2000)
- Test známých modelů koronálního ohřevu na pozorování TRACE

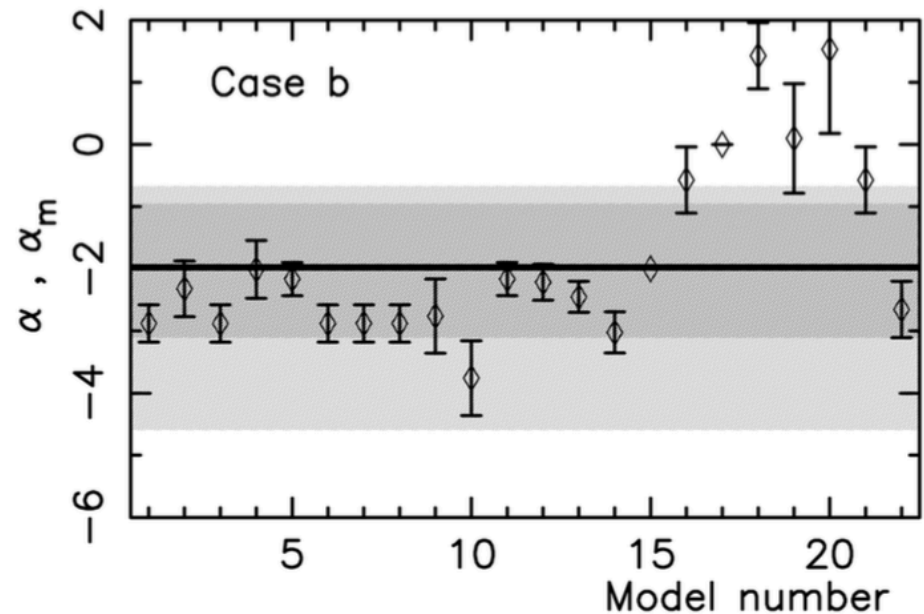
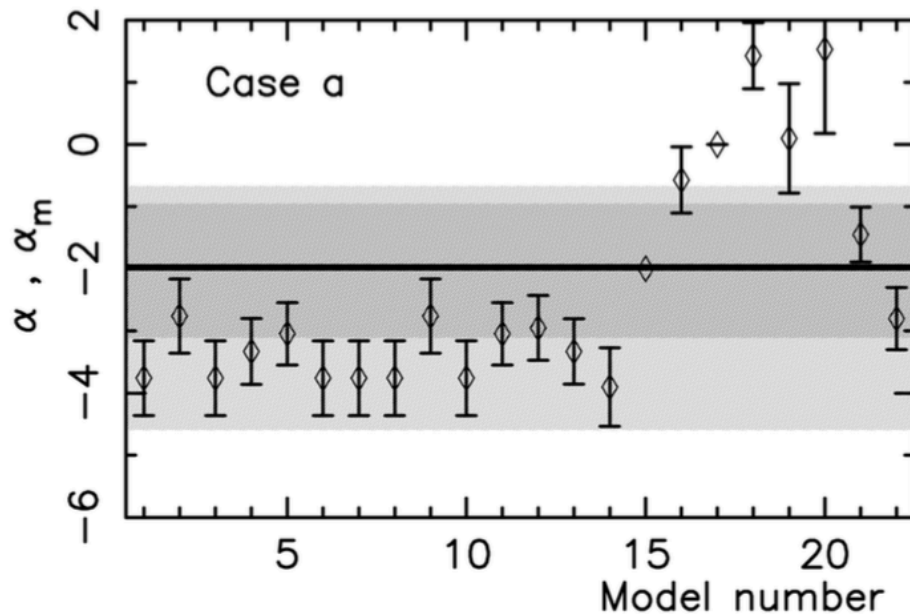
SUMMARY OF THE SCALING LAW FOR DIFFERENT MODELS OF CORONAL HEATING

Model Characteristics	N^0	References	Scaling Law	Parameters
Stressing Models (DC)				
Stochastic buildup	1	1	$B^2 L^{-2} V^2 \tau$	
Critical angle	2	2	$B^2 L^{-1} V \tan \theta$	
Critical twist	3	3	$B^2 L^{-2} V R \phi$	
Reconnection $\propto v_A$	4	4	$BL^{-2} \rho^{1/2} V^2 R$	
Reconnection $\propto v_{A\perp}$	5	5	$B^{3/2} L^{-3/2} \rho^{1/4} V^{3/2} R^{1/2}$	
Current layers	6	6	$B^2 L^{-2} V^2 \tau \log R_m$	
	7	7	$B^2 L^{-2} V^2 \tau S^{0.1}$	
	8	8	$B^2 L^{-2} V^2 \tau$	
Current sheets	9	9	$B^2 L^{-1} R^{-1} V_{ph}^2 \tau$	
Taylor relaxation	10	10	$B^2 L^{-2} V_{ph}^2 \tau$	
Turbulence with:				
Constant dissipation coefficients	11	11	$B^{3/2} L^{-3/2} \rho^{1/4} V^{3/2} R^{1/2}$	
Closure	12	12	$B^{5/3} L^{-4/3} \rho^{1/6} V^{4/3} R^{1/3}$	
Closure + spectrum	13	13	$B^{s+1} L^{-1-s} \rho^{(1-s)/2} V^{2-s} R^s$	$s = 0.7, m = -1.$ $s = 1.1, m = -2.5$
	14			
Wave Models (AC)				
Resonance	15	14	$B^{1+m} L^{-3-m} \rho^{-(1+m)/2}$	$m = -1.$
	16			$m = -2.$
Resonant absorption	17	15	$B^{1+m} L^{-1-m} \rho^{-(1+m)/2}$	$m = -1.$
	18			$m = -2.$
	19	16	$B^{1+m} L^{-m} \rho^{-(m-1)/2}$	$m = -1.$
	20			$m = -2.$
Current layers	21	17	$BL^{-1} \rho^{1/2} V^2$	
Turbulence	22	18	$B^{5/3} L^{-4/3} R^{1/3}$	

REFERENCES.—(1) Sturrock & Uchida 1981, Berger 1991; (2) Parker 1988, Berger 1993; (3) Galsgaard & Nordlund 1997; (4) Parker 1983; (5) Parker 1983, modified; (6) van Ballegoijen 1986; (7) Hendrix et al. 1996; (8) Galsgaard & Nordlund 1996; (9) Aly & Amari 1997; (10) Heyvaerts & Priest 1984, Browning & Priest 1986, Vekstein et al. 1993; (11) Einaudi et al. 1996, Dmitruk & Gómez 1997; (12) Heyvaerts & Priest 1992, Inverarity et al. 1995, Inverarity & Priest 1995a; (13) Milano et al. 1997; (14) Hollweg 1985; (15) Ofman et al. 1995, Ruderman et al. 1997; (16) Halberstadt & Goedbloed 1995; (17) Galsgaard & Nordlund 1996; (18) Inverarity & Priest 1995b.

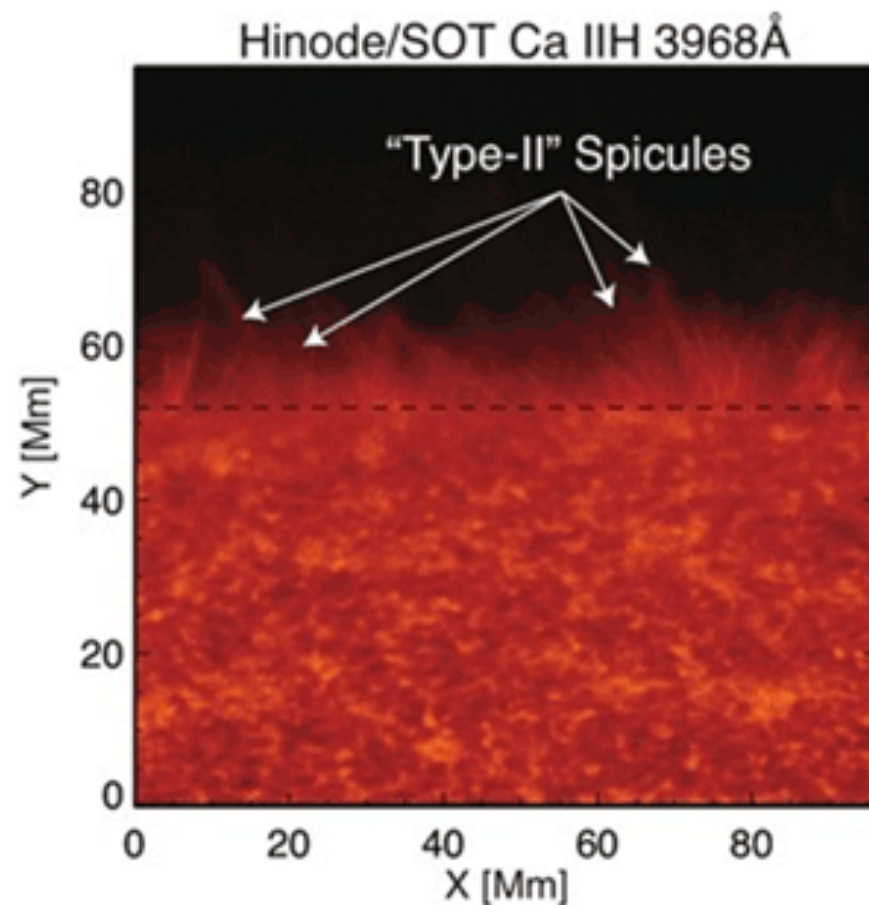
Mandrini et al. (2000) výsledky

- Na dvou aktivních oblastech s uvážením statistických chyb lze vyloučit tři modely
- Modely uvažující konverzi p -modů z fotosféry a jejich rozpad v koróně

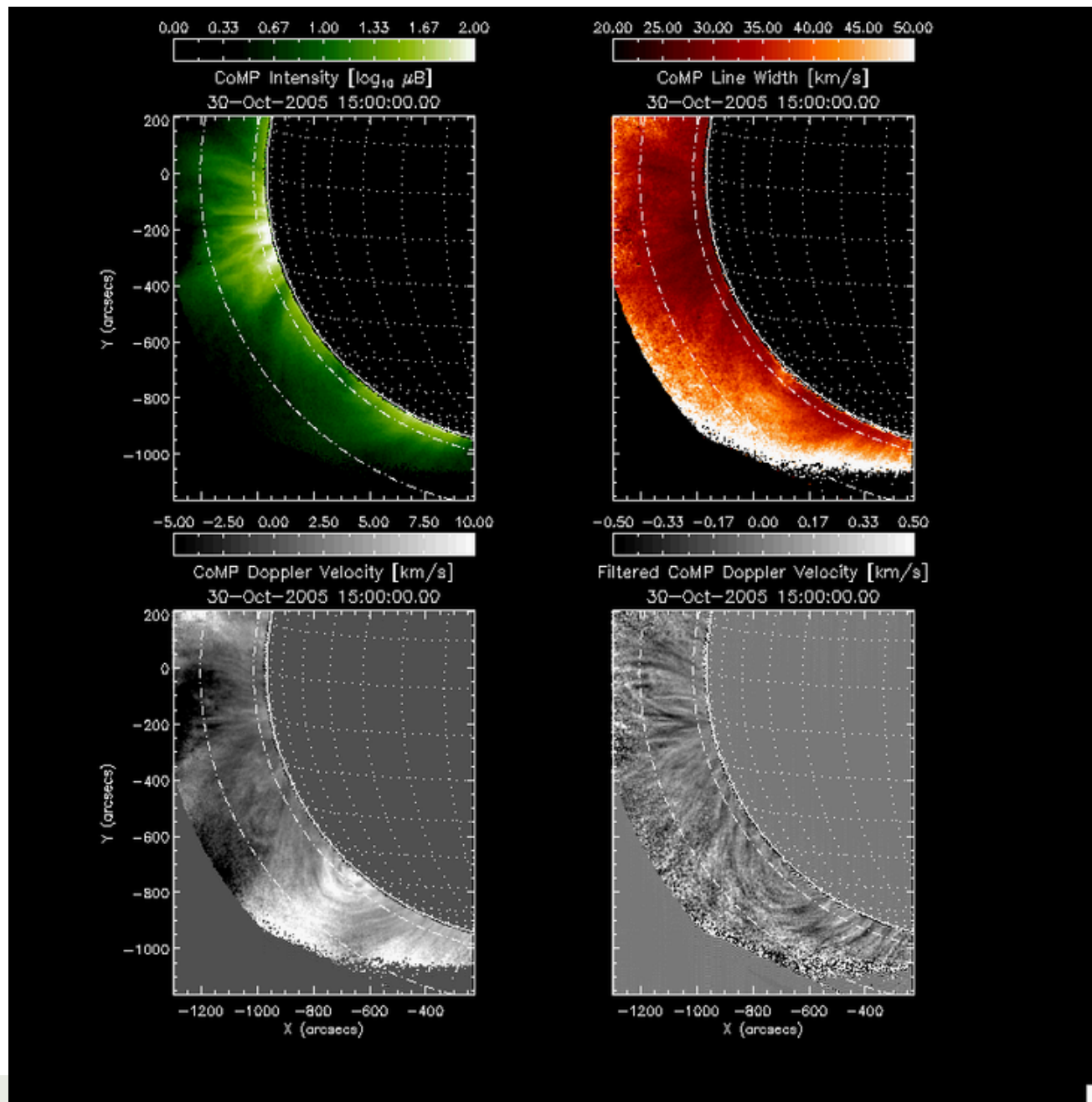


Kontroverze pokračuje

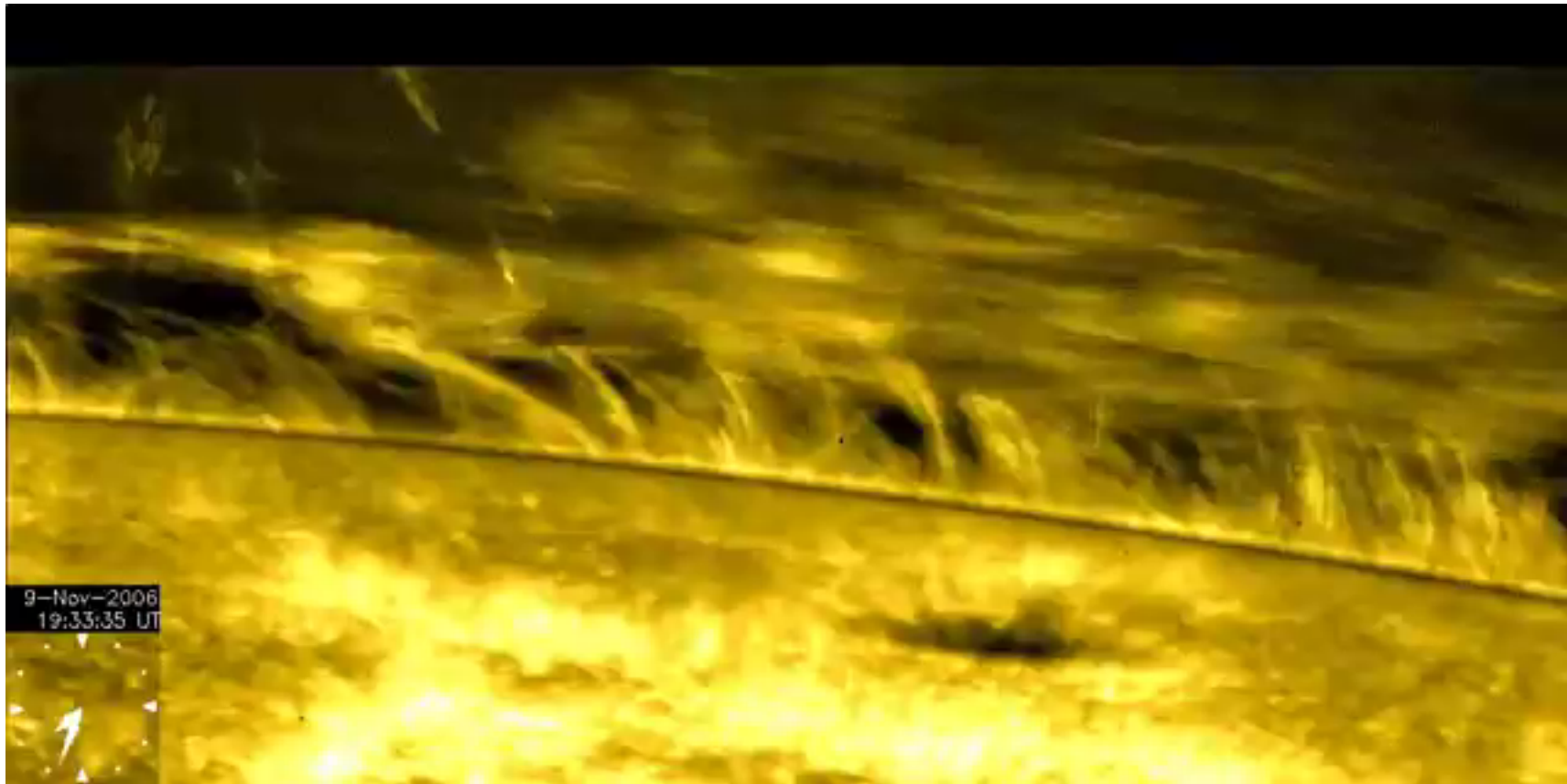
- 2007: objev spikulí typ II
 - Rychlejší (až 100 km/s) formy spikulí, trvají krátce, zřejmě důsledek rázových vln při rekonexích
 - Výtrysky horkého plazmatu
 - Pozorování z AIA/SDO nebo SOT/Hinode poukazují na korespondenci spikulí typ II a horkého plazmatu v koróně
 - Nesou s sebou Alfvénovy vlny, dostačují k urychlení rychlého slunečního větru



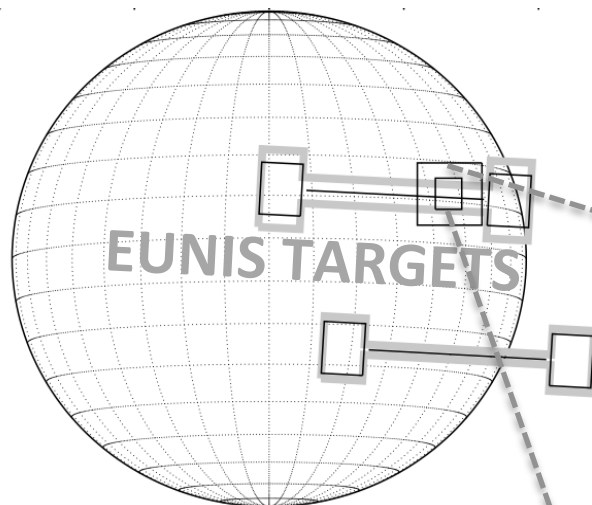
2009: Jsou to Alfvénovy vlny



A jsou!

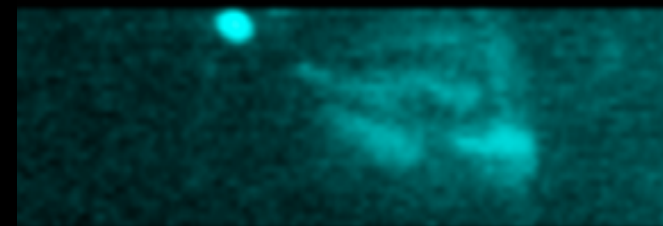


2015: Jsou to nanoerupce!

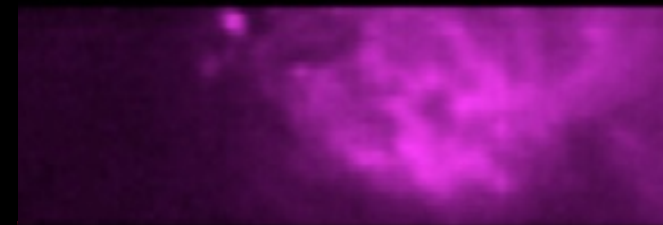


- EUNIS: rentgenový spektrograf na sondážní raketě

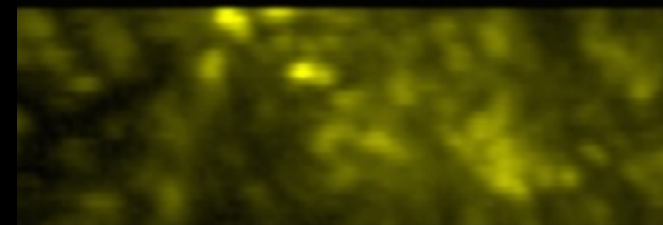
**Velmi teplá koróna
10 MK**



**Normální
koróna
1 MK**



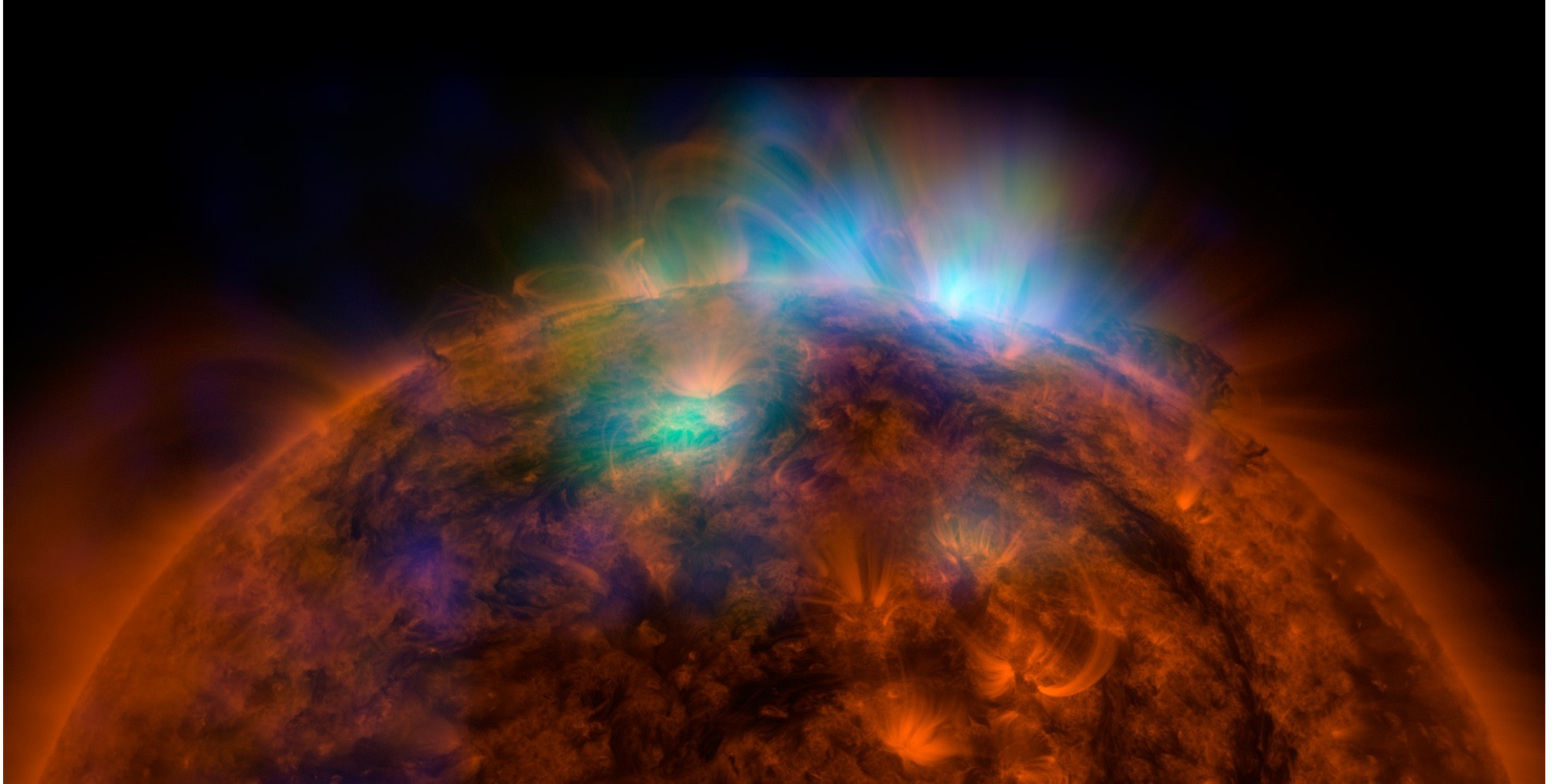
**Nižší atmosféra:
100 000 K**



A jsou!

- NuStar (rentgenový dalekohled NASA, normálně na černé díry)
- Důkazy vysokých teplot plazmatu i v neeruptivních aktivních oblastech

A jsou!



EUV: SDO/AIA 171Å

2-3 keV 3-5 keV

Tedy

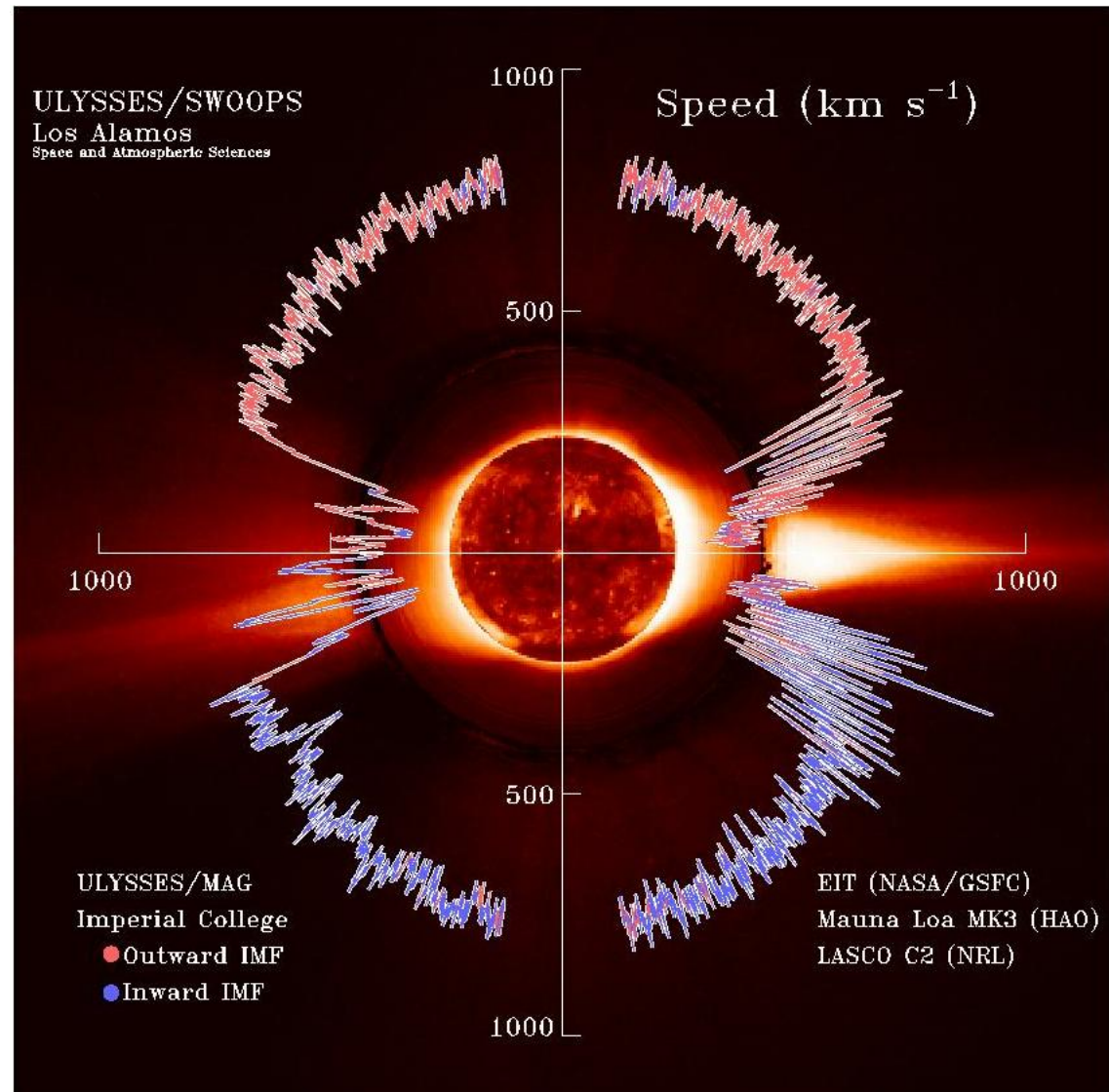
- ▣ Problém ohřevu koróny je stále problémem

Sluneční vítr – počátky

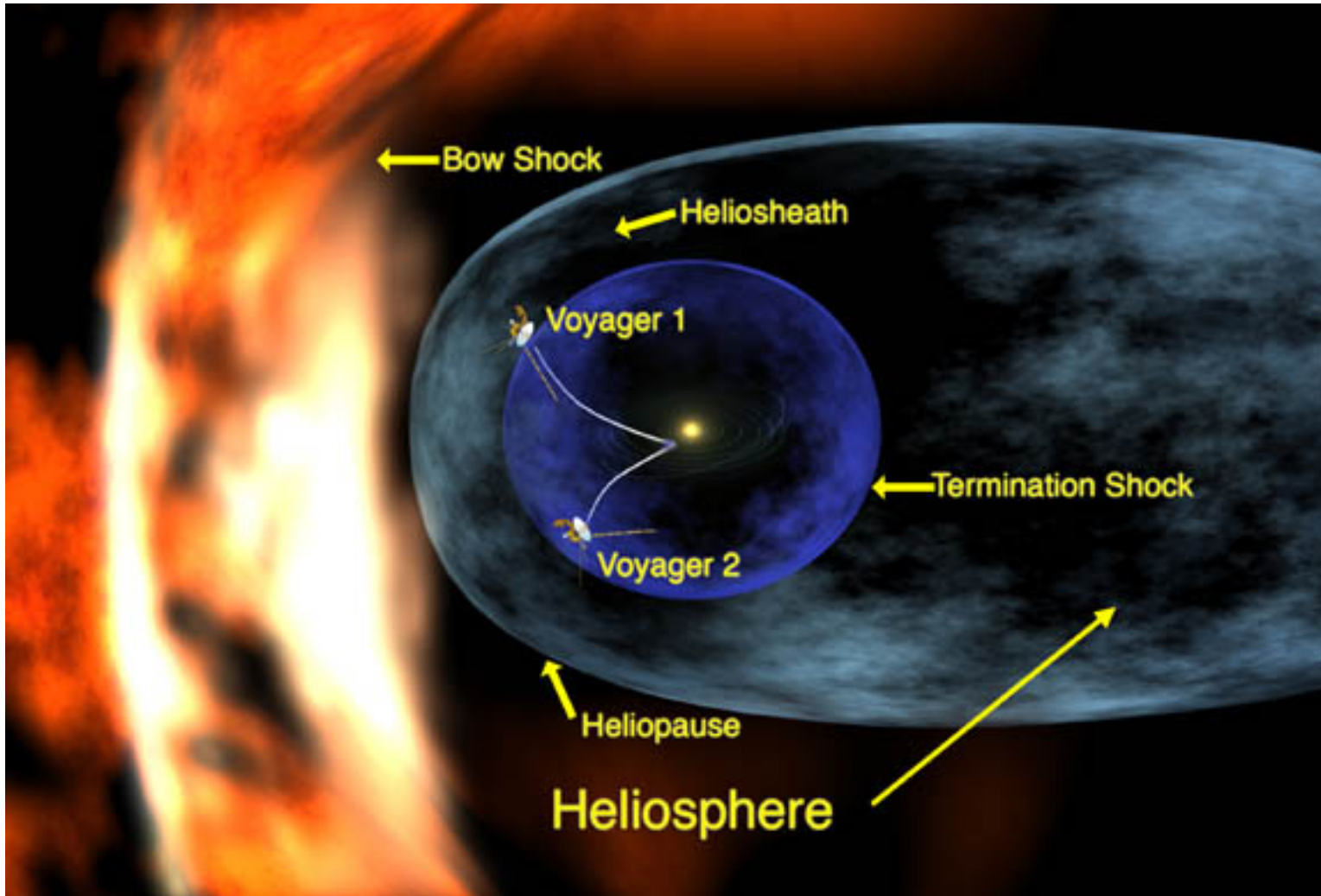
- Polovina 20. století -- „sluneční částicové záření“ jako prostředek k vysvětlení geomagnetických bouří
- Geomagnetické bouře – nárůst meziplanetárního magnetického pole obvykle dva dny po erupci
 - Musí existovat jakési elektrické spojení mezi Zemí a Sluncem
- 1950 – Biermann – iontové stopy komet 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 km/s
- Rychlý – otevřené pole (koronální díry), cca 700 km/s
- Explosivní události – rychlost až 1200 km/s
- Ulysses – sonda na heliopolární dráze



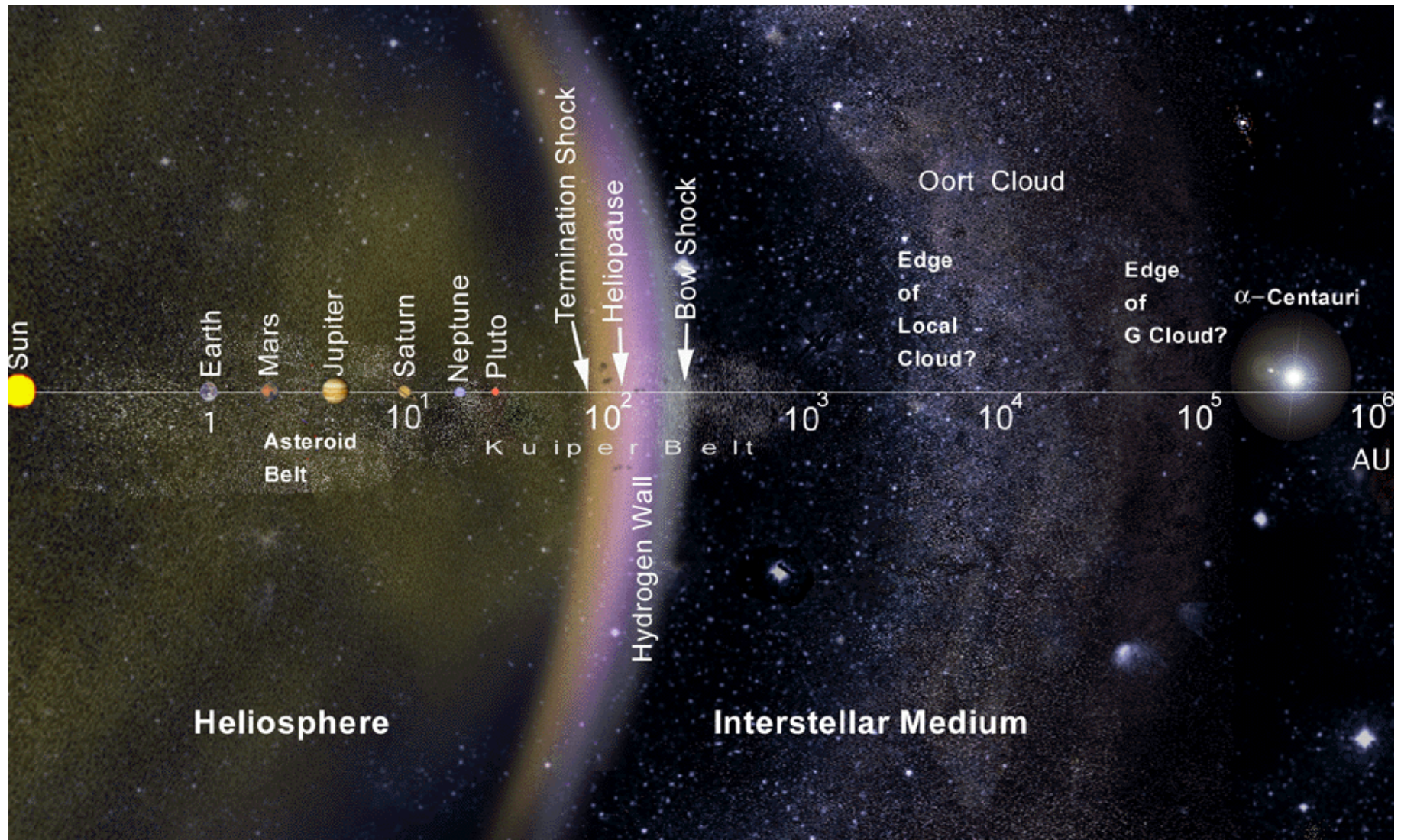
Heliosféra



Struktura heliosféry

- **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



Proudová vrstva

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

