



**PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE**
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**
SPOLOČNE BEZ HRANÍC



FOND MIKROPROJEKTŮ

Žhavé i vychladlé novinky ze sluneční fyziky

Michal Švanda
Astronomický ústav AV ČR
Astronomický ústav UK

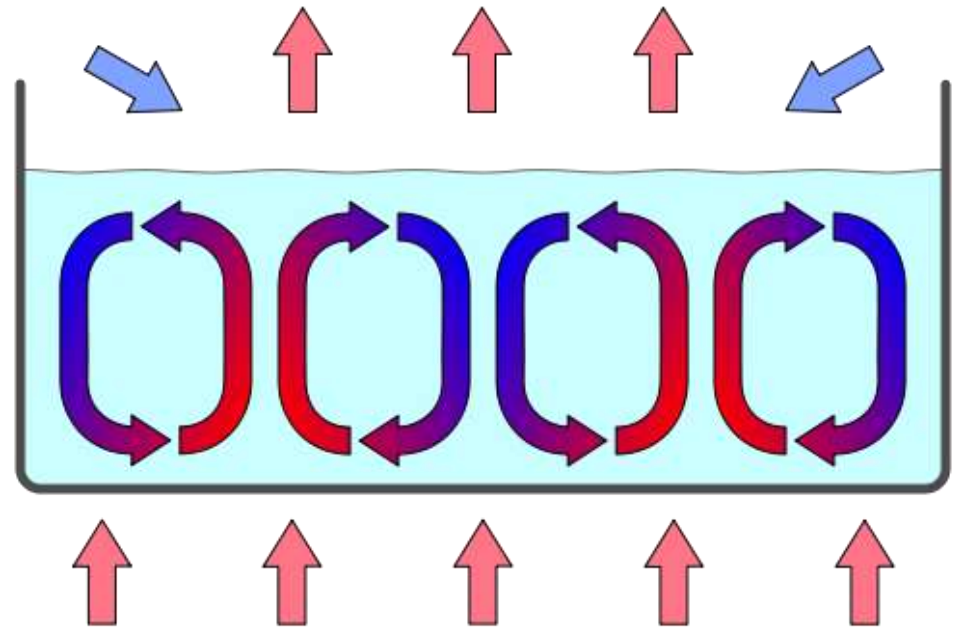
Měnící se sluneční fyzika

- Studium Slunce: již staří Číňané – Kniha změn, vznik až 2000 pnl
 - Kolem 700 pnl pozorování slunečních skvrn
- Systematické studium v Evropě od vynálezu dalekohledu
- Nejlépe studovaná hvězda
- Cílem pozorovacích misí, pozorovacích kampaní i jako předobraz pro numerické simulace
- Fyzika Slunce přesto v mnoha ohledech ne zcela jasná
- Učebnice jsou neustále aktualizovány
- Peter V. Foukal, Solar Astrophysics (1990, 2004, 2008, 2013)
- Sluneční fyzika je neustále živá

1. Konvekce

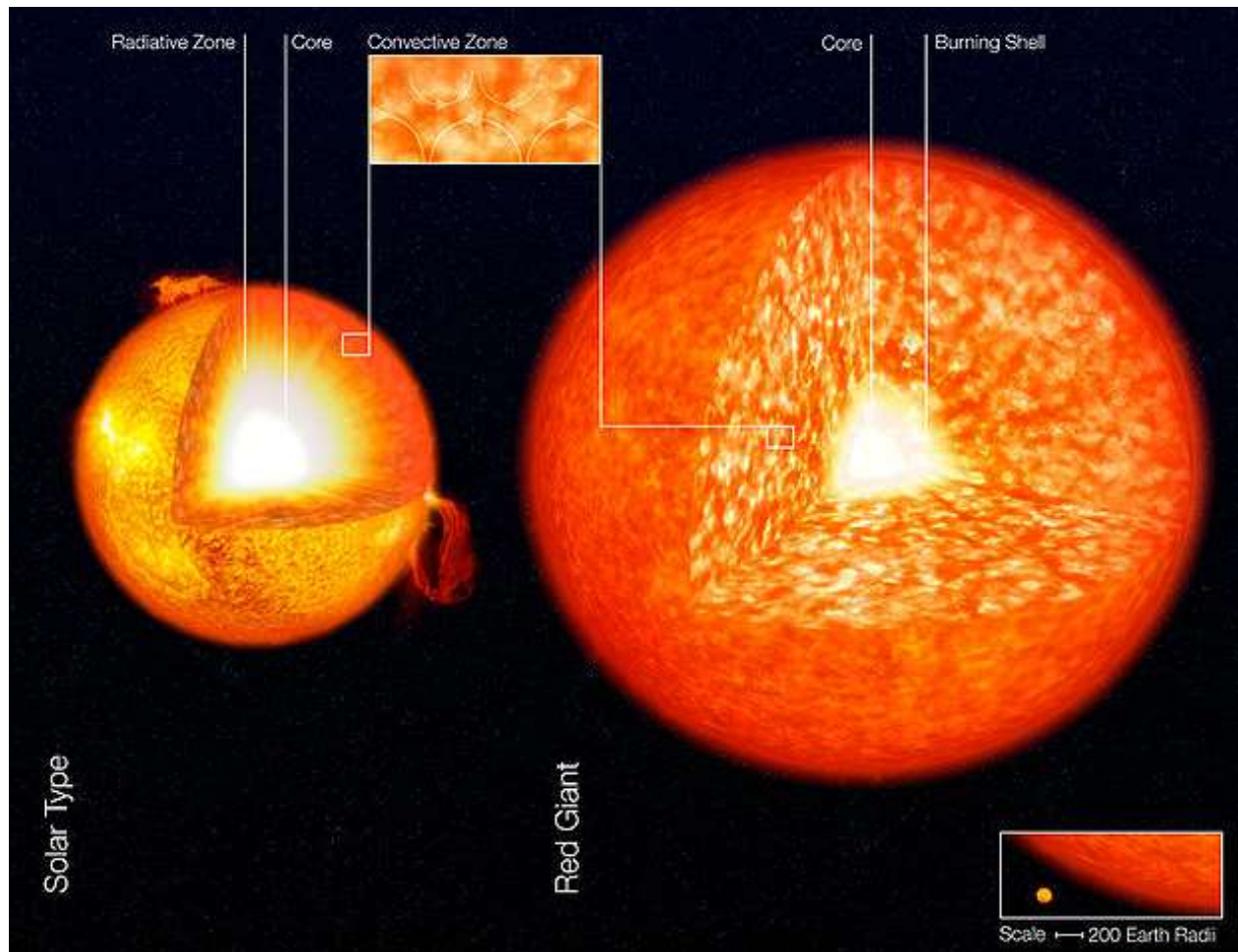
Konvektivní přenos

- Kolektivní pohyb hmoty za účelem transportu tepla
- Realizuje se, pokud je adiabatický teplotní gradient menší než teplotní gradient nepohybující se látky
 - “Je výhodnější látku rozpohybovat než čekat, až se teplo přenesе vodivostí nebo zářením”

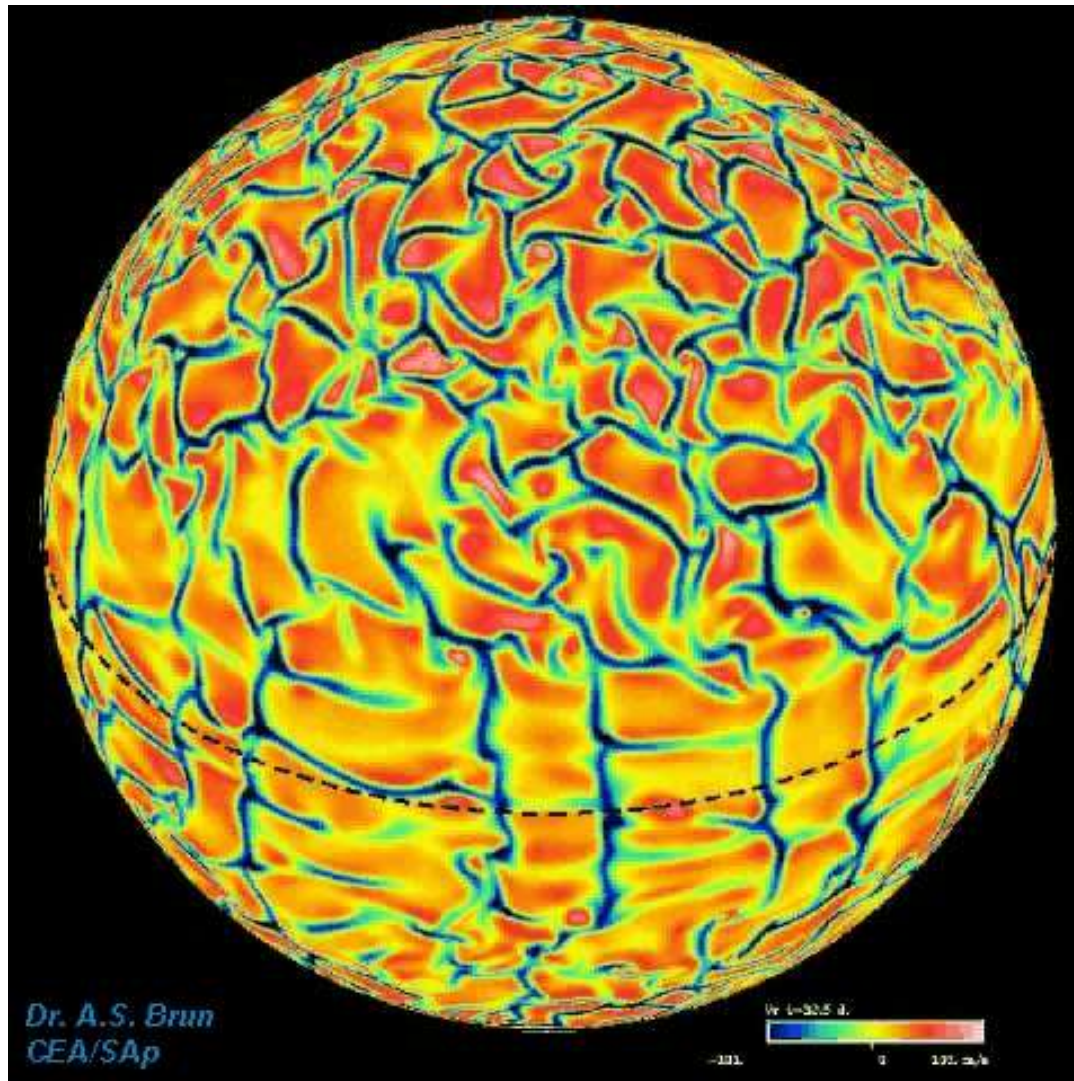


Konvekce ve hvězdách

- Řízena obvykle zvýšenou opacitou (zejména vodíku)

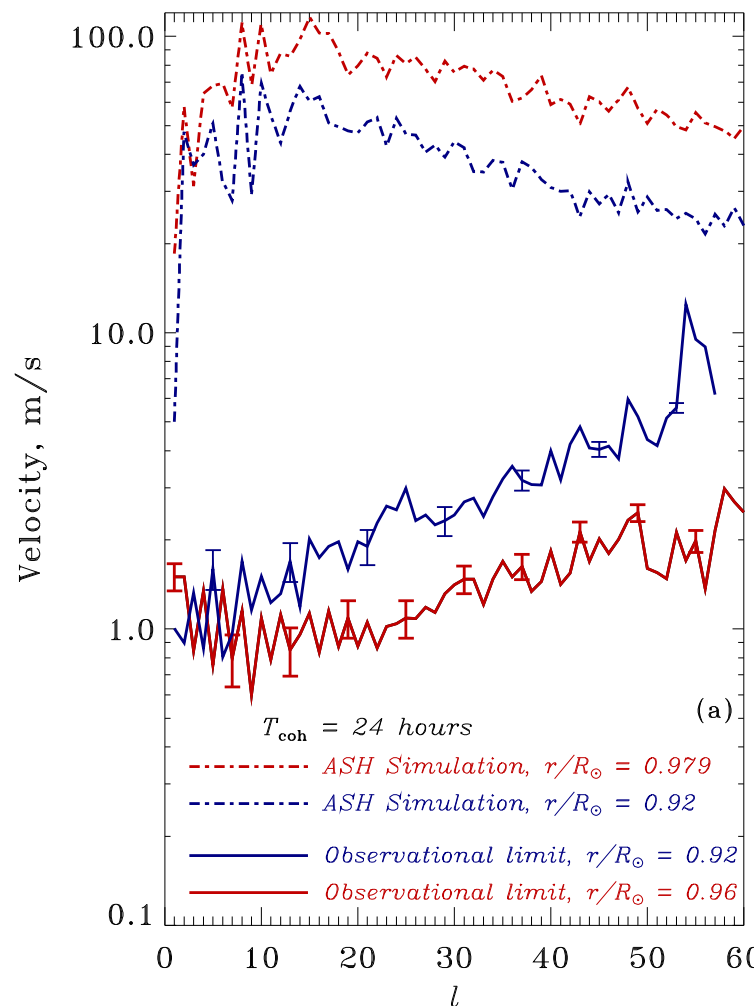


Konvekce ve Slunci (model)



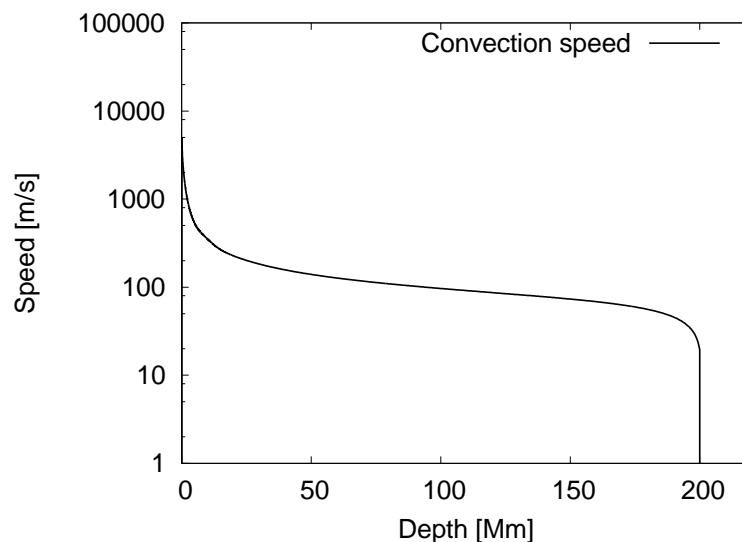
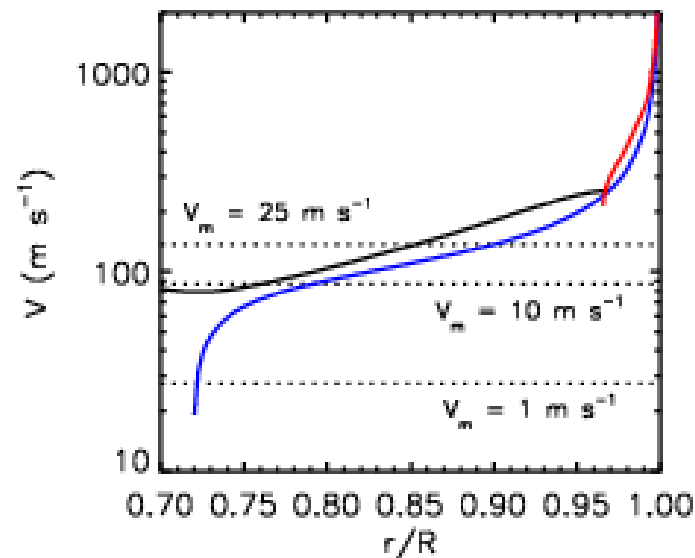
Zpochybnění helioseismologií

- Helioseismologie – lokální – umožňuje měření pohybů plazmatu v přípoверхové vrstvě
- Hluběji – statistické průměrování
 - Informace o amplitudě, charakteristické velikosti, avšak už ne přímé zobrazení
 - Statistika pomáhá redukovat šum – ten roste s \sqrt{N} , tedy signál k šumu roste s $\sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$
- Měřené poruchy cestovních časů vln jsou od dva řády menší než předpovídá model
 - Tedy i konvekční rychlosti musí být nižší o dva řády



Jaké jsou konvektivní rychlosti?

- Amplituda konvektivních rychlostí by měla růst směrem k povrchu a pak prudce narůst (ve granulární vrstvě)
- Měření naznačují druhý vrchol amplitudy cca 2 Mm pod povrchem)
- Jaká je tedy celková dynamika plazmatu?



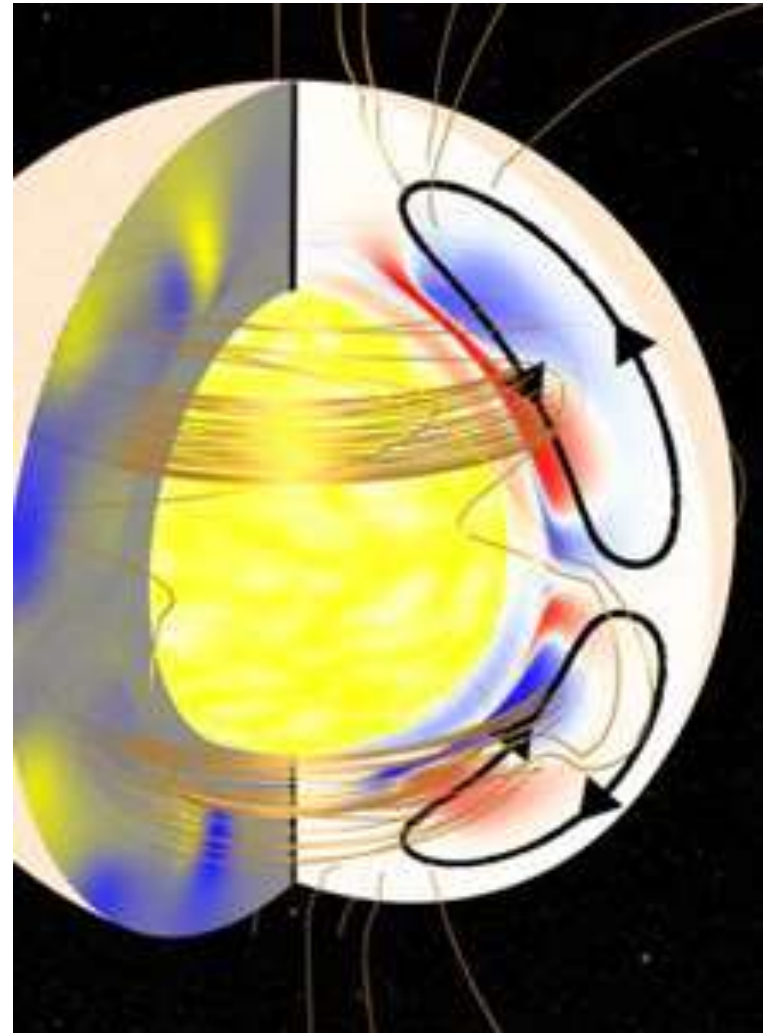
Alternativní konvekce?

- Dnes – přiblížení směšovací délkou
 - Vyžaduje přenos 10^6 slunečních svítivostí nahoru a 10^6-1 svítivostí dolů
- Alternativa
 - Pomalý (cm/s) stoupavý pohyb ode dna konvektivní zóny až k přípovrchovým vrstvám, pak prudké drobení
 - Zpět volný pád (stovky m/s) ve velmi úzkých (stovky km) kanálech na dno konvektivní zóny
- Změna paradigmatu ovlivňuje efektivitu konvekce, přerozdělování momentu hybnosti – čili má vliv na celkovou vnitřní dynamiku konvektivní zóny a potažmo magnetismus

2. Meridionální proudění

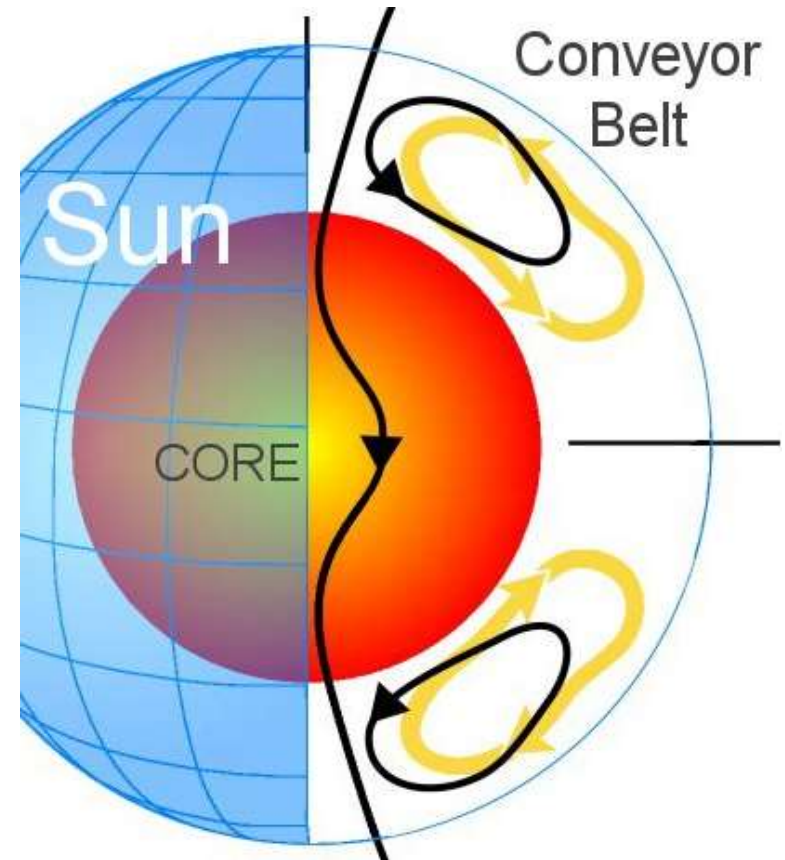
Meridionální proud

- Předpověděl již von Zeipel (1924)
 - Rotující zářivá vrstva ve hvězdě nemůže být v rovnováze
 - Podobně pro konvektivní rovnováhu
 - Ustanovením meridionálního proudu lze paradox překonat
 - Horké póly rotujících hvězd
- Na Slunci změřeno 1979 (T. Duvall)
 - Jedna buňka na polokouli

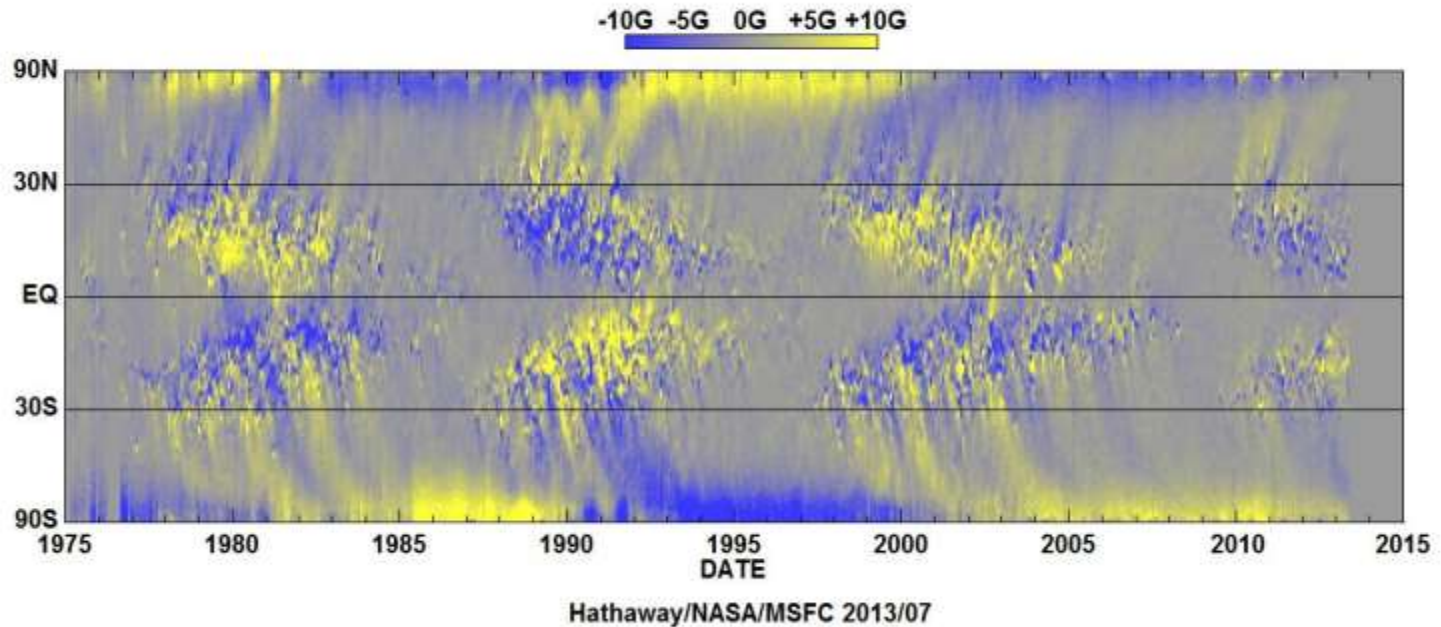


Role meridionálního proudu

- Udržení rovnováhy
- Meridionální proud je jedním z “driverů” diferenciální rotace
- Transport pozadového magnetického pole
 - Důležitá (ne-li hlavní) role pro změnu polarity globálního pole
 - Podstatná ingredience pro “flux transport dynamo” modely kinematického dynama

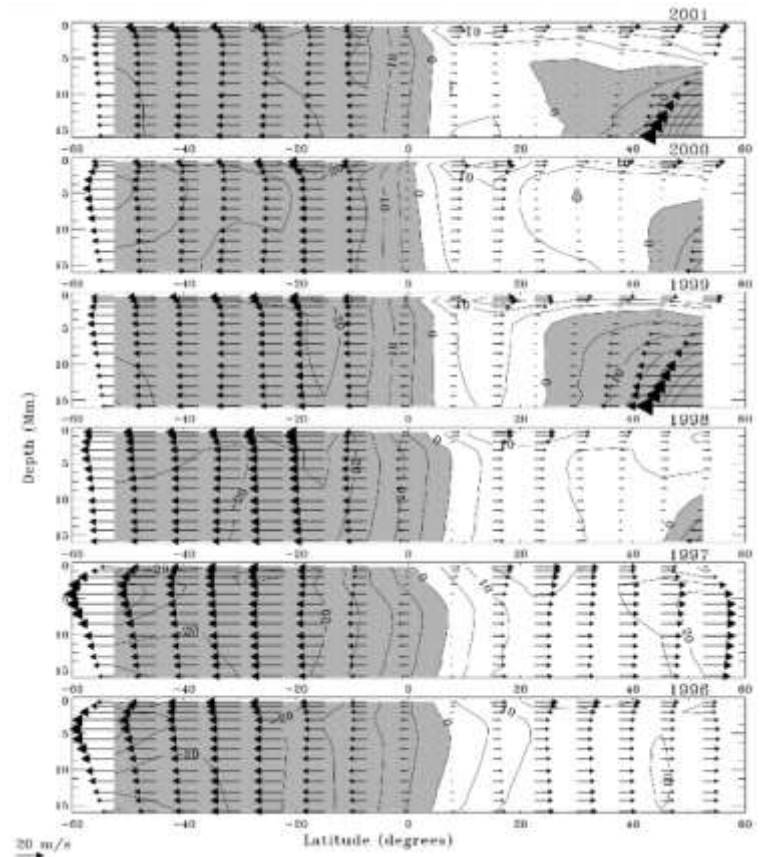
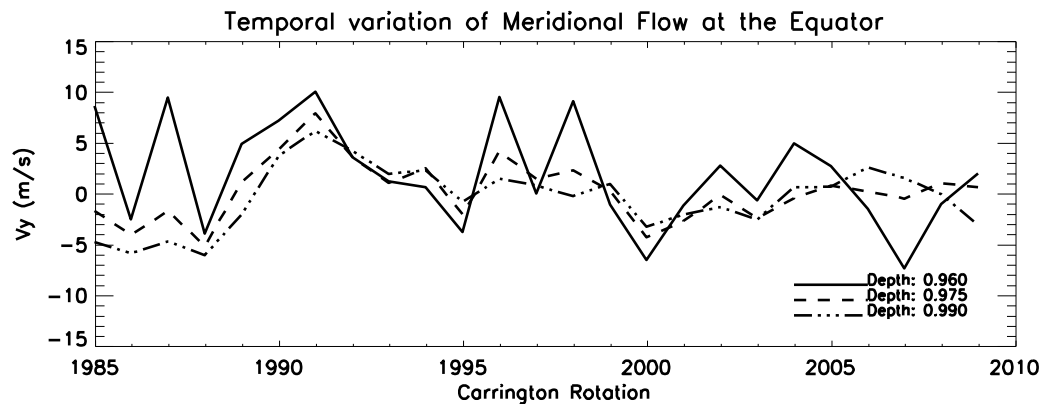


Transport magnetického pole



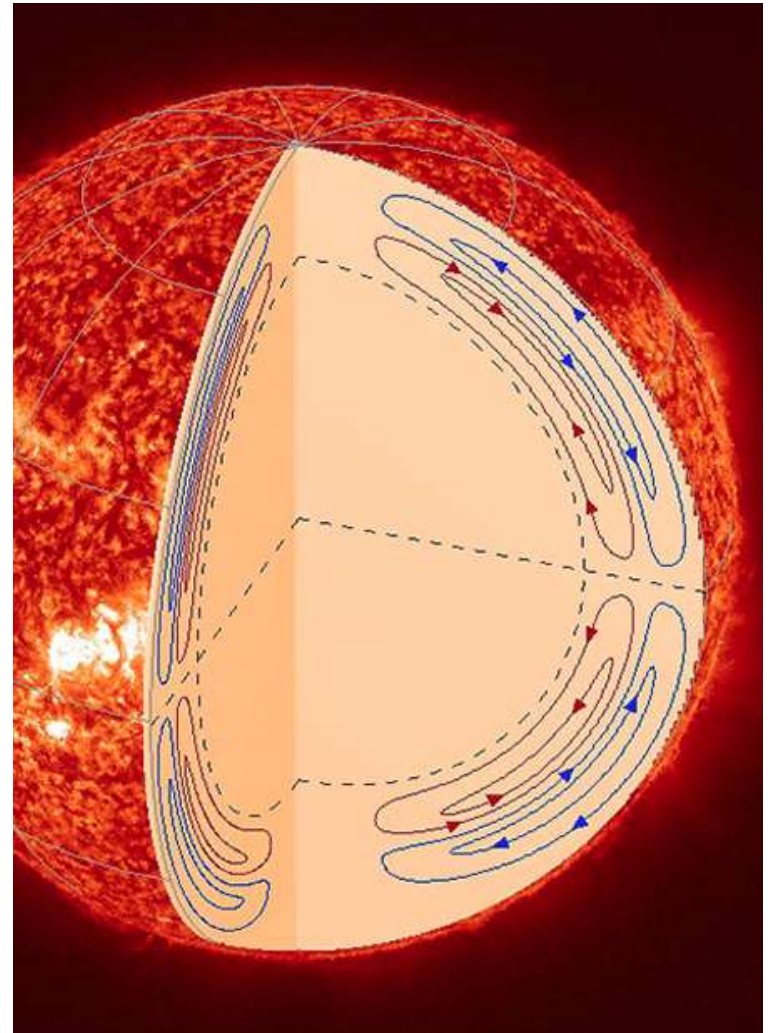
Protibuňky ?

- Nekonečné dohady o protibuňkách v šířkovém směru
- Protibuňky se běžně objevují v globálních simulacích
- Složka cyklu – vtok do pásu aktivity



Nový model meridionálního proudu

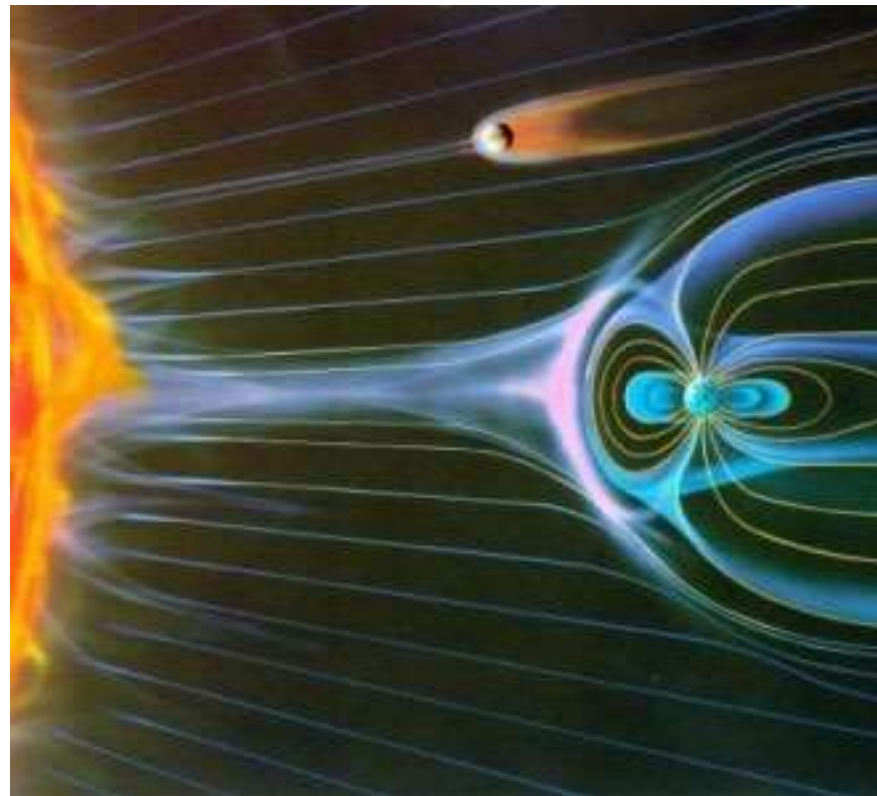
- Zhao a kol. 2013
- Dvojitá buňka v hloubce
- Zajímavost:
 - Hathaway 2012 – trasováním supergranulí poukázal na známky protiproudu již nějakých 40 Mm pod povrchem, tedy ne až na dně konvektivní zóny
- Nový model zatím nepotvrzen, komplikoval by však rozvahy o rovnováze a tvorbě magnetických polí



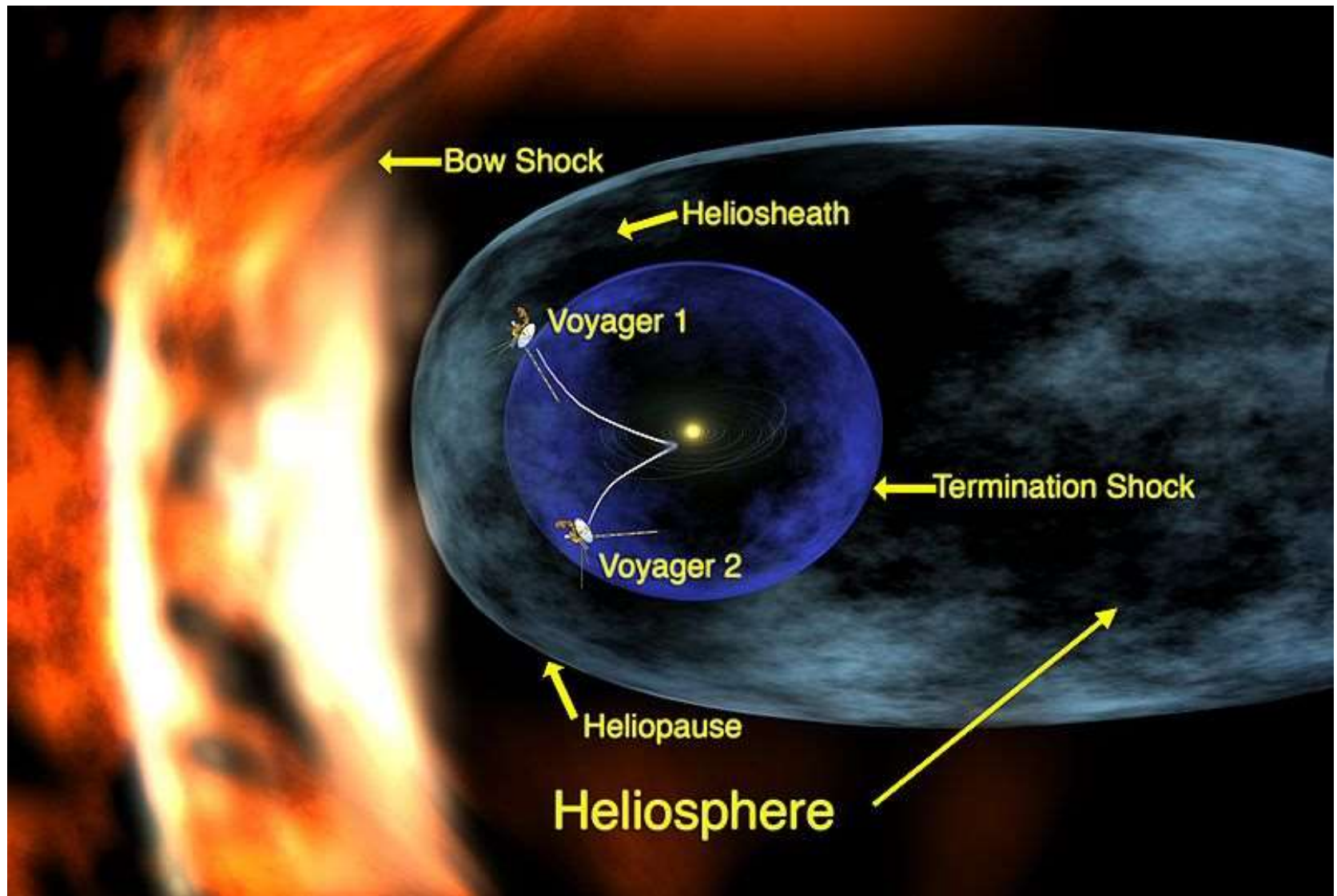
3. Struktura heliosféry

Sluneční vítr

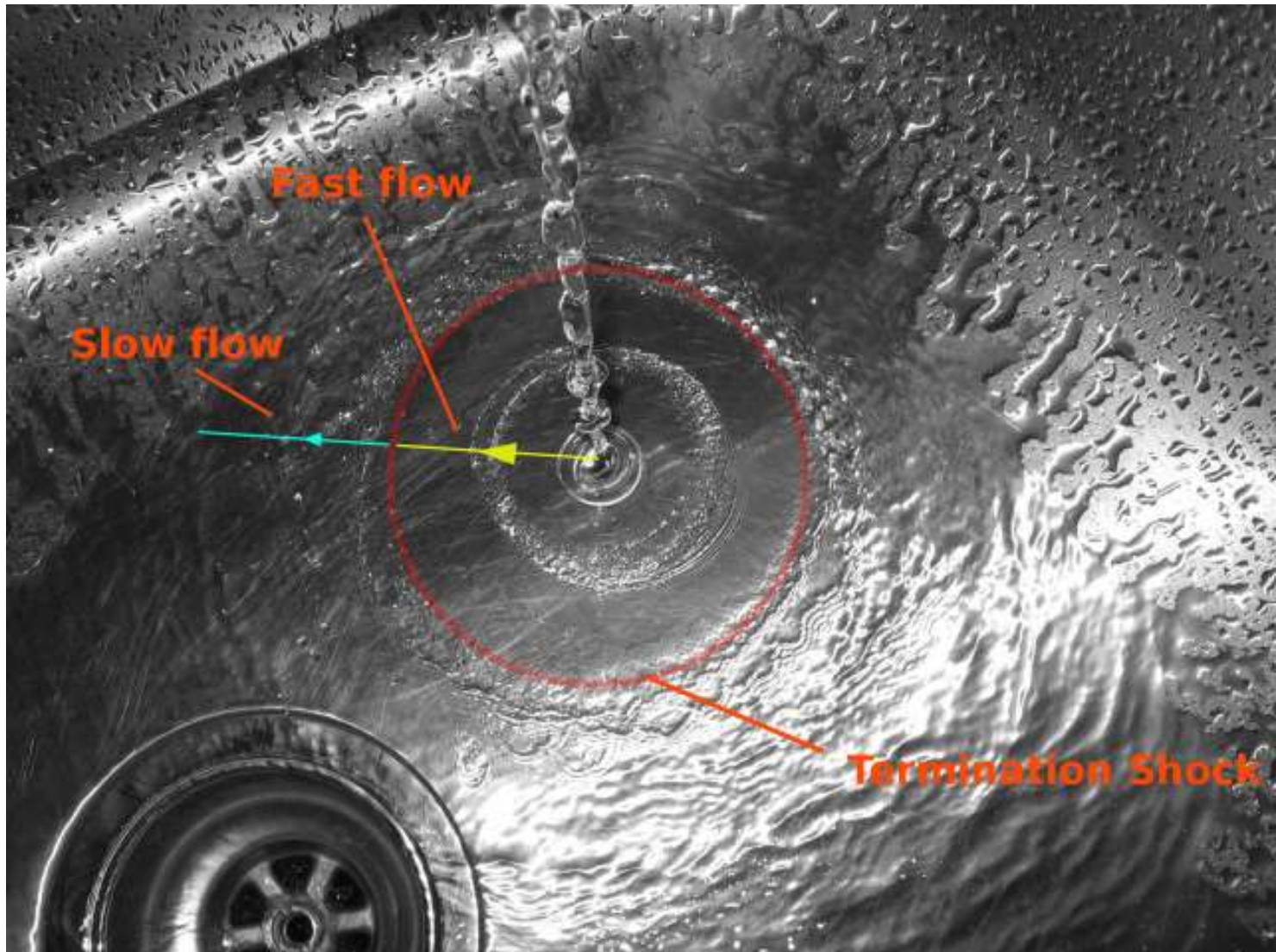
- Neustálý proud částic od Slunce
 - Projevy známy z pozorování komet
 - Správný model Parker (1957)
 - Potvrzeno Lunou 2 (1958)
- Interakcí s mezihvězdným plazmatem vytváří heliosféru
 - Sféra vlivu Slunce



Učebnicová heliosféra



Heliosféra ve dřezu



Nová měření - ENA

■ Galileo, IBEX

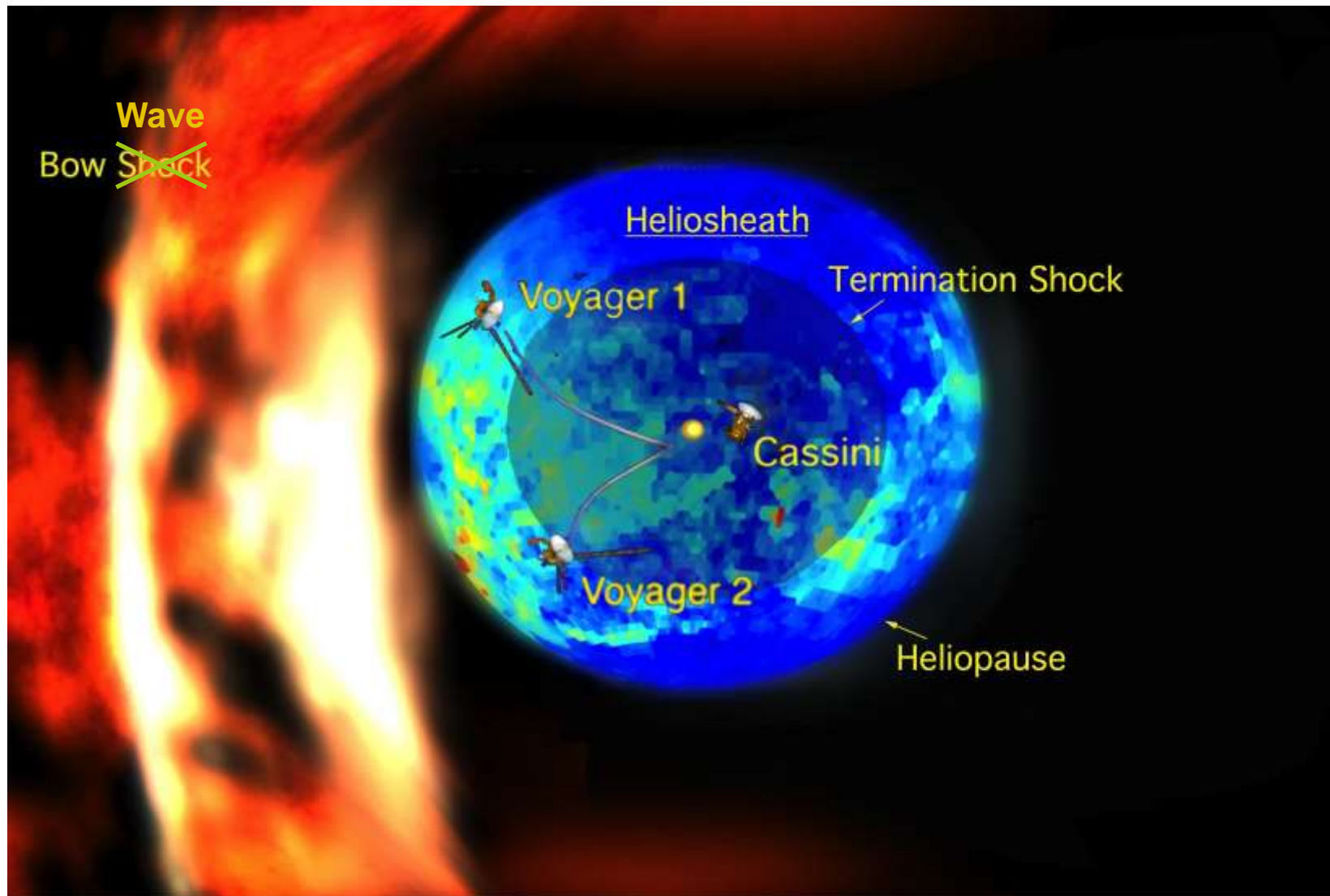
■ Energetické neutrální atomy (ENA)

- Vznikají při procesech mezi ionty nebo horkým plazmatem a pozadovým chladným neutrálním plynem, při nichž se vyměňuje náboj
- Nejsou odklány magnetickým polem
- “Zastanou funkci fotonů”
- Pásové struktury mění se v čase – dosud nevysvětleny, ukazují ale na mnohem větší vliv okolního prostředí na heliosféru
- Nepozorují se předpovězené struktury související se plazmovým chvostem heliosféry
- Relativní rychlost okolního plazmatu je nižší, než se myslelo 23 km/s místo 27 km/s
- Nepozoruje se projev čelní rázové vlny

Nová měření - Voyager

- Voyagery – na palubě detektory plazmatu (na V2 stále funkční)
 - Průlet terminační vlnou 2005 (V1) a 2007 (V2) – zřejmě kvůli zvlněnému tvaru heliosféry
 - V1 překročil heliopauzu (srpen 2012, cca 120 AU od Slunce)
 - V2 je hluboko v plazmové pochvě (cca 100 AU od Slunce)
 - Magnetické pole v plazmové pochvě je mnohem více turbulentní než se myslelo – vytváří jakési 10 milionů km velké samostatně existující bubliny
 - Magnetické pole na okraji soustavy je zřejmě silnější
- Silnější magnetické pole = větší lokální rychlost zvuku
- Rázová vlna se vytvoří, pokud je relativní pohyb částic větší než lokální rychlost zvuku
 - Pro rázovou vlnu před heliosférou není důvod

Nová heliosféra

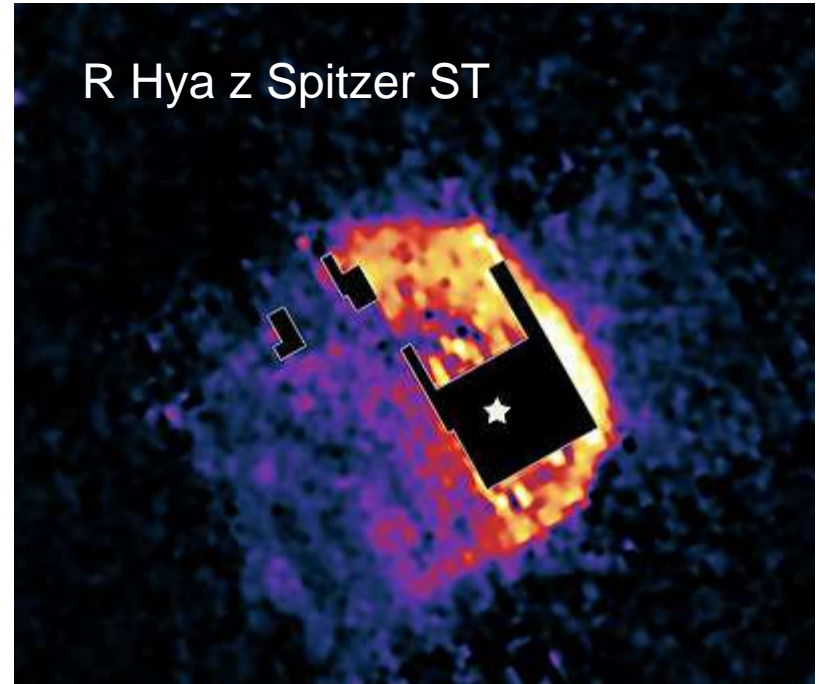


Čelní rázové vlny u jiných hvězd

LL Ori z HST



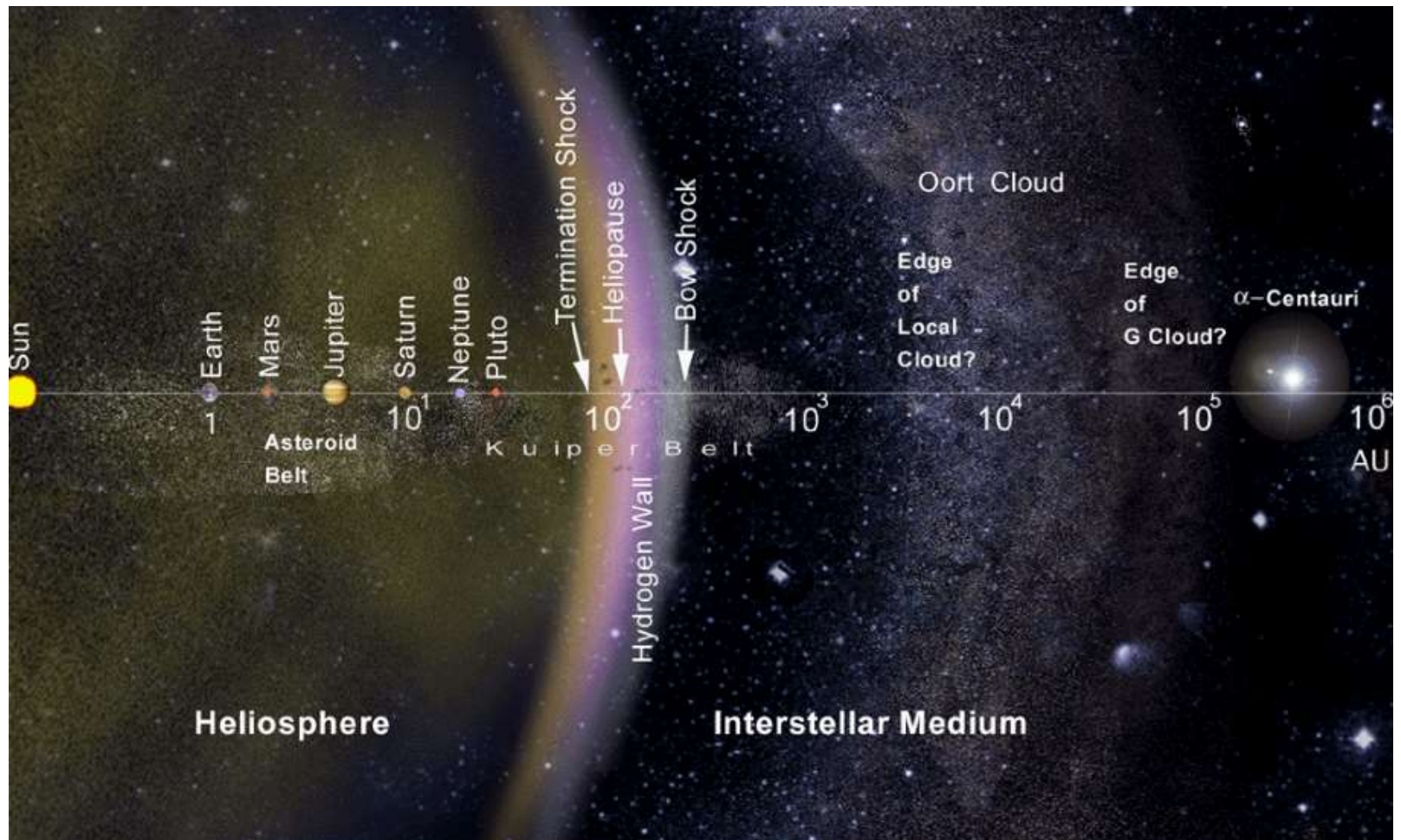
R Hya z Spitzer ST



Mira z GALEX



Opustil Voyager 1 Sluneční soustavu?



Konec Sluneční soustavy cca 150 000 AU, Voyager 1 126 AU

4. Jak si stojí sluneční cyklus?

Cyklus 24 vs. ty předchozí

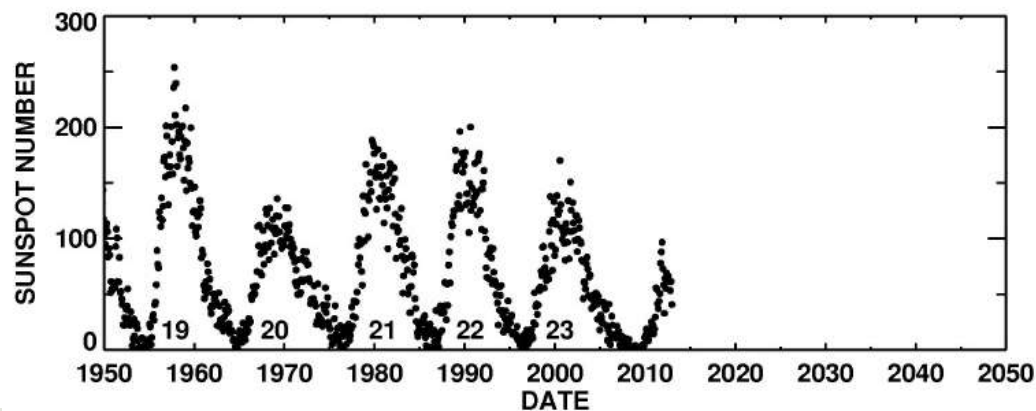
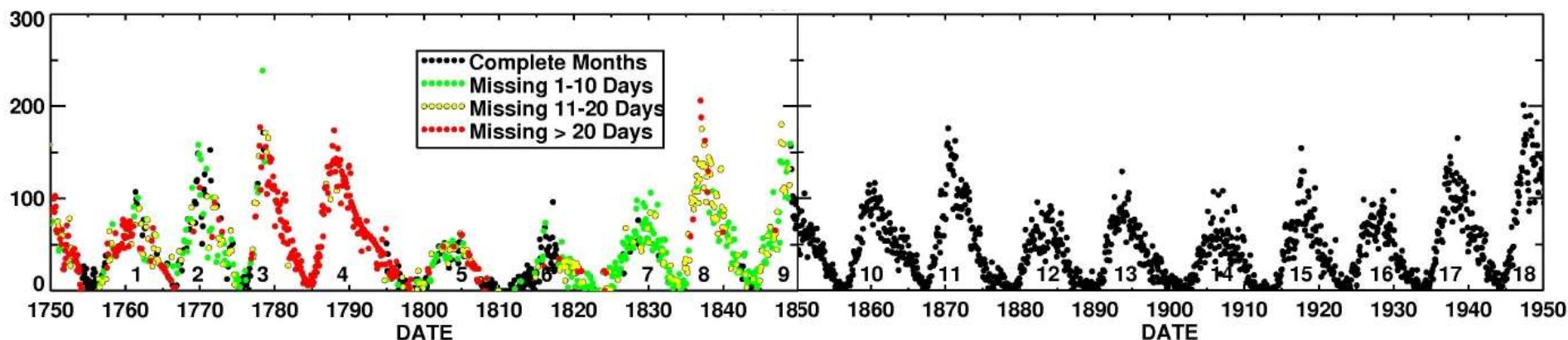
- *Neobvykle* dlouhé minimum mezi 23. a 24. cyklem
- *Nebývale* nízká aktivita v 24. cyklu
- *Nezvyklá* asymetrie mezi polokoulemi

Není cyklus jako cyklus

Variace mezi cykly

Určité empirické pravidelnosti (“zákony”)

Dlouhá minima už byla



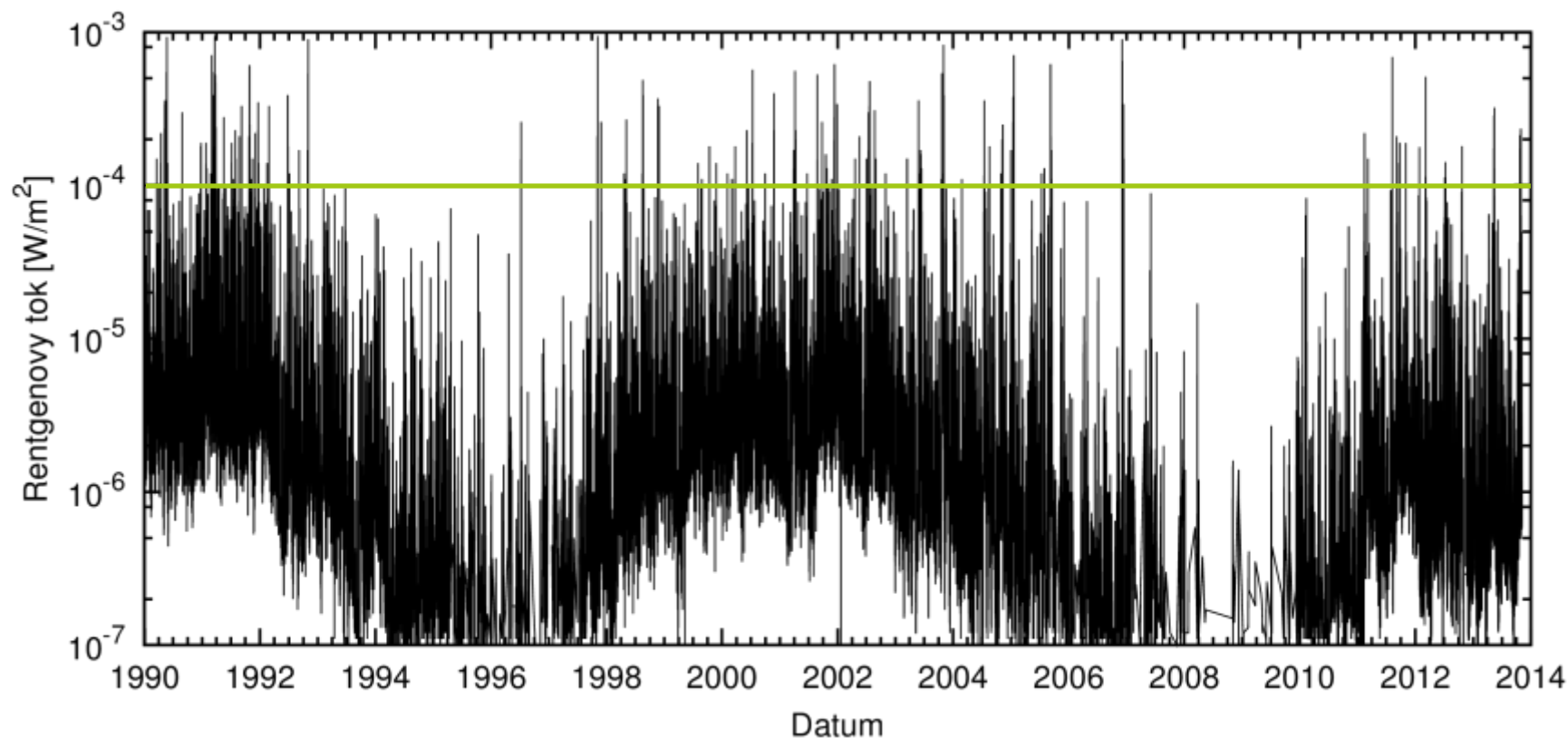
Rentgenový tok

GOES, celkový tok v pásu 0,1-0,8 nm, používá se pro klasifikaci erupcí
1996-2002: 70 erupcí třídy X, celkově 120 za celý cyklus,

max. X45 (4. 11. 2003)

2008-2013: 23 erupcí třídy X (max. zatím X6.9 – 9. 8. 2011)

Aktivita je skutečně v 24. cyklus nižší

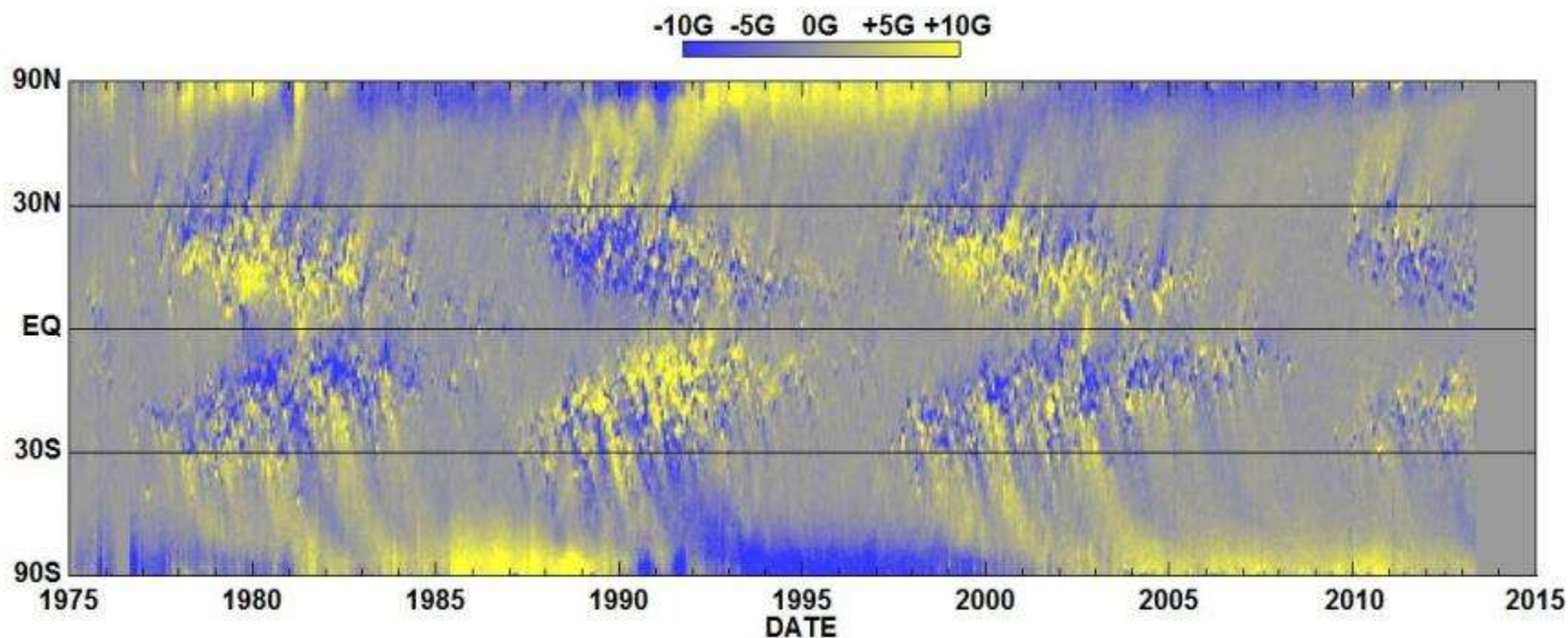


Magnetický motýlkový diagram

Dobře zobrazuje nesymetrie mezi polokoulemi

23. cyklus – jižní polokoule aktivnější

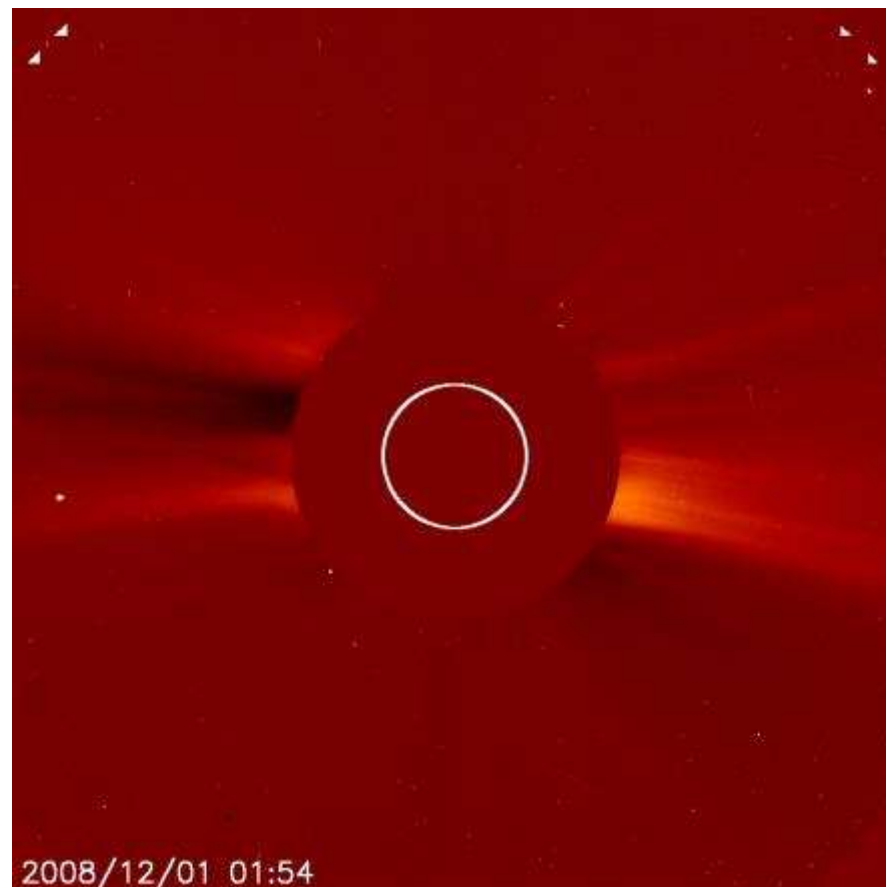
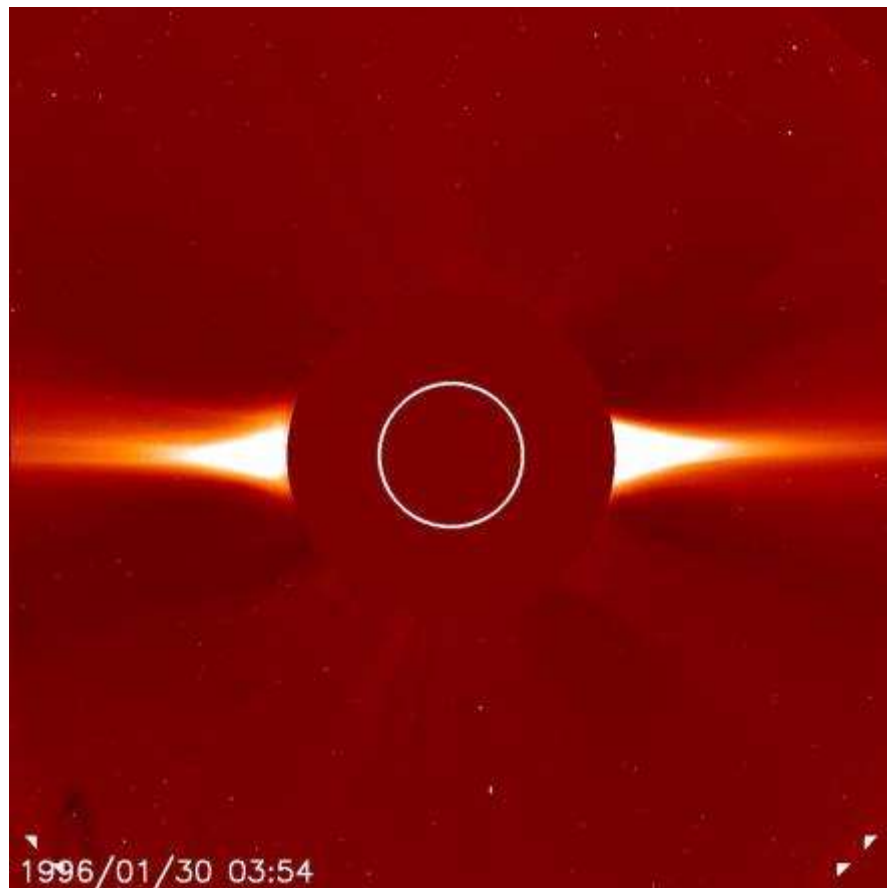
24. cyklus – severní polokoule aktivnější (a má náskok)



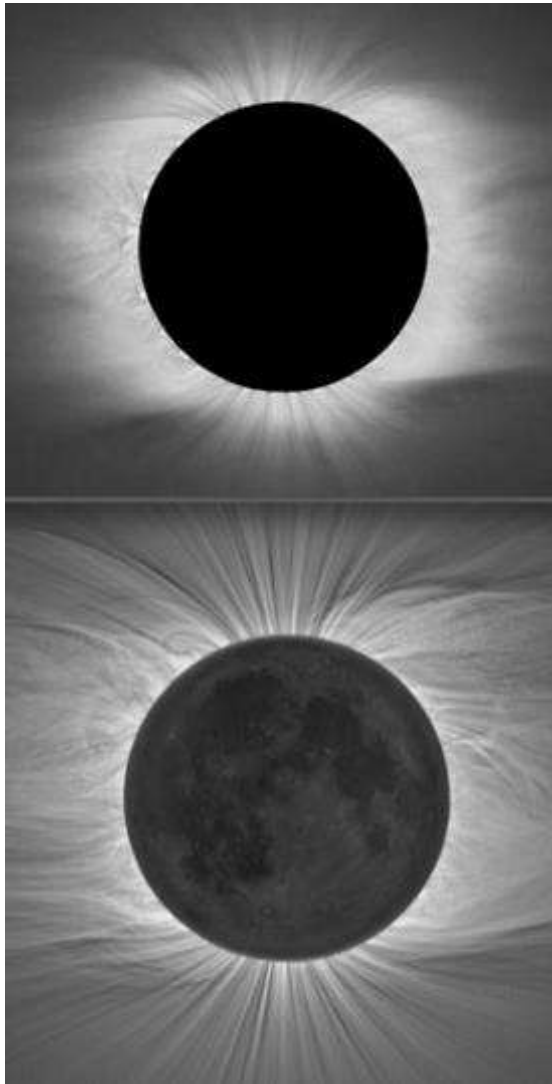
Hathaway/NASA/MSFC 2013/07

Co bylo/je ještě jinak?

Divná koróna v minimu



Co bylo/je ještě jinak? Opravdu?

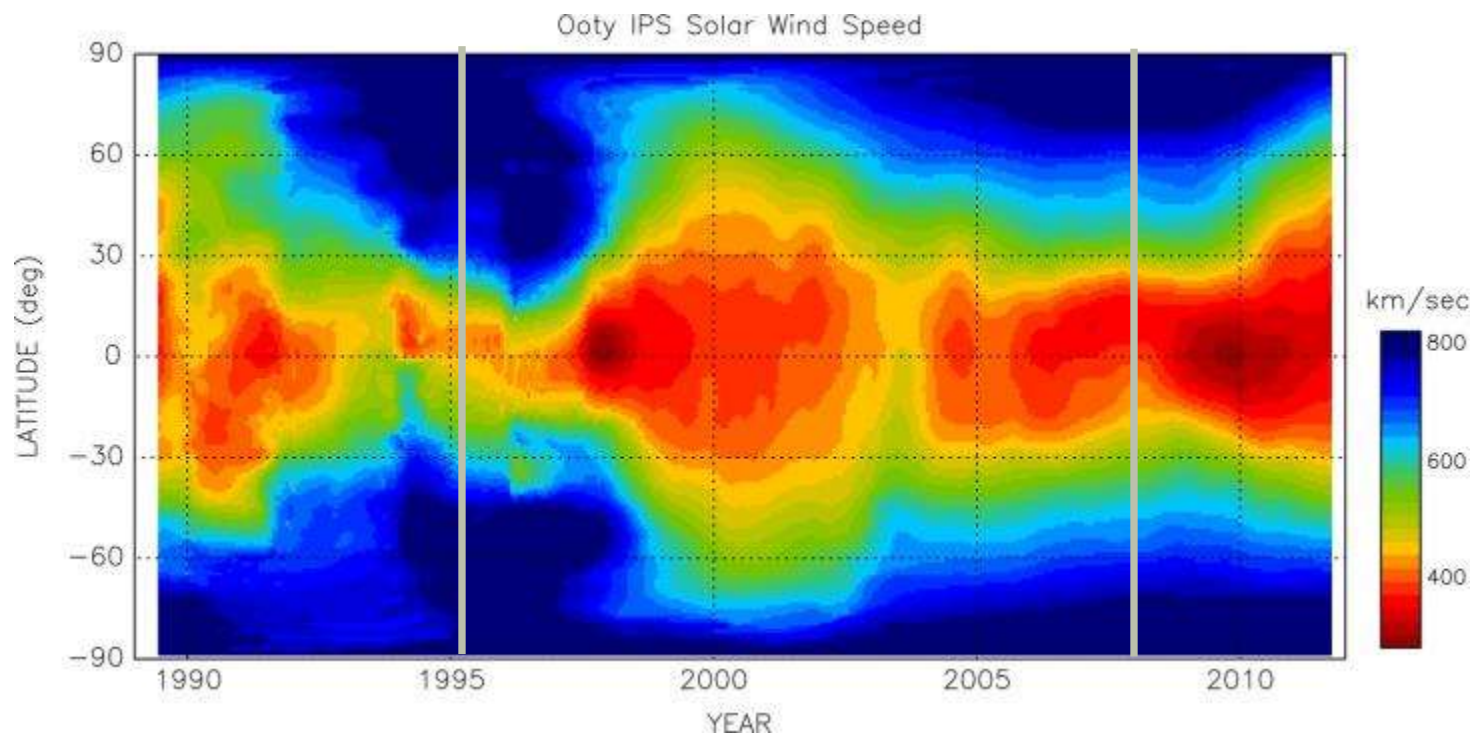


1901

2009

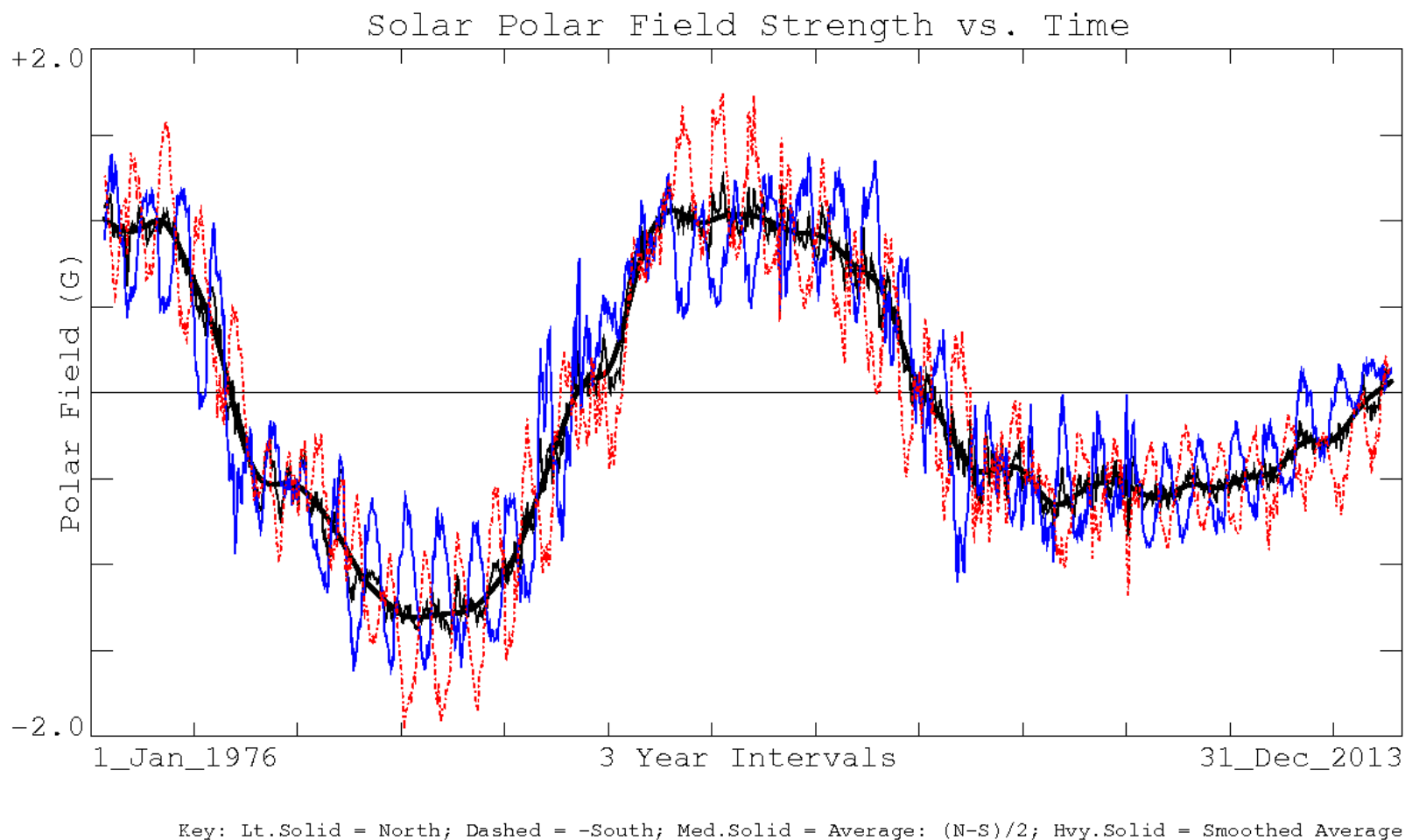
Co bylo/je ještě jinak?

Sluneční vítr se chová jinak



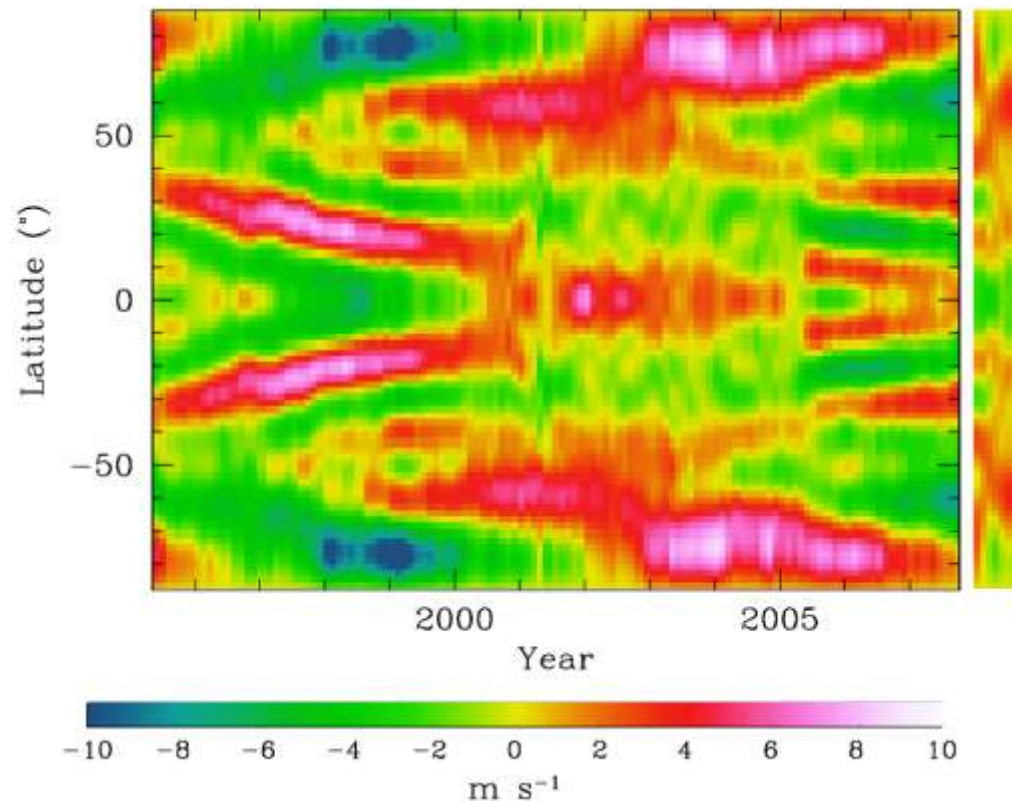
Co bylo/je ještě jinak?

Intenzita polárních polí je menší

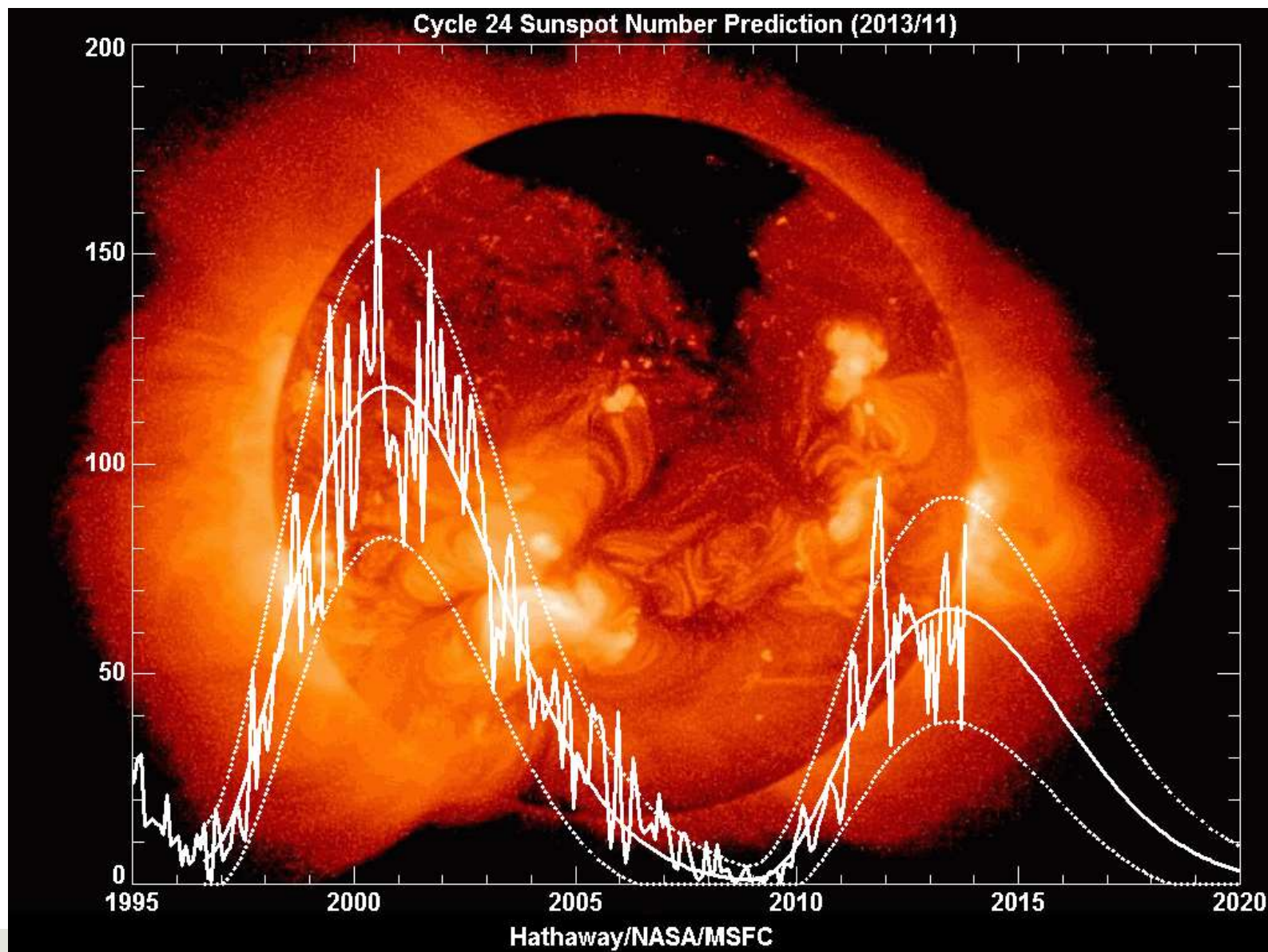


Co bylo/je ještě jinak?

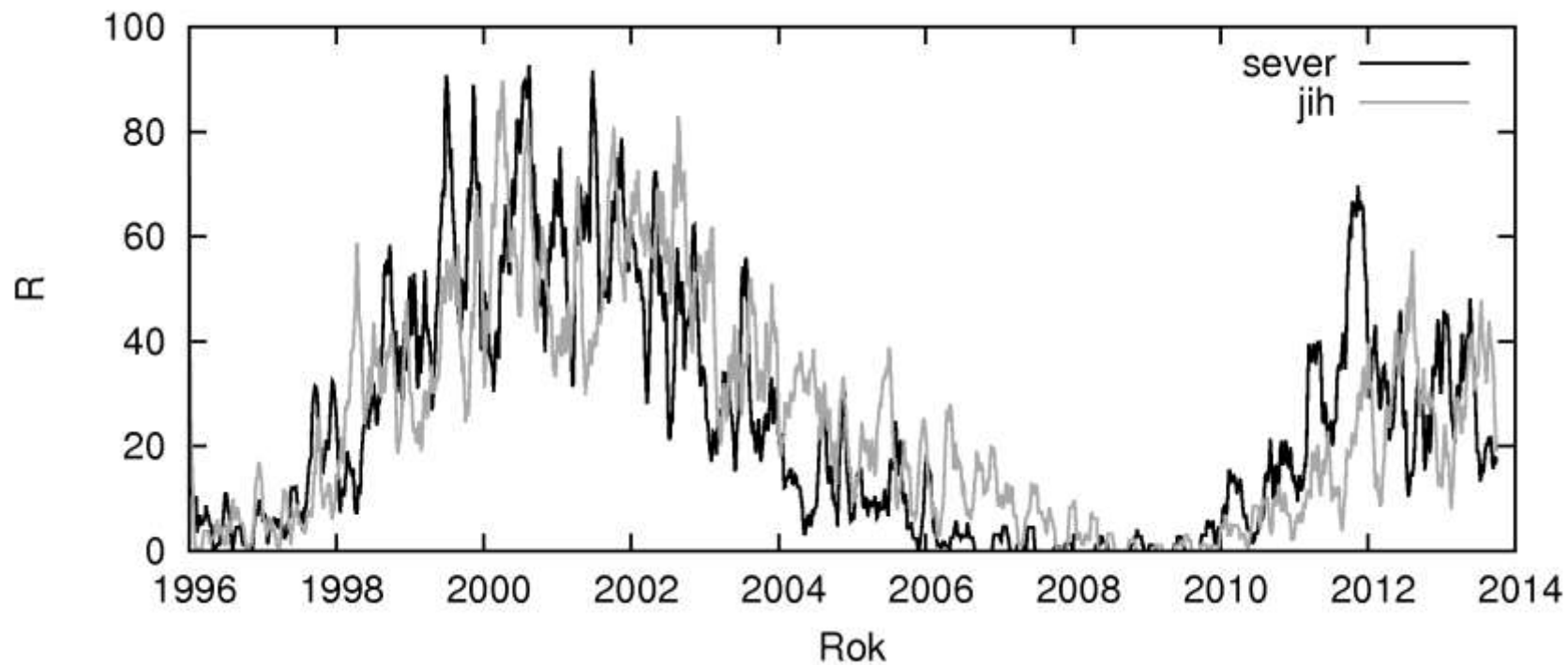
Proudění v nitru je jiné



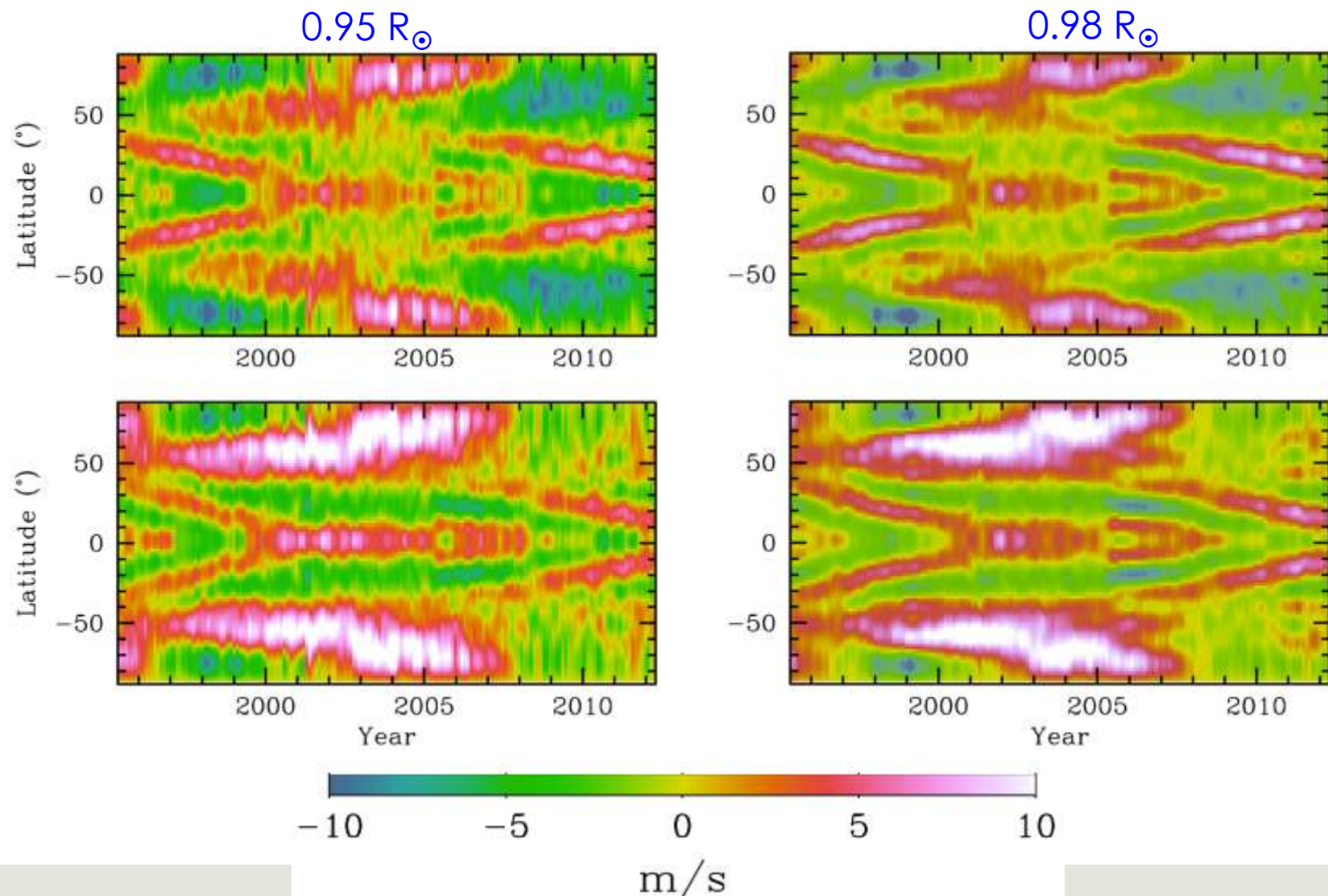
Jaký je a bude cyklus 24?



Asymetrické Slunce



Vstříc 25. cyklu



Závěry

- Je 24. cyklus neobvyklý?
 - Spíše ne (cyklus č. 14 byl asi podobný)
 - Je neobvyklý vůči cyklům 22 a 23 (avšak byly ony *obvyklé*?)
- Čeká nás nová doba ledová?
 - Možná...
- Kdy bude maximum 24. cyklu
 - Na severu už bylo (červenec 2011)
 - Na jihu teprve bude (březen 2014)
 - Celkově: podzim 2013
- Cyklus 25?
 - Spíš se netěšte...

Nové sluneční paradigma?

- I poznatky o Slunci se neustále mění
 - Velké změny mají dalekosáhlé důsledky – hvězdné modely jsou často “kalibrovány” na Slunce, tudíž změníme-li platnou fyziku uplatňující se u Slunce, měníme i fundamentální parametry jiných hvězd
 - Naštěstí jde o “kosmetické” opravy
 - U konvekce může být dopad výraznější
- Další otevřené otázky
 - Ohřev chromosféry
 - Koronální ~~ohřev~~ ochlazování
 - Magnetické pole v hlubokém nitru
 - Původ slunečního dynama
- A proto: studium Slunce má pořád smysl



**Naprostý konec,
díky za pozornost
a trpělivost!**