

SLUNEČNÍ FYZIKA

Slunce jako hvězda

Slunce v minulosti:

- starověk: Slunce = bůh (tj. Slunce se blíže nezkoumalo, protože to byl bůh a toho nebylo potřeba studovat)
 - různé země měly různé bohy: Ra/Re (Egypt), Apolón (Řecko), Khors (Ukrajina), Radegast (Čechy), Sunna (severské země)¹, Dadźbóg (Polsko), Surya Deva (Indie)
 - Inkové, Aztékové – celá mytologie zasvěcena Slunci
 - jiný přístup Číňané 2134 BC – úplné zatmění Slunce je drak požírající Slunce, měli ho zahnat bubny
 - 1111 BC – Číňané zřejmě viděli bílou erupci, 800 BC – čínská pozorování slunečních skvrn² (i v těchto záznamech je patrný 11letý sluneční cyklus)
- zkoumání Slunce až v Řecku – různé názory na fungování přírody:
 - Anaxagoras (500-428 BC) – hořící kovová koule větší než Peloponés (za to uvězněn)
 - Eratosténés (276-194 BC) – víceméně správně změřil vzdálenost Země-Slunce
 - Aristarchus (310-230 BC) – zakladatel heliocentrické soustavy (Slunce je mnohem větší než Země a bylo by divné, kdyby to větší těleso obíhalo okolo menšího)
- „moderní“ studium Slunce:
 - 1129 – kresba slunečních skvrn v Anglii Johnem z Worcesteru
 - 1185 – v Rusku spatřeny protuberance během úplného zatmění Slunce
 - 1600 – G. Bruno přišel s myšlenkou, že „hvězdy jsou různě vzdálená Slunce“ (upálen za to)
 - 1609/1610 – první **teleskopická** pozorování slunečních skvrn (Galileo, Scheiner, Fabricius – první publikoval objev slunečních skvrn (1611), ale je otázka, jestli byl opravdu první, kdo je objevil³)
 - 1715 – první kresba sluneční koróny
 - 1800 – W. Herschel objevil infračervené záření od Slunce
 - 1851 – Schwabe - objev 11letého cyklu (mění se počet slunečních skvrn)
 - 1859 – Carrington uviděl bílou erupce
 - 1860 – během úplného zatmění spatřena CME (pravděpodobně poprvé)
 - 1892 – Hale zkonstruoval **spektroheliograf**⁴ (do té doby se používal jen spektroskop)
 - 1908 – Hale zjistil, že skvrny jsou magnetické (je tam velmi silné magnetické pole) – viděl Zeemanovo rozštěpení spektrálních čar
 - 1951-58 – Biermann, Chapman, Parker – byla vytvořena teorie slunečního větru
 - dnes: sondy na výzkum Slunce

¹ „There is another discrepancy regarding Sunna. Some say Sunna is another name for the goddess Sol and that they are actually one and the same, while others claim that Sunna was the daughter of the goddess.“

(<https://mythology.net/norse/norse-gods/sol/> 24.2.2019)

² přes oblačnost, při západu nebo úsvitu

³ Christoph Scheiner je údajně pozoroval o 3 dny dříve než Johannes Fabricius, ale publikoval to až roku 1612

⁴ **spektroheliograf** = přístroj, s jehož pomocí lze vytvářet fotografie slunce na jediné vlnové délce světla tj. s použitím monochromatického záření. Vlnová délka je zvolena tak aby byla shodná s jednou z čar chemických prvků přítomných na Slunci.

X **spektrograf** je přístroj, který rozděluje světlo podle vlnové délky a zaznamenává tato data

Hledání energie pro Slunce:

= jak to, že Slunce svítí

- aby Slunce fungovalo, musí tam být rovnováha sil (aby se Slunce nezhroutilo vlastní gravitací) – uvnitř musí být zdroj dodávající energii/teplo (zářivý tlak):

- pokud by Slunce normálně hořelo, tak by v tom nejlepším případě vydrželo hořet cca 20 000 let (z geologie víme, že Země je mnohem starší než 20 000 let)
- 1854 Kelvin-Helmholtzova kontrakce⁵ – udržela by zářivost Slunce cca 20 milionů let (stále z geologických důvodů málo)
- 1890 Lockyer – akrece padajících komet by pokryly energetickou potřebu, ale zvyšovalo by to hmotnost Slunce a to by způsobovalo změny planetárních drah, které se nepozorují
- 1904 Rutherford – vnitřním zdrojem by mohl být rozpad radioaktivních prvků
- 1920 Eddington – není to rozpad, je to fúze (termonukleární reakce), stačí slučování vodíku na hélium – problém byl, že ve spektru moc vodíkových čar není (je tam převážně vápník a železo)
- 1925 Cecilia Payne – Slunce je opravdu převážně z vodíku (vycházela za Sahovy rce) – vodík ve spektru nevidíme, protože je povrch Slunce příliš chladný⁶ – statisticky jsou čáry vodíku nevýznamné
- 1930 Chandrasekhar, Bethe – detaily termojaderného slučování, první modely hvězd a Slunce
- 1957 Burbidge – těžší prvky vznikají ve hvězdách

Slunce jako hvězda:

- spektrální třída G2, hlavní posloupnost

- staré 4,5 mld. let (v „nejlepších letech“), ještě 6,4 mld. let na hlavní posloupnosti, pak se z něj stane rudý obr a za cca 8 mld. let bílý trpaslík

$$M_{\odot} = 1,98 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$R_{\odot} = 695 \text{ 980 km}$$

$$L_{\odot} = 3,85 \times 10^{26} \text{ W}^8$$

$$T_{\text{eff}} = 5780 \text{ K}$$

$$\langle \rho \rangle = 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{věk} = 4,5 \times 10^9 \text{ let}$$

$$v_{\text{esc}} = 6,17 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

$Z = 0,016$ (1,6%)⁹ - **metalicita** = kolik je tam prvků těžších než He

$$X = 0,71; Y = 0,27; Z = 0,02$$

$$g = 274 \text{ m/s}^2 \text{ - gravitační zrychlení na povrchu (28G)}^7$$

$$I = 1,7 \times 10^{41} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ - moment setrvačnosti}$$

$$1'' = 726 \text{ km ve vzdálenosti 1 AU}$$

Ztráta hmoty:

$$\text{zářením} \sim 4 \times 10^9 \text{ kg/s}$$

$$\text{větrem} \sim 10^9 \text{ kg/s}$$

$$\text{zatím} \sim 7,5 \times 10^{26} \text{ kg} \sim 0,04 \% M_{\odot}^{10}$$

$$\text{(tj. } 10^{-12} M_{\odot}/\text{yr, masivní hvězdy } 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr)}$$

⁵ = vznik tepelné energie v nitru způsobený gravitačním smršťováním (např. Jupiter, hnědí trpaslíci)

⁶ v optickém spektru nepozorujeme tolik vodíkových čar (např. Balmerovy série), kolik bychom měli, a tedy pokud bychom chtěli určit chemické složení ze síly spektrálních čar (sečetli bychom počet čar určitého prvku a porovnali ty prvky), vyjde, že je slunce železné (nejvíce je železných čar) - důvod je, že 6000 K je málo na excitaci vodíku (excitovaný je jen velmi málo), tj. není tam dost excitovaných atomů a čára se prakticky neformuje (ve fotosféře je teplota pod hladinou excitační energie); u Slunce pozorujeme hlavně kovy: Fe, Ca, Mg (mají nižší excitační potenciál a to stačí na excitaci elektronového obalu) u horkých hvězd typu O, B je to naopak - všechen vodík je ionizovaný, takže nevytvoří vázané-vázané přechody (excitaci), tedy čára se opět nevytvoří

optimální teplota by byla 10 000 K (hvězdy typu A - Balmerovy a Lymanovy čáry nejsilnější), to je dost energie na excitaci, ale málo na ionizaci

⁷ poznámky 27,4 m/s²

⁸ 3.83-3.86 (podle zdroje), Rezoluce B2 IAU (2015): $L_{\odot}^N = 3.828 \times 10^{26} \text{ W}$

⁹ novější (přesnější) hodnota je o něco nižší (1,2 – 1,3%)

¹⁰ počáteční hmotnost?

Vnitřní struktura a vývoj Slunce:

Vnitřní struktura:

- hustota velmi prudce klesá k okraji – díky tomu je 1/2 hmotnosti Slunce koncentrována v jádru (jádro zaujímá necelá 2% objemu), zatímco konvektivní vrstva zaujímá 2/3 objemu¹¹, ale obsahuje pouze 2 (2,6) % hmotnosti

- 3 důležité vrstvy: **jádro**, **zářivá zóna (vrstva v zářivé rovnováze)**, **konvektivní zóna**

→ jádro: do 25% R_{\odot} , zářivá zóna do 70% R_{\odot} , zbytek konvektivní zóna

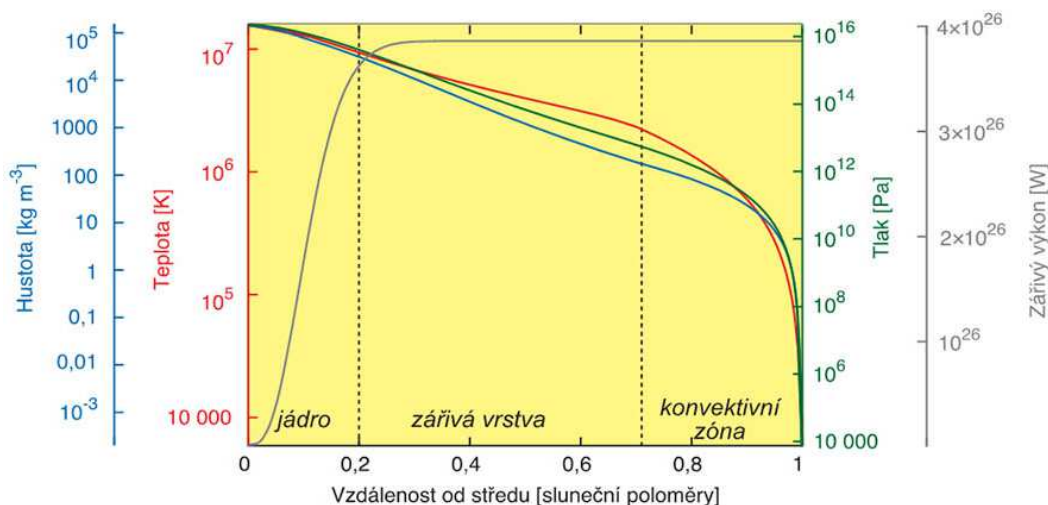
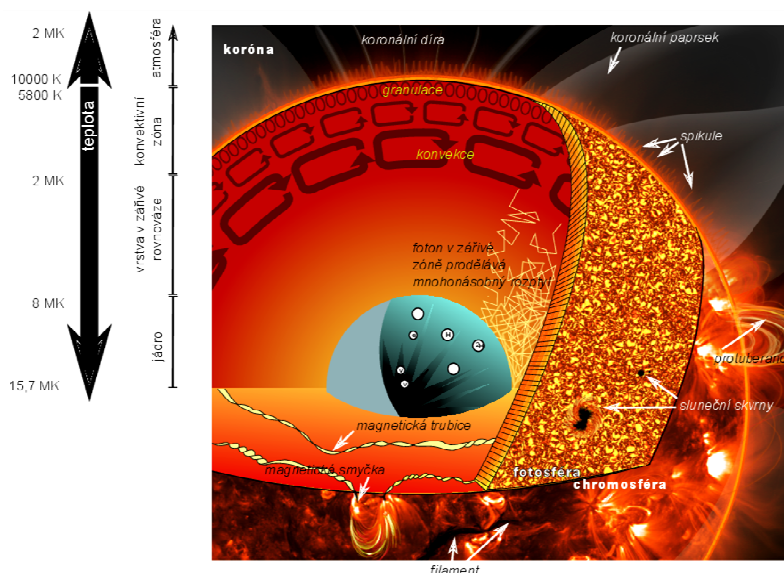
→ teplota klesá od centra k okraji – v centru 15,7 MK (*papír*), na okraji jádra 7,5MK, na rozhraní mezi zářivou a konvektivní vrstvou 2MK

→ vrstvy se od sebe liší procesy, které v nich probíhají

→ **jádro** = tam vzniká energie termojadernými procesy, dál už se energie jen šíří

→ **zářivá vrstva** = energie se šíří zářením (difúze = opakovaný rozptyl fotonů náhodnými směry) – velmi pomalé (170 000 let¹²)

→ **konvektivní vrstva** = energie se šíří s hmotou



¹¹ $R_J = 0,25R_{\odot} \Rightarrow V_J = \frac{4}{3}\pi(0,25)^3R^3 \doteq 0,016 V$ (1,6%); $V_K = V - V_{J+Z} = \frac{4}{3}\pi R^3 - \frac{4}{3}\pi(0,7)^3R^3 \doteq 0,657 V$ (66%)

¹² záleží na tom, jak dobře známe mikrofyziku a co zahrneme do výpočtu účinného průřezu

Rovnice vnitřní struktury:

- řešením rovnic vnitřní struktury (4 parciální diferenciální rovnice + další pomocné vztahy) získáme 1D strukturu libovolné hvězdy

→ nutné řešit numericky

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dr} &= 4\pi\rho r^2 && \text{rovnice kontinuity} \\ \frac{dP}{dr} &= \frac{-Gm\rho}{r^2} && \text{pohybová rovnice (rovnice hydrostatické rovnováhy)} \\ \frac{dL}{dr} &= 4\pi\rho r^2(\epsilon + \text{korekce}) && \text{rovnice přenosu energie} \\ \frac{dT}{dr} &= \frac{-GmT\rho}{r^2 P} \nabla \left\{ \begin{array}{l} \nabla_{\text{rad}} = \frac{3\kappa PL}{16\pi acGmT^4} \quad \text{záření} \\ \nabla_{\text{ad}} = \frac{\delta Gm}{c_p r^2} \quad \text{konvekce} \end{array} \right. && \text{rovnice teploty - má 2 řešení} \\ &&& \text{podle způsobu přenosu energie} \\ &&& \text{(vybere se to menší)} \\ P &= \frac{\mathfrak{R}\rho T}{\mu}, \quad \mu = \frac{1}{2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z} && \text{stavová rce (pro t.d. plyn)} \\ \epsilon &= \epsilon_0 X^2 \rho T^4 && \text{energetická výtěžnost p-p řetězce} \\ \kappa &= \kappa_0 (X+1) Z \rho T^{-3.5} && \text{Kramerova opacita} \\ \nabla &= d(\ln T)/d(\ln P) \end{aligned}$$

→ hmota hvězd na hlavní posloupnosti je velmi blízká ideálnímu plynu

→ energetická výtěžnost¹³ p-p řetězce závisí na čtvrté mocnině teploty¹⁴, část energie je taky produkována CNO cyklem, kde je závislost energie na teplotě T^{20} (u Slunce přispívá CNO mnohem menší měrou (1,7 %), hraje roli spíše u hmotnějších hvězd, kde se dosahuje vyšších teplot – s rostoucí teplotou jde energetická výtěžnost prudce nahoru)

→ Kramerova opacita¹⁵ – závisí na teplotě a metalicitě, jen aproximativní vztah (zanedbává například tvorbu spektrálních čar)

→ tyto rce popisují standardní sluneční model

Sluneční modely:

- nestandardní sluneční modely:

→ neutrinový problém = měřilo¹⁶ se třikrát méně neutrin, než se předpovídalo – návrhy na řešení:

- **Low Z model:** menší Z → menší opacita → menší teplotní gradient → větší jádro, avšak nižší centrální teplota → nižší produkce neutrin
měřená povrchová metalicita (Z ~ 0,02) je větší než centrální (Z ~ 0,001) – možné vysvětlení: povrchové vrstvy obsahují prach, který Slunce zachytilo při průchodu mezigalaktickým mračnem
!Vyloučeno spektrem slunečních oscilací – silně závisí na Z, nekonzistentní s pozorováním.
- **Rychle rotující jádro:** odstředivá síla podporuje gradient tlaku, stačí tedy menší zářivý tlak a je tudíž možná nižší teplota
!Na vysvětlení neutrin třeba jádro rotující 500x rychleji než povrch - muselo by takto vydržet dlouho (doba života Slunce) a nesmělo by se propagovat na povrch. Vyloučeno pozorovanou hodnotou zploštění (Slunce je téměř kulové).

¹³ energy production = energetická výtěžnost? (vyprodukovaná energie na jednotku hmoty, [ε]=J/kg)

¹⁴ v závislosti efektivity reakce na energii se objevuje tzv. **Gamovův pík** (papír)

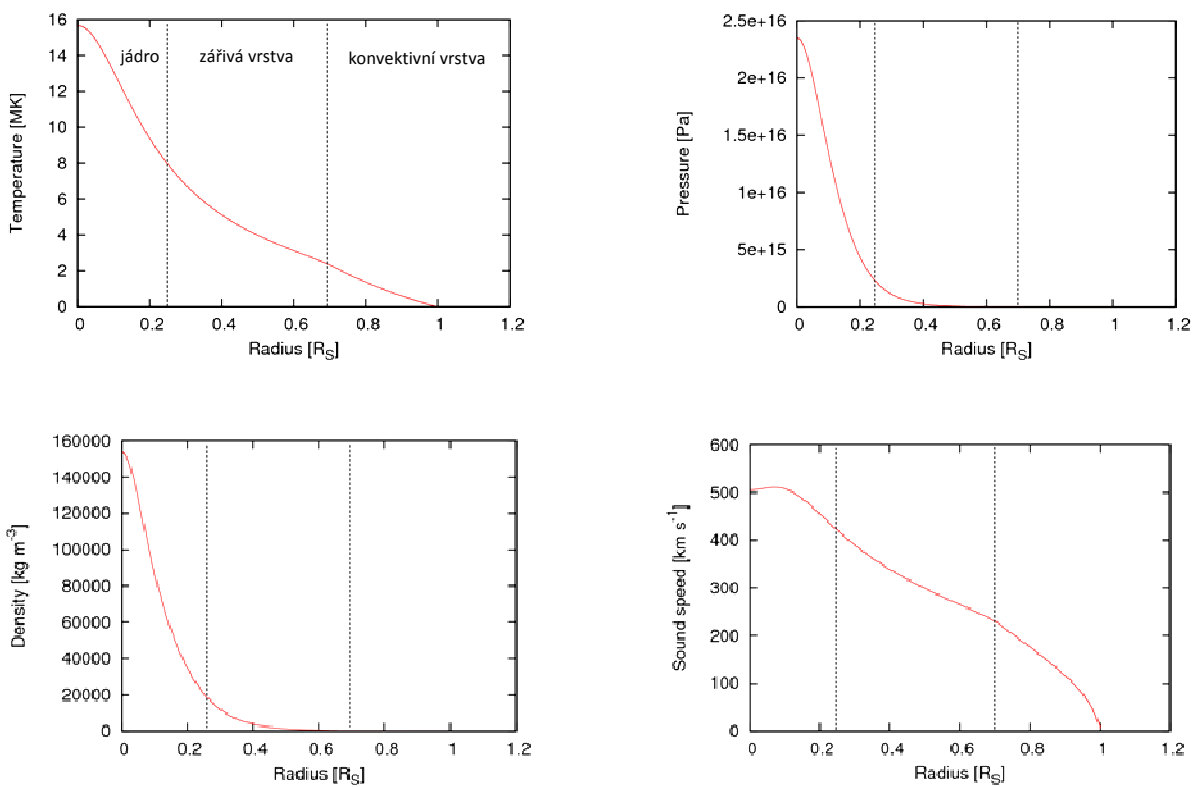
¹⁵ opacita vyjádřená pomocí hustoty a teploty za předpokladu, že v prostředí dominují vázaně-volná absorpce nebo volně-volná absorpce

¹⁶ nádrže s tetrachlorethylenem, při interakci chlóru s neutrinem vznikne argon, ten se detekuje

- Vnitřní magnetické pole: Tlak magnetického pole pracuje proti gravitaci, opět možná nižší teplota.
!Nutná intenzita mag. pole cca 109 G (tlak mag. pole by tvořil cca 10 % tlaku plynu a záření, tj. poměrně velký podíl). Ohmická disipace by zničila pole během několika miliard let, tj. tak silné pole by v podmínkách slunečního plazmatu nepřezilo dobu života Slunce.
- Vnitřní míchání¹⁷: Míchání¹⁸ snižuje střední molekulární hmotnost, stačí nižší teplota pro stejný zářivý tlak ($P \sim T/\mu$).
!Neshoda s měřením oscilací a navíc vyžaduje energii (těžké helium musí být transportováno vzhůru proti gravitační síle, to by bylo těžké vysvětlit).
- WIMPy gravitačně vázané v jádře: Částice temné hmoty jsou vázané v jádře, efektivní přenašeči energie na dlouhé vzdálenosti, interagují pouze slabě, tj. díky malému účinnému průřezu ochlazují jádro.
!Není v souladu se standardním modelem. (?)

→ nedetekujeme všechna vzniklá neutrina kvůli jejich oscilacím (během cesty od Slunce se mění v tauonové a mionové, detekujeme jen elektronová, tedy 1/3)

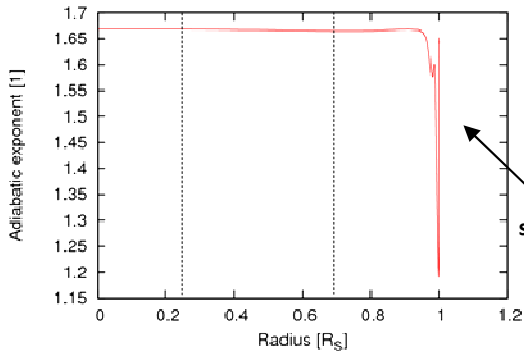
- **Model S** = referenční model Slunce používaný v helioseismologii, závislosti stavových veličin na poloměru



→ typická povrchová rychlost zvuku je 7 m/s
a roste až do 500 m/s, průměr $\langle c_s \rangle = 200$ m/s

¹⁷ diskutovalo se o tom i kvůli Li - na Slunci je mnohem méně Li než by mělo být, je myšlenka, že dochází k promíchávání (jiné než konvekce), které odvádí Li z vnějších vrstev k jádru, kde se spaluje

¹⁸ k míchání nedochází mezi jádrem a zářivou vrstvou (tam se šíří pouze fotony, ne těžší částice)

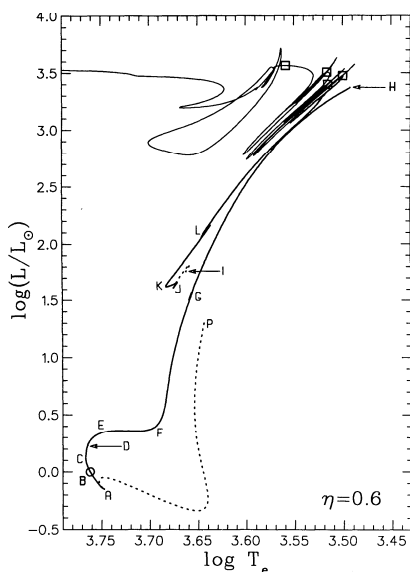


→ adiabatický proces: $\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{konst.}$, pro id. plyn $\gamma = \frac{5}{3} = 1,6\bar{6}$

superadiabatická oblast = proces už není adiabatický, ztrácí se energie zářením

Vývoj Slunce:

- během vývoje se Slunce pohybuje po HR diagramu



I. J. Sackmann (1993)

- P-A: před MS
- A-E: MS, B: současné Slunce
- E-F: SGB
- F-H: RGB
- H: heliový záblesk
- H-I: hoření helia
- I-J: před horizontální větví rudých obrů
- J-K: horizontální větev
- K-L: ??
- L: zapálení helia v obálkách (E-AGB)¹⁸
- Čtverečky – záblesky slupek He na AGB (TP-AGB)

- počítá se to jako sled statických modelů, mezi nimiž se (skokem) změní chemické složení (časový skok miliony let, v RGB a AGB¹⁹ fázích musí být krok menší, protože je vývoj rychlejší)

- zrození Slunce:

→ gravitačním kolapsem (samovolným nebo indukovaným) obřího oblaku plynu (převážně) a prachu s parametry odhadem: $M \sim 6 \times 10^5 M_\odot$, $R \sim 100 \text{ ly}$, $\rho \sim 100 \text{ atomů/cm}^{-3}$ ²⁰

→ kolaps hierarchický – kolabuje do fragmentů, fragment hmotnosti hvězdy = **globule**

→ počáteční kontrakce velmi rychlá, pokud obsahuje prach (~ 10 000 let) – pp. průběh v jakési rovnováze, tj. musí platit viriálový teorém²¹ = potenciální energie během kontrakce se přeměňuje na kinetickou energii (vnitřní energii), ale polovina potenciální energie musí pryč ze systému, jinak se to stane nestabilním – to zařizuje prach, který mračno ochlazuje, protože vyzařuje²² tepelně jako černé těleso, tj. spojitě (zatímco plyn září jen na konkrétních vlnových délkách, a tedy nemůže vyzařovat tolik energie)

¹⁹ AGB větev se dělí na dvě části: E-AGB (early AGB), kdy je hlavním zdrojem energie hoření He v obálkách, a TP-AGB (thermal pulses), kdy dochází k He zábleskům??

²⁰ perfektní technické vakuum na Zemi

²¹ potenciální energie se nemůže celá přeměnit na kinetickou (pouze jedna polovina potenciální energie vytvoří kinetickou) - právě polovina se musí vyzařit ($E_k = -\frac{U}{2}$)

²² prachová zrna získávají energii srážkami

- pak ustavení rovnováhy, další kolaps řídí prach (60-100 K), centrální teplota roste
- výsledná hustota 10^{-10} kg/m^3 , stonmiliardkrát větší než původní

- protohvězda:

- když centrální teplota překročí hranici 2000 K, začne docházet k rozpadu molekul vodíku, to spotřebovává energii (místo vyzařování) a při dosažení 3000 K ionizuje, tedy opět spotřebovává energii, což urychluje kolaps
- centrální hustota dosáhne 10^{-5} kg/m^3 , dočasná hydrostatická rovnováha
- nesymetrie (důsledek náhodných pohybů) způsobí, že protohvězda začne rotovat - akrece z disku (vytvoří se disk místo sféry)
- při překročení centrální teploty 1 MK začne docházet k prvním termojaderným reakcím - reakce deuteria (obvykle ho není moc, proto je tato fáze krátká, jen pár milionů let)

- hvězda typu T Tauri:

- dál dochází ke gravitačnímu kolapsu
- chladné (2000-4000 K) obří hvězdy ohříváné gravitační kontrakcí
- stále plně konvektivní, zatím nedochází k jaderné fúzi žádných prvků
- obklopené akrečním diskem, rychle rotují, mají silná magnetická pole (bylo tam od počátku kolapsu) – propojené s akrečním diskem, způsobují obří skvrny, supererupce!, silný hvězdný vítr
- naprosto nepravidelné proměnné - magnetická proměnnost, zákryty zhuštěninami v disku

- před hlavní posloupností:

- dva typy kontrakce: téměř izotermální (= při konstantní teplotě) kontrakce (10 Myr, velký pokles luminosity), posléze pomalejší přibližování hlavní posloupnosti (20 Myr, luminosity roste na dvojnásobek, efektivní teplota roste o 30 %)
- dále během 20 Myr lehký pokles luminosity až k minimu – ZAMS

- hlavní posloupnost:

- usednutí před 4,50 mld let, bude ještě 6,4 mld let
- díky termojaderným reakcím postupně roste střední molekulová hmotnost v jádru, tj. roste tlak záření, tj. roste centrální teplota, tj. roste zářivý výkon²³ (z 70 % na ZAMS na 221 % na TAMS²⁴)
- za 3 mld let dosáhne T maxima (5843 K, tedy +64 K)
- za 4,8 mld let dojde vodík ve středu jádra²⁵ (dnes spálena asi polovina)
- za 6,4 mld let jádro gravitačně kolabuje (dochází k elektronové degenraci), vodík hoří v tlusté slupce v okolí, Slunce opouští MS a stává se rudým obrem

- rudý obr:

- 700 mil let expanze při konstantní luminositě až na $2,3 R_0$ (SGB), teplota výrazně klesá (až na 4900 K), přechod k rudým obrům (u rudých obrů celkově 600 mil let)
- dále expanduje s rostoucí produkcí energie v jádře
- výrazné změny ve vnitřní struktuře: konvektivní zóna klesá k jádru (přenáší H směrem k vrstvám, kde hoří), od jádra postupuje slupka jaderného hoření – potkají se za 7,6 mld let (od teď)
- to setkání zrychlí expanzi až na $166 R_0$ při svítivosti $2300 L_0$ za 7,68 mld let

²³ a současně roste taky poloměr, aby to zůstávalo v rovnováze

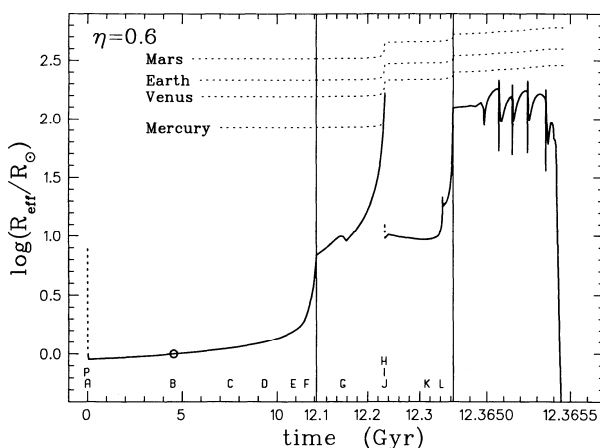
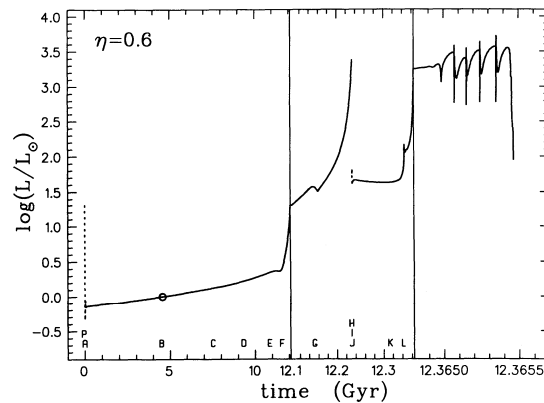
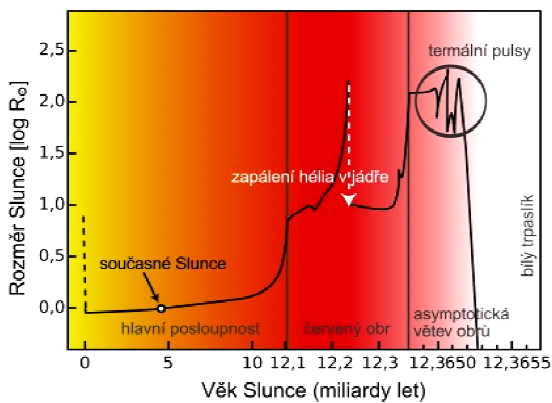
²⁴ TAMS = terminal age main sequence?

²⁵ jenom úplný střed jádra, ne celé jádro, ale už se tvoří heliové jádro

- když centrální teplota²⁶ dosáhne 10^8 K (teplota pro zažehnutí reakce přeměny He na C, O, atd.), vzplane celé jádro = **heliový záblesk** (lehce mimo střed, ten je "ochlazován" unikajícími neutriny) – v okamžiku záblesku produkce energie v jádře $10^{10} L_{\odot}$
- heliový záblesk sníží svítivost (vzniká rázová vlna, která přesune He do vnějších vrstev, kde je nižší teplota, tj. nižší produkce energie – závisí na teplotě), to způsobí i pokles tlaku záření a Slunce dočasně splaskne
- vnitřní struktura slupková – v centru dochází k přeměně He na C, O, nad tím vrstva s hořícím He, nad tím vrstva s neaktivním He, nad tím hořící H, nad tím neaktivní H
- 100 milionů let stabilní, pak uhlíko-kyslíkové jádro, jaderné reakce ve dvou slupkách
- zažehnutí neaktivního He v záblescích, způsobuje opětovnou expanzi vnějších vrstev = **termální puls**, které vytvoří planetární mlhovinu (odhadem 4-7 pulzů, 400 let rozpínání, když se zažehne He, pak 10 000 let gravitačního smršťování, když He vyhoří a poklesne tlak)
- rozepnutí až na $347 R_{\odot}$, dalších 400 000 let na asymptotické větvi obrů

- bílý trpaslík:

- termálními pulsy odhozena obálka = **planetární mlhovina**, zůstane pouze C, N, O jádro ($0,54 M_{\odot}$, $120\,000$ K, kompletně degenerovaný materiál, tj. velikost srovnatelná s velikostí Země) = **bílý trpaslík**
- malá velikost, tj. malý zářivý výkon, chladne desítky až stovky miliard let – skončí jako **černý trpaslík**



- Merkur bude pohlcen už během fáze rudého obra
- rudý obr má silný vítr a tudíž ztrácí velkou část hmotnosti – to posune dráhy zbylých planet dál (nebude v centru tak hmotné těleso)
- nicméně atmosféra Slunce bude zasahovat až k Zemi a to bude Zemi zpomalovat, takže nakonec bude také pohlcena Sluncem (za 7,5 mld. let)

- správnost modelů ověříme:

- pozorováním hvězd v jiných vývojových stádiích
- z helioseismologie
- nalezením hvězd podobných Slunci = **sluneční dvojčata**²⁷

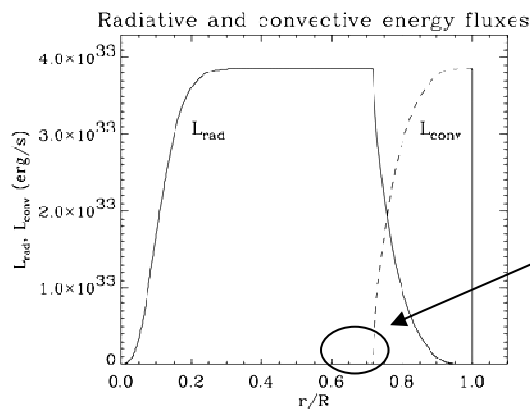
²⁶ heliové jádro je tvořeno elektronovým degenerovaným plynem, tj. nemá stejnou stavovou rci jako id. plyn, nedochází v něm k teplotní stratifikaci a tedy celé jádro má jednu teplotu

²⁷ 18 Scorpis – nejpodobnější Slunci

Konvekce:

Vznik konvekce na Slunci:

- konvekce je nejhůře popsáný proces na Slunci, fyzika není zcela zřejmá
- souvisí s turbulencemi, tj. chaotickým pohybem
- jde o 3D jev, který se vždy špatně modeluje - uvažuje se 1D aproximace = parametrický režim konvekce, tj. probíhá stejně ve všech směrech od centra
- dynamické projevy konvekce generují určité spektrum vln, které se studují v helioseismologii
- do 500 Mm od centra: přenos energie zářením (difúze fotonů volně-volnými rozptyly, plyn je zcela ionizován²⁸)
- na hranici 500 Mm od centra teplota klesá pod 2,5 MK \Rightarrow objevují se volně-vázané přechody (rekombinace, hlavně prvky kolem Fe) - způsobují nárůst opacity, tj. přenos energie zářením není tak efektivní, nástup konvekce
 - \rightarrow spodní hranice konvektivní vrstvy se vyznačuje nízkou viskozitou, velkou hustotou a teplotním gradientem
- většina konvektivní zóny je mírně stratifikována, stratifikace vzroste těsně pod povrchem díky prudkému poklesu teploty (souvisí se superadiabatickou vrstvou), vodíkové a héliové ionizační zóny²⁹ pod povrchem nastavují různé škály turbulentní konvekce

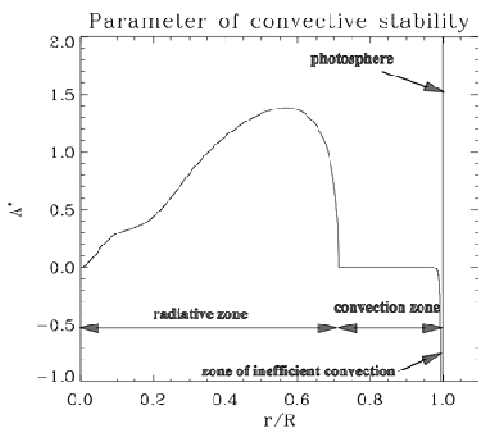


\rightarrow v závislosti na modelu bývá v těchto místech nárůst L_{rad} nad L_{\odot} a současně L_{conv} klesá do záporných hodnot \Rightarrow **convective overshooting (konvektivní přestřelování)** = klesající hmota má setrvačnost a proniká do hlubších vrstev

Mixing length theory (teorie směšovací délky): (papír)

- ne každý s tím souhlasí – problém s předpoklady (bublina, která stoupá v klidném prostředí – takhle to ale ve Slunci nevypadá)
- celý ten pohyb nahoru a dolů trvá \sim 1-2 měsíce

- Ledouxův parametr



\rightarrow kladné v oblasti zářivé rovnováhy (přenos energie zářením)

\rightarrow trochu záporné (ale malé) v konvektivní zóně (efektivní konvekce)

\rightarrow v superadiabatické oblasti jde L. p. prudce do záporných hodnot

\rightarrow fotosféra je konvektivně stabilní, je tam overshooting, ale přenos hlavně zářením

²⁸ včetně prvků jako je například Fe – to má v neutrálním stavu 23 elektronů, nyní plně ionizované, tj. nemá žádný elektron

²⁹ oblast, kde začíná ionizace (úzké rozmezí teplot; při růstu teploty začne v určitý okamžik docházet k ionizaci)

- **superadiabatická oblast:** (*papír*)

- z 3D modelování vychází, že v různých místech vypadá výrazně jinak (i do malých hloubek) – to je nevýhoda mixing-length theory (není správná, reprezentuje realitu pouze ve statistickém smyslu, tj. odpovídá nějakým středním hodnotám)
- hluboká konvekce téměř adiabatická, povrchové vrstvy dominovány zářivými ztrátami, přechodová vrstva (superadiabatická oblast) je turbulentní, kde přenosu energie dominuje superadiabatický gradient

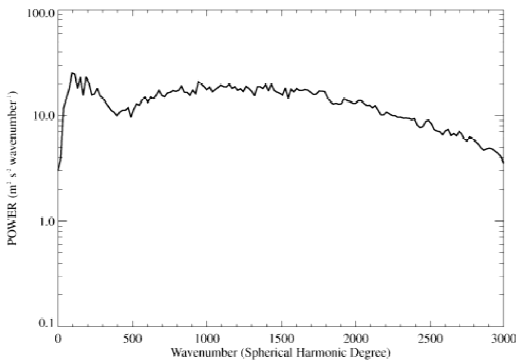
- podpovrchové vrstvy:



Konvektivní škály: (*papír*)

- konvekce není vždy stejná v radiálním směru (může docházet i k pohybům do stran) – s tím souvisí **konvektivní škály**
- fotosférické konvektivní spektrum = jak moc konvektivního toku je přenášeno v závislosti na R (resp. $R \sim \frac{1}{l}$, kde l je úhlový stupeň) – je spojitě, ale má dva píky:

- $l \sim 1000$, tj. $R \sim 1$ Mm ... granule
- $l \sim 120$, tj. $R \sim 30$ Mm ... supergranule (pouze z pozorování, v simulacích se neukáže, modely jsou neúplné)



(l má souvislost s vlnovou délkou, bere se to trochu jako vlna, spíš charakteristická škála)

- **granulace:**

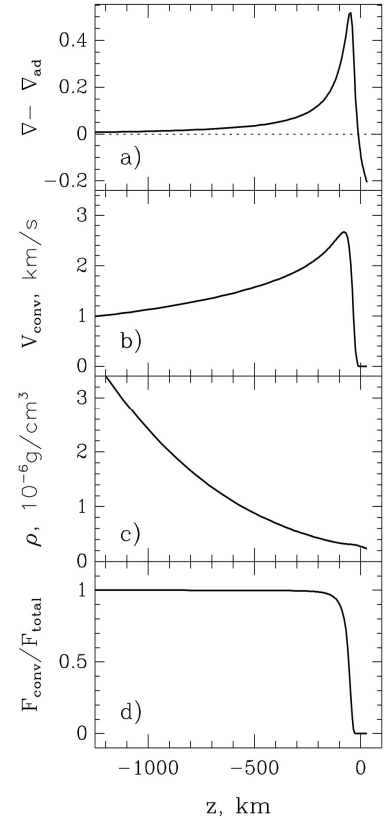
- typická velikost 1 Mm, doba života 3-17 minut, mělké, velké rychlosti (až km/s, blízké rychlosti zvuku)
- teplejší uprostřed, chladnější k okrajům
- existují i tzv. „Explodující granule“
- objevitel W. Herschel (1801 – horké mraky nad chladným povrchem), Nasmyth (1865 na správné cestě k interpretaci)

- **mesogranule:**

- není jasné, zda vůbec existují, není důvod, proč by měli existovat
- typická velikost ~ 6 Mm, doba života ~ 1 hodina
- měly by být formovány explodujícími granulemi

- **supergranulace:**

- typická velikost 30 Mm, doba života ~ 24 hodin
- horizontální rychlostní pole (300 m/s vs. vertikální pouze 20 m/s)



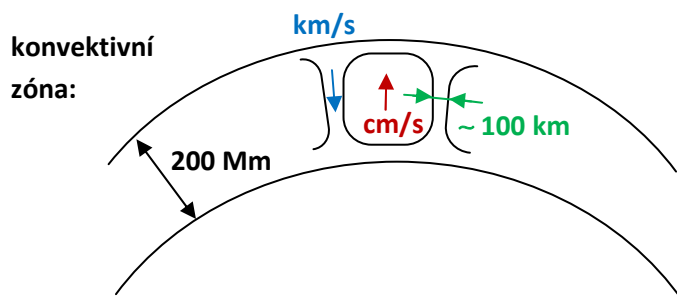
- nechovají se jako pěkné konvektivní buňky, protože nepozorujeme teplotní gradient od centra k okraji (je v rámci chyby měření)
- koncentrují magnetické pole na svých hranicích
- hloubková struktura a původ jsou nejasné – 4 možnosti původu:
 - Konvekce ($\text{He}^{2+} \rightarrow \text{He}^+$ cca 10 Mm hloubka, uvolněné teplo způsobuje nestabilitu)
 - Magnetokonvekce (magnetické pole reguluje podpovrchovou konvekci, tedy nastavuje prostorovou škálu)
 - Termální vítr (samoorganizující se slabé elementy tvoří síť (“tlakové níže”), ustanovuje se rovnováha)
 - Hydrodynamicky řízený jev (sestupné proudy granúl se v hloubce spojují, nastavují supergranulární sestupné proudy a tudíž nový mód proudění)
- nemohou být čistě konvektivním jevem, protože v numerických simulacích konvekce žádné supergranulace nejsou
- pohybují se rychleji než plazma, jímž jsou tvořeny - je to vlna?

- obří buňky:

- kontroverzní, zatím s jistotou nebyly detekovány (nemohou, protože mají příliš pomalé horizontální pohyby ~ 10 m/s)
- měli by mít velikost ~ 100 Mm a dobu života ~ 7 dní
- objevují se v numerických simulacích (problém je, že nemodelují i povrchové vrstvy – nejde udělat globální simulace se současnými počítači, buď jen globální simulace bez vrchní části konvektivní vrstvy, nebo jenom vrchní část konvektivní vrstvy a ne hloubky)

Alternativní modely konvekce:

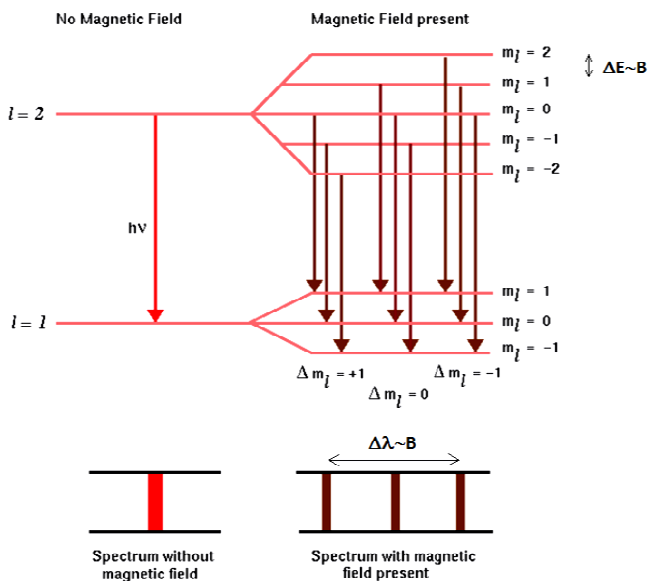
- například Spruit (2003) – globální konvekce je podobná granulaci, ochlazování na povrchu je driverem
 - pomalý (cm/s) rozsáhlý upflow, rychlý velmi koncentrovaný downflow (km/s - rychlost volného pádu, rozměr stovky kilometrů)
 - zatím nejde detekovat, protože je oblast toku dolů moc malá (jen 100 km) a tok nahoru je moc pomalý (cm/s)
 - lepší než mixing-length theory - v MLT prakticky to, co jde nahoru, jde i dolů (nahoru $10^6 L_{\odot}$, dolů $10^6 \cdot 1 L_{\odot}$), zatímco zde jde nahoru $1 L_{\odot}$ a dolů něco velmi malého
- asi před 50 lety se věřilo, že konvekce je řízena odspodu (dole se ohřejí bubliny, které stoupají), nyní se ukazuje, že je spíš řízena ochlazováním na povrchu (mixing-length theory funguje dobře, protože velká část konvektivní vrstvy není stratifikovaná, pouze povrchové vrstvy, tj. velká část odpovídá laminárnímu režimu)



Sluneční magnetismus:

Magnetická pole na Slunci:

- pozoruje se:
 - ve fotosféře - skvrny, knoty, fakule, póry, jasné body
 - v chromosféře - vláknitá struktura (fibrily), flokule³⁰ (plage), spikule, protuberance
 - v koróně - protuberance, paprsková struktura
- obecně mají 3D strukturu
- vývoj v čase na různých časových škálách
 - vznik, vývoj a rozpad skvrn, vývoj poloh skvrn během cyklu (motýlí diagram)
 - dynamika malorozměrových magnetických polí – jasné body se vyvíjí s granulací
 - erupce, vývoj protuberancí,...
- pozorovací metody – vycházejí z interakce ionizovaného plynu se zářením v přítomnosti mag. pole:
 - **Zeemanův jev** = některé elektronové hladiny jsou degenerované (bez působení mag. pole mají stejnou energii), v silném mag. poli se rozštěpí, tj. mají rozdílnou energii; produkuje polarizované záření (podle typu polarizace lze určit směr mag. pole)
 - **Hanleho jev** – v slabých mag. polích, částečně polarizované světlo z povrchu narazí na plyn v mag. poli, ten sníží míru polarizace světla (tato změna je úměrná intenzitě mag. pole); pozoruje se nejčastěji na Lyman-alfa čáře (UV)
 - **(Spektro)polarimetrie** = měří se profily spektrálních čar v různých polarizacích, lze odvodit celý vektor mag. pole (ne jen podélnou složku jako u Zeemanova jevu)



Magnetické útvary:

- **skvrny** = velké tlusté trubice se silným polem (<6000 Gaussů), rozměr tisíce až desítky tisíc km, průměrně žijí několik dnů, ale mohou vydržet až měsíce
- **póry** = slabší trubice, skvrny bez penumbry, slabší mag. pole (~ 1500 G), rozměr pouze pár set km, typicky žijí jen pár hodin až dnů

³⁰ malé jasné útvary ve sluneční chromosféře, vznikají v aktivních oblastech Slunce, nad fakulemi.

- magnetické knoty

- rozměrově malé (prakticky nejsou vidět)
- neviditelné v bílém světle, ale viditelné ve spektru díky Zeemanově rozštěpení, v IR
- vyskytují se v okolí skvrn - zpět se ponořující trubice ze svazku tvořící skvrnu (velikost toku je srovnatelná s tokem skvrny), možná druhý pól monopólních skvrn

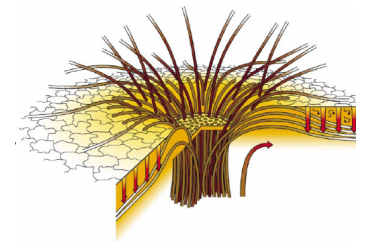
- malé magnetické elementy

- objevují se v mezigranulárních prostorech, malé (stovky km), pohybují se rychle (0,5 – 5 km/s)
- na rozdíl od knotů mají i horizontální komponentu
- pozorovatelné v G pásu - jsou v něm vidět molekuly CH (elementy jsou viditelné díky rozpadu CH molekul – mag. pole způsobuje vyšší teplotu (ale nesmí být příliš silné³¹) → rozpad CH molekul → menší koncentrace CH znamená nižší absorpce světla těmito molekulami (tedy snižuje se opacita) ⇒ oblasti jsou jasnější
- vyskytují se v oblastech s koncentrovaným magnetickým polem, možná souvisí s **povrchovým dynamem** = granule jsou tvořeny nabitými částicemi a jsou v pohybu, můžou lokálně indukovat mag. pole

- **fakule** = jasnější oblast obvykle okolo skvrn (opět v oblastech s koncentrovaným magnetickým polem), důsledek deprese mag. pole – díváme se na horké stěny prohlubně

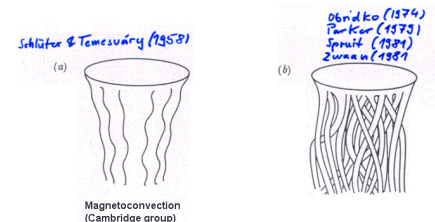
Sluneční skvrny:

- je temná, protože je chladná (4500 K) a je chladná kvůli silnému magnetickému poli, které zabraňuje toku tepla zespodu (dáno orientací pole, Lorentzovy síly)
- otázka je, jak skvrna vzniká a jak vypadají skvrny pod fotosférou; nad fotosférou představa magnetických siločar vystupujících z povrchu (pokud se pole skloní o více než cca 45 stupňů, formuje penumbrou)



- historicky 2 třídy modelů:

- **jednotná trubice (magnetokonvekce)** = všechny jemnější struktury jsou důsledkem degenerované konvekce
- **svazkový model (spagheti)**, tvořená svazkem mag. trubic, jemné struktury jsou výsledkem turbulentní konvekce mezi trubicemi
- mezi nimi nelze rozhodnout na základě fotosférických pozorování (zatím podle numerických simulací preferovanější jedna trubice - důsledek řešení MHD rovnic v konvektivním prostředí)



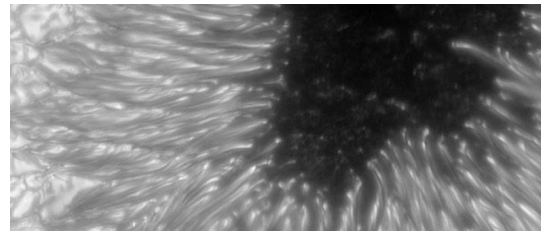
- struktura:

- **umbra** = nejtmavší a nejchladnější je střed, mezi temnými jádry jsou často světelné mosty, až o 1000 km níž než okolní fotosféra = **Wilsonova deprese**, silné mag. pole (až 6000 G) je skoro vertikální
- okolo umbry je **penumbra** – vláknitá (tvořená fibrily), mag. pole slabší (~ 1500 G) a skloněné k fotosféře (na vnějším okraji až o 80°)
- hranice mezi umbrou a penumbrou je dána intenzitou vertikální složky mag. pole – pokud je nad zhruba 1700 G, pak máme umbru, pokud je to méně, máme penumbrou
- **moat** = okolí skvrny viditelné pouze díky dynamickým jevům (např. pohyb granule), je to tok od penumbry ven (500 m/s), není formován vždy (obvykle jen když je skvrna stabilní a penumbra existuje)
- **Evershedův jev** = systematický tok v penumbře radiálně ze skvrny (4 km/s)
- moat a Evershedův jev spolu zřejmě nesouvisí – mají odlišné vlastnosti (např. liší se rychlostí)

³¹ pokud je mag. pole silné, díváme se vlastně na skvrnu, na chladná místa – ta jsou celkově méně jasná

- jemná struktura:

- **umbrální body** = většinou nerozlišené (vidíme je, ale nevíme, jestli je to skutečná velikost, protože se pohybujeme na hranici rozlišení), formují se na hranicích fragmentů, zřejmě degenerované granule (zbytková konvekce)
- **světelné mosty** = slabší pole tj. více probíhá konvekce, skloněnější než v umbře (jeskyně), často granulární struktura (případně vláknitá)
- **penumbrální filamenty** = v podstatě stále neznámá tloušťka, některé tmavé (více skloněné), některé světlé
- **penumbrální zrna** = výrazné na koncích jasných vláken na hranici penumbry s umbrou, pohybují se podél penumbrálních filamentů, radiální pohyby (dovnitř do umbry, kde se mohou stát umbrálními body i vně do klidné fotosféry)



- formace skvrn: (*papír*)

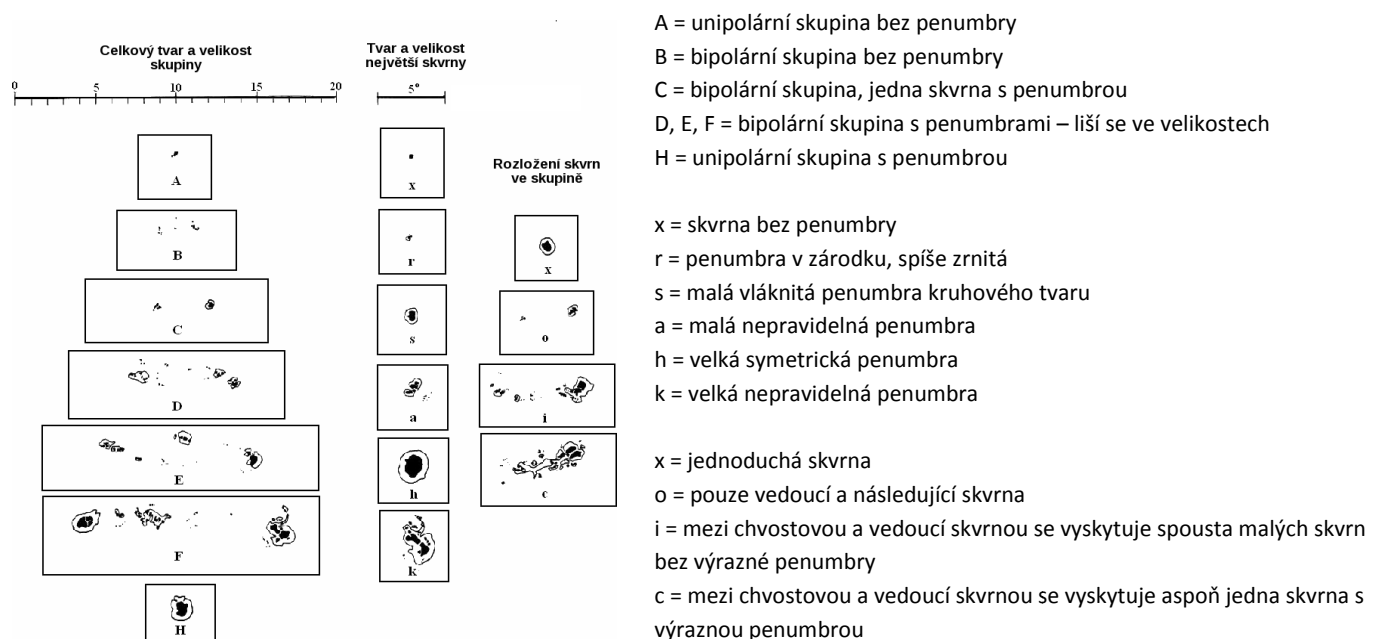
- nejdříve se ve fotosféře objevují fragmenty v podobě pórů, pak jsou k sobě tlačeny supergranulemi
- fragmenty si nejspíš udržují identitu v průběhu života skvrny a k rozpadu dochází opět po stejných fragmentech
- vynořování mag. smyček (Ω loop) (*papír*)
- **dynamická diskonexe** od kořenů = magnetické pole se narušuje u kořenů (v konvektivní vrstvě) turbulentním prouděním okolo mag. smyčky, až se nakonec „přetrhne“ (podobně jako u erupce), spodní část se opět narovná a osamocený magnetický ostrov je „roztrhán“ turbulencemi; zatím nebylo přímo pozorováno, pouze v numerických simulacích, ale pozorujeme dynamické jevy, které to potvrzují
- komplikované pole formuje komplikovanou skupinu skvrn (obecně se předpokládá, že rozměrnější a komplikovanější skvrny jsou starší a jsou více spojeny s dalšími projevy aktivity - erupce)

- objevují se nejčastěji v párech orientovaných ve směru východ – západ, skvrna blíž k západnímu okraji Slunce je **vedoucí**, východní je **následná (chvostová)**

- pozorováním bylo zjištěno, že vedoucí skvrny na dané polokouli mají vždy stejnou polaritu a následné polaritu opačnou, přičemž páry na jižní polokouli mají orientaci opačnou

- **McIntoshova klasifikace skvrn:**

- pouze morfologická (podle vzhledu)



- Mount Wilson klasifikace slunečních skvrn:

→ podle mag. pole

α = unipolární skupina

β = skupina mající obě polaritu, jež jsou oddělené

γ = skupina, kde jsou obě polaritu rozděleny tak nepravidelně, že znemožňují klasifikaci jako β

β - γ = bipolární skupina, kde k oddělení polarit nestačí jedna nepřerušovaná linie

δ = dvě umbry v jedné penumbře vzdálené méně než 2° mají opačné polaritu

β - δ = skupina klasifikovaná jako β obsahující jednu nebo více δ skvrn

β - γ - δ = skupina klasifikovaná jako β - γ obsahující jednu nebo více δ skvrn

γ - δ = skupina klasifikovaná jako γ obsahující jednu nebo více δ skvrn

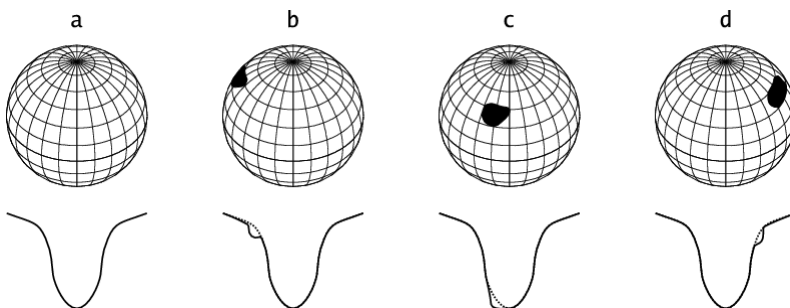
- polarimetrická pozorování slunečních skvrn – polarizace světla se popisuje pomocí Stokesova vektoru

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{intenzita} \\ \text{lineární polarizace } 0^\circ/90^\circ \\ \text{lineární polarizace } 45^\circ/135^\circ \\ \text{kruhová polarizace levá/pravá} \end{pmatrix}$$

Hvězdné skvrny:

- na to, abychom mohli přímo pozorovat sluneční skvrny na jiných hvězdách, bychom museli být schopni rozlišit disk a na to jsou příliš daleko

→ nepřímě se pozorují **dopplerovskou tomografií** = skvrna na povrchu způsobí změnu profilu spektrální čáry (pokles na čáře) – pokud známe rotační profil hvězdy (vliv rotace na profil spektrálních čar), pak podle polohy poklesu můžeme určit polohu skvrny; s rotací hvězdy se pohybuje i pokles na spektrální čáře; takto lze zrekonstruovat fotosféru hvězdy (ale jen s malým rozlišením)



- prozatím mapy s nízkým rozlišením³² (nevíme, jestli se jedná o jednu velkou skvrnu nebo o vícero menších)

- rozvoj do budoucna – automatické přístroje a automatické redukční rutiny

- studium povrchových pohybů je důležité pro popis procesu dynamika

- pozorování hvězdných skvrn pomůže pochopení těch slunečních

Sluneční cyklus:

- hlavní cyklus:

→ 11 let

→ objev Heinrich Schwabe (1834) – pozoroval skvrny, nejdřív spočítal počet dnů v roce, kdy na Slunci nepozoroval žádné skvrny, pak počet skvrn každý rok

→ na začátku 19. století Hale měřil magnetické pole skvrn (dokázal změřit polaritu skvrny) – správná perioda 22 let, složený ze dvou 11-letých, mezi kterým dojde ke změně polaritu (k přepólování dochází v maximu)

³² AE Phe – těsná dvojhvězda, vyšší koncentrace skvrn blíže k místu dotyku

- 11 let je jen průměrná hodnota (11,2 je střední délka trvání), reálně 7,5 – 16 let
- viditelný na různých jevech (mění se počet a mohutnost aktivních jevů) - počet slunečních skvrn, jejich plocha, mohutnost erupcí, počet protuberancí, celkové záření³³, ...
- vykresluje se závislost Wolfova čísla na čase

$$R = k(10g + f)$$

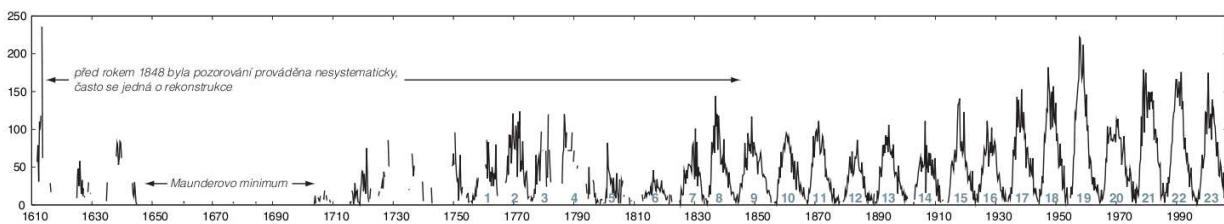
R = Wolfovo číslo (relative sunspot number)

- Rudolf Wolf
- statisticky odvodil, že v každé skupině je průměrně 10 skvrn
- hodnoty Wolfova čísla máme od r. 1848 každý den díky pozorovatelům po celém světě

k = normalizační faktor
 → různým pozorovatelům bylo přiřazeno jiné číslo, aby se to dalo vzájemně srovnat
 → kvalita dalekohledu, kvalita pozorování
 → $k < 1$ lepší pozorování, $k > 1$ horší pozorování

g = celkový počet skupin

f = celkový počet skvrn

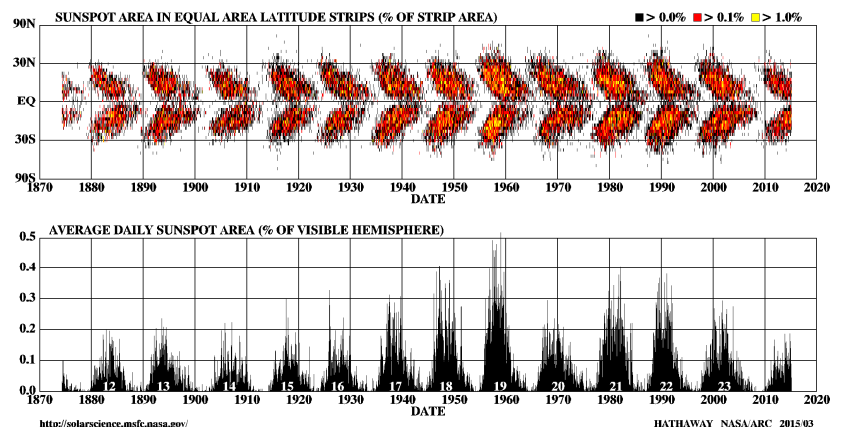


- existují období, kdy cyklus prakticky vymizí = **velká minima** - např. Maunderovo minimum (1638-1715), způsobují malé doby ledové
- od 1755 jsou cykly číslovány (počítá se od minima k následujícímu minimu), v současnosti je cyklus 24 (měl by končit 2019/2020, už byly pozorovány skvrny cyklu 25³⁴)

- **Joyův zákon** = pokud spojíme vedoucí a následující skvrnu (kladnou a zápornou polaritu), pak tato osa je nakloněná k rovníku (skloněná vůči rovnoběžkám)
 → čím blíže jsou k rovníku, tím je sklon menší

- lokalizované aktivní jevy migrují od cca 40° k rovníku během cyklu (tvoří se stále blíže k rovníku) = **motýlí diagram**, **Spörerův zákon**

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



³³ total solar irradiance, změna menší než 1%
³⁴ asi to poznají podle polarity skvrn

- polarita vedoucích skupin skvrn a globálního magnetického pole se cyklus od cyklu mění a navíc je tam antisymetrie mezi severní a jižní hemisférou = **Haleův zákon**

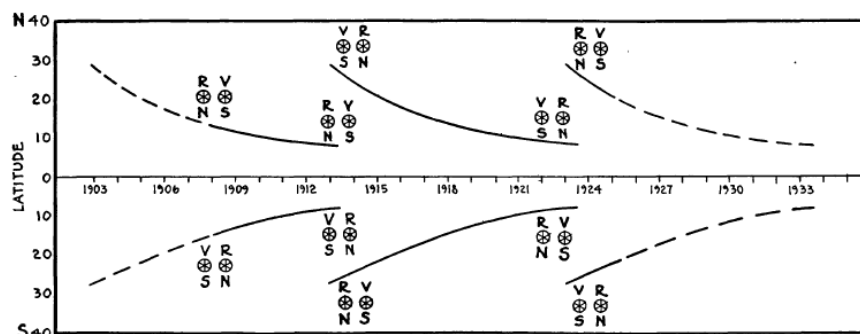


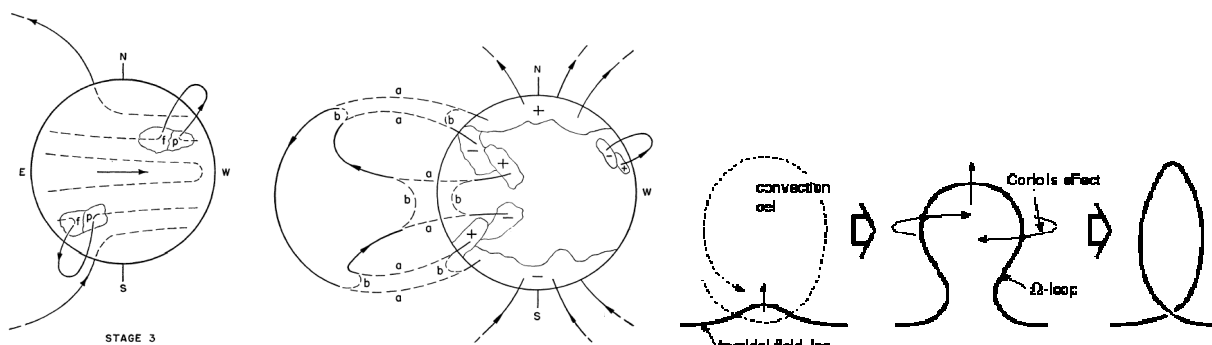
FIG. 18.—The law of sun-spot polarity. The curves represent the approximate variation in mean latitude and the corresponding magnetic polarities of spot groups observed at Mount Wilson from June 1908 to January 1925. The preceding spot is shown on the right.

Sluneční dynamo:

- magnetické pole se mění periodicky nejspíš jako důsledek jakéhosi typu dynamo
- cílem je předpovídat pomocí modelu dynamo sluneční aktivitu

- Babcockovo dynamo:

- na počátku máme dipólové pole (minimum aktivity) – pole sahá pouze do konvektivní vrstvy, ne hlouběji
- mag. pole je „zamrzlé“ do plazmy, Slunce má diferenciální rotaci ⇒ siločáry se zakřívují, zamotávají a pole zesiluje (určitou oblastí prochází více mag. siločar) = **Ω efekt**
- takto vzniká pole, které je téměř toroidální³⁵
- mag. siločáry jsou nestabilní, vystupují nad povrch (ve smyčce, tvoří aktivní oblasti na povrchu)
- pole v aktivních oblastech interaguje s globálním polem a přepojuje se v koróně: pokud vznikne dvojice skvrn (vedoucí a chvostová), tak vedoucí skvrna z jedné hemisféry se spojí s vedoucí skvrnou z druhé – takto značná část pole anihiluje, chvostová část je unášena meridionálním tokem k pólům, které mají opačnou polaritu – tento tok je větší, než jak silné je původní pole, tj. vyruší a následně nahradí původní pole polem s opačnou polaritou (formuje se globálně opačná polarita, která je převážně poloidální) = **α efekt**
- díky meridionálnímu toku dochází k toku magnetických elementů (které mají už převrácenou polaritu vůči globální) k pólům = flux-transport dynamo³⁶ (v tomto modelu dynamo bereme magnetické elementy jako mag. monopóly)



- klasický přístup říká, že oba tyto efekty mají původ na dně konvektivní vrstvy

³⁵ pole nejsou čistě toroidální, ale mají svoji poloidální složku, která je opačná proti původnímu globálnímu poloidálnímu poli – takto dostaneme sklon siločar směrem k rovníku (Joyův zákon), souhlasí i „pravidla“ pro polaritu

³⁶ k toku směrem k pólům dochází buď pomocí meridionálního toku nebo difúzí

- existuje rozšíření – tzv. **Babcockovo-Leightonovo**:

→ přesněji matematicky popsané Babcockovo dynamo

→ α -efekt probíhá v povrchových vrstvách (na rozdíl od klasického B. dynamu, kdy oba efekty probíhají v konvektivní vrstvě), tj. oba efekty jsou prostorově odděleny

→ produkuje:

- délku cyklu 22 let (viz dále)
- fázový posun mezi začátkem cyklu a přepólováním (z pozorování víme, že k přepólování nedochází v minimu, ale v maximu, tj. uprostřed cyklu³⁷), tj. fázový posun mezi k rovníku migrujícím toroidálním polem a k pólu migrujícím poloidálním polem
- potřebuje silné toroidální pole (10-100 kG) na dně konvektivní zóny (nutné pro formaci skvrn ve správných šířkách) – předpokládá se, že pole zesiluje Ω -efektem z ~ 10 G (poloidální pole) na ~ 10 kG (toroidální pole)
- slabá antikorelace mezi amplitudou a délkou cyklu (čím je delší cyklus, tím má menší amplitudu)
- asymetrie mezi polokoulemi jako interakce dipólu a kvadrupólu

→ neprodukuje:

- není samovybuzené, čili po velkých minimech by se už nenastartovalo (možná existence dalších efektů), vyžaduje primordijní (počáteční) pole, které jen přerozděluje a zesiluje v cyklu

- moderní dynamo (moderní modely):

→ numericky odvozené (fitují se historická data)

→ kinematické dynamo

→ operuje s přenosem hmoty meridionálním tokem nebo difúzí

→ předpovědi nejsou důležité pro fyziku, ale pro aplikace (NASA, elektronika, rozvody, kosmické počasí)

- další dynamo: mean-field dynamo (*papír*), vlnové dynamo (Parker-Yoshimura dynamo)

→ žádné není 100% přesné – velký problém pro modelování je, že některé „zdrojové členy“ nezapočítáváme – např. skvrny se nechovají vždy podle výše zmiňovaných pravidel (např. mají špatnou polaritu vzhledem k polaritám na své polokouli – nějaká fluktuace způsobila přesah za rovník, nebo jde rovník mezi vedoucí a následující skvrnou)

- proč 11 let:

→ někteří si myslí, že to souvisí s oběžnou dobou Jupitera – gravitační slapové působení (ale je to divné, protože ty slapy tvoří vlny maximálně milimetrové)

→ tři různé procesy: zesílení pole (Ω -efekt, char. škála 5-8 let), jeho vynoření (1 rok), rozptyl pole difúzí a transport meridionálním proudem k pólům (3 roky) $\Rightarrow (5-8) + 1 + 3 = (9-12)$ let; tj. délka cyklu je dána vlastní diferenciální rotací Slunce (ovlivňuje Ω -efekt), povrchovou gravitací Slunce (ovlivňuje vynořování), povrchovou difuzivitou a velikostí povrchu (ovlivňuje transport)

³⁷ v druhé polovině cyklu je už původní pole zcela vyrušené

Sluneční erupce:

Sluneční erupce:

- náhlé (max. desítky minut) uvolnění velkého množství energie ($\sim 10^{25}$ J)
- 1859 R. Carrington pozoroval bílou erupci - během zakreslování slunečních skvrn si povšiml významného zjasnění, které trvalo cca 5 minut, den poté zasáhla Zemi geomagnetická bouře
- pozorují se v optickém oboru na H_{α} čáře (dvojlávkové³⁸ chromosférické erupce), v UV, RTG a rádiovém oboru
 - světelná křivka vykazuje typicky prudký nárůst a pak exponenciální pokles (typická doba útlumu je pár minut)

Klasifikace erupcí:

- energetická (objektivní):

- podle toku energie v úzkém pásu RTG oboru³⁹
- rozlišují se kategorie: A, B, C, M (medium), X (extreme, vyskytují se vzácně) podle maximální hodnoty celkového toku energie
- používá se ke každému písmenu i jemnější dělení 0-9⁴⁰ (kromě třídy X, kde to může až do 20, pak už jsou přístroje satureovány a vyšší hodnoty se pouze odhadují)

- podle plochy (subjektivní)

- měřeno v H_{α} , počítají se jasné pixely
- kategorie: S (plocha $< (2^{\circ})^2$), 1, 2, 3, 4 ($> (25^{\circ})^2$)

- podle intenzity (subjektivní):

- rozhoduje pozorovatel
- kategorie: F (faint), N (normal), B (bright)

- obecně rozlišujeme:

- normální erupce ($E \sim 10^{23}$ - 10^{26} J, $T \sim 8$ - 40 MK, $n \sim 2$ - 20×10^{16} m⁻³)
- mikro-erupce ($E \sim 10^{20}$ - 10^{23} J, $T \sim 1$ - 8 MK, $n \sim 2$ - 20×10^{15} m⁻³)
- nano-erupce ($E \sim 10^{17}$ - 10^{20} J, $T \sim 1$ - 2 MK, $n \sim 2$ - 20×10^{14} m⁻³)
- piko-erupce (ještě menší)
- supererupce – ještě větší než ty největší pozorované erupce, pravděpodobně se na Slunci vůbec nevyskytují, ale pozorujeme je u jiných hvězd

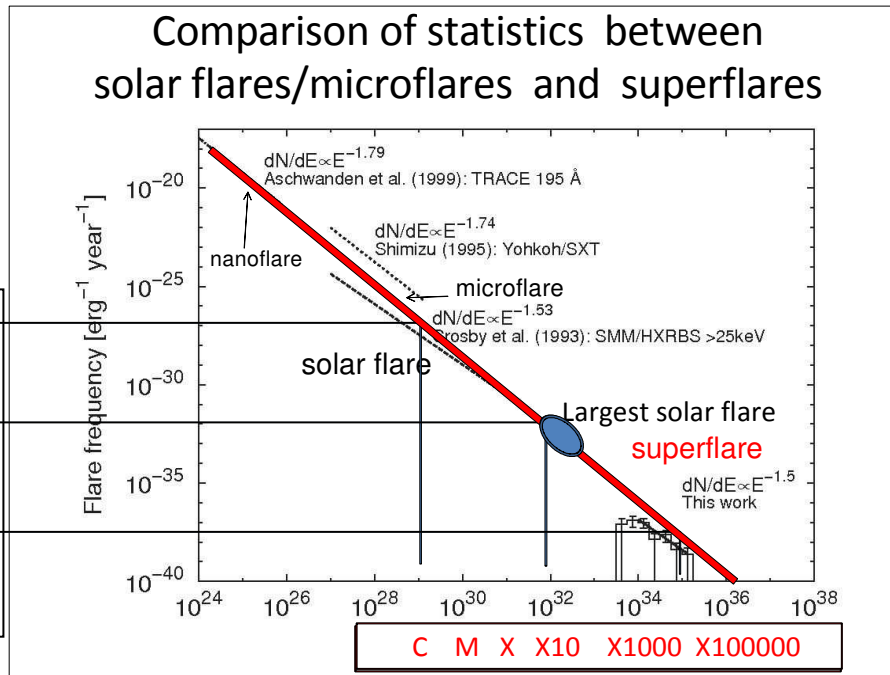
³⁸ pozoruje se paralelní zjasnění, každé vlákno má jinou polaritu, mezi vlákny je proudová vrstva; při erupci se od sebe vlákna vzdalují

³⁹ GOES satelity – pozorují Slunce od r. 1974 v pásu 0,1-0,8 nm, měření každou minutu

⁴⁰ např. A erupce má maximální tok do 10^{-7} W/m², A2 erupce má $2 \cdot 10^{-8}$ W/m²

Comparison of statistics between solar flares/microflares and superflares

- 1000 in 1 year
- 100 in 1 year
- 10 in 1 year
- 1 in 1 year
- 1 in 10 years
- 1 in 100 years
- 1 in 1000 years
- 1 in 10000 years

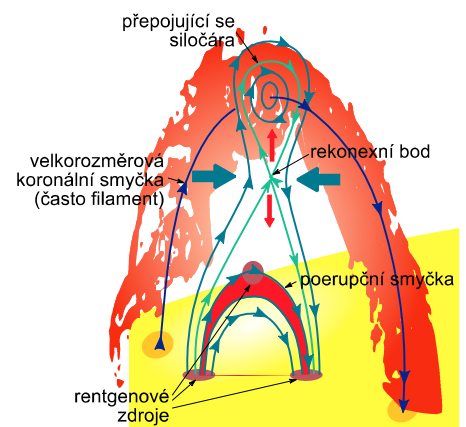


Vznik erupce:

- energie získaná disipací mag. polí (*papír*)
- důsledek rekonexe magnetického pole
 - změna topologie magnetického pole, volná energie uvolněna ve formě energie a částic
 - typická škála, na které dochází k rekonexi, odpovídá rozměru sluneční skvrny (~ 10 Mm), ale aby k rekonexi došlo (aby vznikla anomální rezistivita), musí být mag. siločáry stlačeny na vzdálenost ~ 1 m⁴¹

- standardní model sluneční erupce:⁴²

- = antiparalelní konfigurace mag. pole, siločáry jsou stlačeny velmi blízko k sobě a pak dojde k rekonexi (přepojení) magnetických siločar
 - máme arkádu magnetických smyček, které spojují dvě opačné polarity, mezi nimi dochází k pohybu a mag. siločáry se natahují a přepojují – vznikají magnetické provazce, resp. filanty (viz obrázek u filamentu) náhodné pohyby fotosféry způsobené konvekcí zamotávají ty provazce (jako gumičky nebo vlasy) – tím se tam uskladní hodně energie (vzniká tam velké napětí)
 - když je provazec aktivován (např. napětí mag. pole táhne provazec nahoru, nestabilita), tak provazec vytlačuje celý útvar vzhůru, tím vzniká uvnitř podtlak (resp. přetlak zvenku) a to stlačuje mag. siločáry - v tomto místě vzniká tzv. **X-point**, mag. pole se přepojuje (vzniknou dvě oddělené oblasti – nová arkáda⁴³ a „ostrov“ siločar)
 - v X-bodě dochází k výraznému zahřívání (desítky mil. stupňů) – silný zdroj RTG záření (pozorujeme RTG záblesky)
 - erupce (rekonexe) začíná v koróně, částicové svazky se šíří dolů (proudy částic nahoru a dolů) - ty, co jdou dolů, se zanořují ve dvou vlákních hlouběji do atmosféry, ta se zahušťuje a dochází k excitacím v důsledku srážek – takto vzniká záření (RTG, UV)⁴⁴



⁴¹ to je problém pro modelování, protože potřebujeme velmi jemnou síť na velkou oblast – řeší se to tak, že se vždy zjemní jen ta část, kde je to potřeba

⁴² CSHKP (Carmichael, Sturrock, Hirayama, Kopp, Penman) model

⁴³ má „cusp-ovitý“ (špičatý) tvar (jako lomený oblouk)

⁴⁴ podél smyčky měkké RTG, ve špičce, chromosféře a hlouběji tvrdé RTG

(pro chromosféru hlavně v $H\alpha^{45}$, pokud dojdou částice až k fotosféře, pozorujeme záření ve viditelné oblasti = **bílá erupce⁴⁶**)

→ další částí je „magnetický ostrov“, který se odpojí⁴⁷ – pokud obsahuje plazma, pak se toto plazma (**CME**, plazmový oblak) odtrhne a šíří se do meziplanetárního prostoru (toto má vliv na tzv. kosmické počasí)

→ problémy standardního modelu:

- model je 2D, erupce je 3D (to řeší model klouzavé rekonexe⁴⁸)
- není jasné, jestli jsou bílé erupce vysvětlovány správně
- počet (tok) netermálních elektronů potřebných v erupci k vysvětlení všech pozorovaných jevů $\sim 10^{34}$ až 10^{36} s^{-1} , tj. pro dobu trvání 100 až 1000 sekund nutné počty až 10^{39} elektronů - to je skoro počet všech elektronů v koróně
- transport elektronů z koróny do chromosféry znesnadňován zpětným proudem (důsledek kvazineutality plazmatu – separují se náboje a to vede k indukci el. pole, které působí odpudivě), excitací elektrostatických vln a řadou nestabilit, tj. proud elektronů dolů by neměl být možný

→ modifikace modelu:

- dodatečná akcelerace při proudu elektronů dolů stochastickými (náhodnými) poli
- dodatečná akcelerace ve smyčkách s helikálním polem (podél smyčky)
- dodatečná akcelerace interakcí s plazmovými vlnami

→ alternativa: zahřívání není způsobeno kolizemi (nosičem nejsou elektrony), ale torzními Alfvénovými vlnami, které se indukují při rekonexi, interagují spolu a způsobují rázy

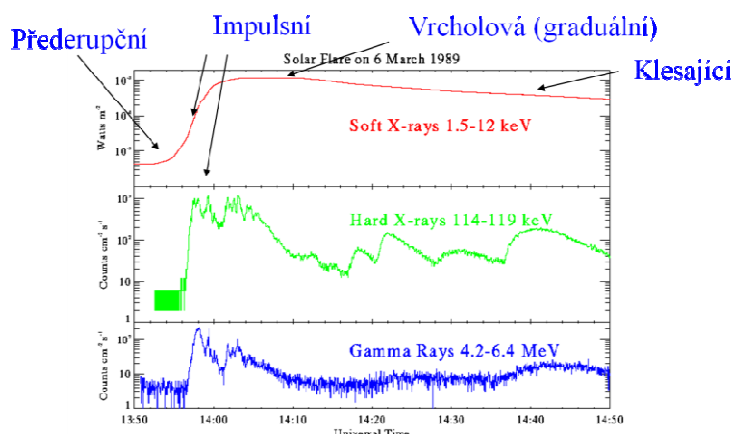
Fáze erupce:

- **přederupční** = krátká zjasnění v UV a měkkém RTG aktivací magnetického provazce

- **impulsní** = vertikální pohyb provazce(, proudová vrstva,) způsobuje ostrůvkovou nestabilitu (souvisí s anomální rezistivitou), v ostrůvkách probíhá fraktálně rekonexe, formuje se arkáda poerupčních smyček, chromosféra se vypařuje a stoupá - formují se chromosférická vlákna

- **vrcholová (graduální)** = smyčky postupně odříznuty od rekonexe, vzdalování svazků, vnitřní smyčky začínají chladnout (chladné pod horkými), objevují se v chromosféře (chladné poerupční smyčky)

- **klesající** = postupné chladnutí, při teplotě kolem 100 kK křivka zářivých ztrát tenkých čar dosahuje maxima, katastrofické chlazení, odtok plazmatu z arkády poerupčních smyček (dříve vypařené plazma se ochlazuje a klesá zpátky)



⁴⁵ zpočátku plazma příliš horké, takže by v $H\alpha$ nebylo vidět, ale rychle se ochlazuje

⁴⁶ jsou další modely: např. že k zahřívání dochází v chromosféře, tam vzniká záření, které zahřívá fotosféru (tj. nejsou ty urychlené částice, ale záření); jiný model říká, že i to viditelné světlo pochází z chromosféry

⁴⁷ nemusí se odpojit vždy - někdy mag. pole okolní arkády je dost silné, že k vyvržení materiálu nedojde (= confined flare)
X jinak hovoříme o eruption (česky by se spíše mělo říkat flare = vzplanutí)

⁴⁸ odpadne X-bod, k rekonexi dochází podél linie = separatrix

Neupertův efekt:

= integrál křivky vyzářeného tvrdého RTG v čase dá křivku měkkého RTG v čase (takže derivací měkkého dostaneme tvrdé)

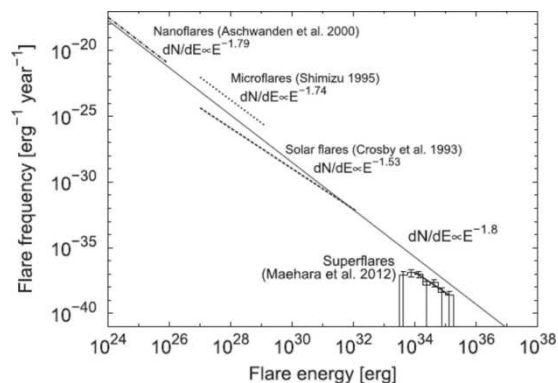
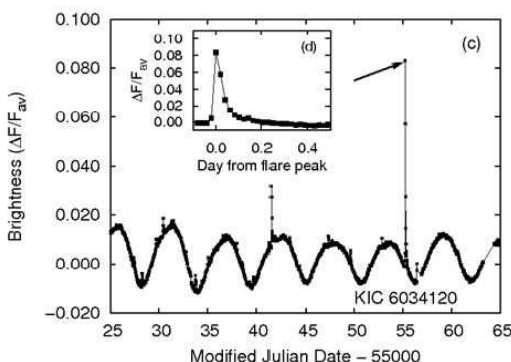
- tvrdé RTG vzniká při kolizích, tj. chová se jako narážející částice, zahřívají atmosféru, která pak vyzařuje v měkkém RTG (tvrdé RTG přijde hned, ale s částí se něco stane v atmosféře a dorazí později jen jako měkké RTG)
- nefunguje při velkém ochlazení
- může se např. použít pro odhad, pokud nám pozorování v jednom oboru chybí (např. v tvrdém RTG)

Supererupce jiných hvězd:

- erupce jsou pozorované i u jiných hvězd (u hvězd chladných spektrálních typů erupce relativně běžné, i mnohem silnější než běžné sluneční)
- př. hvězdy typu T Tauri (= mladé hvězdy slunečního typu, PMS⁴⁹, plně konvektivní hvězdy obklopené akrečním diskem) – mají silné magnetické pole, siločáry se propojují s akrečním diskem, energetické výrony 10^{28-29} J
- př. RS CVn⁵⁰ (=blízké dvojhvězdy) - jejich magnetosféry se překrývají, tj. interagují spolu a takto vznikají erupce o energii až 10^{31} J
- statisticky byly erupce nejvíce pozorované u mladých hvězd nebo dvojhvězd, později (1999) objeveny i hvězdy slunečního typu (chladné, pomalu rotující) a stáří, které nejsou ve dvojhvězdném systému a přesto u nich pozorujeme silné erupce (10^{27-31} J) – vysvětlení přítomnosti neviditelného společníka, který není hvězda ale planeta (Horké Jupitery⁵¹)
- nejasná souvislost se spektrálním typem nebo rychlostí její rotace nebo hloubkou konvektivní zóny

Supererupce slunečních hvězd:

- družice Kepler po 3 roky pozoroval asi 90 000 G hvězd (což je statisticky zhruba ekvivalentní tomu, jako pozorovat jednu takovou hvězdu po dobu 300 000 let, tj. velké množství dat) - u 279 zachyceno 1 547 supererupcí
→ amplitudy 0,1-10 %, trvání 0,1 dne, 10^{26-29} J
- slabá souvislost s rotační rychlostí (čím rychlejší rotace tím více supererupcí), avšak energie na rotační periodě nezávisí
- statistika ukazuje polynomiální závislost počtu erupcí na jejich energii, tj. čím je energie erupcí menší, tím četnější jsou (podobná statistice slunečních erupcí – pravděpodobně způsobeny stejným mechanismem)
- supererupce se poznají na světelné křivce náhlým zjasněním a pak téměř exponenciálním poklesem:



⁴⁹ pre-main-sequence star = hvězda před hlavní posloupností

⁵⁰ RS Canum Venaticorum

⁵¹ Horké Jupitery jsou zvláštní třídou exoplanet, jejichž hmotnost je podobná nebo vyšší než je hmotnost Jupiteru ($1,9 \times 10^{27}$ kg) a mají i podobně rozlehlou magnetosféru. Na rozdíl od našeho Jupiteru, který Slunce obíhá ve vzdálenosti 5 AU, však horké Jupitery obíhají svou mateřskou hvězdu ve vzdálenosti přibližně 0,05 AU, což je pouhá 1/8 vzdálenosti mezi Merkurem a Sluncem.

Atmosféra Slunce:

Atmosféra Slunce:

- je velmi provázaná, tj. nemá dobrý smysl studovat vrstvu po vrstvě, je to potřeba vzít celé (hlavně kvůli působení mag. polí)

- s fotosférou se takto často zachází, avšak jeden z modelů supergranulace předpokládá, že tato konvektivní škála je kvůli selforganizaci mag. pole ve vyšší atmosféře
- musíme započítat vrchní část konvektivní zóny, všechny vrstvy atmosféry včetně mag. polí, všechny jevy (např. spikule)
- náročné na výpočetní techniku – krátké časové kroky (kvůli rázovým vlnám), velké boxy s velkým rozlišením (velká oblast kvůli různým škálám konvekce s malými magnetické elementy)

- standardní model atmosféry (VAL-C):

- C značí variantu pro tiché Slunce
- semiempirický model
- uděláme sken teploty podle hloubky a podle úhlu pro více vlnových délek a pak to nafilujeme – tím získáme teplotní profil

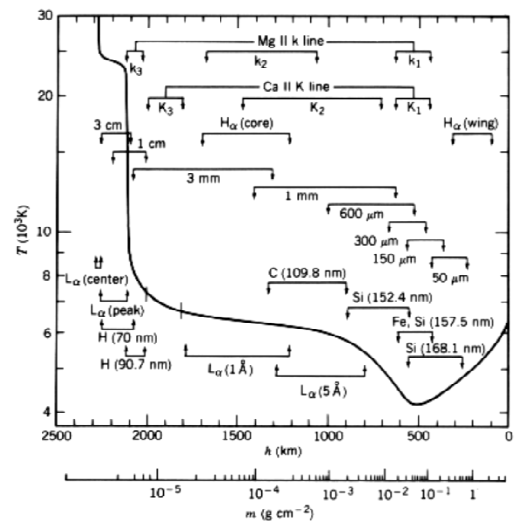
- pod fotosférou nevidíme v žádné vlnové délce, pouze nepřímé informace

- ve fotosféře vidíme granulaci, sluneční skvrny, fakulová pole,...

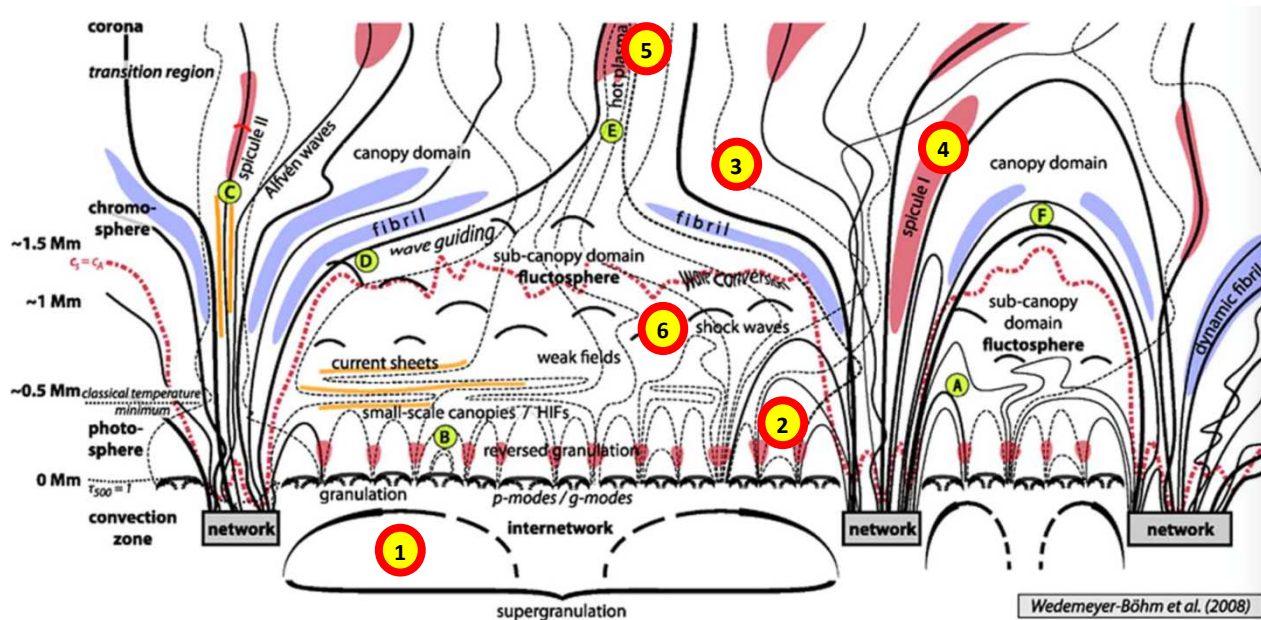
- nad fotosférou vidíme, různá výška odpovídá pozorováním na různých vlnových délkách, podle toho, kde se ty čáry formují⁵² =

formační hloubka (např. střed čáry H_{α} se formuje vysoko

v chromosféře, okolí čáry se formuje poměrně hluboko), vliv má i magnetické pole - struktury mag. pole jsou zdrojem zvýšeného vyzařování



⁵² závisí na ionizační a excitační rovnováze – chemické složení všech vrstev atmosféry zhruba stejné (převažuje vodík, dost He a nějaké kovy), ale podle teploty a hustoty se tam formují různé ionty a excitované stavy atomů



- 1 • Konvektivní pohyby (granulace nejdůležitější)
 - $\beta > 1$ (tlak plynu dominuje nad tlakem mag. pole)
 - Velkorozměrová redistribuce magnetických polí (velká pole – supergranulace, malá pole – granulace), horizontální pole uvnitř granúl
- 2 • **Reverzní granulace:** adiabatická expanze nad centry granúl, adiabatická komprese nad mezigranulárními prostory, mezigranulární prostory jasnější (větší hustota i teplota) než granulární (reverzní = střed tmavší než okraj)
- 3 • **Canopy⁵³ domain:** tvořena velkorozměrovými magnetickými poli, “Pravá chromosféra”, pozorujeme zde MHD vlny (excitované níže) a fibrily (chladné plazma v rozpínajícím se magnetickém poli, možná důsledek rázových vln z interakce unikajících oscilací a konvekce z fotosféry), je tam ekvipartiční vrstva ($c_s = c_A^{54}$) – dochází zde ke konverzi vln (HD na MHD?)
- 4 • Spikule: **Typ I:** výsledek rázových vln poruchami ve fotosféře (např. zvukovými vlnami) – propagace podél pole z fotosféry do horní vrstev; **Typ II:** tenčí, dynamičtější, proměnnější, rychlejší, pravděpodobně důsledky rekonexních procesů, mají souvislost s Alfvénovými vlnami (při rekonexi můžou vznikat právě i Alfvénovy vlny)
- 5 • **Koronální mech:** výtrysky horkého plazmatu, ne nutně nad nejsilnějším polem ve fotosféře, obvykle ve spojení s aktivní oblastí
- 6 • **Subcanopy domain:** slabé magnetické pole, $\beta > 1$, na vrcholech smyček se tvoří rázové vlny, granulace dominantní jev odpovědný za strukturu (intragranule – silná horizontální pole, formují vrchlíky), dynamická, reverzní granulace, přechod z konvekce dominované vrstvy do vrstvy dominované vlnami
 - **Fluktosféra (= klapotisféra):** dominovaná rázovými vlnami, refrakce a konverze vln na ekvipartiční vrstvě (rázové vlny konvertují na MHD vlny?)
- C • Proudová vrstva: rekonexe
- D • Rázové vlny následují siločáry
- E • Rázové vlny stlačují a ohřívají plazma v oblasti zužujícího se magnetického pole
- F • Rázové vlny tlačí na vrchlíky a stlačují magnetické pole

⁵³ canopy = klenba

⁵⁴ rychlost Alfvénových vln

Fotosféra:

- nejnižší, někdy označována za povrch (přechodová vrstva mezi opticky tenkou atmosférou a opticky tlustým slunečním tělesem)

- zdrojem většiny záření přicházejícího ze Slunce (98%)

- velmi tenká (300 km⁵⁵, na této výšce je změna hustoty právě o řád, tedy dochází i ke změně opacity a vrstva se stává postupně průhlednou)

- teplotní minimum (4200 K)

- dá se uvažovat, že je v LTE⁵⁶ (je tam rovnováha mezi zářením a částicemi), tj. září tepelně (spojité spektrum)

- ve fotosféře můžeme pozorovat tzv. **limb darkening**⁵⁷ (**okrajové ztemnění**) = okraj je temnější než střed - díváme se do menší hloubky, tj. do míst s nižší teplotou (*papír*) – pozorujeme v kontinuu⁵⁸

Solar Photosphere as a Function of Depth

Depth (km)	% Light from this Depth	Temperature (K)	Pressure (bars)
0	99.5	4465	6.8×10^{-3}
100	97	4780	1.7×10^{-2}
200	89	5180	3.9×10^{-2}
250	80	5455	5.8×10^{-2}
300	64	5840	8.3×10^{-2}
350	37	6420	1.2×10^{-1}
375	18	6910	1.4×10^{-1}
400	4	7610	1.6×10^{-1}

Chromosféra:

- vytvořena díky mag. polí⁵⁹

- teplota⁶⁰ nejprve klesá k teplotnímu minimu, a pak roste se vzdáleností od Slunce díky procesům v magnetickém poli (typická teplota 10 000 K, do cca 25 000 K)

- zhruba 2500 km tlustá⁶¹

- LTE už neplatí (a stejně i v koróně), tj. září jen na konkrétních vlnových délkách

→ dobře viditelná v H_α čáře (obecně v čarách Balmerovy série vodíku⁶²), trochu přispívá také H_β (zelená) a H_γ (modrá až fialová) – dohromady dávají růžovou, proto při zatmění je chromosféra růžová

→ v chromosféře se také formují emisní⁶³ čáry Ca II, mapují koncentrace mag. polí (ohraničují supergranule) - tvoří síťovitou strukturu = **vápníková mřížka**

- v chromosféře pozorujeme opačný efekt než ve fotosféře, tzv. **limb brightening (okrajové zjasnění)** = okraj je jasnější než střed (je tam opačný průběh teploty, na okraji se díváme do mělkých, a tedy teplejších vrstev) – pozorujeme v konkrétních spektrálních čarách

- můžeme zde pozorovat protuberance (filamenty), spikule, fibrily,...

- protuberance:

→ chromosférický materiál v koróně - chladnější, ale hustší než okolí (vyšší hustota znamená vyšší zářivé ztráty a tedy ochlazování)

→ standardní model protuberance: „vypařování“ plazmatu v nižší atmosféře (z fotosféry), tok nahoru gradientem tlaku uvnitř magnetické smyčky (materiál teče do chladnějších částí), plazma se setkává na vrcholu, poklesne vlastní vahou (prověsí magnetickou smyčku) = **magnetic dip (magnetický pokles)** – udržuje protuberanci stabilní (*papír*)

⁵⁵ záleží na zdroji – pokud se bere fotosféra až k teplotnímu minimu, pak má tloušťku 500 km (v naší definici je teplotní minimum ve výšce 200 km nad fotosférou); spodní hranice se bere tam, kde je optická hloubka rovna jedné

⁵⁶ LTE: neplatí tam Kirchhoffův zákon, můžeme počítat rovnováhu pro částice, ale záření už musíme počítat z rovnice přenosu záření

⁵⁷ u snímků na internetu apod. bývá limb darkening už odečteno

⁵⁸ spektrální čára má určitou formační hloubku, tj. může se právě formovat hlouběji a na okrajích by tak docházelo ke zjasnění

⁵⁹ stále není dostatečně prostudováno, jen si myslíme, že to tak je

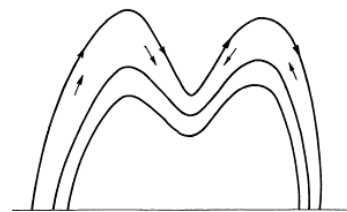
⁶⁰ tyto dvě vrstvy ale nejsou v TDR! (ani lokálně) – teplota je dána ionizačně-excitačním stavem atomů → teplota může být určena např. rozdělením energií, počtem ionizovaných atomů, počtem excitovaných atomů – v TDR jsou všechny teploty stejné, mimo TDR některé nemají smysl

⁶¹ některé zdroje uvádějí až 10 000 km – dáno strukturami v chromosféře, které dosahují takových výšek, střední výška dosahuje do 2500 km

⁶² lze ji také pozorovat v Lymanově sérii, ale ta je UV, nelze ji proto pozorovat ze Země

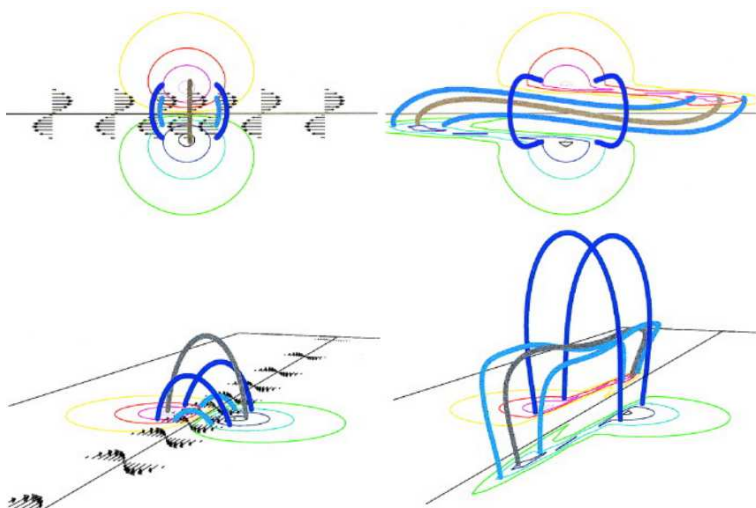
⁶³ mohou být i absorpční, ale v přítomnosti slabého mag. pole jsou emisní

- klidné: $B_{||} \sim 10-100$ G, kruhově polarizované světlo, obvykle v oblasti tichého Slunce (neaktivní oblast, pozadové magnetické pole), obvykle velké a dlouho trvající
- aktivní: $B_{||} > 100$ G, obvykle v aktivní oblasti
- typicky: tloušťka 5000 km, výška 50 000 km, délka arkády 200 000 km
- mag. pole v nich má heliakální (šroubovicovou?) strukturu
- září v H_{α} , protože pro tyto čáry (např. Balmerovy, L_{α}) je plazma v protuberanci neprůhledné (pro kontinuum je průhledné – dáno stavem látky) \Rightarrow neprojde, ale rozptyluje se (absorpce a reemise)



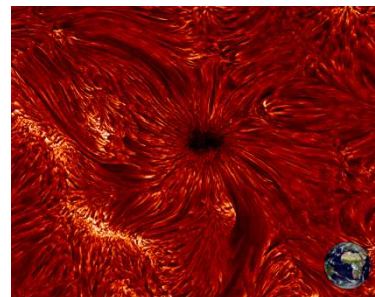
- filanty:

- to samé jako protuberance, záleží jen na úhlu pohledu – pokud to pozorujeme nad okrajem, mluvíme o protuberanci, pokud to pozorujeme na slunečním disku, mluvíme o filamentu
- jeví se tmavý, protože „zastiňuje“ povrch – rozptyluje záření z fotosféry do různých směrů
- je v koróně, září hlavně v H_{α}
- lze na nich pozorovat **neutrální čáru/linii (polarity inversion line)** = linie, která rozděluje bipolární magnetické pole (linie mezi těmi dvěma polaritami)
- filament vzniká nad touto linií – pokud jsou současně podél neutrální linie **střížné proudy (shearing motions)**, vzniká zde proudová vrstva a následně vznikají **magnetické provazce** (pokud jsou vyplněny plazmatem, mluvíme o filamentu) – mohou se v důsledku konvekce zaplést a to je považováno za příčinu erupcí



- fibrily⁶⁴:

- rozpínají se z oblastí se silným mag. polem do jiných oblastí se silným mag. polem
- jemné dlouhé tmavé vlákno s délkou až 11 000 km
- pozorují se v H_{α}
- směřují paprskovitě od sluneční skvrny, začínají ve vnitřku penumbry a sahají až do vzdáleností rovnajících se průměru skvrny - systém fibril obklopujících sluneční skvrnu se nazývá **superpenumbra**
- životnost je 10 až 20 minut, ale celá jejich struktura téměř nemění svůj vzhled v průběhu několika hodin



⁶⁴ až na první poznámku zdroj wikipedie (česká, anglickou verzi to nemá, jen česká a slovenská)

- jsou pravidelně uspořádány ve směru siločar magnetických polí, předpokládá se, že fibrily jsou silotrubice magnetického pole, kterými prochází plazma s nižší teplotou, než jakou má fotosféra
- existují i gigantické fibrily anebo řetězce fibril, které spojují velké skvrny nebo fakule (spojují skvrny nebo fakule opačné polarity)

- bright mottles (jasné skvrnky/vějířky??)

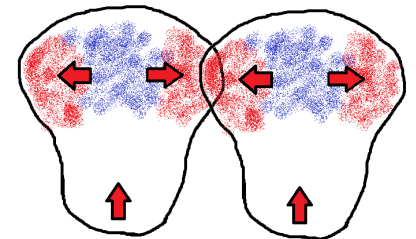
= jasné skvrnky v místech, kde je „malé“ (rozměrem) mag. pole

- na okrajích supergranulí je silnější pole a pp., že vybíhá do atmosféry – to formuje **dark mottles**
- v chromosféře

- spikule:

- pozorovatelné nad okrajem (vypadají jako tráva, chlupy), pokračování granulí⁶⁵
- výška cca 5000 km, tloušťka méně než 500 km, teplota⁶⁶ 104 K, hustota⁶⁷ $3 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^3$
- vertikální rychlosti (nahoru a dolů) až 25 km/s
- přenášejí hodně hmoty směrem vzhůru (pozorován Dopplerův jev, totální tok hmoty 100krát více než tok slunečním větrem), musí tam být i zpětný tok (hmota se musí vrátit zpátky na Slunce), ale tato hmota se nahoře ochladila a nyní je příliš chladná na to, aby byla pozorovatelná v H_α
- vlastnosti neznámé
- životnost 5-10 minut
- v polárních oblastech a oblastech koronálních děr jsou mnohem větší = **makrospikule** (délka až 20 000 km)
- některé spikule jsou dvouvláknové (je otázka, jestli to souvisí s tokem dolů)
- možná přispívají k ohřevu atmosféry

- **reverzní granulace** = v čáře H_α vypadá granulace obráceně, tj. granule jsou ve středu tmavé a na okrajích světlé – už to není konvekce, je to způsobené tím, že plyn se dostává výš, kde adiabaticky expanduje, tj. ochlazuje se, látka je tlačena do mezigranulárních prostor, kde dochází k adiabatické kompresi (větší hustota a teplota)



Přechodová vrstva:

- růst teploty v chromosféře je pozvolný, pak skokem teplota vyroste k 1-2 MK ve vrstvě asi 1000 km (střední teplota 60 000 K) - je tam teplotní diskontinuita a odtud ze stavové rovnice (tlak musí být spojitý kvůli hydrostatické rovnováze) plyne i diskontinuita v hustotě, tj. prudce klesá teplota a roste hustota (tlaková kontinuita, stále platí rovnice hydrostatické rovnováhy, není tam žádná komprese apod.)
- pozorovatelná v čáře He II (vznikají tu ionty He II)
- velmi strukturovaná, nehomogenní (lze pozorovat i teplejší jevy z chromosféry, např. filamenty)⁶⁸
- dochází k pohybům nahoru a dolů (pozoruje se dopplerovský posun) – souvisí se spikulemi, které sahají až do přechodové vrstvy
- s výškou se nehomogenity stírají – asi způsobené rozpínajícími se trubicemi magnetického pole

⁶⁵ zdroj wikipedie

⁶⁶ chromosférická teplota

⁶⁷ srovnatelná s hustotou protuberancí

⁶⁸ intenzita závisí pouze slabě na teplotě, ale silně na hustotě elektronů \Rightarrow jasnější místa odpovídají větší elektronové hustotě, ne vyšší teplotě

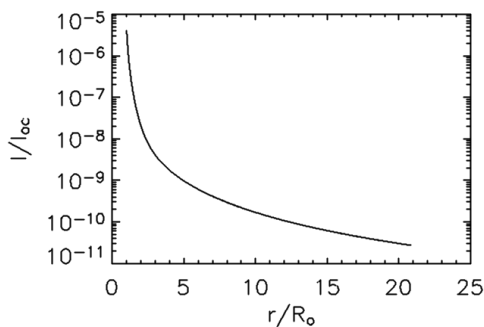
Koróna:

Koróna:

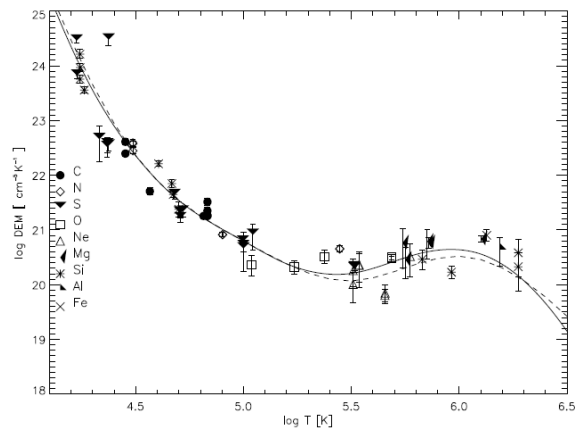
- vytvořena díky mag. poli⁵⁹
- řídká (rozpíná se do meziplanetárního prostoru)
- typická teplota milióny K, tj. vyzařuje v UV a RTG – pozorujeme ve viditelném oboru díky rozptylu fotonů z fotosféry (Thomsonův rozptyl na volných elektronech, které se pohybují podél mag. siločar⁶⁹)
- v místech, kde je mag. pole uzavřené (aktivní oblasti), pozorujeme **koronální paprsky**, v místech je mag. pole otevřené (klidné, tiché), pozorujeme **koronální díry**
 - v maximu je „kruhová“, po celém obvodu (tj. aktivita je víceméně všude)
 - v minimu je dipólová, protáhlá, pouze podél rovníku (aktivita je pouze v rovníkové oblasti)



- odhad hustoty koróny z pozorování (*papír*)
 - jasnější místa odpovídají vyšší hustotě elektronů (ne vyšší teplotě)



- DEM (*papír*)
- = kolik je tam částic, které mají danou teplotu
 - místo intenzity měříme počet vyzařujících iontů (ten souvisí s teplotou)
 - není to tak, že zachycujeme záření plazmy na různých teplotách, je to kombinace různých teplot z různých hladin??
 - na snímcích nepozorujeme plazma horké 1,6 miliónů stupňů, maximálně pik na té teplotě, ale jsou tam i příspěvky z nižších teplot (přispívají k formování spektrální čáry)



Složky koróny:

- F koróna

- vnitřní část koróny, kvůli difrakci pozorovatelná pouze při zatmění (stínítko je u koronografu příliš blízko)⁷⁰
- světlo rozptýlené z fotosféry, pozorujeme Fraunhoferovy čáry⁷¹

⁶⁹ víme to, protože takto rozptýlené světlo je polarizované

⁷⁰ na rok 2020 se chystá mise PROBA-3 – vypuštění dvou sond, které budou fungovat jako 150 m dlouhý koronograf (www.esa.int/esasearch?q=proba-3&r=mistni_informace_ceska_republika)

⁷¹ výrazné absorpční čáry ve viditelné části slunečního spektra, pozorované už r. 1802 Wollastonem, podrobně popsány r. 1814 Fraunhoferem

- K koróna (kontinuum koróna)

- vysoká teplota, tj. rychlost elektronů, na kterých dochází k rozptylu fotonů je příliš vysoká, proto jsou veškeré spektrální čáry rozmyty (nevyzařuje se přesně kontinuum, ale „pseudo-kontinuum“)
- díky Thomsonově rozptylu je polarizovaná

- E koróna (emisní koróna)

- vlastní záření, velmi slabá
- vysoká teplota a nízká hustota vedou k tomu, že je spektrum čistě emisní (není LTE)
- **koronální aproximace** = excitace atomů je srážková (atomy se sráží s elektrony, trvá ~minuty), deexcitace je zářivá (způsobeno nízkou hustotou – než se atom stihne s něčím srazit, tak deexcituje, trvá $\sim 10^{-7}$ - 10^{-4} s), ze stejného důvodu pozorujeme zakázané čáry i v optické oblasti spektra ($\sim 10^0$ s, zakázané, protože je nejde pozorovat v laboratorních podmínkách, hustota není dost nízká)
 - př. „Korónium“ = myslelo se, že je to nový prvek, ale pak se ukázalo, že je to zakázaná čára železa Fe X (637,5 nm)
 - dvě výrazné čáry (obě zakázané čáry vysoce ionizovaného Fe) – zelená (Fe XIV) a červená (Fe X)
 - tvar (intenzita) koróny v zelené čáře Fe XIV sleduje 11-letý cyklus (podobné chování jako motýlí diagram), současně je tam ale i pohyb směrem k pólům („rush to the poles“) – v době, kdy dojde k pólům, začíná nový cyklus

- T koróna (termální)

- jsou zde uvězněné prachové částice, které tepelně září

Ohřev koróny:

- fotosféra ~ 6000 K → koróna ~ 2 MK – musí tam být nějaký proces, který zahřívá korónu
 - např. rozpad zvukových vln způsobených konvekcí, disipace MHD vln (Landaův útlum), mikro-, nano-, piko-erupce (rekonexe při těchto erupcích), Joulovo teplo z proudů podél magnetických smyček
- je třeba korunální ohřev cca 1 kW/m^2 (toto platí pro klidné Slunce, v aktivních oblastech je to více, méně v korunálních děrách)
- 2000 asi 22 různých modelů – pouze 3 modely se podařilo vyvrátit (ty které souvisí se zvukovými vlnami), mezi ostatními nelze rozhodnout na základě pozorování, odpovídají mu
- 2007 objev spikulí typu 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 s horkým plazmatem v koruně
 - nesou s sebou Alfvénovy vlny, dostačují k urychlení rychlého slunečního větru
- 2015 EUNIS (rentgenový spektrograf na sondážní raketě) naznačoval, že by to mohly být nanoerupce
- NuStar (rentgenový dalekohled NASA, normálně na černé díry) poskytl důkazy vysokých teplot plazmatu i v neeruptivních aktivních oblastech, tj. dochází k rekonexím, které nevedou k erupcím, ale mohou ohřívat korónu
- někteří si myslí, že není problém v ohřevu koróny – když se modely spojí, vyjde, že by měla být ještě teplejší, tj. naopak musí docházet k jejímu ochlazení
- stále poněkud záhada, ale důležité pro energetiku hvězdy
 - rozhodně se ví, že to musí souviset s mag. polem, protože hvězdy slunečního typu, které nemají mag. pole, nemají korónu ani chromosféru
- pochopení vyžaduje MHD simulace a pozorování s velmi velkým rozlišením - ukazuje se, že na malých škálách je hodně magnetických polí (mezigranulární prostory)

- tři skupiny modelů: nemagnetické (disipace akustických vln), magnetické “stejnoseměrné” (disipace el. proudů – Joulovské ohřívání, rekonexe), magnetické “střídavé” (vlny)

→ **nemagnetické:**

- povrchová konvekce vytváří spektrum vln
- hustota materiálu klesá, tedy amplituda vln narůstá - vznikají rázové vlny, které se rozpadají vysoko v atmosféře (to ohřívá korónu)
- tento mechanismus může vysvětlit ohřev chromosféry, ohřev koróny však spíše ne (vlny ztratí energii v chromosféře, do koróny pronikne minimum)

→ **magnetické „stejnoseměrné“⁷²:**

- elektrické proudy podél smyček nesou energii, nepotenciálová část magnetického pole obsahuje energii
- rozpad Joulovým teplem, rekonexemi (které nejsou vidět jako erupce, pomalé), erupcemi (nano-, piko-⁷³,...)

→ **magnetické „střídavé“⁷⁴:**

- magnetoakustické a Alfvénovy vlny
- problém: magnetoakustické vlny ochotně disipují, ale obtížně procházejí chromosférou (nízká hustota materiálu) a navíc se odrážejí zpět do fotosféry, nemohou tedy nést dostatečné množství energie a Alfvénovy vlny snadno procházejí chromosférou (díky větší vlnové délce), ale neochotně disipují
- numerické simulace: Alfvénovy vlny mohou konvertovat na magnetoakustické v přechodové vrstvě
- až do vypuštění SOHO žádný důkaz vln v koróně - SOHO detekovalo vlny 100 mHz s cca 10 % potřebné energie, nové přístroje (Hinode, AIA) objevily vlny s nižšími frekvencemi (až 1-10 Hz) v nižší atmosféře, které mají možná dost energie

Hvězdné koróny:

- i jiné hvězdy s magnetickým polem mají korónu – řídká, horká, ionizovaná

→ u horkých hvězd vzniká tlakem záření

→ u chladných hvězd je za vznikem silné magnetické pole vypínající se nad fotosféru

- měření mimo zemskou atmosféru: XMM Newton, Chandra

- příklad YY Gem (dvojhvězda M-hvězd, součást 6-ti násobného systému Castor, 37 ly od Země, 0,60 M_{\odot} , 0,60 R_{\odot} , 3800 K, P = 19 h)

⁷² DC (direct current) teorie

⁷³ mají mnohem menší magnitudu než normální erupce, ale mechanismus je stejný

⁷⁴ AC (alternate current) teorie

Sluneční vítr a kosmické počasí:

Historie:

- polovina 20. století - „sluneční částicové záření“ jako prostředek k vysvětlení geomagnetických bouří⁷⁵, sluneční částice generují proud v ionosféře
- pozorované a měřené geomagnetické bouře vždy souvisely s jevy na Slunci, ale se zpožděním (nárůst meziplanetárního magnetického pole obvykle dva dny po erupci)
 - to dává informaci o tom, jak rychle se to šíří – bylo zřejmé, že to nejsou fotony, ale těžší částice
 - musí existovat jakési elektrické spojení mezi Zemí a Sluncem
- průlom nastal v 50. letech 20. století:
 - 1950 Biermann – pozoroval komety, iontové stopy komet míří vždy od Slunce⁷⁶, tj. musí existovat stálý tok částic od Slunce, které předávají hybnost plynu komet (energie fotonů nestačí)
 - potřeba velkých rychlostí a velkých hustot (s tehdejšími modely to bylo nefyzikální)
 - 1957 Chapman – snažil se vysvětlit vysokou teplotu koróny⁷⁷ - model statické koróny s vysokou tepelnou vodivostí
 - 1958 Parker – začal formovat model dynamické koróny s meziplanetárním mag. polem a slunečním větrem⁷⁸ (udělal dvě předpovědi – jak by měl sluneční vítr vypadat okolo Země⁷⁹ a jak by měla vypadat struktura meziplanetárního mag. pole)

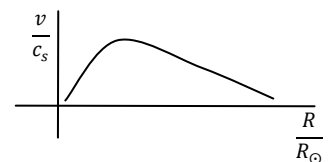
-3 složky slunečního větru:

- **pomalý** = zdrojem jsou místa s uzavřeným polem (aktivní oblasti, tj. převážně kolem rovníku – to zhruba odpovídá rovině ekliptiky), typická rychlost cca 400 km/s, tento vítr předpovídal Parker
- **rychlý** = pochází z míst s otevřeným polem (koronální díry, póly, víceméně celé Slunce v minimu aktivity), typická rychlost cca 700 km/s, původ nejasný (nesouhlasí s Parkerovým modelem) – věří se, že ho mohou urychlovat stochastická el. pole v koróně
- původně se myslelo, že je dominantní pomalý sluneční vítr (většina pozorování byla v rovině ekliptiky)
- 1990 sonda Ulysses měřila vlastnosti slunečního větru na heliopolární dráze – po většinu času je dominantní rychlý sluneční vítr (tj. není pouze z koronálních děr, ale v minimu aktivity je téměř všude, v maximu jsou přítomna otevřená i uzavřená mag. pole a máme kombinaci rychlého a pomalého větru)
- **rázové vlny způsobené explozivní událostí** – plazmoidy z erupcí, typická rychlost 1200 km/s (až 3000 km/s)

Heliosféra:

- sluneční vítr postupně zrychluje, po překročení kritického bodu (několik poloměrů Slunce od Slunce) se stane nadzvukovým vzhledem k lokální rychlosti zvuku⁸⁰ (tj. po většinu dráhy ve sluneční soustavě je nadzvukový)

- v absolutních jednotkách rychlost slunečního větru klesá, ale ve v/c_s nejdříve roste a až potom klesá (tj. pokles rychlosti je menší než pokles teploty, tedy teplota neklesá dostatečně rychle a vítr je nadzvukový – v klesá, ale c_s taky a dokonce rychleji, tedy v/c_s roste)



⁷⁵ už R. Carrington spojoval první pozorovanou erupci 1859 s tím, co se děje na Zemi

⁷⁶ kometa má plynový a prachový ohon - prach zůstává vzadu za oběžnou dráhou komety (často takto vzniká zakřivený ohon), ohon z ionizovaného plynu vždy míří přímo od Slunce, protože plyn je silněji ovlivňován slunečním větrem než prach a sleduje čáry magnetického pole, ne trajektorii oběžné dráhy

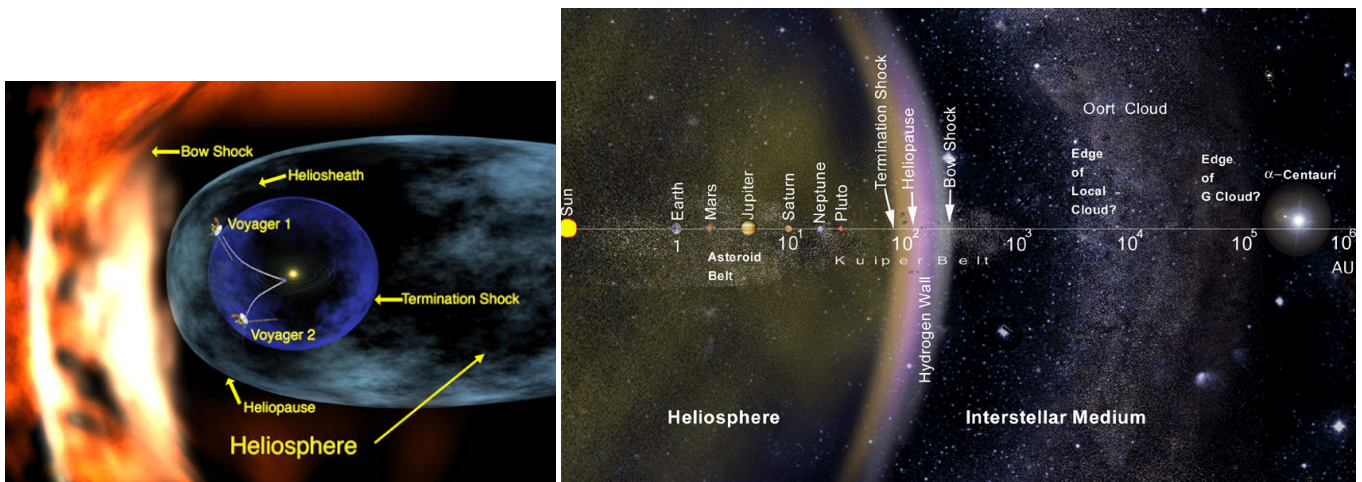
⁷⁷ to věděli ze spektroskopických pozorování během slunečního zatmění a korónografů

⁷⁸ CAK teorie hvězdného větru, řešení pomocí HD rovnic – vyjde pomalý sluneční vítr

⁷⁹ potvrzeno sovětskou sondou Luna 2 (1959)

⁸⁰ $c_s = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} \sim T$, tj. odpovídá teplotě v daném místě

- pak zpomaluje v důsledku **gravitace??** (navíc se zvyšuje lokální rychlost zvuku s hustotou??), takže se v určitém bodě stane opět podzvukovým - **terminační vlna (termination shock)** = oblast, kde je nadzvukový sluneční vítr zpomalován pod rychlost zvuku působením mezihvězdného prostředí
 - v určité vzdálenosti od Slunce, pravděpodobně okolo oběžné dráhy Pluta, nadzvukový vítr zvolna zpomaluje díky střetávání s mezihvězdnou hmotou - to způsobí náraz, vzniká terminační vlna, a rychlost částic klesá na podzvukovou⁷⁰
- **heliosféra** = oblast, kde dominují částice slunečního větru nad částicemi od jiných hvězd
 - končí tam, kde se vyrovnává tlak slunečního větru s tlakem okolních hvězd⁸¹
- **heliosférická obálka (heliosheath, heliosférický plazmový chvost)** = oblast dominance podzvukového slunečního větru, věří se, že je zde sluneční vítr turbulentní, vliv okolí způsobuje tvar „komety“
- **heliopauza** = přímé setkání obou médií, hranice heliosféry (rozděluje částice podle původu – uvnitř jsou částice pocházející od Slunce, venku jsou částice z mezihvězdného prostředí⁸²), zde se vyrovnává tlak slunečního větru s tlakem okolních hvězd
- **čelní rázová vlna (bow shock)** = heliosféra se pohybuje mezihvězdným prostředím nadzvukovou rychlostí⁸³ (pohyb Sluneční soustavy k apexu je rychlostí 27 km/s, zatímco lokální rychlost zvuku je 23-25 km/s), na jejím čele vzniká turbulentní oblast, v níž je zvýšený tlak způsobený pohybem heliosféry – rázová vlna⁸⁴
 - jsou pozorování, která tento model zpochybňují – ukazují, že pohyb heliosféry není nadzvukový, tj. nebude tak protáhlá a nebude čelní rázová vlna, **pouze přířďová vlna?** (bow wave)



- ačkoliv vně bow shocku je většina nabitých částic z jiných hvězd nebo z galaxie, tak jsou stále součástí Sluneční soustavy - ta je definovaná jako sféra vlivu gravitace
 - např. oba Voyagery jsou vně heliosféry (v mezihvězdném prostředí), ale stále jsou ve Sluneční soustavě, protože největší gravitační vliv má Slunce
 - Sluneční soustava končí někde ve 2 ly (na půli cesty k nejbližší hvězdě)
 - Oortův oblak je zhruba kolem 1 ly

⁸¹ zdroj wikipedie

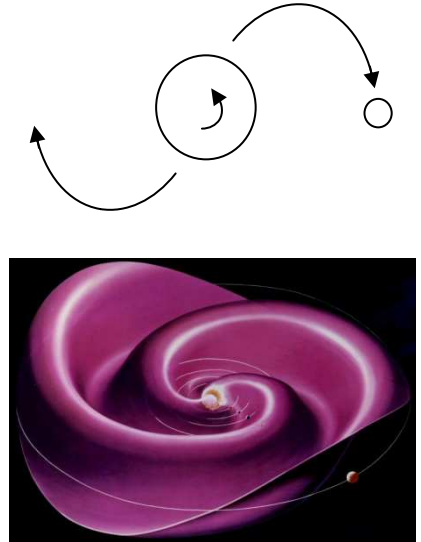
⁸² od jiných hvězd, z galaktického plynu

⁸³ učebnicový model

⁸⁴ Rázová vlna je fyzikální jev, při němž se prostředím šíří vzruch (energie) v podobě skokové změny fyzikálních veličin popisujících stav prostředí. Nosičem rázové vlny může být hmotné prostředí (tuhé, kapalné nebo plynné), nebo pole (například elektromagnetické).

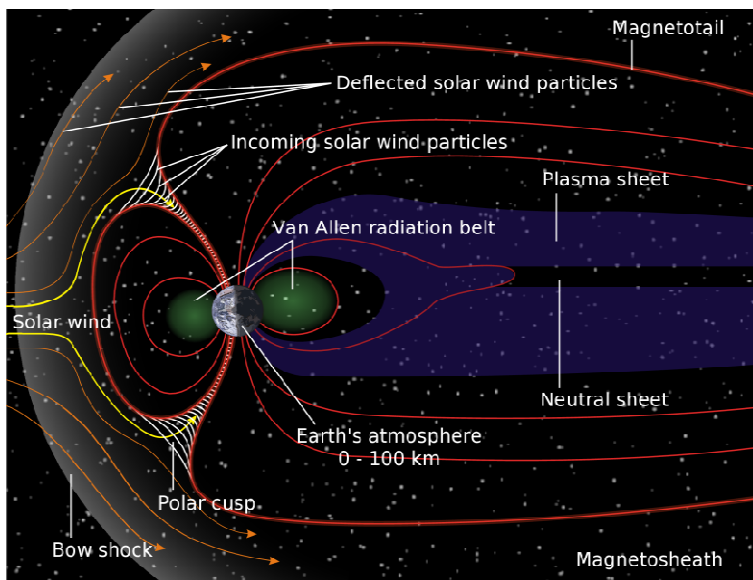
Proudová vrstva:

- = rozhraní polarit meziplanetárního magnetického pole (IMF), tj. plocha, na které se mění polarita slunečního mag. pole ze severní na jižní
- díky rotaci jsou mag. siločáry stočeny do Archimédovy spirály
 - důležité pro předpovědi vlivu sluneční aktivity na Zemi (Země nemůže být zasažena aktivitou na východní straně (tam kde „vycházejí skvrny“??) – hmota se pohybuje podél ramena a stáčí se pryč
 - záleží i na polaritě plazmoidu, který zasáhne zemi – pokud má opačnou polaritu než magnetosféra Země, pak může dojít k rekonexi a důsledky jsou horší
- pole má tvar spirál (model sukně baletky) = **Parkerovy spirály**⁸⁵
 - vede k sektorové struktuře IMF = jestli převažuje + nebo - (4 sektory, tj. 4x se to změní během jednoho oběhu - důsledek rotace Slunce se skloněnou rotační osou⁸⁶)
- když Země prochází stacionárními body, kde je mag. pole téměř nulové (tou plochou, kde se mění polarita, ty píky a záhyby – je tam velká změna z + na -), interaguje mag. pole Slunce s magnetosférou Země a generuje se malý proud (resp. proud je velký, ale na velké ploše, celkový radiální proud ~ 3 GA)



Kosmické počasí:

- perspektivní obor - hodně peněz (právě kvůli vlivu na každodenní činnosti), „aplikovaná sluneční fyzika“
- cílem je sledování stavu IMF v okolí Země, ale rozšiřuje se to už i na další planety (Mars, Venuše – kolem nich obíhají sondy, které mimo jiné sledují i IMF)
- modely zatím ne příliš úspěšné
- částice ze Slunce způsobují poruchy v magnetickém poli Země = geomagnetické bouře, polární záře⁸⁷, ionosférické poruchy, poruchy elektroniky, poruchy dálkových vedení



⁸⁵ jmenuje se to po Parkerovi, protože ve své práci předpověděl strukturu meziplanetárního mag. pole

⁸⁶ 7,25° od směru kolmého k ekliptice

⁸⁷ částice způsobující polární záře nepřicházejí přímo od Slunce, ale z rekonexe „za Zemí“ (zezadu) – víme to, protože polární záře pozoruje téměř výhradně na noční straně a navíc tyto částice mají vyšší energie než částice přicházející přímo ze Slunce

Scénář erupce:

- 1) vidíme světlo (vysokoenergetické elektromagnetické záření - RTG, gama, UV)
 - vidíme prakticky okamžitě (osm a půl minuty po erupci)
 - RTG záření ionizuje atmosféru, a může způsobit poruchy komunikací a GPS
- 2) protonová bouře (svazky protonů nebo elektronů uvolněných při rekonexi)
 - trochu pomalejší než světlo 23 minut až dvě hodiny
 - opět ionizuje atmosféru, nebezpečná pro astronauty, zvyšuje radiační zátěž pilotů atd.
 - může způsobit diferenciální nabíjení družic (různé části sond jsou z jiných materiálů, každá část se nabíjí jinak – vzniká tam napětí a může tam vzniknout bleskový výboj, který spálí elektroniku)
- 3) koronální ejekce hmoty (plazmoid)
 - 20 hodin až tři dny
 - způsobuje poruchy magnetosféry⁸⁸ (geomagnetické bouře)
 - indukce elektrického proudu - výpadky družic, výpadky sítí

Polární záře:

- výsledek interakce částic slunečního větru s atomy a molekulami v atmosféře (srážková excitace)
- velký příkon, až 600 GW
- nejčastěji v okolí polárních kruhů (při velké aktivitě se objevují i níže)
- probíhají téměř symetricky na jižní a severní polokouli (narušuje to jen sklon magnetického ohonu Země vůči rovníku)
- naprosto neškodné, ruší krátkovlnné spojení, umožňuje spojení dlouhovlnné (je to proud v ionosféře, někteří to zkouší využít)

Dopady aktivity na Zemi:

- vznik napětí na dlouhých vedeních
 - rozpad energetických sítí, koroze ropovodů, plynovodů
 - elektrická zařízení se mohou spálit - **mívají pojistky, které příslušnou část sítě odpojí??** ⇒ vyráběná energie je stejná, ale „sít' je menší“, méně el. vedení, navíc je tam ještě proud generovaný geomagnetickou bouří, tj. další pojistky mohou odpojit část sítě – během několika sekund může selhat celá sít' = **kaskádový kolaps elektrické sítě**
 - v síti máme střídavý proud s frekvencí 50 Hz, geomagnetický indukovaný proud je kvazistacionární s frekvencí ~ mHz - to je pro el. zařízení jako stejnosměrný proud (transformátory dokážou pracovat s vysokým proudem a napětím, ale musí být střídavé) - stejnosměrný proud vede ke vzniku Joulovského tepla, které může spálit transformátor⁸⁹
- ovlivnění ionosféry, která zprostředkovává rádiového spojení⁹⁰ (komunikace, navigace)
 - zasažen je hlavně letecký provoz (nad zhruba 74° zeměpisné šířky není možné navázat s letadlem jakýkoliv signál) – tj. lety jsou zrušeny nebo odkloněny⁹¹
- navigace
 - klesá přesnost⁹² (variace hustoty v ionosféře, signál scintiluje, metrová přesnost se ztrácí)

⁸⁸ nabité částice s sebou nesou i magnetické pole, které interaguje se zemským

⁸⁹ př. 1989 byl jeden transformátor zničen 224 A (v České republice to bývá 50 A a už to může mít vliv)

⁹⁰ krátké rádiové vlny se od ní mohou odrážet a tím se šíří daleko od vysílače

⁹¹ vede ke zdražení letenek, zpoždění, odškodnění cestujících?? (mimořádné události do toho ale nespádají??) – velké ztráty pro letecké společnosti

⁹² např. letecká radionavigace z 300 m na 7 km, GPS z řádově metrů až centimetrů až na 300 m

- těžební plošiny vyžadují přesnost řádově metry – při zhoršení přesnosti GPS musí být těžba zastavena (finanční škody)
- radiomajáky (nízkofrekvenční vlny, letadla a lodě, až kilometrová nepřesnost v případě zvýšené aktivity)
- falešné signály
 - signalizační zařízení na železnicích v severních státech, dálková ovládní (např. dveře garáže)
 - geologická prospekce⁹³ (ropa, minerály) – mění se zemní elektrické proudy, buď se využívají nebo vadí
- elektronika
- poškození kosmických družic
 - diferenciální nabíjení – viz výše
 - nabité částice ničí solární panely – viz Bastille Day Event (poškození SOHO)
- zvýšené radiační riziko pro kosmonauty, piloty, letušky
 - při letu ve vyšší výšce (na velké vzdálenosti) za normální sluneční aktivity dostaneme dávku ozáření jako při rentgenu hrudníku, při zvýšené sluneční aktivitě dostaneme 5-10x víc; riskantnější pro posádku, která tráví v těchto výškách podstatně víc času, než pro cestující
- potenciální nebezpečí pro kybernetické implantáty, kardiostimulátory
- lidé citlivější na změny magnetického pole
 - ale co NMR vyšetření? (změny při geomagnetické bouři jsou ~ 1000 nT, při NMR ~ 1-2 T)
- ztráta orientace zvířat
 - mají minerální magnetit obalená nervovými buňkami, což jim dává možnost orientace podle magnetického pole Země
 - holubi (testováno - nevrátili se během slunečních bouří), delfíni, velryby

Historické události:

- **Carrington Event** (supererupce)
 - první historicky doložená erupce z 1. 9. 1859 (bílá erupce)
 - geomagnetická bouře následující dva dny
 - polární záře až v Karibiku, horníci ve Skalistých horách snídali v domnění, že je ráno, bylo možné číst noviny
 - výpadek telegrafního spojení, popálení operátorů, některé linky posílaly falešné zprávy i bez napájení
 - Dst index⁹⁴ = -1760 nT (možná -1500)
- **1921**
 - geomagnetická bouře vyřadila 13. května 1921 městskou železnici v New Yorku (zřejmě od telegrafního vedení vyhořela kontrolní věž)
 - kompletní výpadek telegrafní sítě na východě USA
 - rozsáhlé poruchy (“vyhořelá elektronika”) telefonní sítě ve Švédsku
 - poruchy transkontinentálních kabelů (na dně Atlantiku)
 - Dst \cong -800 nT
- **Québec Blackout**
 - 13. březen 1989 rozsáhlá geomagnetická bouře jako výsledek série erupcí a CME (jedna CME čistí cestu druhé - 6. 3. X15, 9. 3. X5)
 - rozpad energetické sítě kaskádovým kolapsem v Québecu⁹⁵, kompletní blackout trval 9 hodin

⁹³ Prospekce (prohledávání) je fyzická práce zahrnující projíždění (tradičně pěšky nebo na koni), rýžování, prosévání a průzkum terénu hledající známky mineralizace.

⁹⁴ Disturbance storm time index = jeden z indexů popisujících narušení magnetického pole Země (maximální odchylka geomagnetického pole); záporná hodnota znamená, že narušující pole má opačnou polaritu (tj. oslabuje to pole Země)

⁹⁵ pravděpodobně jen díky špatně zapojené pojistce se to nerozšířilo do celých USA

- izolující kamenné podloží
- rozpad trval řádově sekundy
- vyhořelo několik transformátorů (do 12 měsíců selhalo 25 transformátorů po celých USA)
- celkové škody \$6 milionů

→ vyhořelý 500 kV transformátor v New Jersey

→ dva vyhořelé 400 kV transformátory ve Velké Británii

- Bastille Day Event

→ erupce třídy X5 14. 7. 2000

- na středu disku (tedy dobře sledovaná přímo shora)
- protonová erupce
- naprosto zahltila EIT@SOHO a udělala měření nepoužitelnými (za deset minut poškození slunečních panelů jako při pětiletém používání, poškození částicových detektorů)

→ oprovázena geomagnetickou bouří 15. - 17.7.

→ zahřálo to atmosféru Země, nafoukla se, a to rozhodilo hodně (tisícovku) satelitů

→ dozvuky koronální ejekce hmoty detekovány přístroji na Voyager 1 a Voyager 2 (cca 80-100 au)

- 23. 7. 2012

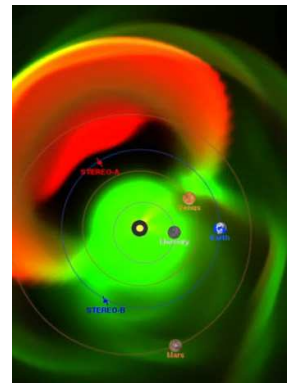
→ erupce na odvrácené straně Slunce (tedy síla neznámá)

→ mohutná CME, zasáhla satelit STEREO A

- nejrychlejší pozorované CME 2900 km/s (oblast "vyčištěna" jinou CME před čtyřmi dny)
- ve skutečnosti dvě CME s odstupem 15 minut

→ odhadnuta geoeektivita Dst \cong -1200 nT

→ odhadnuty škody 2 biliony dolarů (20x Katrina)

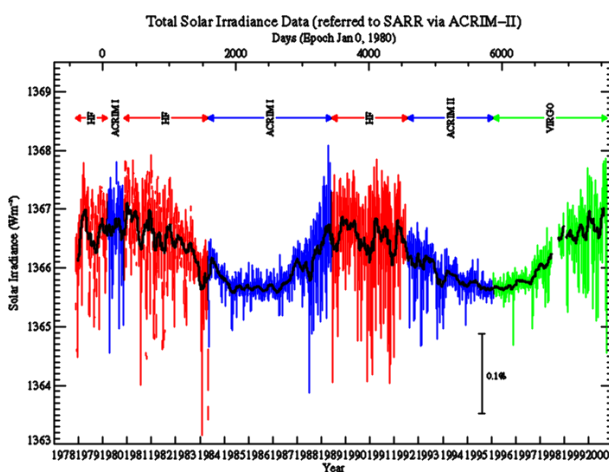


Dlouhodobé efekty:

- změna celkového toku:

→ skvrny – pokles jasu \sim 0,1 %, fakule – zjasnění o \sim 0,1 % (na plochu cca 4x více než skvrn) \Rightarrow v maximu je vyšší příkon záření

→ sluneční konstanta⁹⁶ \sim 1366 Wm⁻² (o trochu větší v maximu)



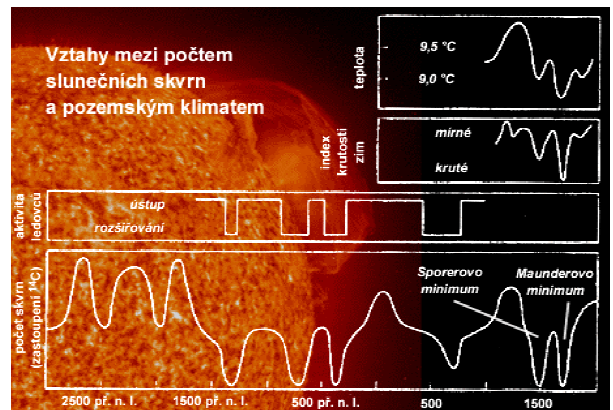
⁹⁶ tok sluneční energie procházející plochou 1 m², kolmou na směr paprsků, za 1 s ve střední vzdálenosti Země od Slunce měřený mimo zemskou atmosféru. Konstanta zahrnuje celé spektrum slunečního záření, nejen viditelné světlo. Veličinou je hustota zářivého toku.

Další periody aktivity:

- Gleissbergův cyklus - 87 let, modulace amplitudy cyklu
- De Vriesův - 205 let
- Hallstattův - 2300 let
- erupční perioda - 140—170 (154) dní
- silná perioda ~ 27 dní!
- aperiodická složka
- periody nemají fyzikální základ, nereprodukuje se v modelech

Souvislost s klimatem:

- na klima mají vliv hlavně dlouhodobé cykly nebo období, kdy se cyklus „zastaví“ (velká minima)
- 10. – 13. století: zvýšená aktivita, teplé klima
 - žádný led na severním pólu, Vikingové tudy dopluli do Grónska – zemědělská kolonie (Green-land)
- 13. století: ochlazování
- 1645–1715: Malá doba ledová (Maunderovo minimum)
 - kruté zimy (pokles průměrné teploty 0,5°C)



Proxy sluneční aktivity (¹⁴C):

- proxy data = nepřímé údaje umožňující vědcům rekonstruovat klimatické podmínky, které panovaly v minulosti
 - např. ledovcová jádra, letokruhy, fosilní pyl, zkušební vrty, korály, a mořské a jezerní usazeniny (charakter depozice nebo rychlosti růstu materiálu byly ovlivněny klimatickými podmínkami v době, ve které se usazovaly nebo rostly), množství jednotlivých izotopů⁹⁷
- kosmogenní izotopy⁹⁸ formované vysokoenergetickými částicemi (z galaktických zdrojů) v zemské atmosféře: ¹⁴C, izotopy Be
 - když je sluneční aktivita větší, je větší heliosféra, a tedy přichází méně těchto částic kosmického záření, tj. je méně kosmogenních izotopů (antikorelace mezi sluneční aktivitou a zastoupením kosmogenních izotopů)
 - izotopy lze nalézt v bublinkách v ledovcích, letokruzích stromů (geologické vrstvy mapující obecně klimatickou teplotu)
- lze mapovat sluneční aktivitu až 11 000 let do minulosti (sluneční aktivita byla víceméně stejná)

Metody předpovědi aktivity:

- předpovědi aktivity:
 - krátkodobé:
 - na pár dní, chceme, aby byla přesná
 - zajímá nás, jak je velká pravděpodobnost, že dojde k erupci třídy X
 - extrapolace současných dat (založené na zkušenosti, počítače počítají mnohem déle, než kdy potřebujeme výsledky), „pozorování“ odvrácené strany
 - úspěšnost ~ 85 % na týden
 - dlouhodobé:
 - založené na modelech

⁹⁷ zdroj wikipedie

⁹⁸ vznikají interakcí kosmického záření s již vzniklými těžšími prvky rozptýlenými ve vesmíru (nemají původ při vzniku vesmíru, ani z výbuchu supernov???)

- matematická funkce modelující vývoj indexu aktivity
 - využijeme např. rozvoj do řady
 - předpověď = extrapolace funkce (např. extrapolace podle počtu slunečních skvrn)
 - nejsou příliš úspěšné
- fyzikální model beroucí v úvahu fyzikální principy
 - kalibruje se na pozorování (fitují se volné parametry)
 - předpověď = vývoj modelu do budoucna
 - populární model je flux-transport model (Dikpati et al.) – bohužel i přesto, že sedí na předchozí cykly, tak předpověď 24 cyklu vůbec nevyšla⁹⁹ (předpovídali velkou aktivitu a byla minimální)
- problémy v modelování způsobují například skvrny s obrácenou polaritou (porušený Haleův zákon)
- sluneční aktivita ovlivňuje techniku – z důvodu plánování je nutné mít alespoň odhad
 - NASA - plánování misí, konstrukce sond a pobytů ve volném kosmu
 - energie – ostražitost před výpadky
 - družice – možné poruchy, přechod do bezpečného režimu

⁹⁹ stejně to bylo v 90% modelů; ty ostatní ještě nemusí být správné, může to být jen náhoda

Sluneční rotace:

Sluneční rotace:

- pomalá (~ měsíc)

→ bylo známo zhruba od 1610 podle pohybů skvrn (Galileo)

→ 1858 Carrington měřil přesněji pozice slunečních skvrn – zjistil, že střední rotační perioda skvrn je $13^{\circ}12'$ za den, čili $T=27,2753$ dne

- **diferenciální** = rotace je rychlejší na rovníku a pomalejší u pólů (*papír*)

→ 1863 Carrington $\omega = A + B \sin^{7/4} b$ (konstanty odvodil fitováním)

→ dnes se používá $\omega = A + B \sin^2 b + C \sin^4 b$, ale tato báze není OG, tj. koeficienty se budou měnit při přidávání dalších členů rozvoje (pokud máme v popisu i sluneční skvrny, třetí člen se zanedbává – bylo by to moc složité??), tento vztah předpokládá symetrii rotačního zákona vůči rovníku

- tento parabolický fit je dobrý v šířkách, kde se tvoří skvrny (tj. zhruba do 40°), směrem k pólům přestává fungovat (ale může to být i tím, že z polárních oblastí nemáme dostatek dat)

→ lepší popis expanzí rychlostní křivky jako fce heliografické šířky na Legendreovy nebo Gegenbauerovy polynomy či jiné ortogonální báze, ale to nebylo úspěšné, protože sluneční rotace není symetrická vůči rovníku, není stabilní, tj. mění se s časem a podoba rotačního zákona závisí na metodě (např. jestli sledujeme skvrny, granule, ...)

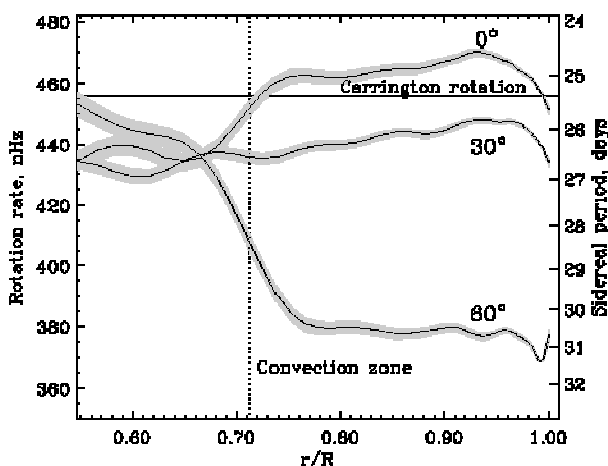
- ovlivněná magnetickými poli

- způsoby měření:

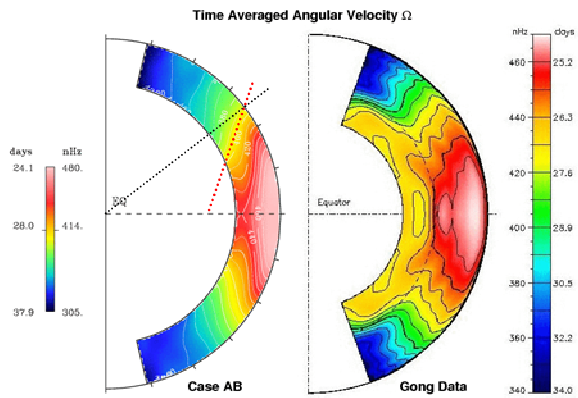
→ spektroskopicky

→ trasování objektů – ukazuje se, že čím větší objekty sledujeme, tím rigidnější rotace (nejeví se tak diferenciální); magnetické objekty jsou **systematicky posunuté vůči něčemu s Dopplerovým posuvem** (objekty s mag. polem rotují rychleji než okolní fotosféra, nejspíš mají původ v hlubších vrstvách, kde je rotace rychlejší); supergranulace rotují nejrychleji

→ helioseismicky – jediná metoda, která umožňuje měřit rotační profil i hlouběji pod povrchem



→ z helioseismologie se ukazuje, že rotace je diferenciální pouze v konvektivní zóně, hlubší vrstvy rotují zhruba jako tuhé těleso ⇒ mezi konvektivní a zářivou vrstvou je velmi silné rychlostní tření (tj. lokálně tam jsou velké rozdíly v rychlostech) – tato vrstva se nazývá **tachoklina** a má se za to, že je hlavním zdrojem mag. pole Slunce (dynamo)



A.S. Brun, JILA, University of Colorado

→ neplatí ale, že by na dané šířce byla směrem k centru stále stejnou rychlost (pozorovací fakt) – to platí zhruba od 25° výš (k pólům), kolem rovníku rychlostní profil spíš připomíná válec (ale válec to není)

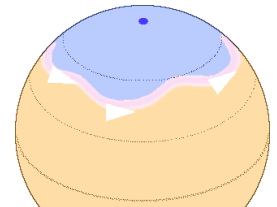
- rotace bývá obvykle modelovaná v 1D, ale nelze ji dělat čistě v 1D (*papír*)

- meridionální cirkulace:

- pomalý tok (~ 10 m/s) od rovníku k pólům
- (zřejmě) odpovědný za odnos magnetického pole k pólu, přepólování globálního pole a jeho recyklaci (tj. ovlivňuje sluneční cyklus)
- projeví se pouze statisticky (pokud modelujeme konvekci v globálním měřítku, po zprůměrování) – lokální rychlosti jsou až o dva řády větší
- jeden z faktorů způsobující diferenciální rotaci (unáší rychlejší elementy k rovníku a pomalejší k pólu)
- některé instrumentální efekty mohou být výraznější než samotný tok (efekt zkreslení)
- zatím se uvažuje, že se jedná o jednu velkou buňku, ale jsou i teorie, že se formují **protibuňky**

- Rossbyho vlny:

- objevují se všude, kde je diferenciální rotace (např. i v Zemské atmosféře¹⁰⁰)
- vlnovité odchylky od konstantní hodnoty rotace na rovnoběžkách
- těžko detekovatelné ve sluneční atmosféře
- označovány jako r-mody „oscilací“
- velkorozměrové vlny
- mají vždy komponentu, která se šíří proti směru rotace



Vývoj rotace:

- profil diferenciální rotace není konstantní v čase
- sekulární změny (dlouhodobé, neperiodické, které se nasčítávají) = přeuspořádání hybnosti s vývojem Slunce – hybnost odnášejí fotony a sluneční vítr
 - mladé hvězdy rotují rychleji, pp. že Slunce bylo podobné, ale když se tyto změny spočítají, je to málo¹⁰¹ ⇒ Slunce zpomaluje ještě tzv. **magnetické brzdění (magnetic arms)**¹⁰² – mag. pole Slunce sahá velmi daleko, ve výsledku je pro sluneční vítr efektivní poloměr Slunce větší, tj. efektivnější ztráty momentu hybnosti (částice slunečního větru odnášejí hybnost při mnohem větším r)

¹⁰⁰ můžou za to, že se v mírném pásu mění počasí v průměru každé 3 dny

¹⁰¹ Pokud by na ZAMS mělo Slunce periodu rotace 1 den, pak by těmito efekty zpomalilo do dnešní doby pouze na 6 dní

¹⁰² rotace jádra by se zpomalovat tímto mechanismem neměla (mag. pole je až od konvektivní vrstvy dál), tj. podle tohoto modelu by mělo rotovat rychleji než konvektivní vrstva, ale to se nepozoruje – musí tam být další efekt, který propojuje rotaci jádra a konvektivní obálky (zatím nejasné)

- periodické změny (související se slunečním cyklem)

→ pozoruje se asymetrie mezi severní a jižní polokoulí – polokoule, která vykazuje nižší aktivitu, rotuje rychleji a více diferencially¹⁰³

→ v maximu sluneční aktivity rotuje Slunce pomaleji a méně diferencially

→ lokálně povrchové oblasti s magnetickým polem rotují rychleji (viz výše)

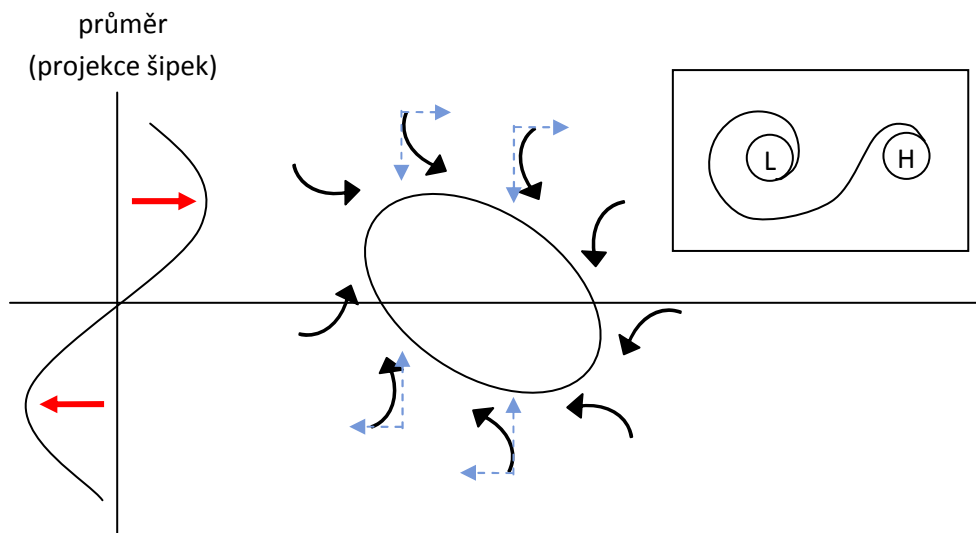
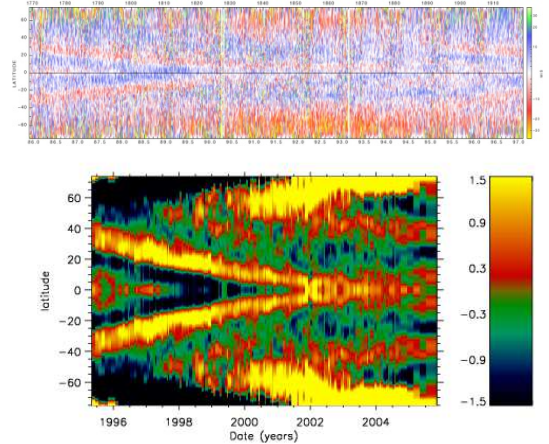
- torzní oscilace:

→ pásy rychlejší (pomalejší) rotace (o cca 10 m/s, rychlost na rovníku je v téměř 2 km/s) migrující k rovníku s cyklem aktivity

→ na rozhraní pomalého a rychlého pásu se objevují aktivní oblasti (oblasti se skvrnami¹⁰⁴)

→ existuje i druhá větev – migrace k pólu s cyklem aktivity

→ původ nejasný - Spruit 2003, Rempel 2006 model: v aktivních oblastech je nižší tlak než okolo (o cca 5 K chladnější než okolí) – „vtok“ hmoty do pásu (spíše se to podobá hurikánům, stáčení do spirál působením Coriolisovy síly)



→ narušuje to i meridionální tok

→ z helioseismologie se ukazuje, že proudy blízko rovníku jsou mělké (spojeny s mělkými mag. poli, spíše tepelný efekt - ochlazování), proudy blíže k pólům jsou hlubší (spíše spojené s mechanickými silami)

→ oscilace v tacholině – jednu dobu se pozorovaly oscilace s periodou 1,3 roku, ale od roku 2002 se již nepozorují (nejspíše jen instrumentální efekt)

¹⁰³ abychom toto zahrnuli do výpočtů, musíme přidat Lorentzovu sílu, vede na další člen - Maxwellův tenzor (propojuje mag. pole a rychlost rotace, zpomaluje rotaci a dělá ji méně diferencially)

¹⁰⁴ tedy i oblasti se skvrnami migrují během cyklu směrem k rovníku

Pozorování Slunce:

Sluneční pozorování:

- v bílém světle:

- kresby¹⁰⁵ - takto vznikají **synoptické mapy** = mapy slunečního povrchu (přehledové mapy - např. skvrny a fakulová pole, magnetické pole, koronální zelená čára,...)
- fotografie - vysoké rozlišení

- spektrální pozorování

- speciální pozorování: **magnetogramy** = neměří se energie, ale magnetické pole; **dopplerogramy** = měření Dopplerova posuvu (obraz povrchu Slunce, v němž každému bodu odpovídá určitá radiální rychlost)
- vše s vysokým prostorovým (50 - 70 km) i časovým rozlišením (obrázky po sekundách, možná i méně)

Souřadnice:

- dnes se za standardní považuje Carringtonův systém (19. století):

- systém jako kdyby Slunce bylo tuhé těleso
- rotuje s periodou 27,2753 dne (13,2°/den)
- nulová epocha (= začátek počítání) = 9. 11. 1853, 12 hodin¹⁰⁶
- pozice rotační osy vzhledem k nebeské sféře (z pohledu kdy stojíme na povrchu Slunce a koukáme na „sluneční Polárku“??): $\alpha_0=286,13^\circ$, $\delta_0=63,87^\circ$ ¹⁰⁷, sklon vůči ekliptice asi 7,5°

- používají se i modifikované systémy: využívající lokální sluneční meridián, různé projektivní systémy (v helioseismologii se používá Postelova projekce - zachovává kružnice), heliocentrický systém, lokální kartézský (hlavně pro pozorování s vysokým rozlišením)

Sluneční aktivita:

- pokud bychom Slunce pozorovali z větší dálky (jako ostatní hvězdy) – pozorovali bychom proměnnost Slunce způsobenou magnetickou aktivitou (na různých prostorových a časových škálách má různé projevy)
 - **sluneční aktivita** = soubor v čase proměnlivých jevů souvisejících s magnetickým polem (sluneční skvrny, protuberance, erupce, CME a plazmové oblaky)
- jasové změny celkově cca 0,1 % (ve viditelném světle), mnohem větší v UV a X nebo rádiu (změny až 1000 %)

Hvězdná aktivita:

- u Slunce je chromosféra pravděpodobně důsledek magnetického pole, a tedy pokud budeme pozorovat u jiných hvězd chromosféru (tj. emisi v H_α , H_β , **vápníkové (a draslíkové) čáře** a časové změny těchto čar), můžeme usuzovat na přítomnost magnetického pole, podobně UV a RTG proměnnost naznačuje přítomnost koróny, RTG záblesky souvisí s erupcemi
- od 60. let pozorují na Mount Wilson hvězdy podobné Slunci (www.mtwilson.edu/hk, HK projekt, 300 000 pozorování) → ukazuje se, že 75% slunci-podobných hvězd vykazuje aktivitu podobnou té sluneční

¹⁰⁵ dodnes zakreslování sluneční skvrn (započato Galileem, nejdelší fyzikální experiment, který stále běží - velmi dlouhá datová řada)

¹⁰⁶ říká o půlnoci, já našla 12 hodin světového času

¹⁰⁷ podle wikipedie se deklinace mění od +23°26'21" do -23°26'21"

Pulsující hvězdy:

- hvězdy nejsou statické, ale dynamické
- pulzace dávají informace o vnitřní struktuře (pulzace jsou vlastně oscilace)
- různé mechanismy pulsací:
 - záklopkový (κ mechanismus¹⁰⁸ - cefeidy, δ -Scuti hvězdy, miridy), vnitřní nestability
- radiální¹⁰⁹ (nafukování a vyfukování) × neradiální
- na HR diagramu je tzv. **pás nestability** – hvězda, která se nachází v tomto pásu, s největší pravděpodobností pulzuje

Helioseismologie:

- Slunce taky pulzuje (neradiálně – způsobeno konvekcí, která excituje tlakové vlny)
- jediná metoda, která nepřímou umožňuje vidět do nitra Slunce (struktura nitra, podpovrchové toky), a taky mapujeme dění na odvrácené straně (zvyšuje přesnost předpovědí kosmického počasí)
- perspektivní metoda slunečního výzkumu, stále ve vývoji od cca 60-tých let
- sledování odezvy hydrodynamických vln - inverzí pozorování dostaneme informace o poruchách, které ovlivňují šíření těchto vln
- globální (zkoumáme hvězdu jako celek, průměrné vlastnosti Slunce) × lokální (zkoumáme nějakou malou část)

Asteroseismologie:

- tatáž metoda může být aplikovaná i na jiné hvězdy (porovnáváme jiné hvězdy se Sluncem) – obdoba helioseismologie, pouze globální (vidíme hvězdu jen jako bod)
- pro asteroseismologii potřebujeme neradiální pulzace
 - přípovrchová konvekce se vyskytuje v „chladnější polovině“ HR diagramu, za tzv. **hranicí granule**
- problém: nemáme prostorové rozlišení (nemáme disk hvězdy, všechno je slité do jednoho bodu), máme pouze časové rozlišení (to získáme pomocí tzv. rychlé fotometrie)
- u červených obrů detekujeme smíšené módy, které umožňují sondáž jaderných oblastí (to u Slunce nelze)
 - umožňuje odlišit hvězdy spalující v jádře vodík a spalující helium (přesný indikátor věku hvězdy)
 - umožňuje měřit rotaci jádra (obvykle jádro rotuje asi 10x rychleji než obálka), ale znesnadňuje měření rotačního charakteru obálky (na to ale zase máme spektroskopii povrchu)
- můžeme měřit spektra oscilací (tj. jak moc hvězda osciluje na které frekvenci) - posun ve spektru odpovídá jiné vnitřní struktuře hvězdy
 - struktura hvězd slunečního typu i mnohé jiné typy hvězd
- stanovení fundamentálních parametrů osamělých hvězd (hmotnost, poloměr, střední hustota, stáří), stanovení vnitřní rotace, stanovení polohy rotační osy v prostoru (konec problému “sin i”) – a to se stejnou přesností, jako kdyby tyto hvězdy byly ve dvojhvězdném systému
- málo exemplářů (dat)

¹⁰⁸ mechanismus pulzací, při kterém se mění opacita – když je opacita menší, tak záření uniká a hvězda splaskává, když je opacita větší, tak se záření koncentruje uvnitř a hvězda se nafukuje než se zvýší teplota nad úroveň ionizace, hvězda zprůhlední a zase splaskne

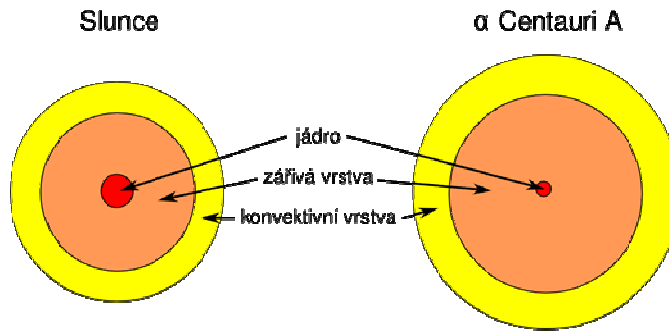
(při smršťování se energie spotřebovává spíše na ionizaci, než na zvyšování teploty \Rightarrow roste opacita, narůstající tlak plynu a záření způsobuje rozpínání vrstvy, během rozpínání dochází k rekombinaci a k uvolňování naakumulované energie, teplota neklesá tak rychle jako v okolí a společně s klesající hustotou to vede ke snížení opacity, tíha výše položeného materiálu převáží sílu směřující vzhůru a cyklus začíná znovu)

¹⁰⁹ obvykle je to tak, že je v nitru hvězdy nějaká chemická látka (iont, molekula), která cyklicky mění svůj stav (např. opacitu

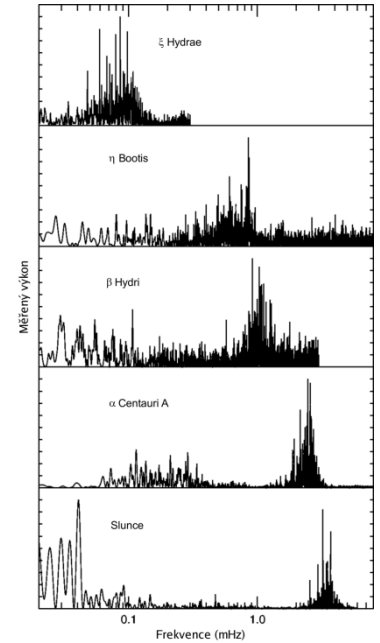
- př. Slunce vs. α Centauri A:

→ α Centauri je velmi podobná Slunci (i tak je posun je spektru oscilací výrazný):

→ o 10% těžší, o mnoho větší luminositá díky vyšší teplotě v nitru, tj. i malý nárůst hmotnosti způsobí velký rozdíl ve vnitřní struktuře (jádro je menší než u Slunce – dominuje tam CNO cyklus a ten je mnohem citlivější na teplotu, to způsobí, že je hvězda rozsáhlejší a má jinou vnitřní strukturu)



Hmotnost:	$1,98 \times 10^{30}$ kg	$2,19 \times 10^{30}$ kg
Svitivost:	$3,84 \times 10^{26}$ W	$5,93 \times 10^{26}$ W
Efektvní teplota:	5770 K	5790 K
Teplota jádra:	15,7 MK	19 MK
Hustota jádra:	152,7 g/cm ³	177,1 g/cm ³
Teplota KZ:	2,18 MK	1,89 MK
Metalicita:	0,01694	0,0334



Joviseismologie:

- tatáž metoda pro plynné planety
- pozorovány volné (jasové) oscilace plynné obálky Jupiteru

Sluneční oscilace a helioseismologie¹¹⁰

Sluneční oscilace:

- objeveny v 60-tých letech 20. století Leightonem v dopplerogramech a o pár let později byly interpretovány jako stojaté vlnění - jako interference mnoha módů vln

→ způsobuje hřebeny ve výkonovém spektru = **rezonanční módy**

→ pouze ty, které mají vhodnou disperzní relaci, se skládají konstruktivně

- vznik vln: odezva na hydrodynamické poruchy v prostředí (chaotická konvekce poskytuje takových poruch nespočetně)

- vlny detekujeme tak, že při svém šíření narušují lokálně rovnováhu (např. změni teplotu¹¹¹, tlak, hustotu), nebo je můžeme pozorovat v dopplerogramech

- vneseme-li do rovnic vnitřní struktury poruchu (fluktuaci), můžeme nalézt oscilující řešení

→ obvykle řešení charakteru vlny s nějakou typickou frekvencí (frekvence silně závisí na struktuře Slunce)

- různé vlny pronikají do různé hloubky - kratší vlnové délky neproniknou tak hluboko, naopak delší ano

→ umožňuje studovat různé hloubky slunečního nitra = **helioseismologie** – jediný způsob, jak se podívat do slunečního nitra na základě pozorování (všechno ostatní jsou jen modely)

- vlny – vlna může po jednom oběhu (jeden oběh trvá typicky několik desítek minut) potkat samu sebe a interferuje - takto vznikají **stojaté vlny** (při konstruktivní interferenci)

→ jen ty se dlouhodobě uchovají

→ jsou velice dobře vidět ve slunečních pozorování, a je tedy možné velice přesně měřit jejich frekvence¹¹² (a ty jsou právě citlivé na stavbu nitra)

- v závislosti na typu řídicí síly, která vyvolá tu poruchu, rozlišujeme několik typů vln (na Slunci 3 typy):

→ **g-módy = (vnitřní) gravitační** – v konvektivně stabilním prostředí (nitro), dojde k náhodné výchylce, která způsobí vzestup elementu hmoty, výchylka se utlumuje, až element začne zase klesat, ale přestřelí a vzniká kmitavý pohyb¹¹³; zatím nepozorované (nebo alespoň ne dostatečně průkazně)

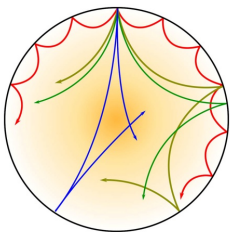
→ **p-módy = zvukové (tlakové)** – v konvektivně nestabilním prostředí, v konvektivní vrstvě jsou oblasti s nadzvukovou rychlostí, vzniká sonický třesk¹¹⁴ a vzniklé vlny (??ten kužel??) se šíří konvektivní vrstvou; na rozdíl od g-módů mají i horizontální část (ta je u g-módů irelevantní)

→ **f-mód¹¹⁵ = povrchové gravitační** – vlny na povrchu, fyzikálně podobné vlnám na moři

→ nejsilnější p-mody s periodou 296 s (necelých 5 minut, interference 107 různých módů)

→ u hvězd slunečního typu jsou tyto tři módy odděleny (lze je detekovat zvlášť), např. u rudých obrů jsou tzv.

smíšené módy (kombinace g a p, konvertují mezi sebou)



¹¹⁰ část informací je z přednášky M. Švandy 5. 1. 2018 na Pátečnicích a část z wikipedie

¹¹¹ pokud se to stane někde na povrchu, pak můžeme v daném místě pozorovat zjasnění

¹¹² nejpřesnější měření v astronomii vůbec (přesnost 10^{-5})

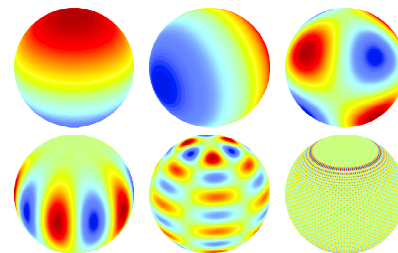
¹¹³ nevybublá až nahoru, proto to není konvekce

¹¹⁴ sonický (aerodynamický) třesk = vzniká, když je rychlost zdroje zvuku větší nebo rovna rychlosti zvuku; čelní plocha rázové vlny je místem nespojitosti fyzikálních veličin (skoková změna hustoty, tlaku,...), přestáváme tedy hovořit o mechanickém vlnění (tlaková vlna naráží do nepřipraveného prostředí, není to pozvolná změna tlaku)

¹¹⁵ jeden mód – na rozdíl od p-módů nemá závislost na n

- vlny na kouli rozložíme do jednotlivých módů tak, že je rozložíme do sférických harmonických funkcí (kulové funkce) = **prostorové vlny**

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} \exp(im\phi) P_l^m(\cos\theta)$$



→ popisujeme je pomocí 3 čísel:

l = celkový počet uzlových křivek v úhlovém směru

m = počet uzlových křivek v úhlovém směru, které prochází pólem

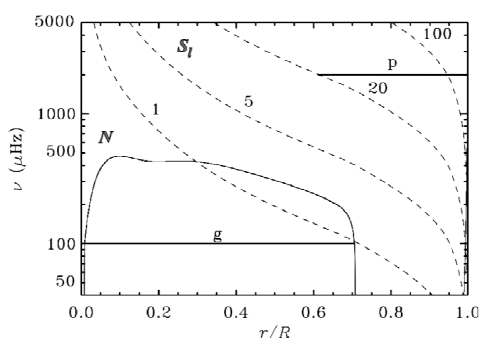
n = počet uzlových křivek v radiálním směru

- díky rozdílné rychlosti zvuku v různých hloubkách se při šíření vln aplikuje Snellův zákon (zákon lomu)

→ vlny, které se šíří dolů, se odchylní směrem od centra (od radiálního směru, zpět k okraji), až v jednom místě dojde k úplnému odrazu, a pak se znovu odrazí, když dojde k okraji Slunce (a toto celé se opakuje)

→ vlny s nižším *l* pronikají hlouběji, ale obtížněji se pozorují (jednotlivé body odrazu jsou daleko od sebe) – můžeme pozorovat vlny s frekvencí vyšší než 1 mHz

→ hranice šíření vln: (*papír*)



Výkonové spektrum:

- výkonové spektrum udává rozložení výkonu signálu podél frekvenční osy

- máme-li dlouhodobá sluneční pozorování s prostorovým rozlišením (v nějakém zorném poli)

- výkon vlny: (není to výkon jako ve watttech, ale dá se to z toho spočítat)

→ máme-li data¹¹⁶ $\Phi(x, y, z, t)$ na kouli nebo ploše, pak výkon spočítáme jako:

$$P = |\tilde{\Phi}|^2 = \tilde{\Phi} \cdot \tilde{\Phi}^*$$

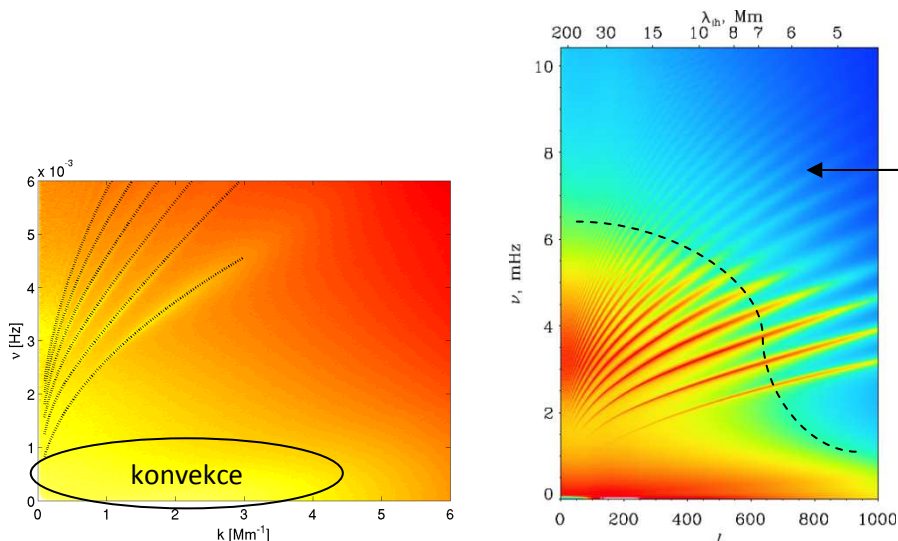
$$\text{kde: } \tilde{\Phi} = \text{FT}(\Phi(x, y, z, t))$$

- *k- ω* (*l-v*) diagram: *k* = vlnové číslo, *l* = počet uzlových rovin (každá vlna se rozloží na jiný počet bázových vln), souvisí s λ

→ na ose *x* je prostorová frekvence, na ose *y* je časová frekvence

→ $\omega = 2\pi\nu$ (vyjadřuje „probíhání podél vlny“ bez ohledu na to, jak je ta vlna natažená, tj. jaká je její vlnová délka)

¹¹⁶ může to být intenzita světla, může to být rychlost z dopplerogramu – jakýkoliv obecný signál, který je ovlivněný tím vlněním



vlny, které projdou do atmosféry

→ vlny od druhého hřebene nahoru jsou zvukové, první hřeben to jsou povrchové gravitační vlny a dole je konvekce

disperzní reace: $\omega = \omega(k) = 2\pi\nu(k)$

$$\rightarrow v_f(k) = \frac{\omega(k)}{k}$$

$$\rightarrow v_g(k) = \frac{d\omega(k)}{dk}$$

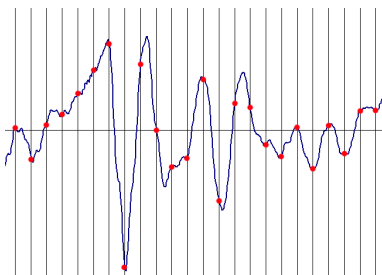
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega(k)}{v_f(k)} \Rightarrow \lambda = 2\pi \frac{v_f(k)}{\omega(k)} = \frac{v_f(k)}{\nu(k)} \rightarrow v_f(k) = \lambda \nu(k) = \frac{\lambda}{T(k)}$$

- kdyby na Slunci nebyli rezonanční módy (stojaté vlnění, to jsou ty hřebeny), byl by ten diagram vyplněn celý víceméně rovnoměrně

- vidíme jen vlny uvězněné pod povrchem a ne všechny se od povrchu odrazí zpátky, některé projdou do atmosféry (vlny s frekvencí nad asi 5 mHz) a ty nejsou vidět ve výkonovém spektru

- hřebeny jsou různě široké – to souvisí s dobou života toho módu (čím déle pozorujeme, tím je hřeben užší, ale nejde ho zužovat do nekonečna – sama vlna má nějaké trvání a čím déle mód žije¹¹⁷, tím je hřebínek širší) – to souvisí se **vzorkovacím teorémem** (*papír*) = jak spolu souvisí rozlišení v časové a frekvenční oblasti

→ **vzorkování signálu**¹¹⁸ je proces jeho diskretizace v časové oblasti (počítače mají pouze konečnou kapacitu paměti a ani nejsou nekonečně rychlé, musíme se omezit pouze na nezbytně nutné množství vzorků, které budeme dále zpracovávat) - provede se to tak, že rozdělíme vodorovnou osu signálu (např. čas) na rovnoměrné úseky a z každého úseku odebereme jeden vzorek, tj. z původního signálu ztratíme mnoho detailů, dostáváme pouze množinu diskrétních bodů s intervalem odpovídajícím použité **vzorkovací frekvenci**



¹¹⁷ dáno parametry nitra

¹¹⁸ zdroj wikipedie

→ **Nyquistův (Shannonův, Kotělnikovův) vzorkovací teorém** říká, že dokonalá rekonstrukce signálu je možná pouze tehdy, když je vzorkovací frekvence větší než dvojnásobek maximální frekvence vzorkovaného signálu, neboli když Nyquistova frekvence (polovina vzorkovací frekvence) je vyšší než nejvyšší frekvence vzorkovaného signálu¹¹⁹. Při použití nižší vzorkovací frekvence se po převodu zpátky na analogový signál mohou v důsledku aliasingu¹²⁰ objevit ve výsledném signálu frekvence, které v původním signálu nebyly.

Rotační rozštěpení:

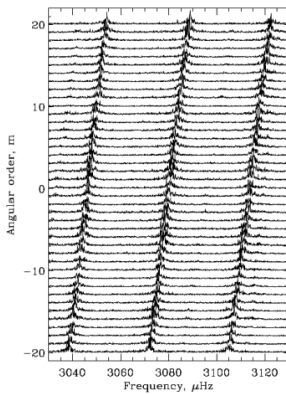
- podobně jako mag. pole způsobuje rozštěpení spektrálních čar, tak rotace rozštěpuje ty hřebeny ve výkonovém spektru

- z výkonového spektra je možné určit rychlost rotace Slunce

→ pokud nemáme rotaci, pak pro různá m v Y_l^m dostaneme stejný výkon; s rotací dostáváme pro různá m různé hodnoty Y_l^m

→ rotace rozdělí ω_{nl} na ω_{nlm} , $\Delta\omega_{nlm} = \omega_{nlm} - \omega_{nl0}$

→ úhlová rychlost Ω je úměrná $\Delta\omega_{nlm}/m$



→ náhodné pohyby způsobí rozštěpení hřebínku na tři

→ pokud je tam navíc systematický pohyb, dojde k posunu – pro dané k (resp. l) se změní ω , protože se změní v_f (není to posun, který by rostl v čase, jsou to nakopírované stále stejné úseky za sebou – posunutí prvního způsobí ještě větší posunutí druhého)

Disperzní relace: (papír)

- obecná: $k_r^2 = \frac{\omega^2 - \omega_c^2}{c^2} + \frac{S_l^2}{c^2 \omega^2} (N^2 - \omega^2)$

- p-módy: $\omega^2 = \omega_c^2 + k^2 c^2$ ($k_r^2 > 0, N^2 < 0$)

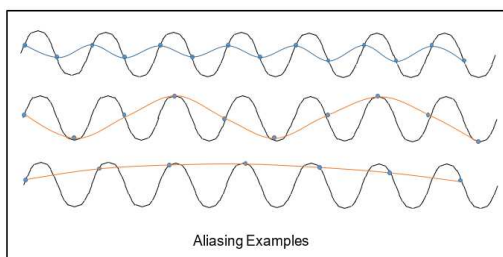
g-módy: $\omega^2 = N^2 \cos^2 \theta$ ($k_r^2 > 0, N^2 > 0$)

f-mód: $\omega^2 = k_h g$ ($\Delta P = 0$)

- bod obratu: $k_r^2 = 0 \rightarrow \frac{c(r_t)}{r_t} = \frac{\omega}{\sqrt{l(l+1)}}$

¹¹⁹ př.: rozsah lidského sluchu je 20 Hz až 20 kHz, tj. maximální frekvence signálu, který ucho zachytí je 20kHz. Minimální vzorkovací frekvence, která splňuje vzorkovací teorém pro tuto šířku pásma je 40 kHz. Z tohoto důvodu byla pro kompaktní disky zvolena vzorkovací frekvence poněkud vyšší, a to 44,1 kHz

¹²⁰ aliasing (falšování) = původní frekvence spojité informace je vzorkováním zcela zfalšována



Inverze:

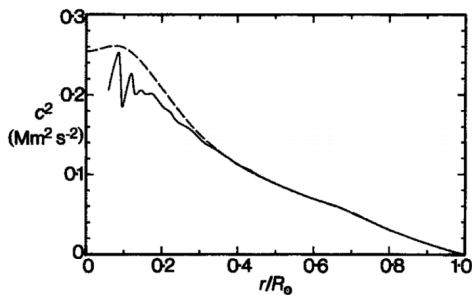
= z pozorování určujeme volné parametry modelu (obvykle se z modelu počítá, co by se mělo pozorovat – zde je to naopak, proto inverze)

- většinou nejde dělat analyticky

- **Duvalův zákon** (*papír*) = po přidání konstanty si na sebe hřbety p-módů v k- ω diagramu „sednou“ (důsledek toho, že to všechno jsou zvukové vlny a tedy mají stejnou disperzní relaci)

→ existence Duvallova zákona umožňuje stanovit disperzní relaci a tu invertovat

→ lze (analyticky) invertovat a za předpokladu monotónní fce $c(r_t)$ získat profil rychlosti zvuku ve slunečním nitru

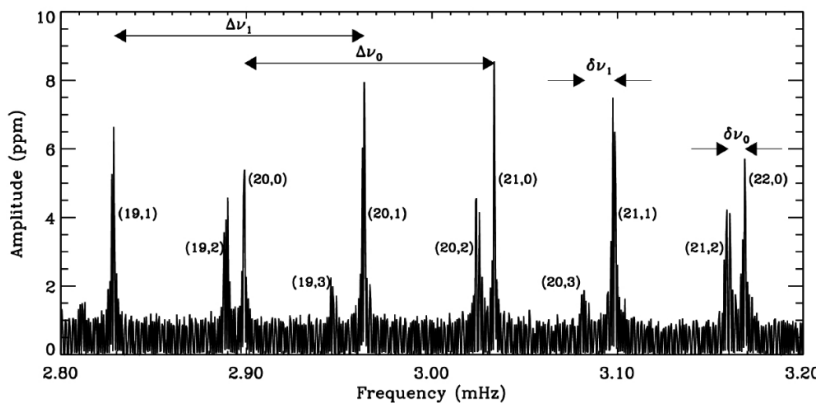


→ ukazuje rozdíl mezi modelem (čárkovaně) a inverzí (plně)

→ v nitru je shoda horší, protože tam ta měření jsou zatížena velkými chybami (hůř se měří) a současně i model je vnitru méně přesný (vstupují tam různé jiné efekty)

Velká a malá separace:

- zdá se, že pětiminutové p-módy jsou ekvidistantní (na výšku ve výkonovém spektru) pro malé l (0-3), tj. mají ekvidistantně vzdálené frekvence



- dvě význačné vzdálenosti:

→ **velká separace** = mezi vlnami, jejichž řád se liší o 1, ale mají stejné l , tj. (n, l) a $(n + 1, l)$ (sousední hřebínky na stejném l)

- velikost velké separace je velmi citlivá na střední hustotu hvězdy (dají se takto vážit osamocené hvězdy nebo pokud máme odhad hmotnosti, lze určit, jak jsou velké)

→ **malá separace** = mezi vlnami, kdy řád je o 1 větší, ale l je o 2 menší, tj. (n, l) a $(n + 1, l - 2)$

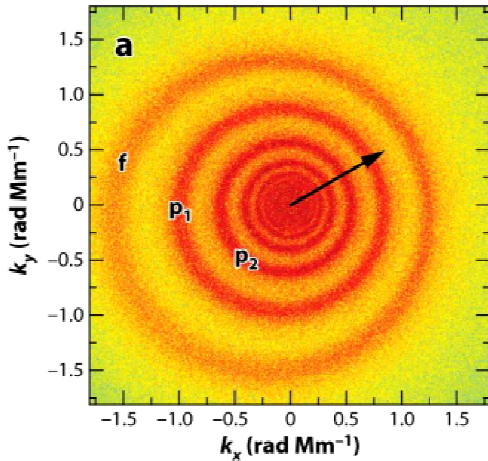
- malá separace je citlivá na rychlost zvuku u centra (citlivé na zastoupení vodíku a to závisí na věku hvězdy, lze tedy takto odhadnout stáří hvězdy)

- helioseismologie rozhodla na základě pětiminutových oscilací, že neutrinový problém je problém částicové fyziky a ne modelu Slunce

→ pomocí malé separace se podařilo některé modely vyloučit

Ring-diagram:

- týká se lokální helioseismologie (tj. lze dělat jen na Slunci)
- povrch Slunce rozdělíme na jednotlivé úseky a na každém úseku spočítáme výkonové spektrum
 - pro každý úsek máme frekvenci, vlnový vektor ve směru osy x a vlnový vektor ve směru osy y
- zkoumá se dvěma způsoby:
 - řez konstantním ω - dostaneme kružnice (resp. elipsy)



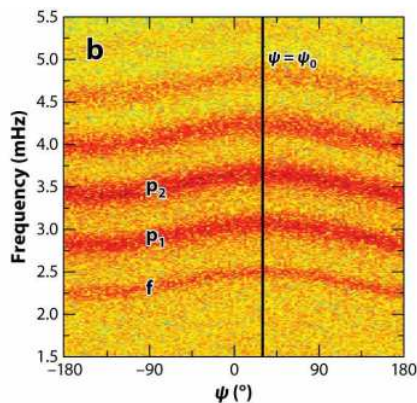
→ elipsy nejsou soustředné kvůli Dopplerově posuvu, způsobený tečením plazmatu (do fáze rychlosti v_f se promítá i unášivá rychlost plazmatu v)

$$\frac{\omega(k)}{k} = v_f(k) = v_{f0} + v$$

→ z toho, na kterou stranu jsou elipsy protáhlé lze určit směr tečení plazmatu

→ z toho, jak moc jsou deformované, lze určit rychlost plazmatu

→ uděláme průměr z $k = \text{konst.}$ (polární souřadnice – procházíme elipsy od 0 do 2π , na osu y vynášíme vzdálenost od středu)

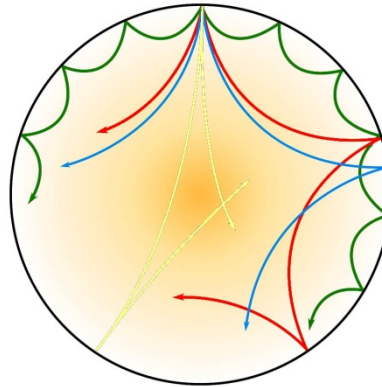
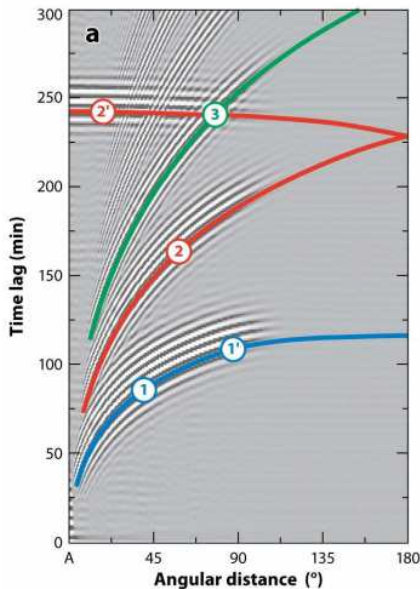


→ každá frekvence je Dopplerovým posuvem trochu posunutá směrem nahoru, z toho určíme rychlost plazmatu a z pozice hrbu určíme úhel, pod kterým to teče

Time distance (analýza cestujících vln) (papír)

- opustíme rezonanční vlny (strukturální inverze), tj. 1D modely
- dynamické dění ve 3D
- měří se vzdálenost a cestovní čas vlny (čas průchodu vlnového balíku mezi dvěma body)
 - **cestovní čas** = maximum časové kroskorelace filtrovaných oscilací mezi dvěma body
 - cestovní čas je závislý na rychlosti zvuku a rychlosti podpovrchového proudění
- vlny, které procházejí anomálií, jsou v pozorování porušeny – anomálie ovlivňují rychlost jejich šíření
- můžeme měřit čas průchodu vlny nitrem v závislosti na vzdálenosti (hloubce prostupu)
 - inverzí lze získat informace o struktuře poruch, tj. o dynamice plazmatu pod povrchem

- ze zdroje se šíří celé spektrum vln – každá se šíří jinak (např. v závislosti na vlnové délce)
 - vlny, které se neodrazí ani jednou přijdou nejdříve, ty co se odrazí jednou přijdou později, atd.
 - ty co se odrazí jednou, přijdou později než ty, které se neodrážejí, protože vlny, které pronikají do větší hloubky, cestují rychleji
 - f a p-módy mají typickou dobu mezi dvěma odrazy zhruba 20 minut, měříme sekundové poruchy (ale je tam velký šum, tj. možná nevěrohodné??)



- nemusíme dělat celé výkonové spektrum, ale můžeme si vybrat jen ty vlny, které nás zajímají (fázově-rychlostní filtry, hřebenové filtry,...)
- dnes se zahrnují i vlnové efekty do prvního řádu (ne paprsková aproximace, ale vlna), informace o vlastnostech náhodného šumu

Helioseismická holografie:

- = mapování odvrácené strany Slunce
- lze předpovídat velké skvrny a tedy teoreticky i erupce

Reziduální velkorozměrové toky:

- od pozorovaných toků na povrchu celého Slunce a odečteme rotaci a podobně, zbyde např. proudění plazmatu pod povrchem
- z toho se usuzují vazby mezi mag. polem a prouděním

Pod skvrnou:

- můžeme zkoumat, co je pod skvrnou
- inverze pro skvrnu z 20. 6. 1998 použita time-distance v paprskové aproximaci, metoda RLS (*papír*)
 - konvergentní toky udržují skvrnu stabilní
 - tahle inverze ale ignorovala 90% fyziky (nevhodný model, paprsková aproximace, ignorovalo to magnetické pole!)

- obecně se tvoří hloubkové mapy rychlosti zvuku - pokud by tam platila stavová rovnice plynu, pak by ta rychlost zvuku odpovídala teplotě (dostaneme soulad s představou, že skvrna vychládá, protože mag. pole blokuje proudění tepla z nitra)

- problém: inverzní metody jsou matematické metody, inverzní problém lze zřídka řešit přesně (v helioseismologii nikdy) – řeší se to aproximativně a tím tam vnášíme spoustu předpokladů

→ předpoklady:

- linearizace přináší jen malé chyby (poruchy jsou malé), tj. hledáme přesné řešení jen v prvním řádu
- problém je separabilní v prostoru poruch (můžeme udělat zvlášť inverzi pro hustotu, pro rychlosti zvuku, pro tlak... a dostaneme stejný výsledek), není tam přeslech (cross-talk??)
- známe přímý problém (tj. dokážeme modelovat šíření vln v idealizovaném prostředí)

→ kompromisy:

- realistický problém je obří - velké množství pozorování znamená velké množství volných parametrů – přesné řešení by znamenalo inverzi matice s $(10^7)^2$ prvků \Rightarrow zjednodušení např. předpoklad translační invariance (symetrie vůči posunu – funguje dobře v oblastech klidného Slunce, nefunguje v místech, kde jsou skvrny), osekání problému redukcí proměnných atd.
- numerické problémy (špatně podmíněná nebo singulární matice) - řešení je regularizováno dodatečnou podmínkou (požaduje se hladkost nebo omezující podmínka na tvar lokalizační funkce nebo omezení přenosu šumu)

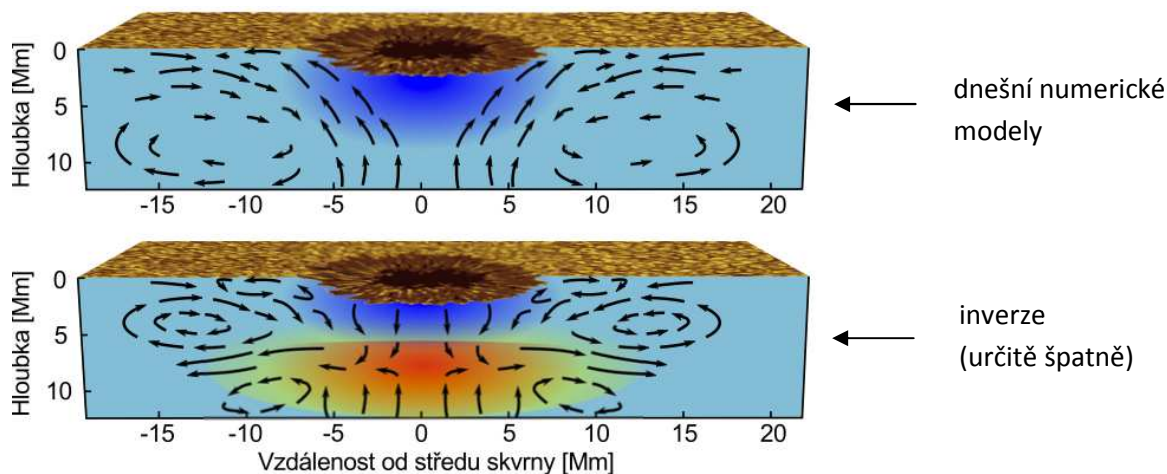
Iregularizační podmínky jdou často proti sobě (obvykle například nemůžeme současně dostat velice dobré prostorové rozlišení a současně dobrý poměr signálu k šumu)

- v případě skvrn byla spousta předpokladů narušena (ve skvrnách inverzní metody ignorují 90 % fyziky!)

→ předpoklad lineárních vln narušen! (vliv mag. pole na oscilace není malý, je dominantní; vliv poruch mag. pole není lineární)

→ předpoklad translační invariance narušen!

→ (dostatečně dobře) neznáme přímý problém



- o správnosti lze rozhodnout pouze na základě nezávislého pozorování, které nemáme - máme pouze pozorování z povrchu, která jsou pro oba modely stejná

Sluncetřesení:

- velká erupce může způsobit vlny na povrchu (jako když hodíme kámen do vody, podobné f-módu (liší se v disperzní relaci, je to jako vlny na vodě způsobené větrem a vlny způsobené hozením kamene)