



PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Projekt podpořený Operačním programem
Přeshraniční spolupráce Slovenská republika – Česká republika 2007-2013



TRENČIANSKY
SAMOSPRÁVNÝ
K • R • A • J



Hvezdáreň v Partizánskom
Hvězdárna Valašské Meziříčí



Zlínský kraj

Tato akce je realizována s finanční
výpomocí Zlínského kraje

Co (si myslíme že) víme o Slunci?

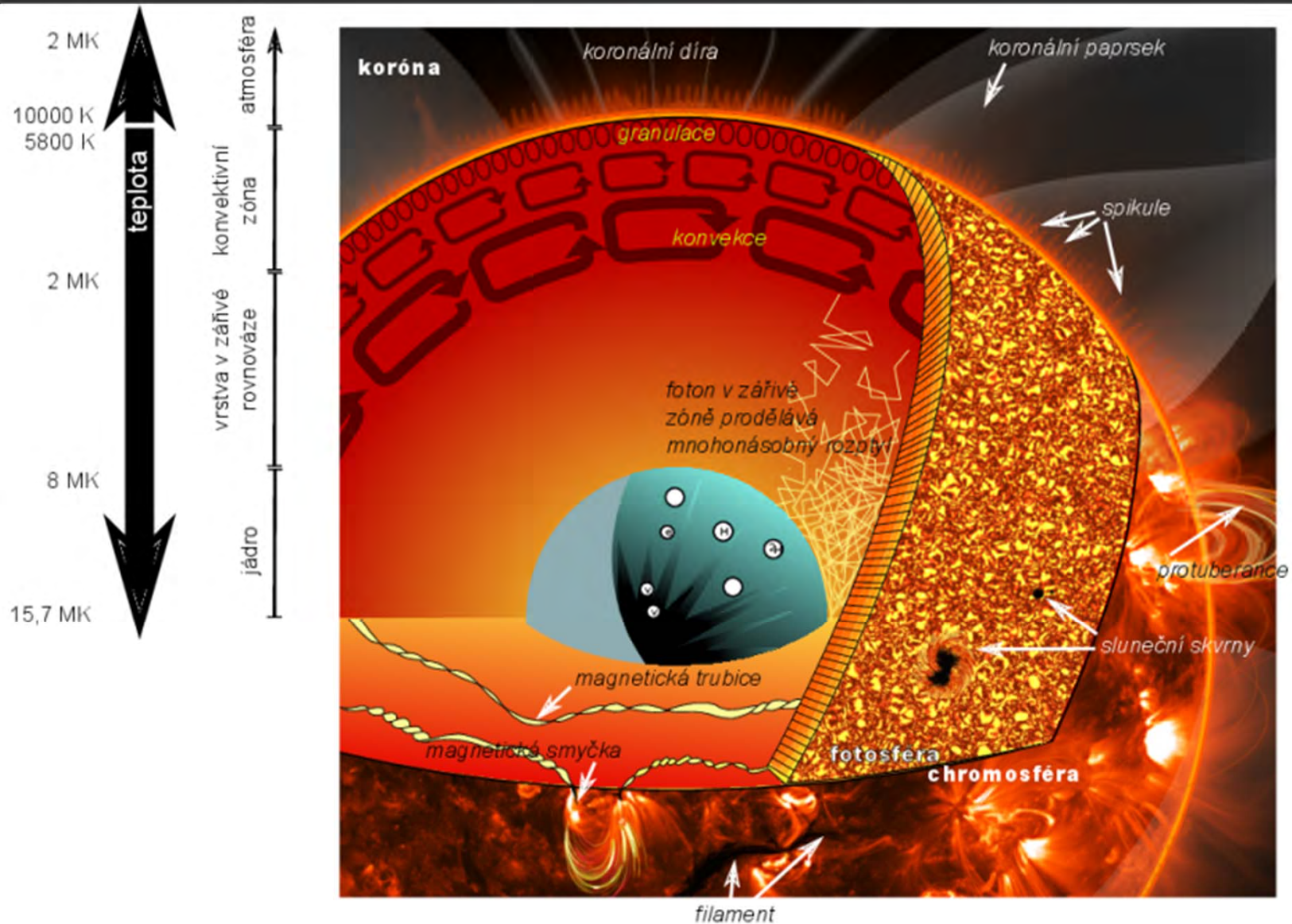
Michal Švanda

ASTRONOMICKÝ ÚSTAV UK, PRAHA
ASTRONOMICKÝ ÚSTAV AV ČR, ONDŘEJOV

O čem to bude?

- Slunce, naše nejbližší hvězda, je studováno intenzivně a dlouho
 - Vše by již mělo být známo – *chua chua*
- Fundamentální vlastnosti Slunce podle učebnic
- Současné problémy zpochybňující některé statě učebnic
 - Konvekce
 - Chemické složení
 - Struktura heliosféry

Když astronom slyší “Slunce”



Helioseismologie

Odkud máme informace o Slunci

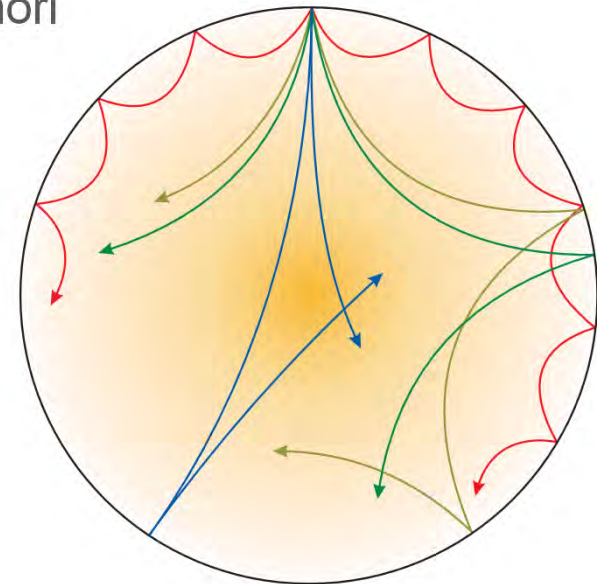
- Nitro opticky tlusté – tedy nemáme přímou informaci z hloubek větších než cca 200 km pod teplotním minimem
 - Pozorujeme tedy pouze atmosféru
- Informace o nitru – doména teoretických modelů
- Seismologie – standardní nástroj výzkumu niter těles
 - Geoseismologie
 - Helioseismologie
 - Selenoseismologie
 - Asteroseismologie
 - Joviseismologie
 - ... koloťuk



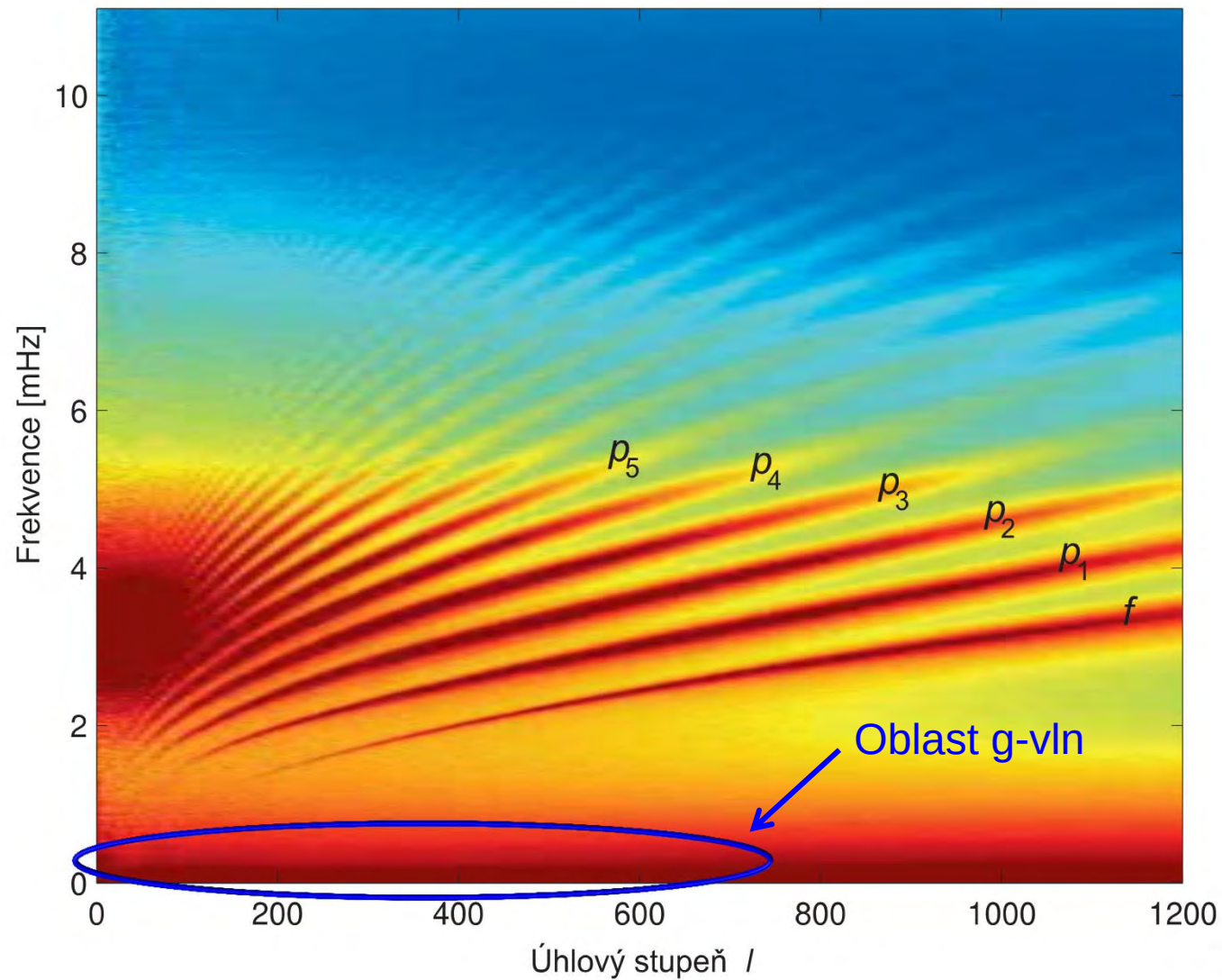
Sluncetřesení

- Vznik vln: odezva na hydrodynamické poruchy v prostředí
 - Chaotická konvekce poskytuje takových poruch nespočetně
- Podle řídící síly typ vln
- Rezonance
 - Hlubková lokalizace
 - Pouze určité vlny se dlouhodobě uchovají

- g : gravitační – v konvektivně stabilním prostředí
- p : zvukové – v konvektivně nestabilním prostředí
- f : povrchové gravitační vlny – fyzikálně podobné vlnám na moři

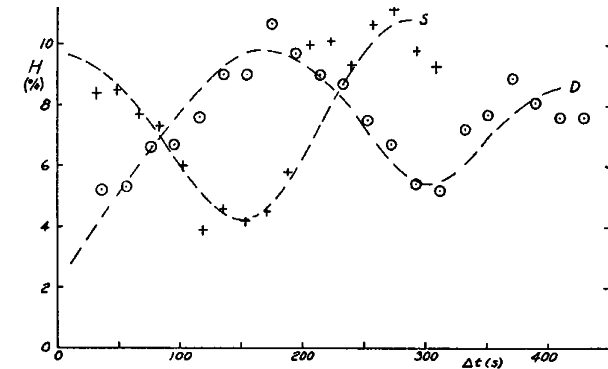


k - ω (I-v) diagram



Helioseismologie

- Leighton 1960 – pozoroval supergranulaci, všiml si pětiminutové periodicity ve vertikální rychlosti
- Deubner 1974 – pozorování na Capri – první k- ω diagram
- Od 1979 – dlouhodobá pozorování na jižním pólu
- Od 1976 BISON – štafeta stanic kolem světa (pouze jedno měření, žádné obrázky), podobně funguje GONG (ale s obrázky)
- Kosmické sondy (MDI/SOHO, HMI/SDO, HINODE atd.)



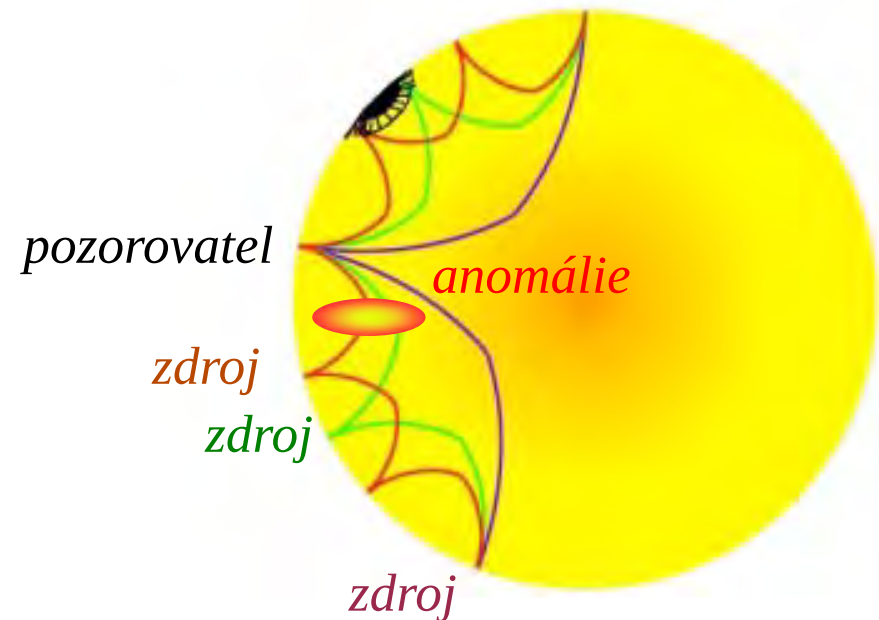
the peak heights of A-C curves (evaluated for long, narrow strips) published coincide very closely with those of the Deubner (1974) and the Deubner (1974) observations. The statistical significance of the wave observations has been published recently. Exactly at this position a protrusion of the disk is observed, preferentially at the disk center, where gravity waves excited by single granules are observed. This finding (Clark and Clark, 1973) that gravity waves propagate from the photosphere. However, this domain is closely linked to the 5-min oscillations.

5-MIN OSCILLATIONS

The Figures 3 to 6 demonstrate that the consideration of the statistical stability

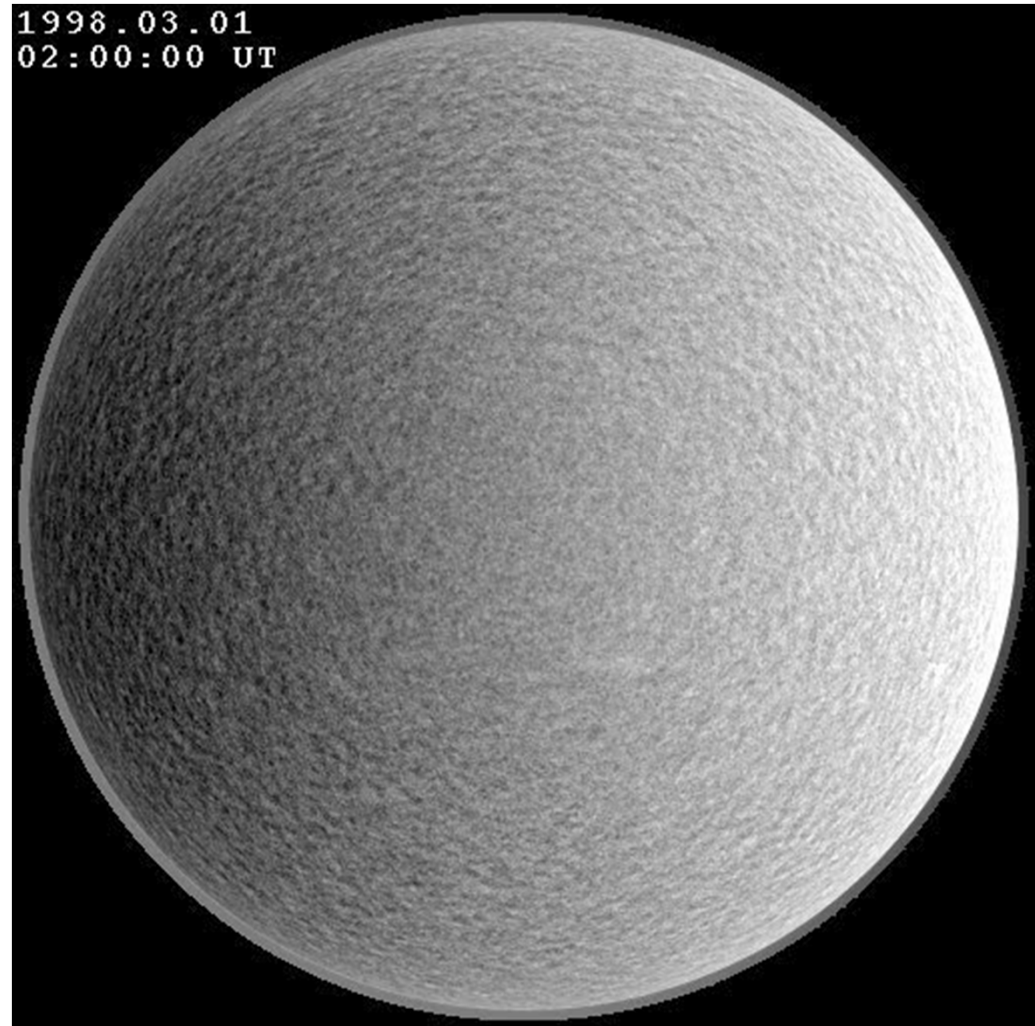
Lokální helioseismologie

- Seismické vlny (v přípovrchových vrstvách zvukové) se šíří nitrem a interagují s překážkami a anomáliemi
 - Ty ovlivňují rychlost jejich šíření
- Lze měřit čas průchodu vlny nitrem v závislosti na vzdálenosti (hloubce prostupu)
- Inverzí lze získat informace o dění pod povrchem



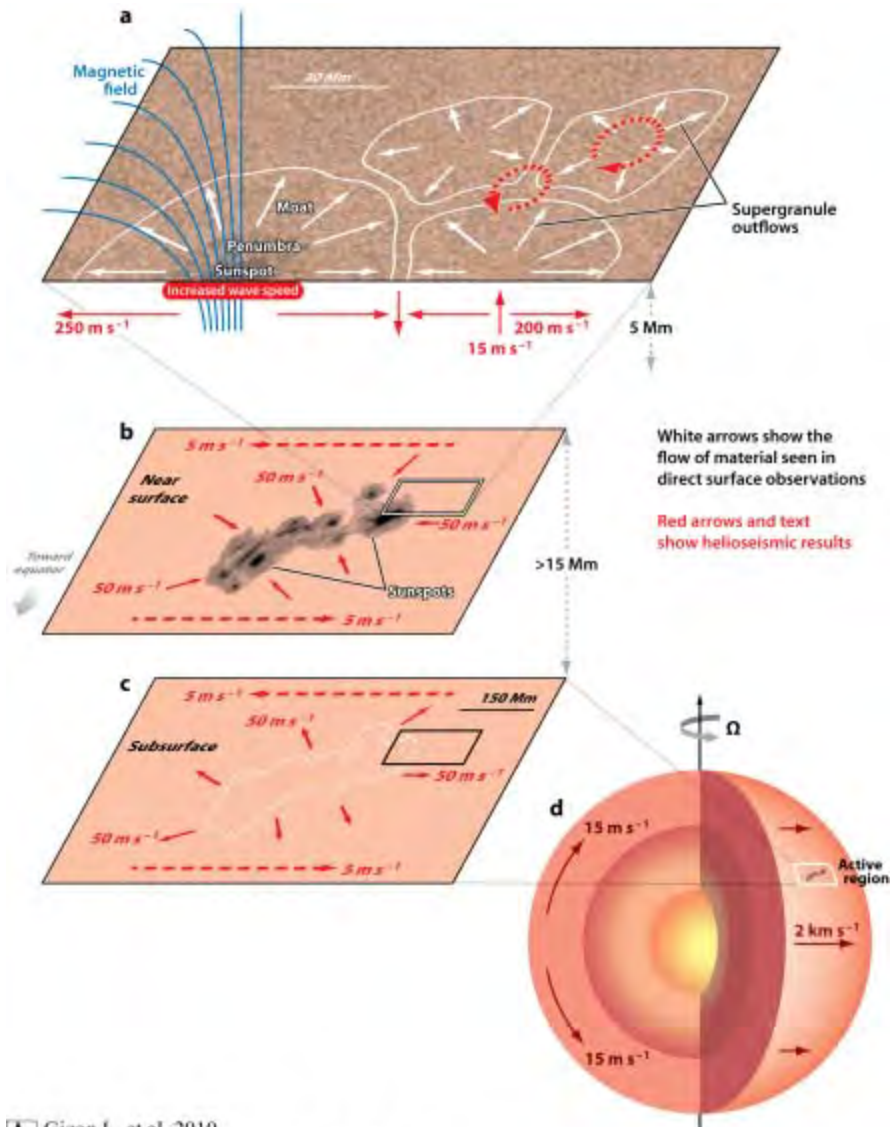
Rozvoj: Pozorovací kombajny

- 1995: start SOHO a GONG
 - Nepřeberné množství velmi kvalitních pozorovacích dat
 - Překotný rozvoj metod a mraky výsledků



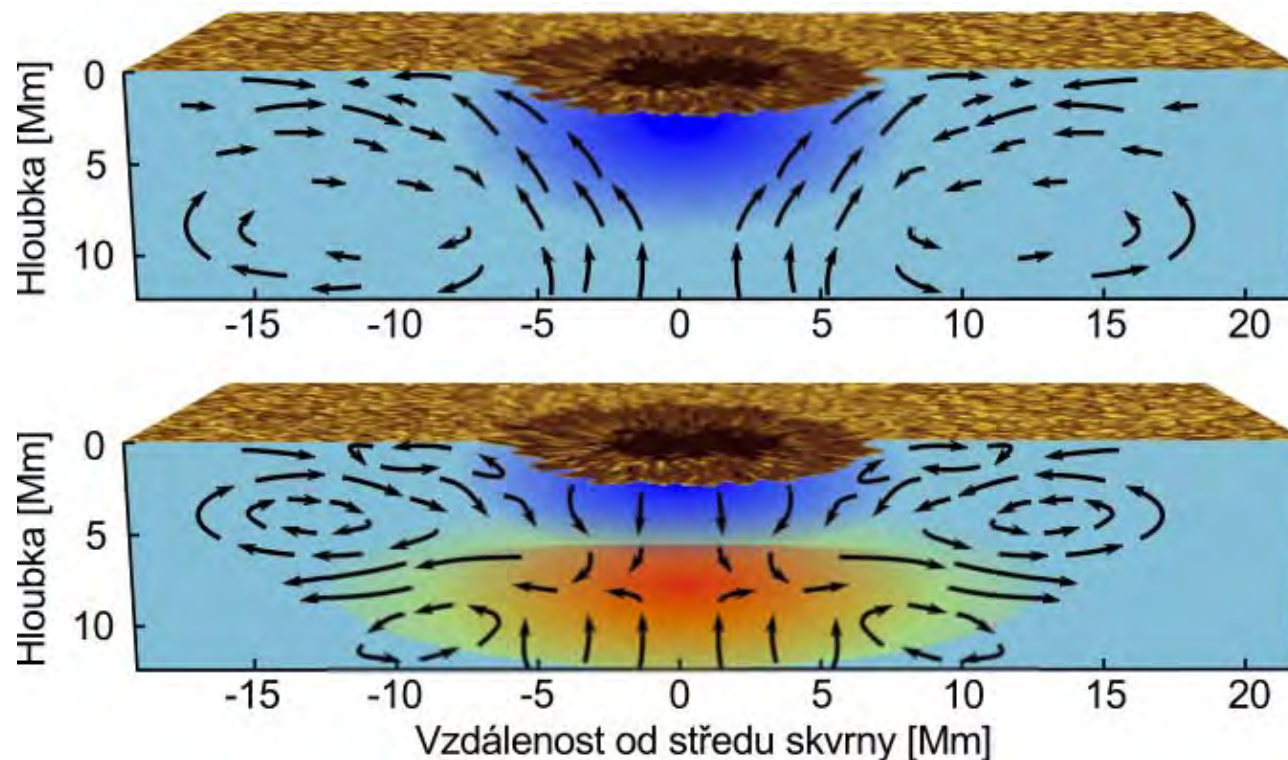
Příklad: pohyby plazmatu

- (Pod)fotosférická dynamika plazmatu
- Mnohaškalová



Problémy helioseismologie

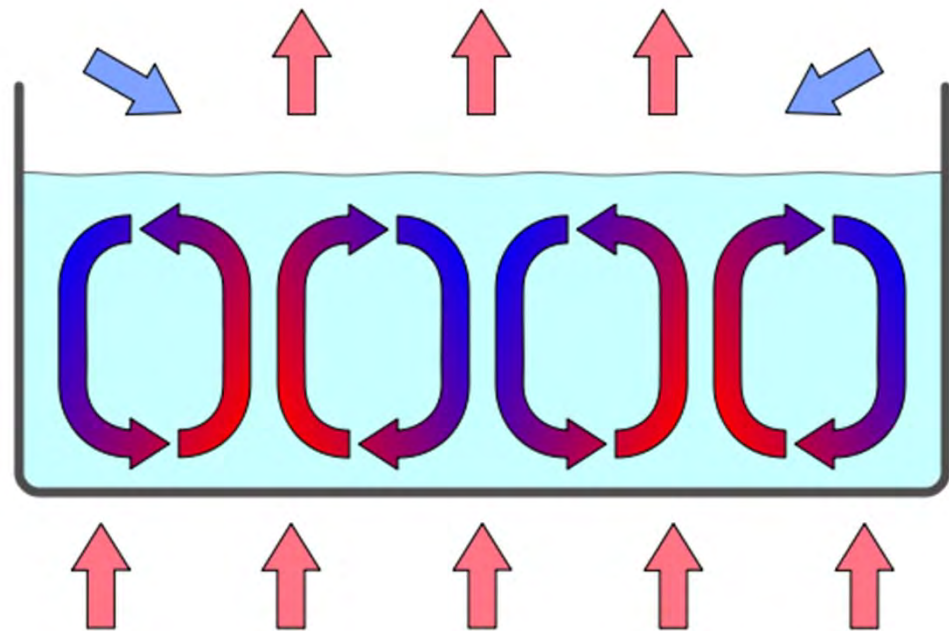
- Náhodný šum – jak hluboko lze jít v detailech?
- Interakce vln s magnetickými poli
 - Jaká je hloubková struktura slunečních skvrn?



Problém 1: Konvekce

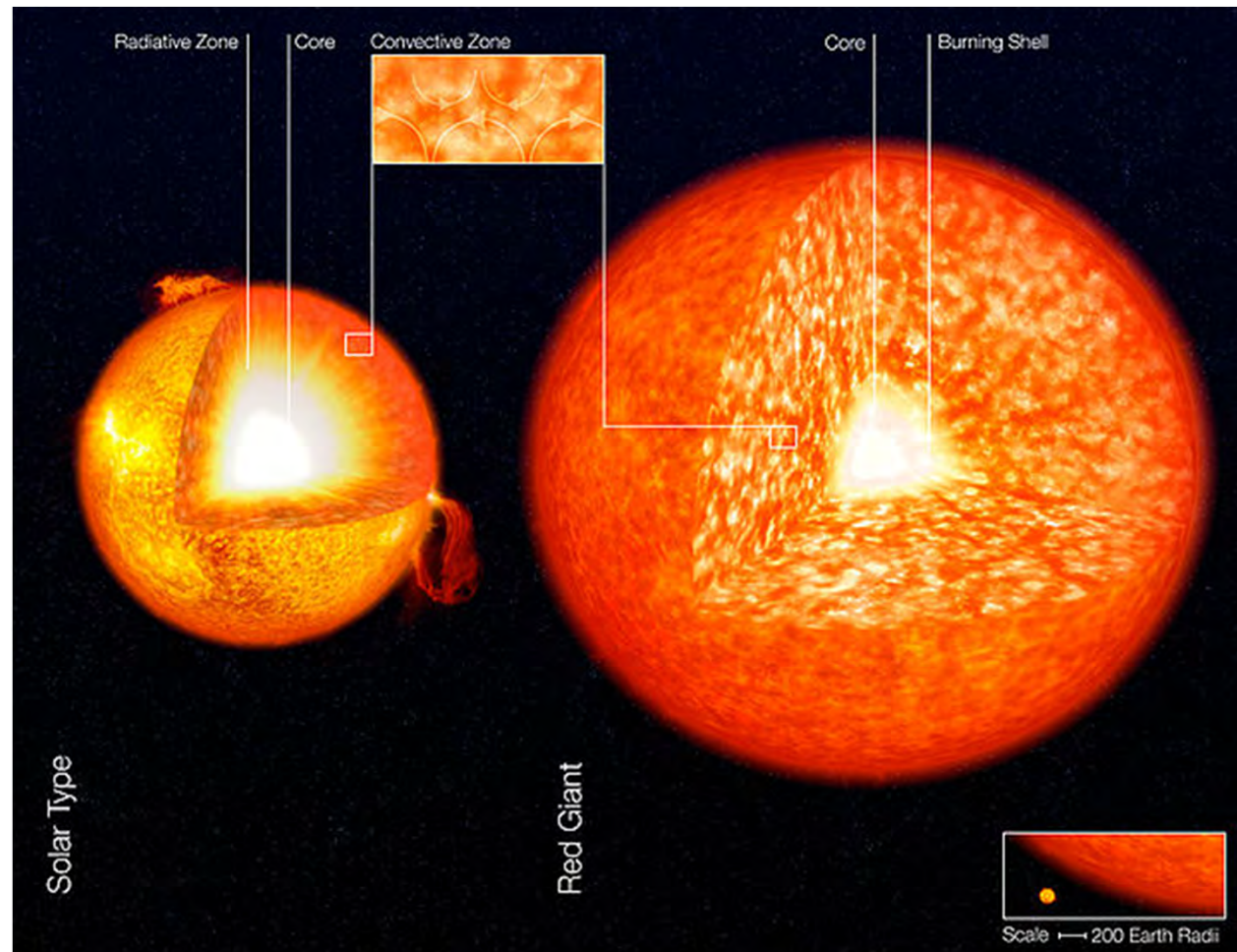
Konvektivní přenos

- 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”

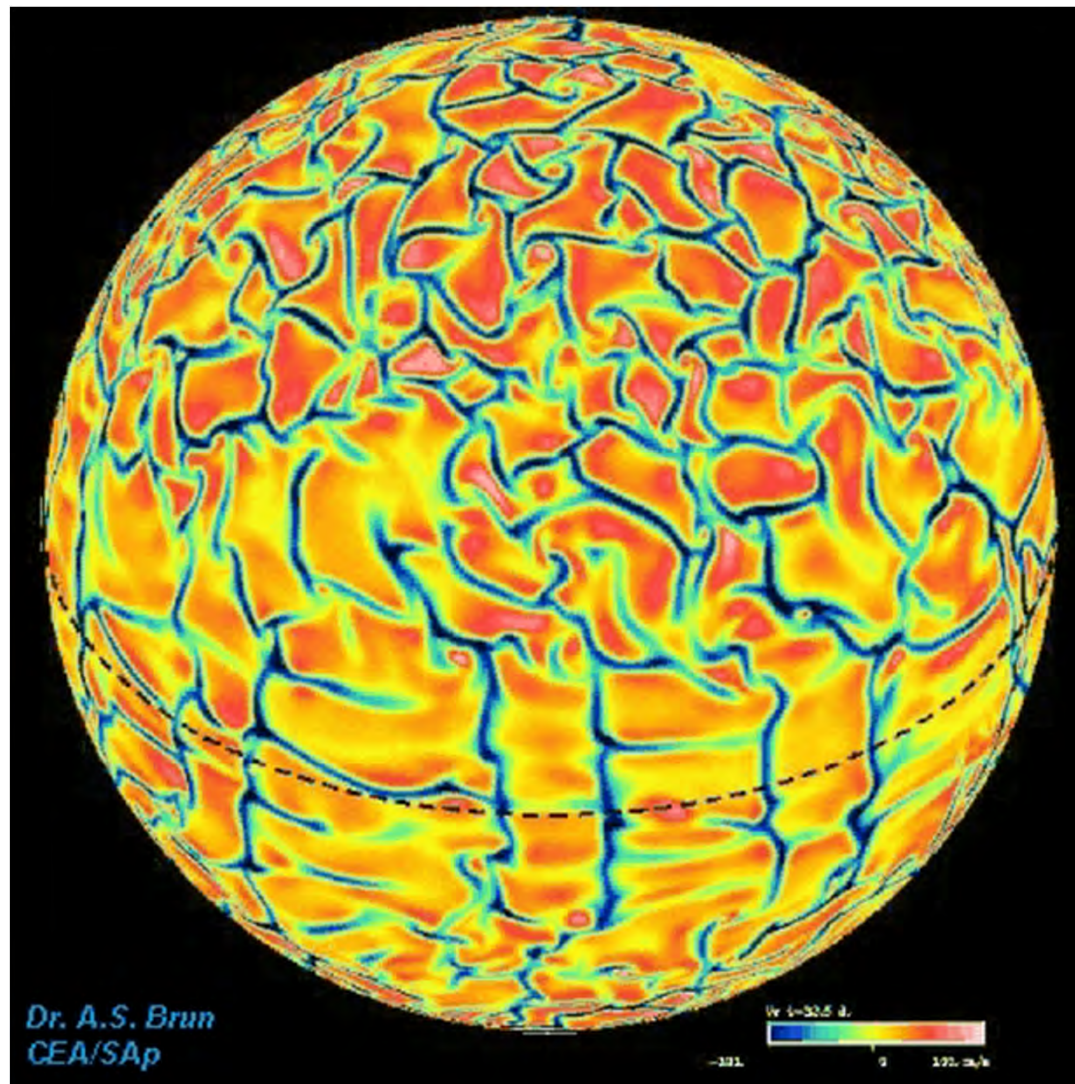


Konvekce ve hvězdách

- Řízena obvykle zvýšenou opacitou (zejména vodíku)

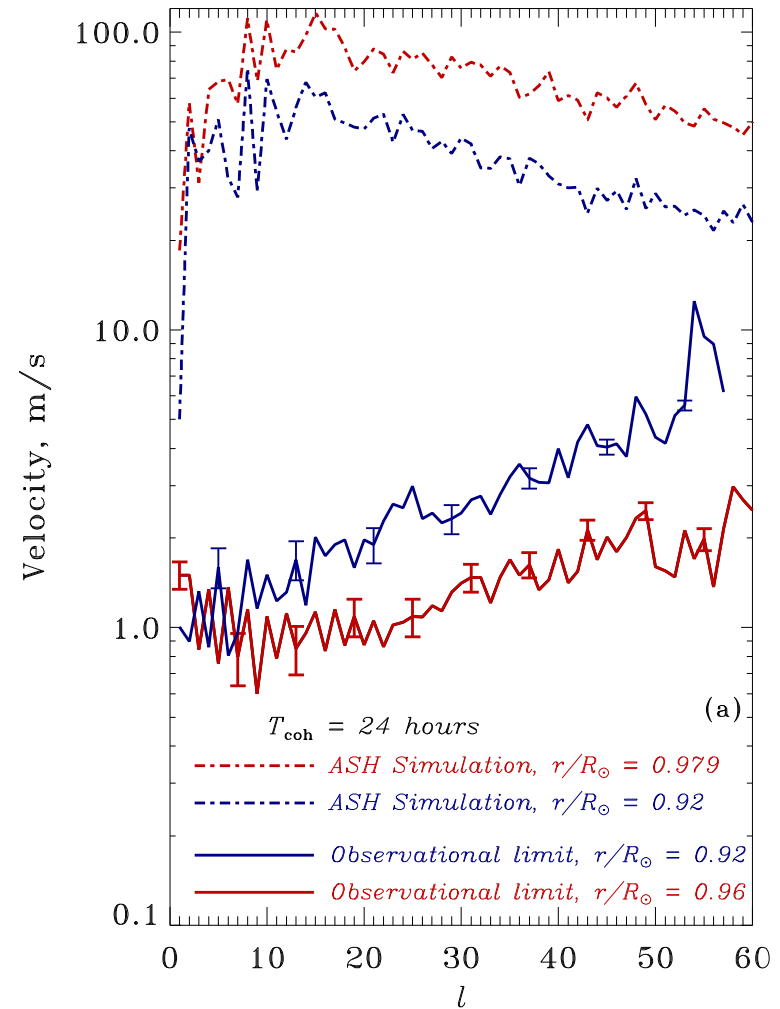


Konvekce ve Slunci (model)



Helioseismologie vyzývá modely

- Měřené poruchy cestovních časů vln jsou od dva řády menší než předpovídá model
- Tedy i konvekční rychlosti musí být nižší o dva řády
- Amplituda konvekčních rychlostí by měla klesat směrem k povrchu a pak prudce narůst (ve granulární vrstvě)
- Měření naznačují druhý vrchol amplitudy cca 2 Mm pod povrchem)



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

Problém 2: Chemické složení Slunce

Chemikovo Slunce

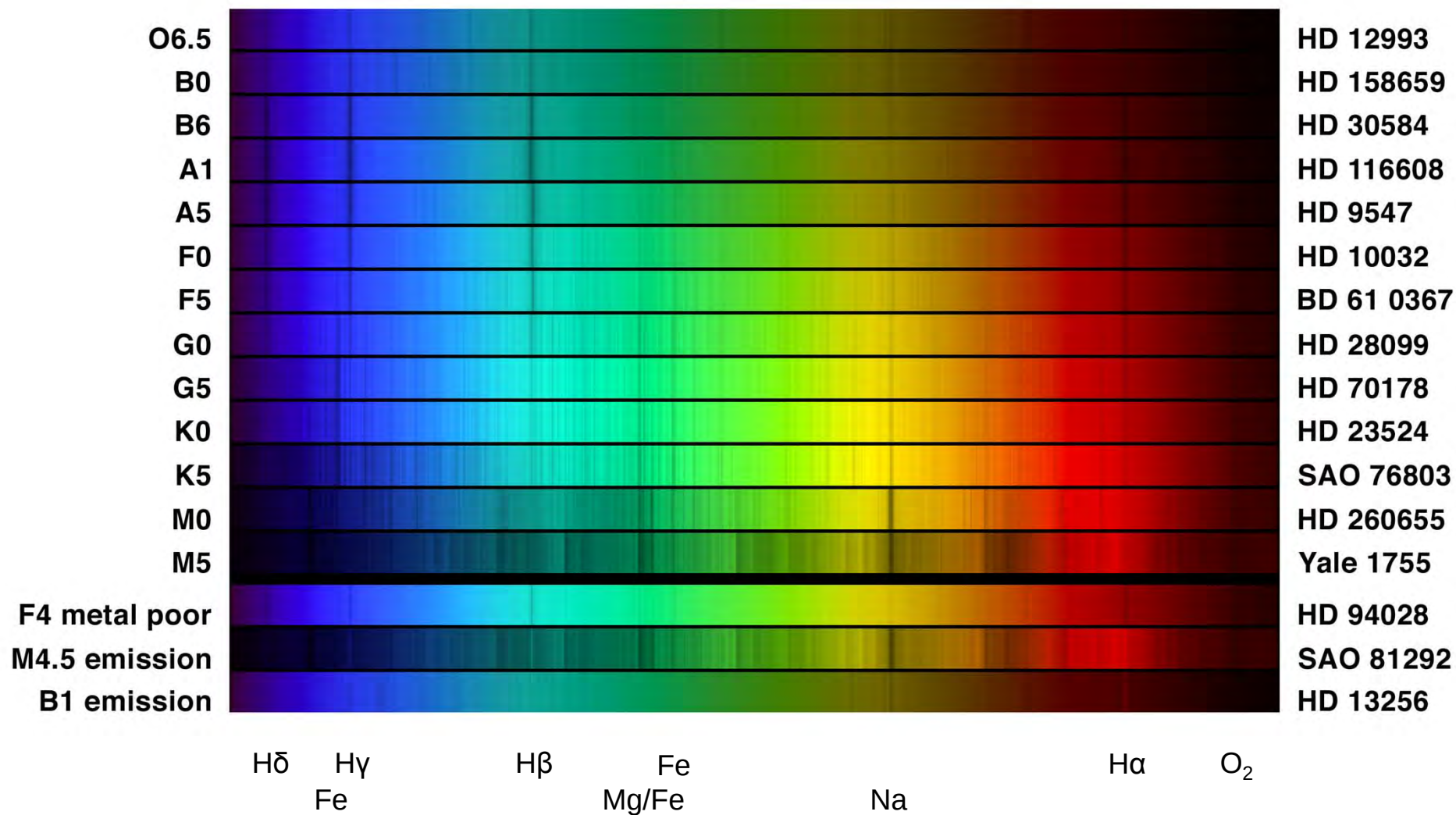
■ Slunce je podle učebnic složeno z následující siláže:

- 73,46 % vodíku
- 24,85 % helia
- 0,77 % kyslíku
- 0,29 % uhlíku
- 0,16 % železa
- 0,12 % síry
- 0,12 % neonu
- 0,09 % dusíku
- 0,07 % křemíku
- 0,05 % hořčíku
- a dalšího smetí

Chemické složení Slunce

- Nelze přímo zjistit
- Z analýzy fotosférických spektrálních čar (nejčastěji, přesnost ~10 %)
- Analýza primordinálních meteoritů (problém s těkavými prvky, avšak velmi dobrá přesnost)
- Podobnost s chemickým složením slunečního okolí
 - Slunce je anomální – cca dvakrát větší zastoupení těžkých prvků
- Helioseismologie (profil rychlosti zvuku je citlivý na chemické složení, také poloha konvektivní zóny atd.)
- Sluneční neutrína (prozatím nedostatečná přesnost)

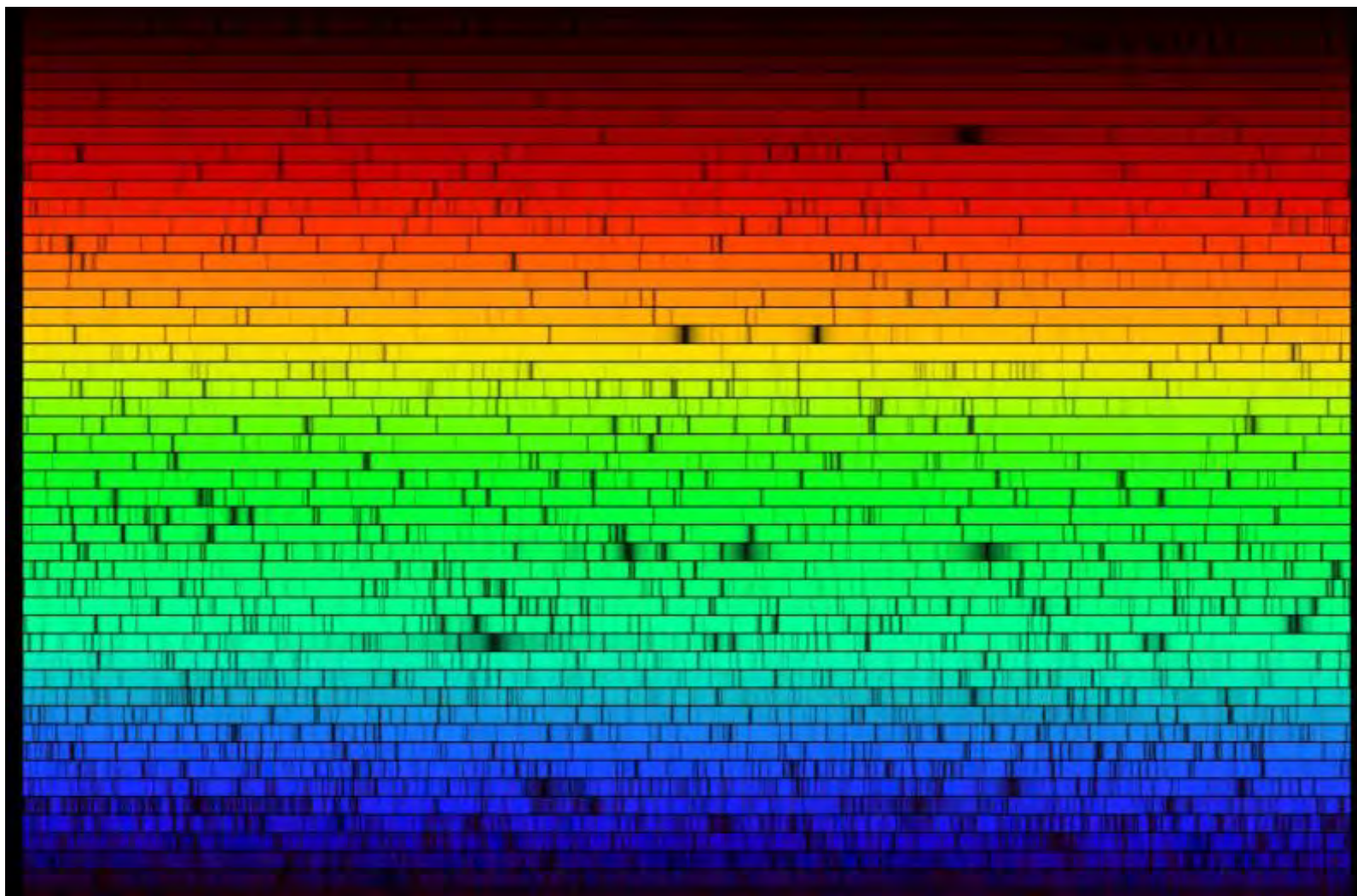
Spektrální typy hvězd



Analýza spektrálních čar

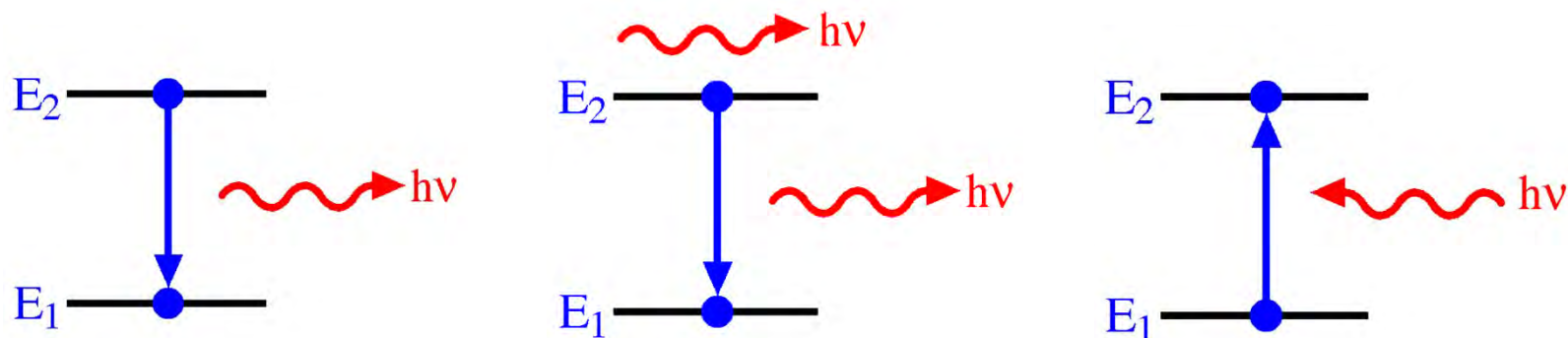
- Analýzu nelze provést přímo
 - Každý prvek má mnoho čar jejichž výraznost závisí na teplotě a dalších parametrech plazmatu
- Vyžaduje model atmosféry (realistický) se započtenou fyzikou (realistickou)
- Tradičně však 1-D model se zjednodušenou fyzikou přenosu záření (ignoruje konvekci)
- Ignorují se 3-D jevy (neradiální složky, okrajové ztemnění pouze parametricky)
- Předpokládá se lokálně rovnováha mezi částicemi a zářením

Sluneční spektrum



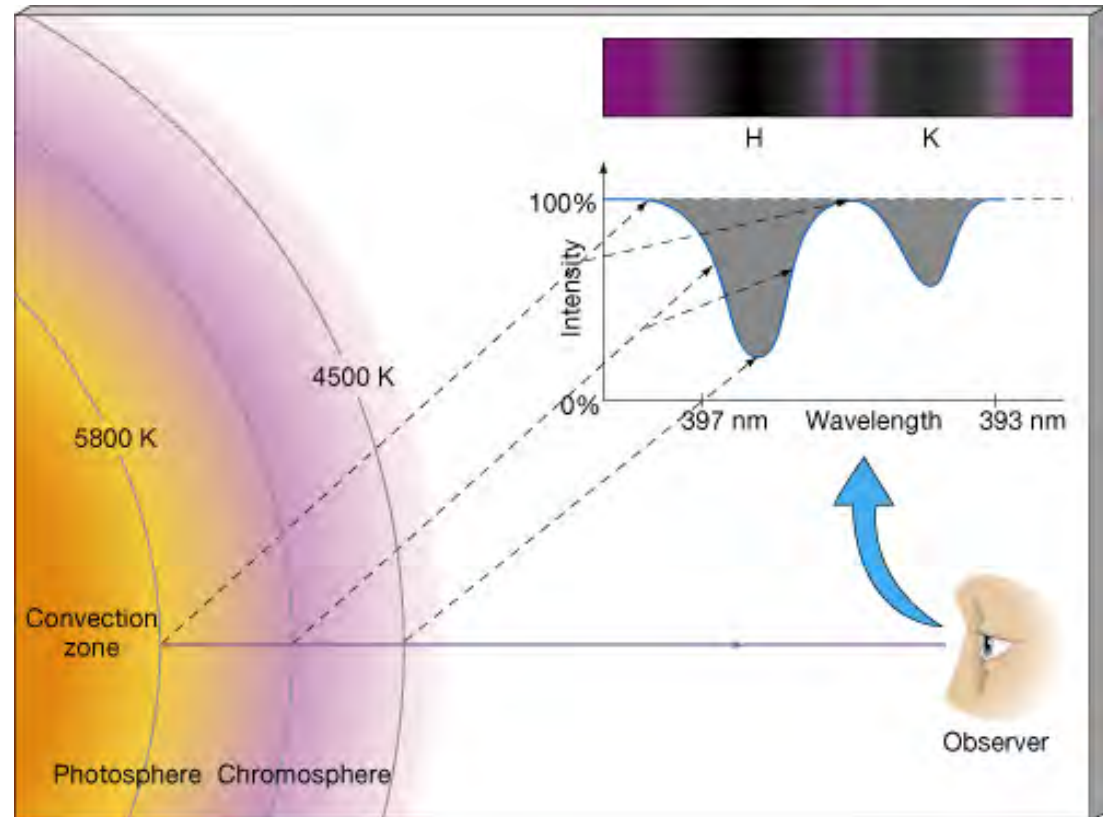
Modelování spektra

- Formace spektrálních čar
 - Kolize mezi zářivým polem a částicemi – rozptyl – dále kvantování fotonů a relace neurčitosti
- Popis interakce záření a atomů/iontů pomocí Einsteinových koeficientů – jejich výpočet je záležitost mikrofyziky
- Výpočet pravděpodobnosti výskytu stavových přechodů
 - Každému přechodu odpovídá spektrální čára
 - Každá spektrální čára zvyšuje opacitu
- Chemické složení hraje roli – lze použít jako neznámou a úlohu invertovat



Semiempirický model

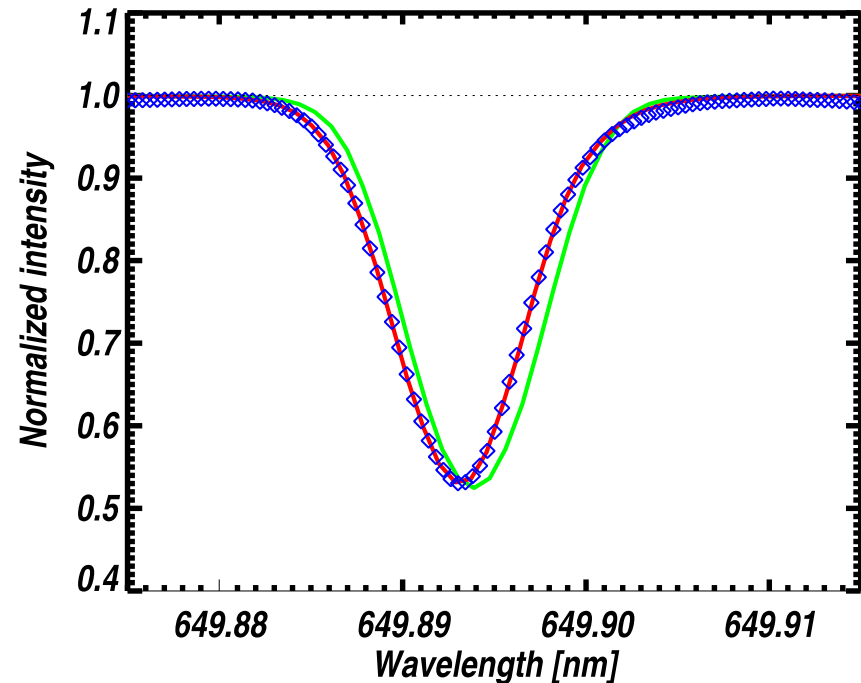
- Inverze spektrálních čar
- Každá část čáry se formuje v jiné hloubce
 - Ne tak docela ☺
 - Intenzita odpovídá teplotě
 - Z profilu více spektrálních čar lze odhadnout vlastnosti atmosféry
- Formační hloubky jsou výsledkem modelu!



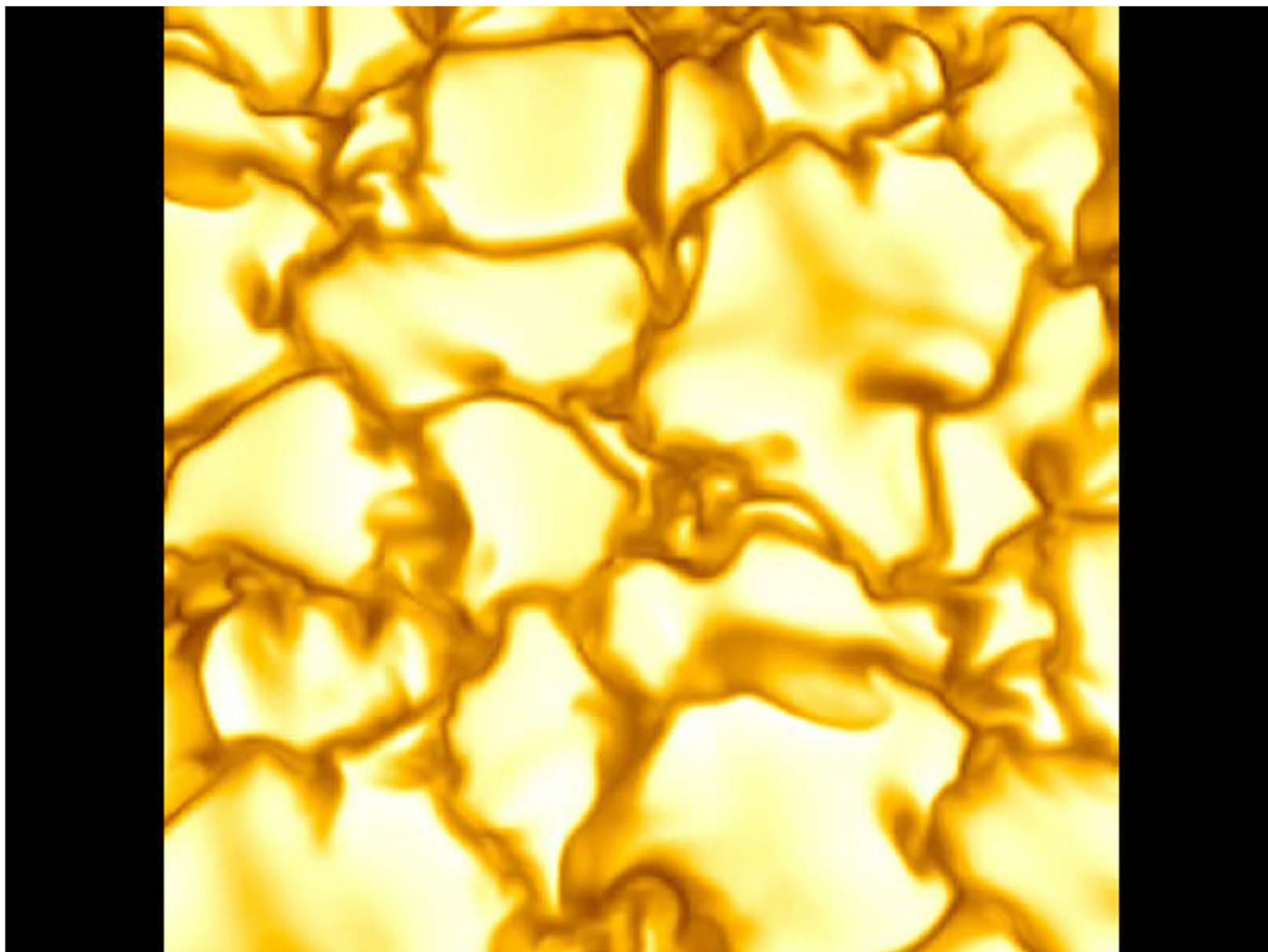
VAL, Maltby, atd.

1-D vs. 3-D model

- 1-D – radiální závislost, konvekce parametricky
 - Snadno se počítá
 - Lze započítat detailnější fyziku (více spektrálních čar atd.)
 - Ad hoc parametry (mikroturbulence, makroturbulence, ...)
 - 1-D aproximace je přijatelná
- 3-D – detailní model včetně 3-D konvekce
 - Velmi náročné na výpočty
 - Nutné ořezat fyziku – výběr jen určitých spektrálních čar nebo určitá forma průměrování
 - Ad hoc nejsou nutné – jsou automaticky zahrnuty v hydrodynamickém modelu
 - Konvekce je nerealistická – nelze modelovat každý atom

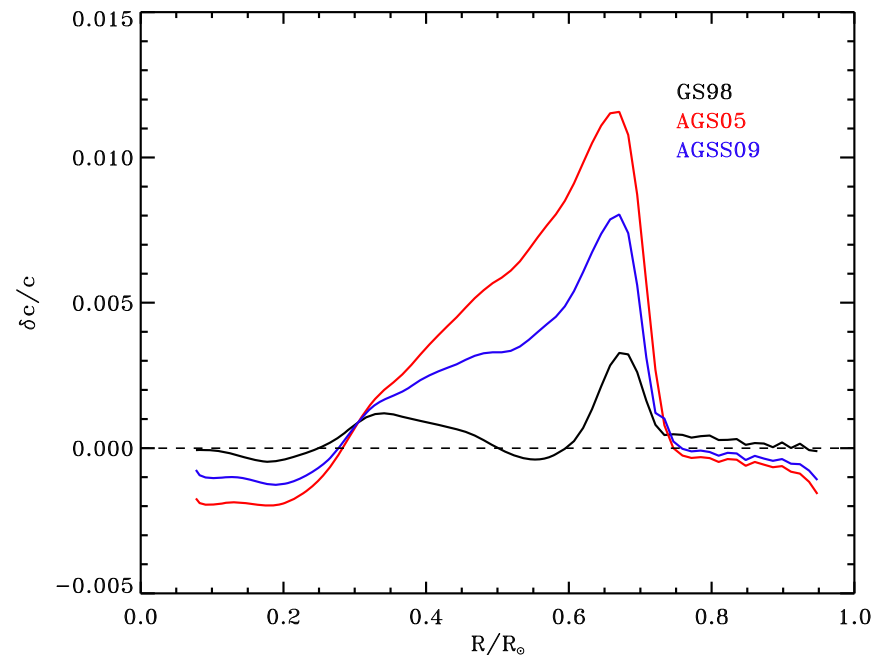


Průlet nad granulací



Nové chemické složení Slunce

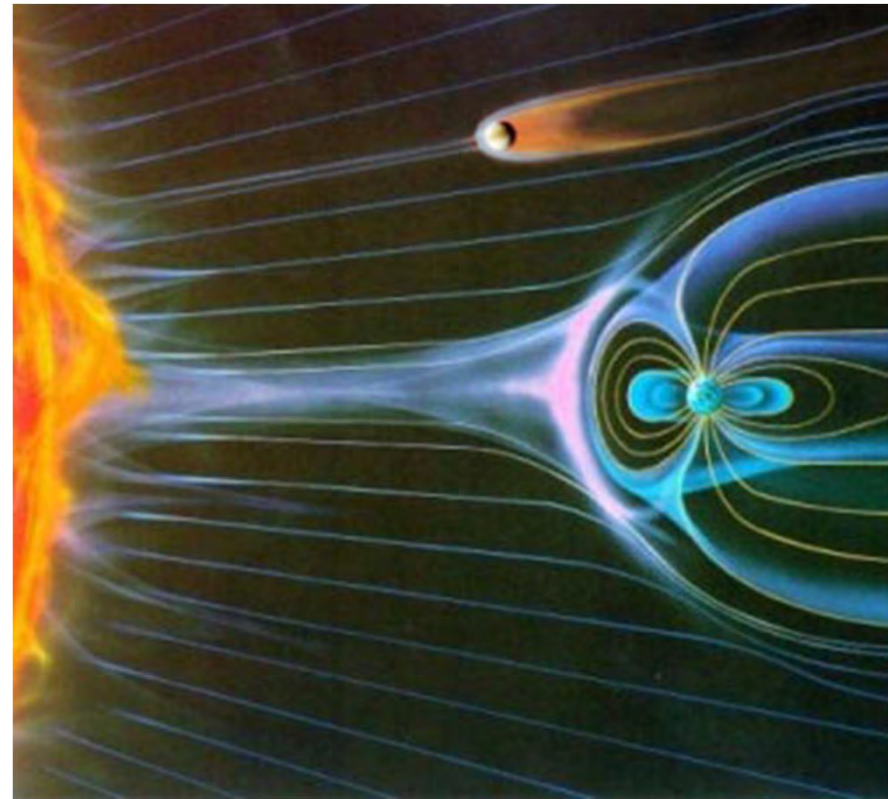
- Detailní 3-D model – menší zastoupení těžkých prvků
- Metalicita předtím 0,023, dnes 0,012
 - Souhlasí s chemickým složením v slunečním okolí
 - Lépe vysvětluje tok neutrin (ale velké chyby, takže nerozhodně)
 - Problém s helioseismologií – jiný profil rychlosti zvuku a mělčí konvektivní zóna
 - Pro návrat k souhlasu je zapotřebí o cca 10 % větší opacita v konvektivní zóně
 - Nedostatečná mikrofyzika?
 - Vnitřní míchání zvukovými vlnami?
 - Jiné vnitřní chemické složení?



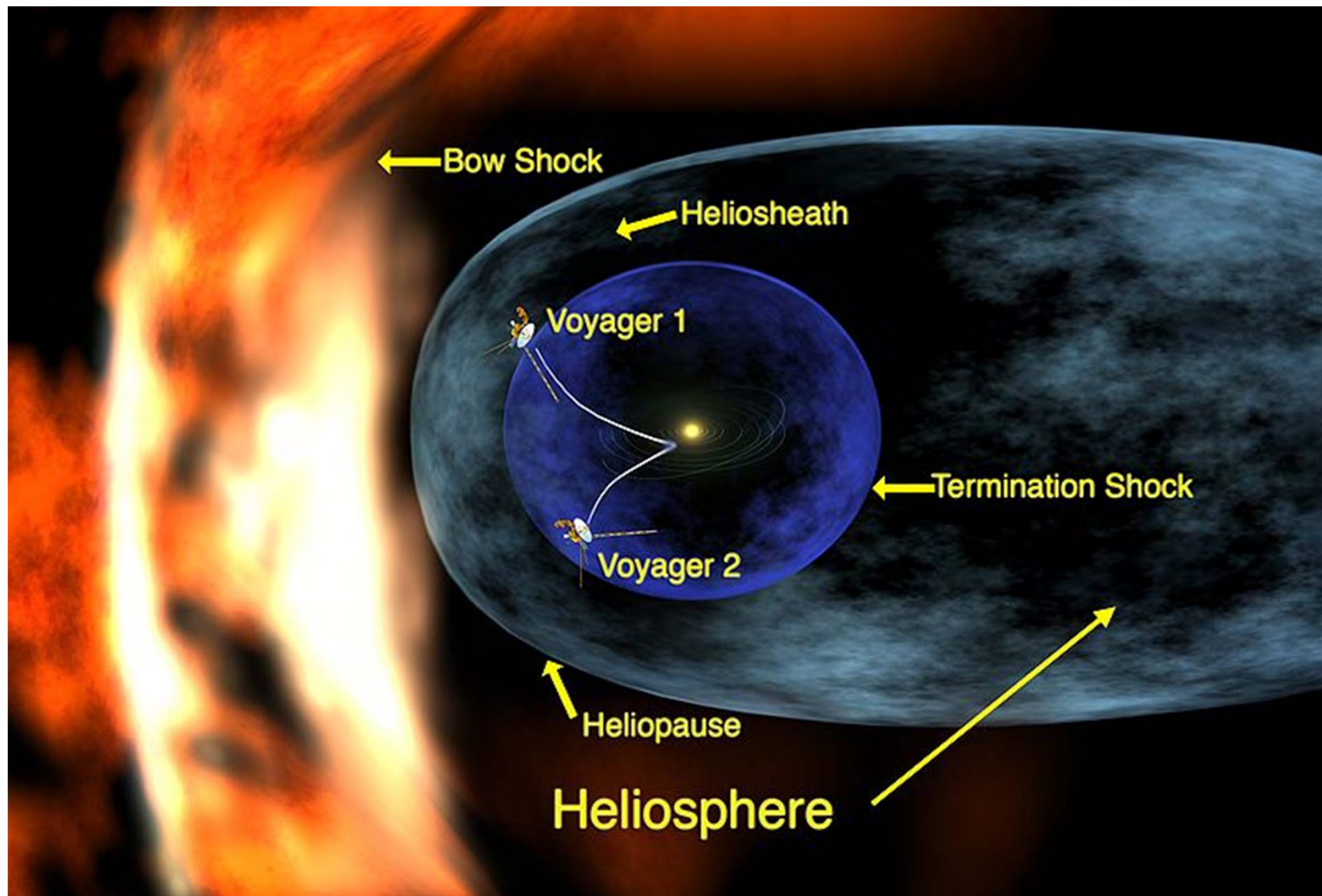
Problém 3: Struktura heliosféry

Sluneční vítr

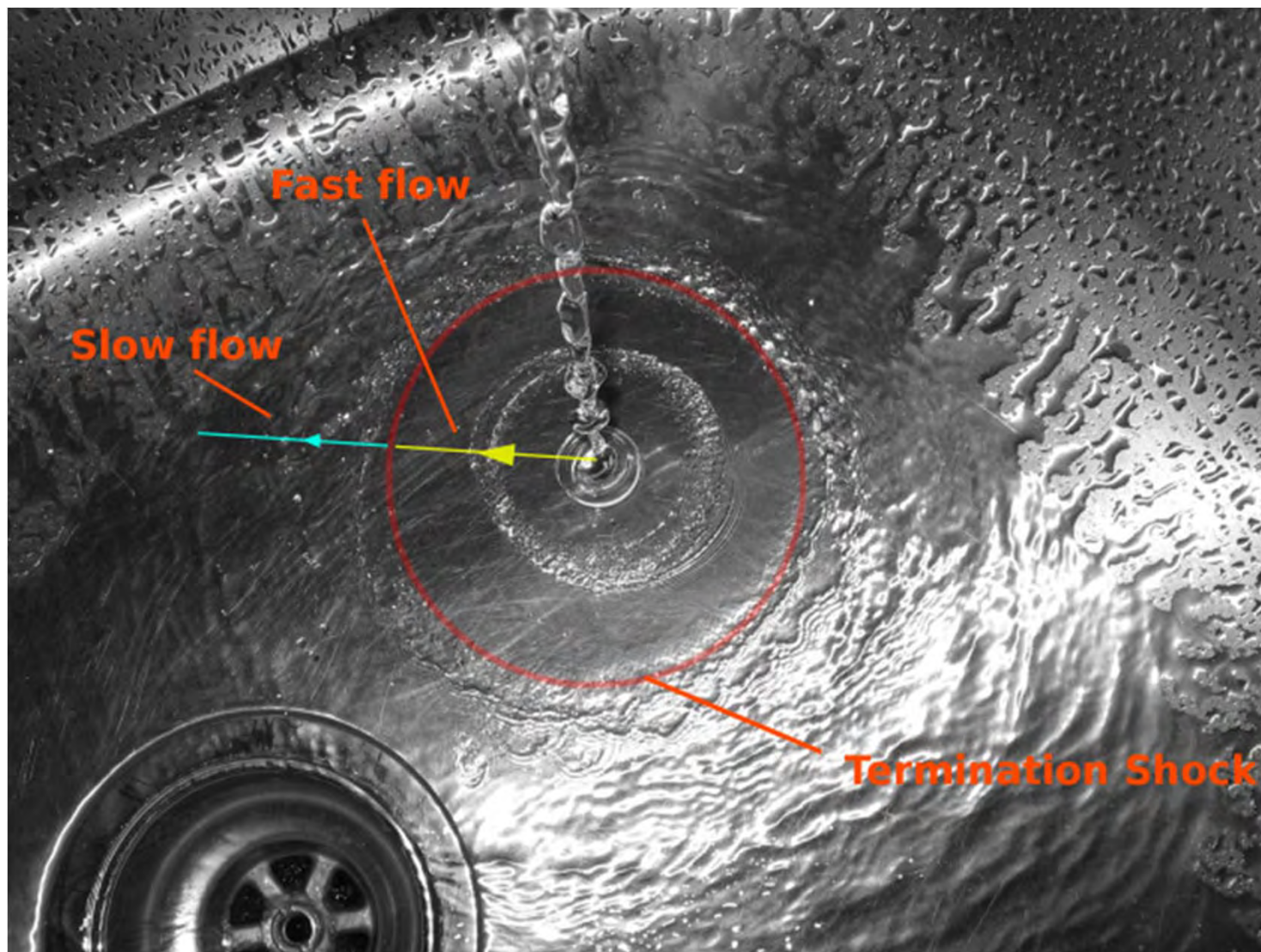
- Neustálý proud částic od Slunce
 - Projevy známy z pozorování komet
 - Správný model Parker (1957)
 - Potvrzeno Lunou 2 (1958)
- Interakcí s mezihvězdným plazmatem vytváří heliosféru
 - Sféra vlivu Slunce



Učebnicová heliosféra



Heliosféra ve dřezu



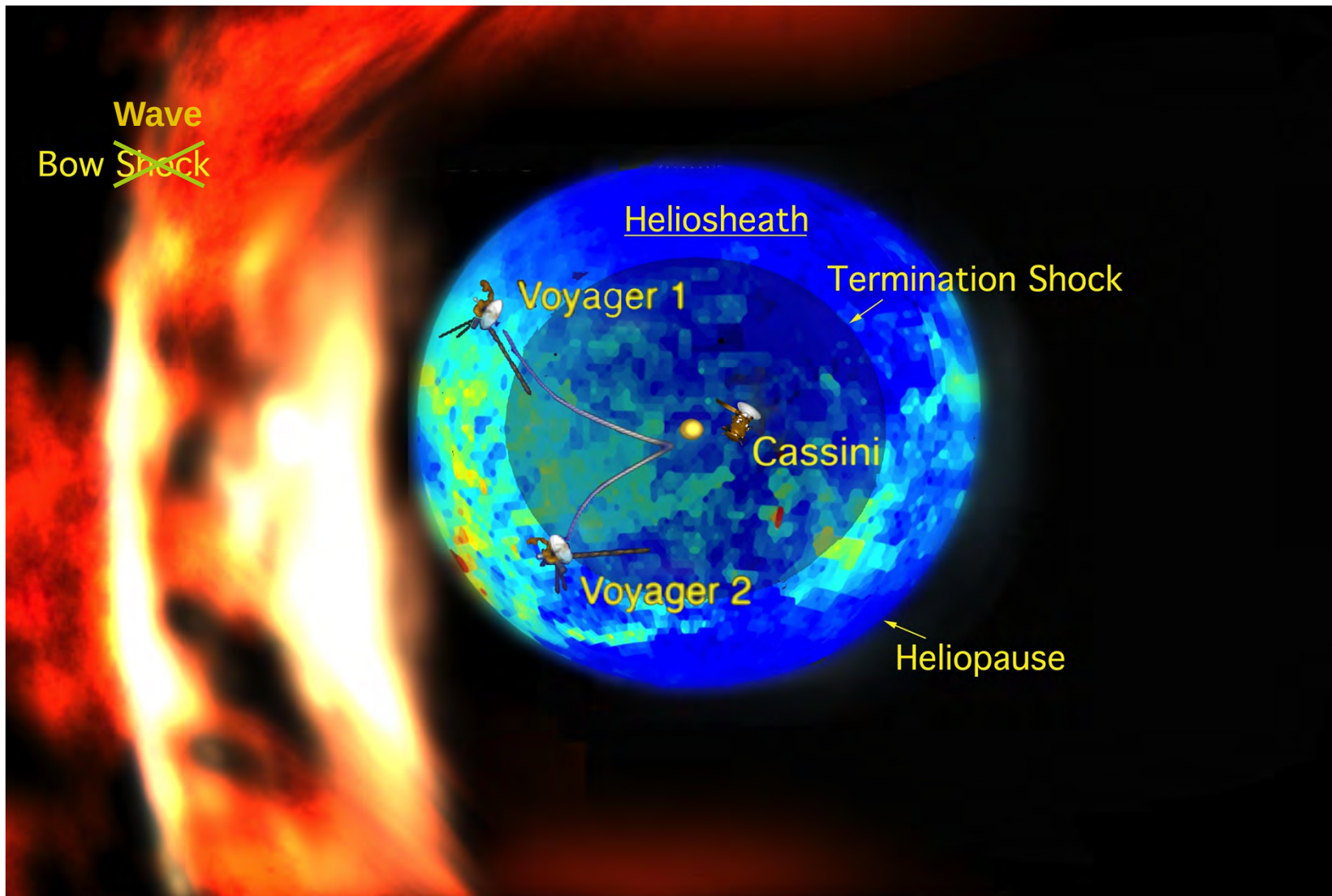
Nová měření - ENA

- 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 odkláněny 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 se zřejmě blíží k heliopauze (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

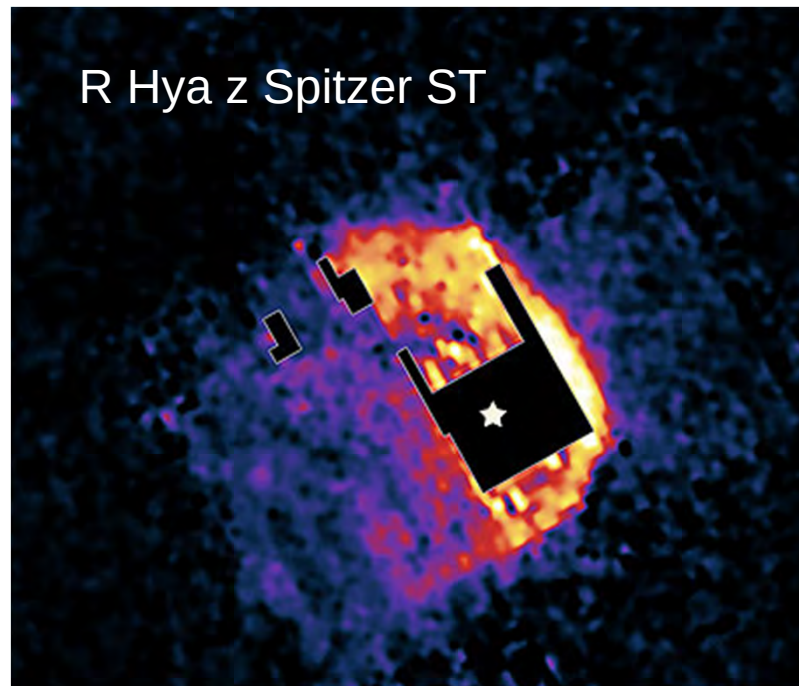


Čelní rázové vlny u jiných hvězd

LL Ori z HST



R Hya z Spitzer ST



Mira z GALEX



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



Děkuji za pozornost!