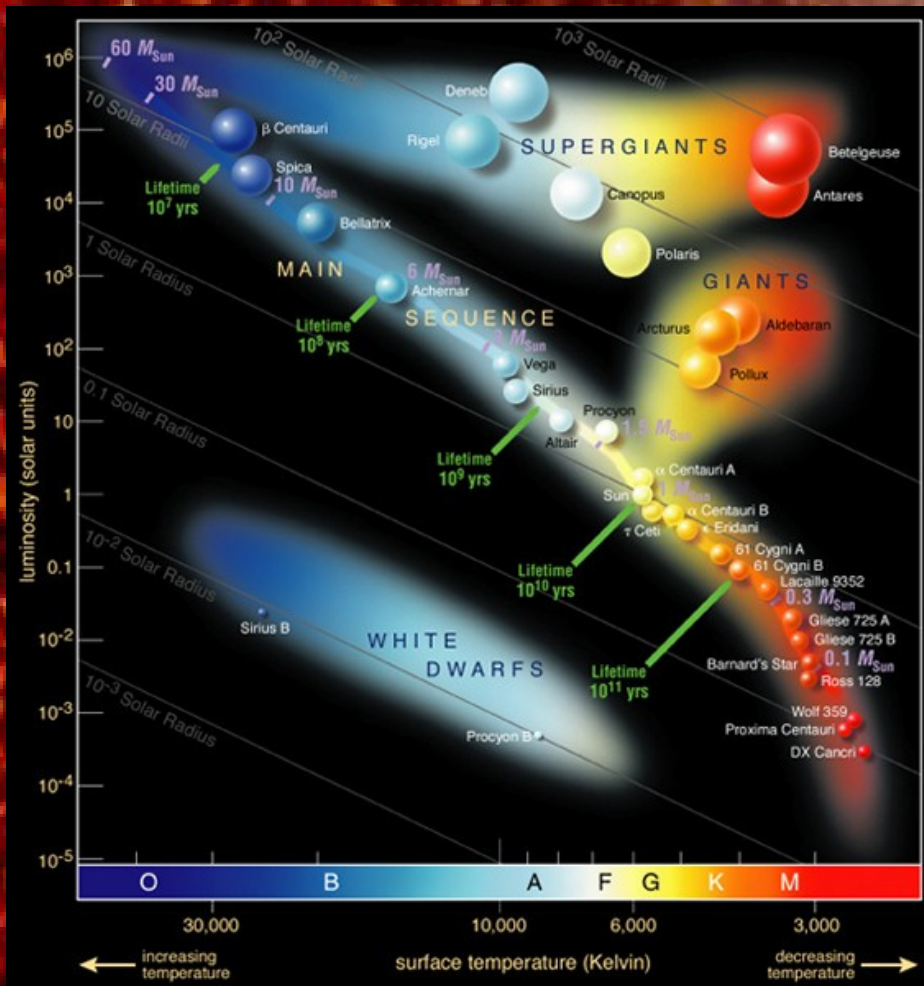


Struktura a dynamika sluneční fotosféry

Michal Šanda

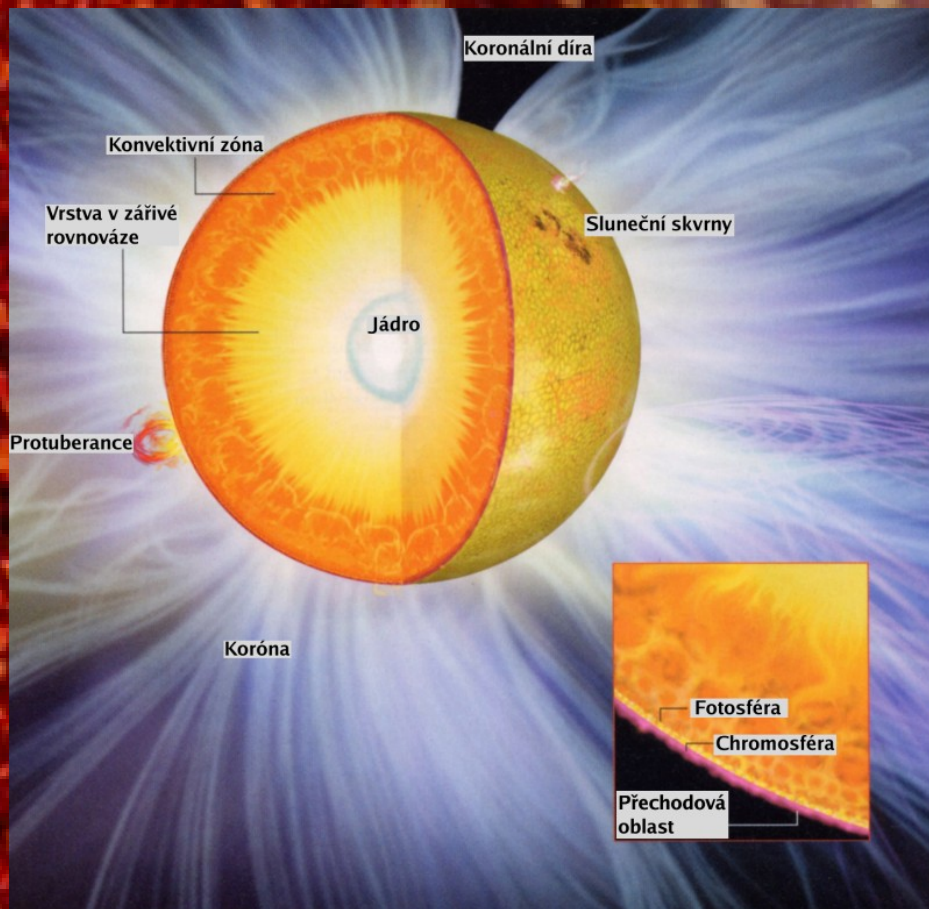
**Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov
Astronomický ústav Univerzity Karlovy, Praha**

Slunce jako hvězda



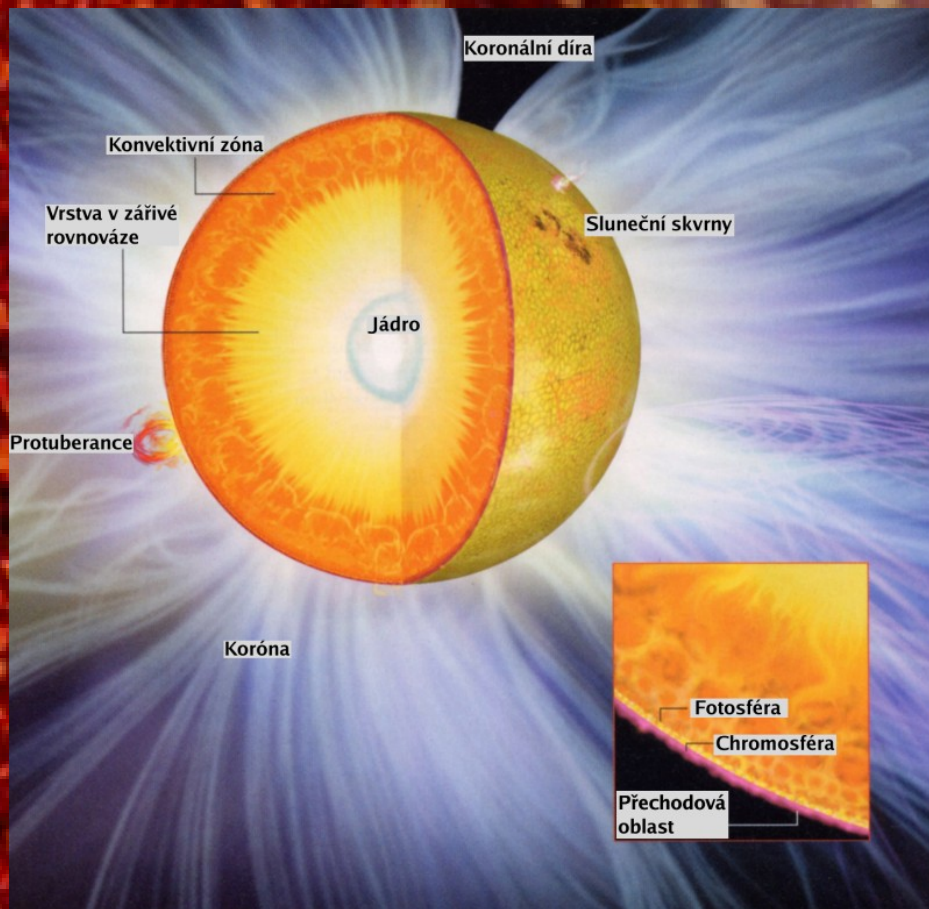
- Spektrální třída G2V
- $T_{\text{ef}} \sim 5700 \text{ K}$
- $M = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
- $R = 695\,000 \text{ km}$
- $L = 4 \times 10^{26} \text{ W}$
- Celkově hvězda mírně nadprůměrná

Sluneční nitro (1)



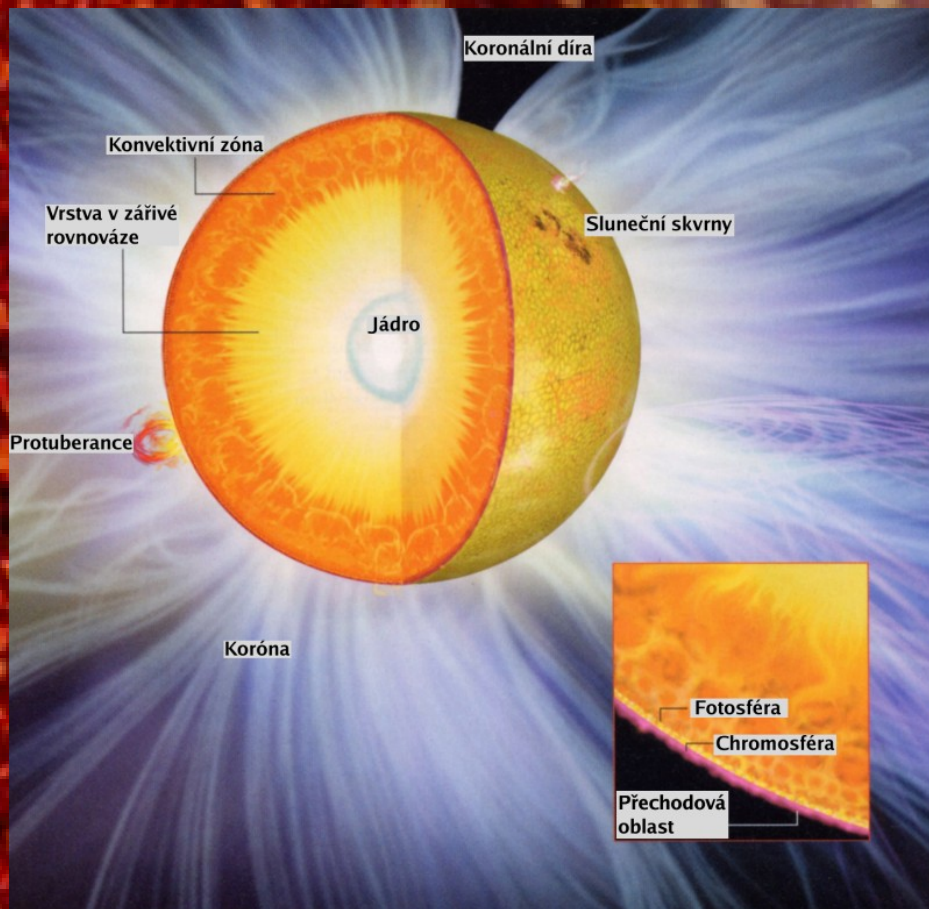
- **Jádro:**
 - $T_c = 15,7 \text{ MK}$, $15 \% R$,
 - $\rho_c = 250 \times 10^9 \text{ atm}$, $3 \% V$
- **Oblast termonukleárních reakcí**
- **Vrstva v zářivé rovnováze, průhledná**

Sluneční nitro (2)

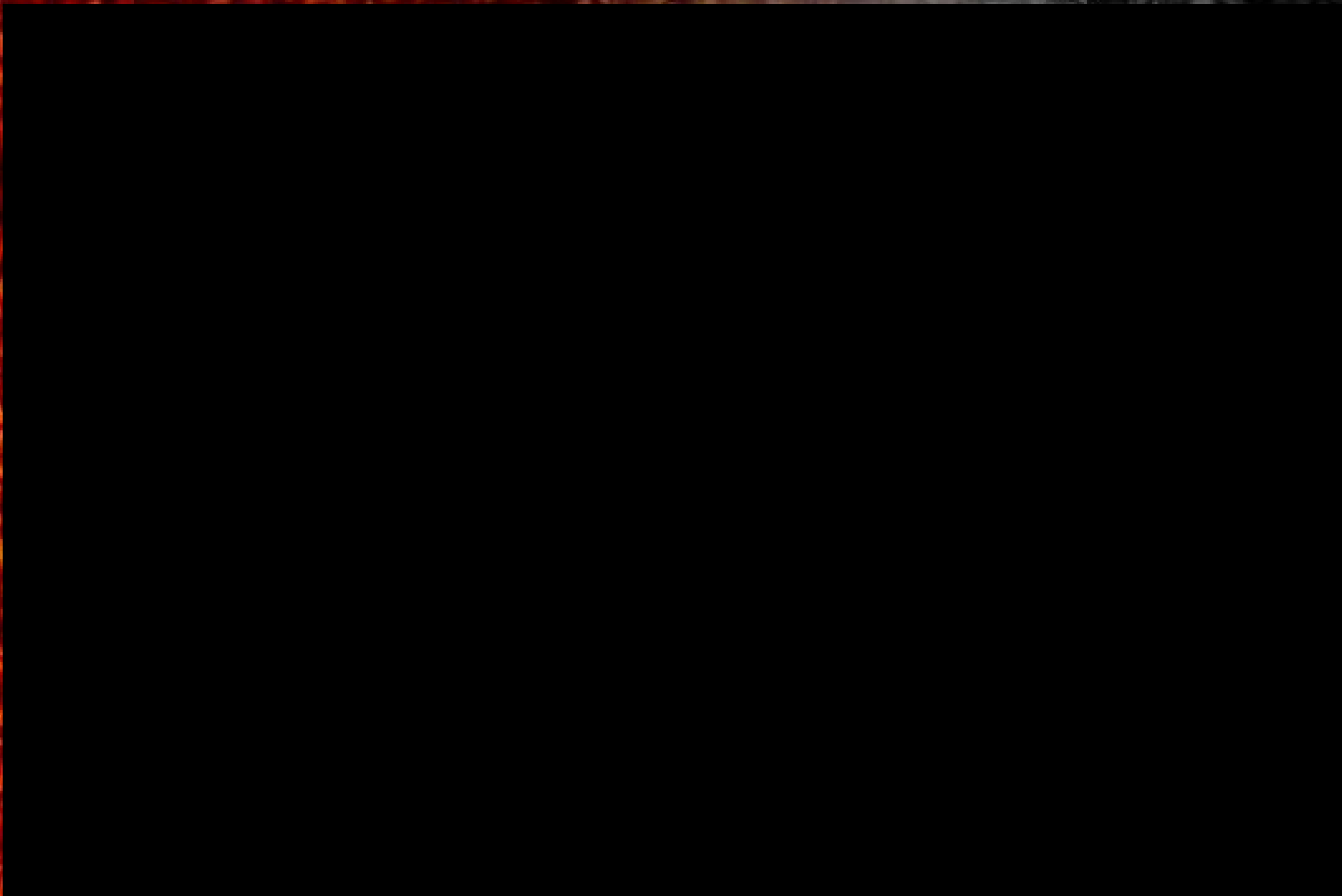


- Na cca 70 % R se mění způsob přenosu E
- $T_{kz} = 200\,000\text{ K}$, vodík částečně rekombinuje
- Podpovrchová konvektivní zóna

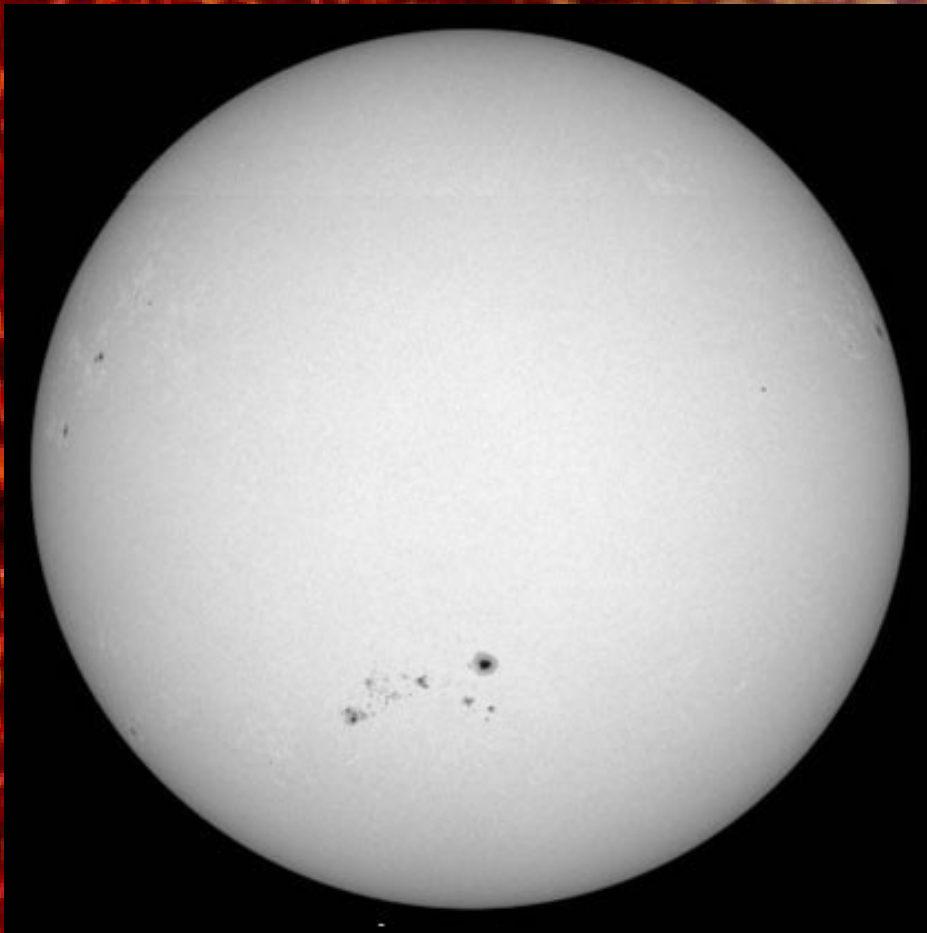
Sluneční atmosféra



- Fotosféra (teplotní minimum, tenká)
- Chromosféra (růst teploty)
- Koróna (2 MK (částice), řídká, není v TE)

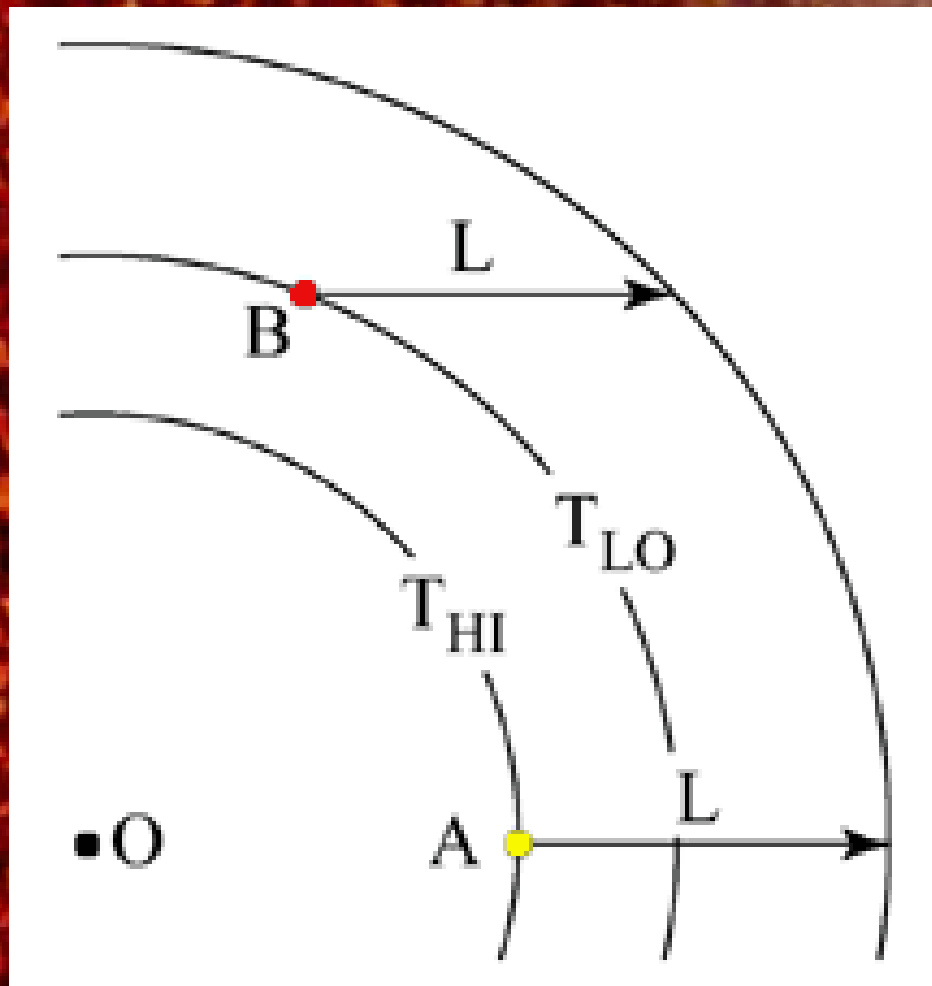


Fotosféra



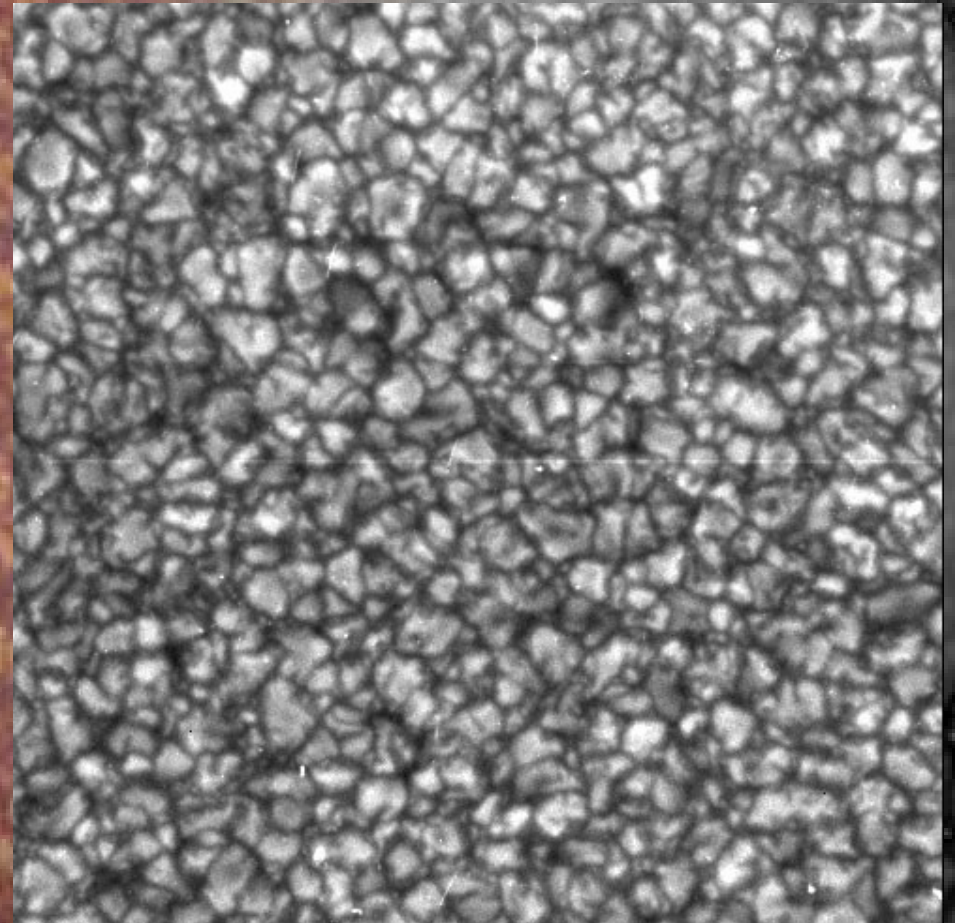
- Tenká (300 km) vrstva s teplotním minimem
- Pozorovatelná v bílém světle
- Velké množství útvarů

Okrajové ztemnění

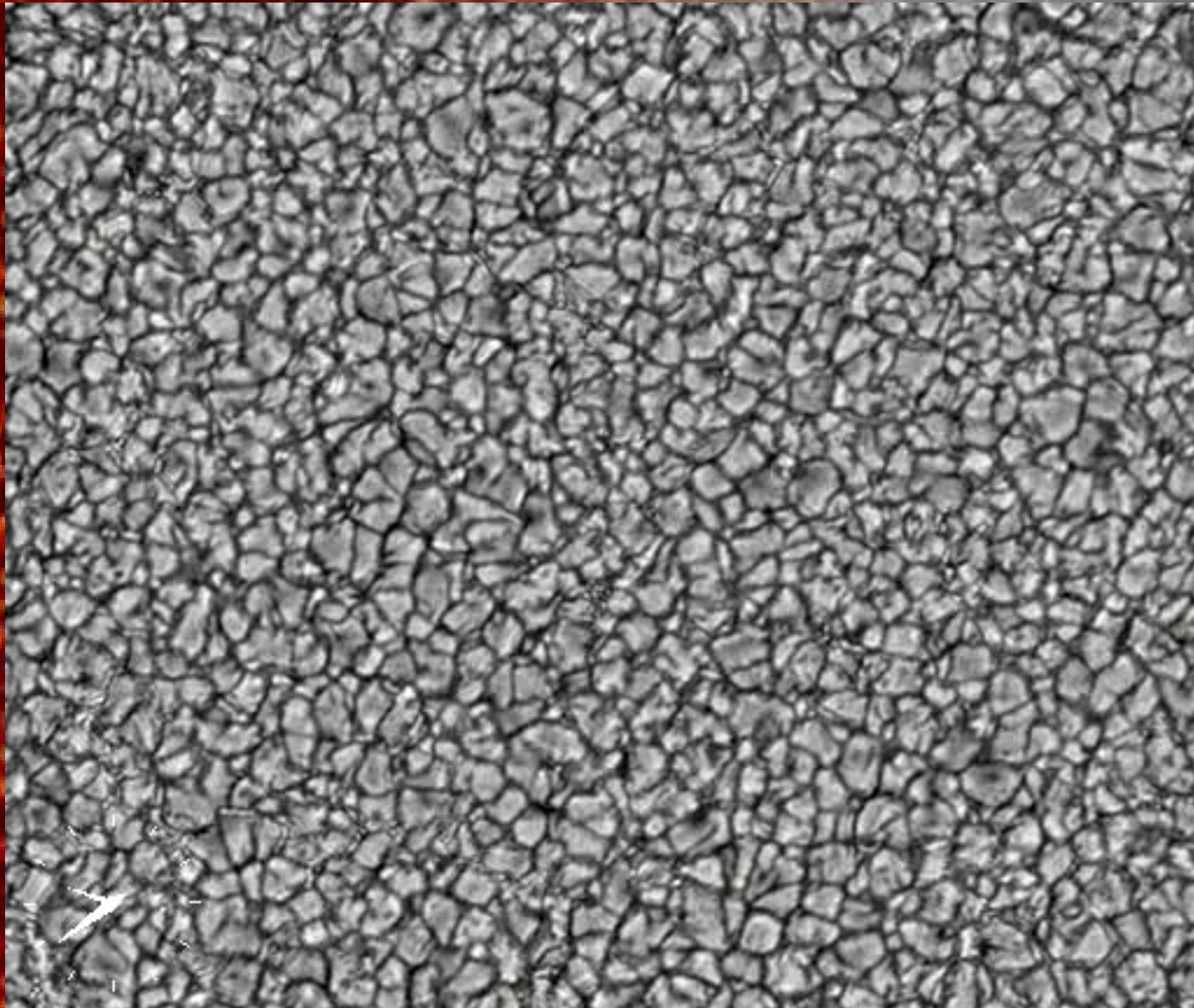


Granulace (1)

- Konvektivní buňky, velikost ~ 1000 km, životnost 3—10 min.
- Vršičky turbulentní konvekce

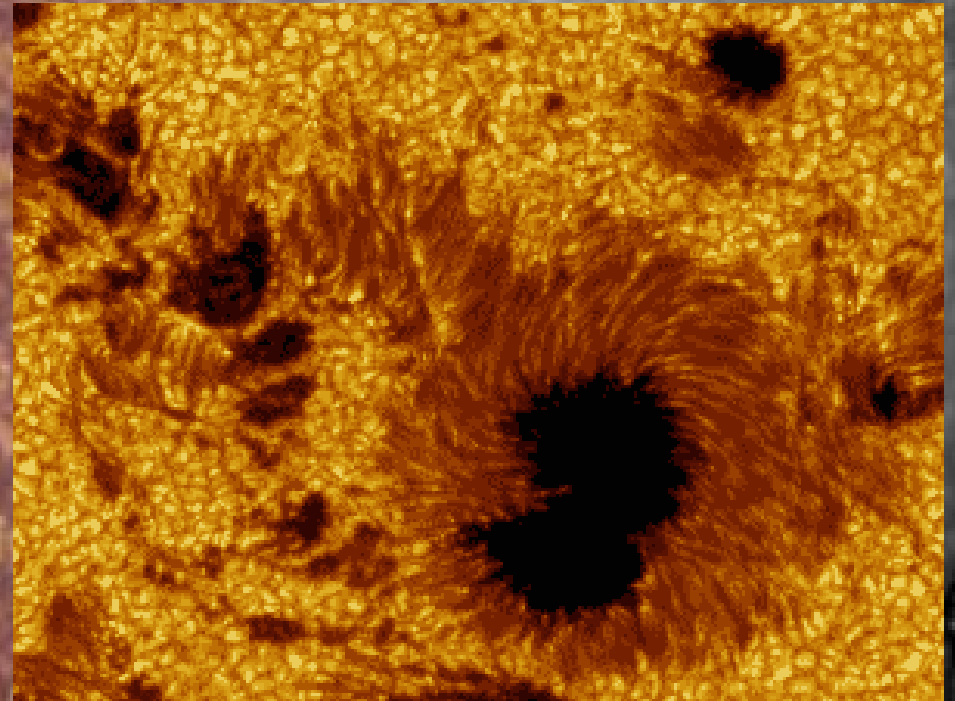


Granulace (2)



Magnetické elementy: Sluneční skvrny (1)

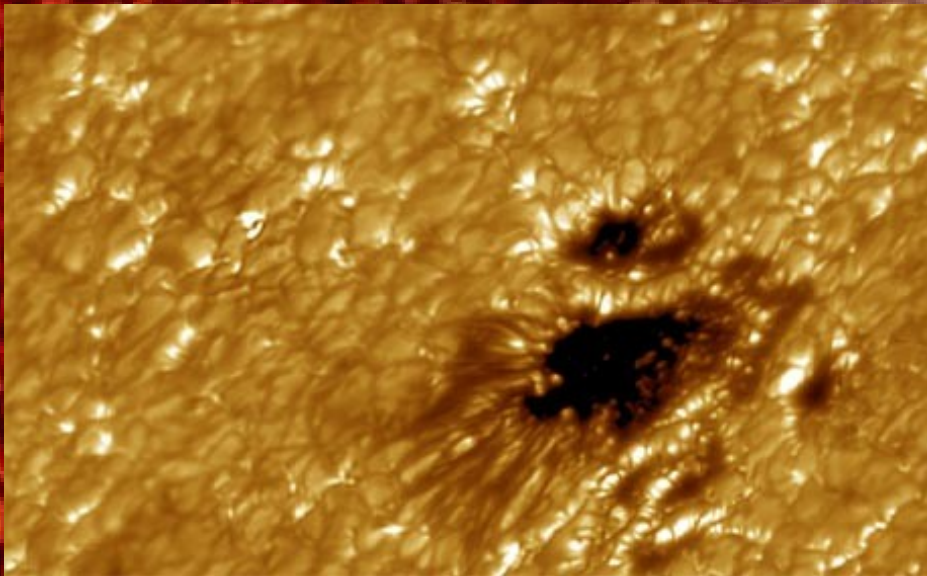
- Tmavé protože chladné, chladné, protože mg. pole
 - mg. pole v plazmatu „zmrzlé“ -- nemůže se pohybovat napříč polem, ale musí jen podél



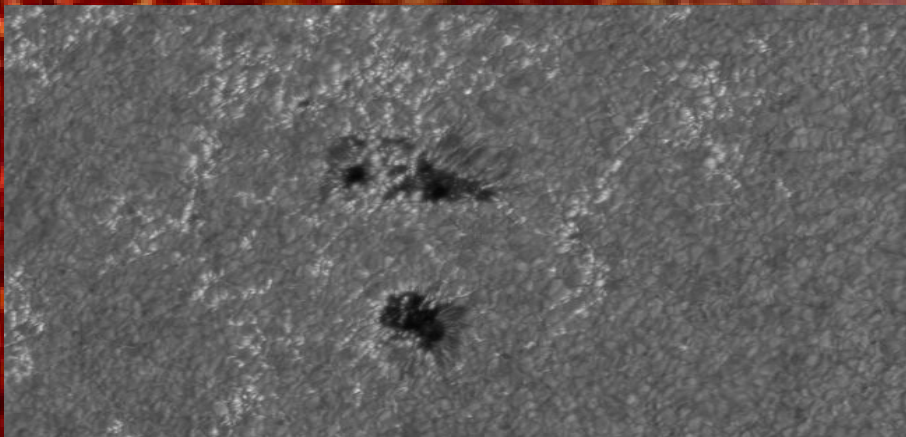
Magnetické elementy: Sluneční skvrny (2)

- Magnetické pole koncentrováno – mění směr na tečný k fotosféře, plazma pohyb pouze podél, ne přes – omezení příčných pohybů – omezení toku tepla z nitra ven
- Ochlazení skvrny až o 1500 K oproti okolí (umbra) nebo o 700 K oproti okolí (penumbra)
- Složitá struktura i vývoj (bude dále)

Magnetické elementy: Fakule



- Vlákenné struktury (limb)
- Granule v mg. oblastech vyvýšeny, okraje horké
- Plocha – fakule vždy cca 4x víc, než skvrny – i přes tmavé skvrny nárůst jasů o cca 0,1 %

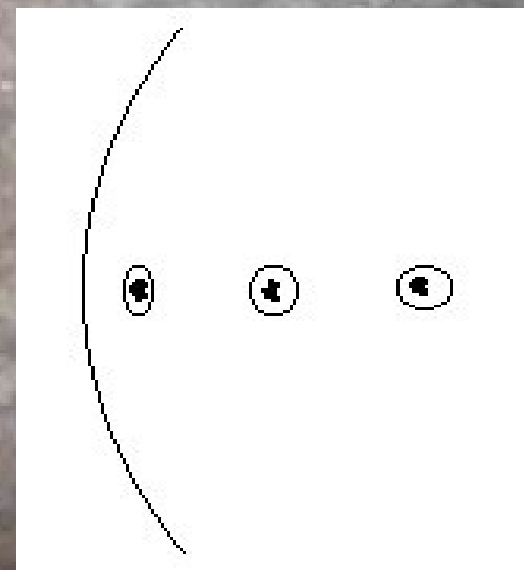


Sluneční skvrny (1)

- Chladné útvary ve fotosféře, vznikají působením dvou vlivů:
 - **Potlačení tepelného přenosu energie z nitra**
 - Termodynamické ochlazení – magnetické pole se rozevírá, plazma zvětšuje adiabaticky svůj objem a tudíž se ochlazuje

Sluneční skvrny (2)

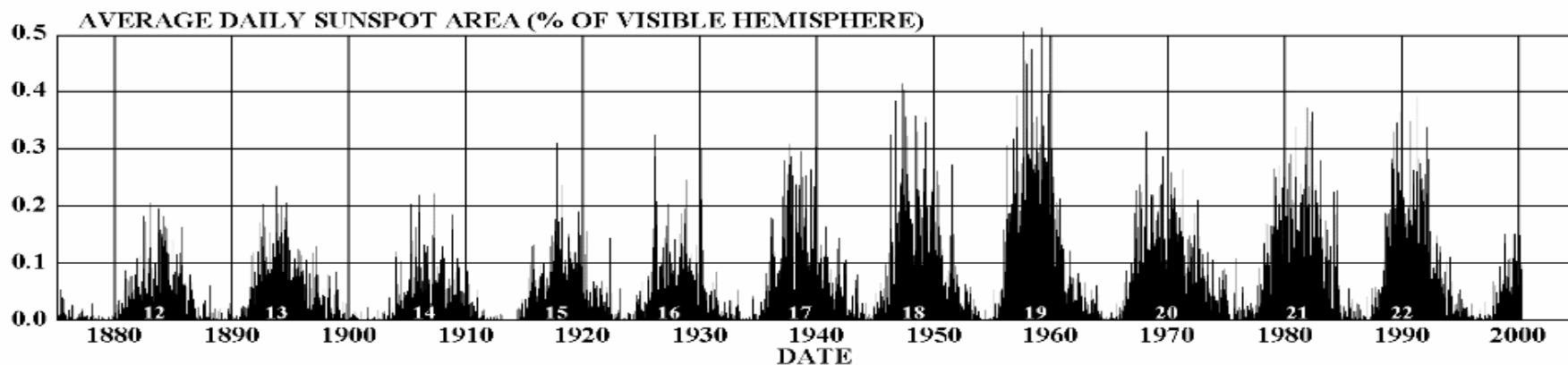
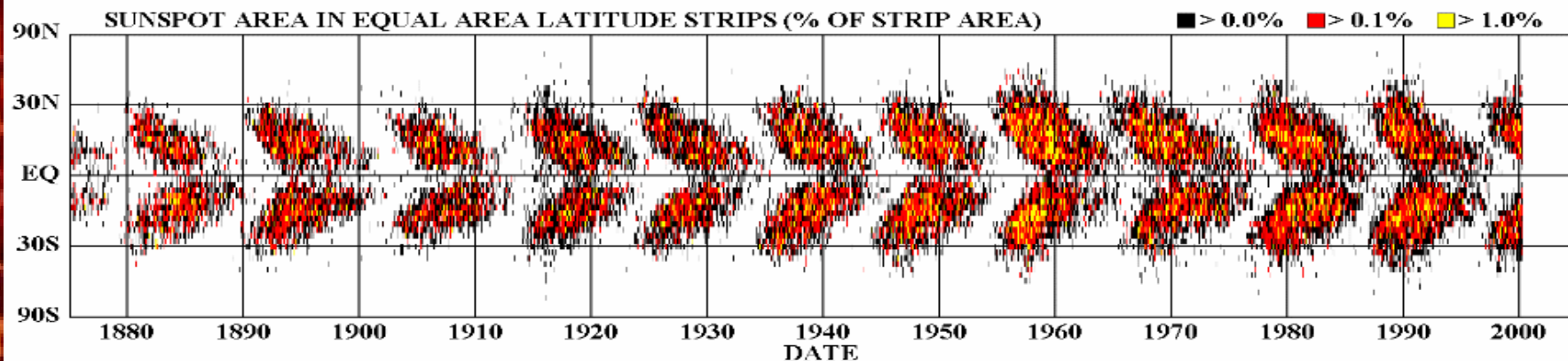
- 1610 Thomas Harriot
- 1610 G. Galilei, J. Fabricius, Ch. Scheiner
- Již předtím pouhým okem z čínských kronik
- 1769 A. Wilson – wilsonova
- deprese (cca 700 km)



Sluneční skvrny (3)

- Statistika – 11letý cyklus, motýlkový diagram

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

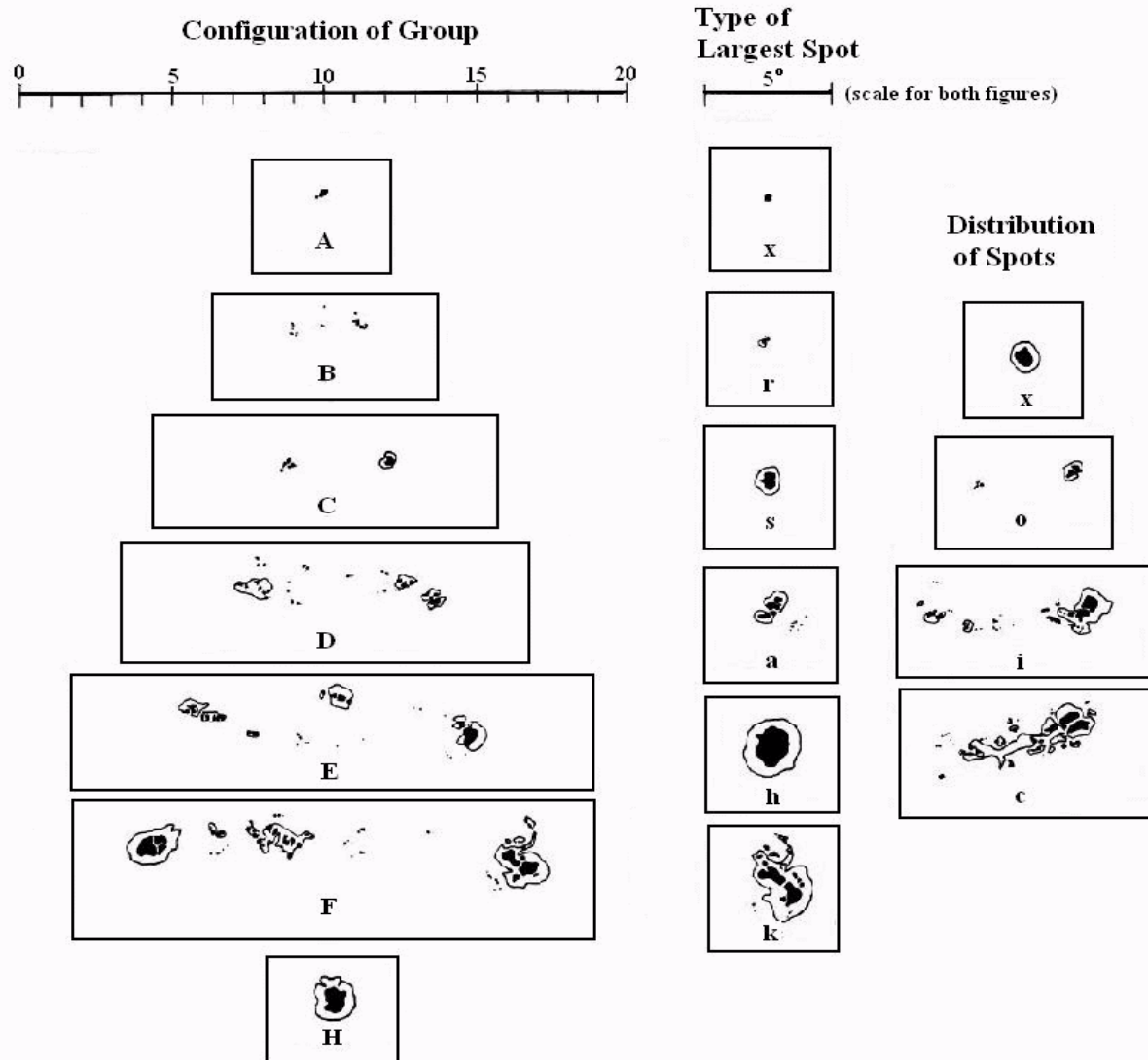


Sluneční skvrny (4)

- Vnitřní struktura skvrn
 - Umbra
 - Penumbra
 - Další jemné útvary (bude dále)
- Podle morfologie – McIntoshova klasifikace

Sluneční skvrny (5)

Modified Zurich Sunspot Classifications
Courtesy of A.L.P.O. Solar Section - Rik Hill



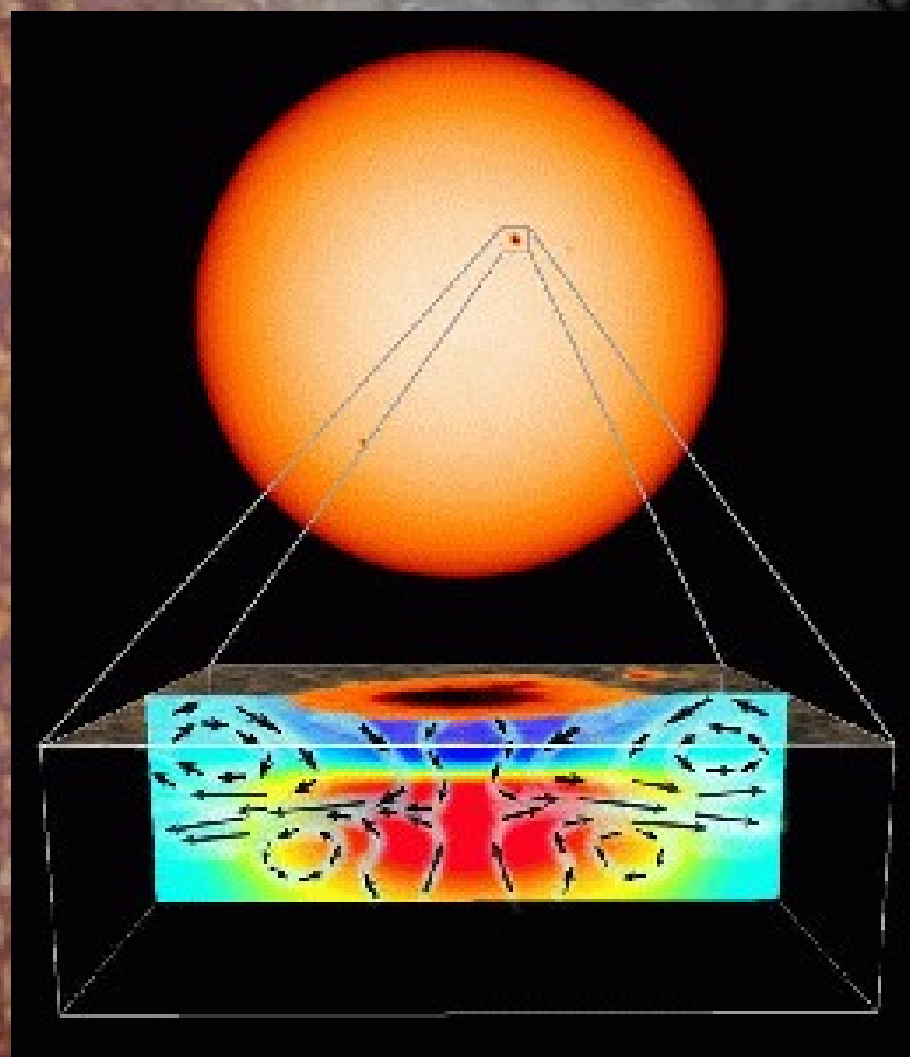
Sluneční skvrny (6)

- Skvrna/póra

x Charakteristika	Póry	Skvrny
x Průměr (Mm)	1—6	6—40
x Minimální intenzita	0,2—0,7	0,05—0,3
x B(0) [G]	1700	3000
x B (R_{vis}) [G]	1200	800
x B -- Sklon k normále (st.)	40—60	70

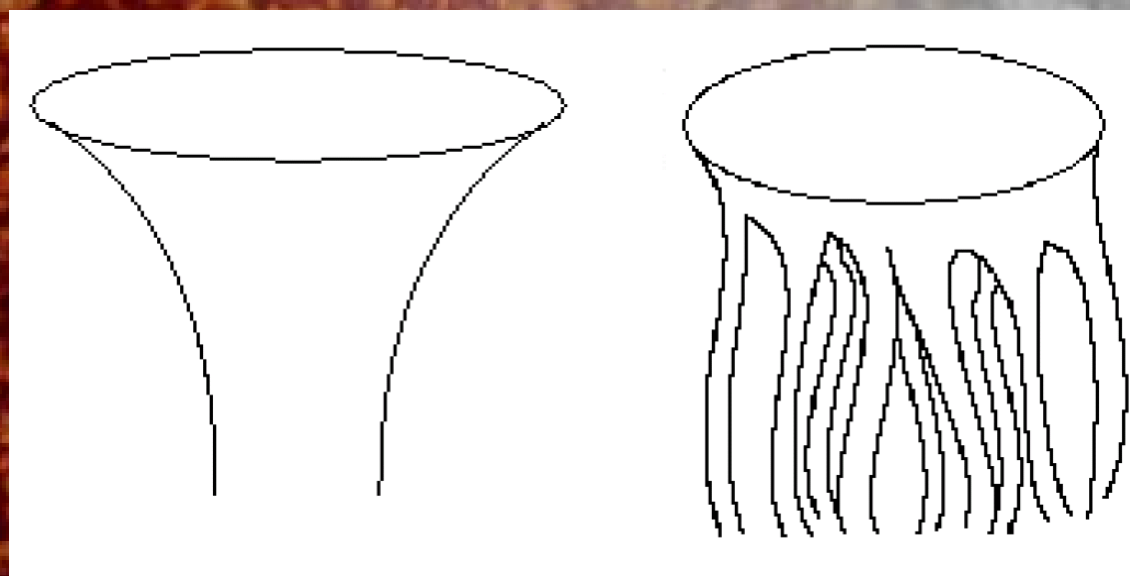
Sluneční skvrny (7)

- Hloubka cca 5 Mm, konvergentní toky do 1,5 Mm, pak se mění na tok směrem dolů, v hloubce 6 až 10 Mm jsou pozorovány konvergentní toky
- Pod skvrnou koncentrace tepla



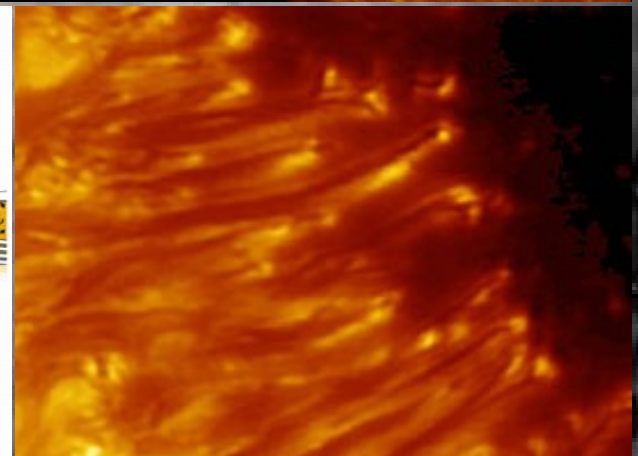
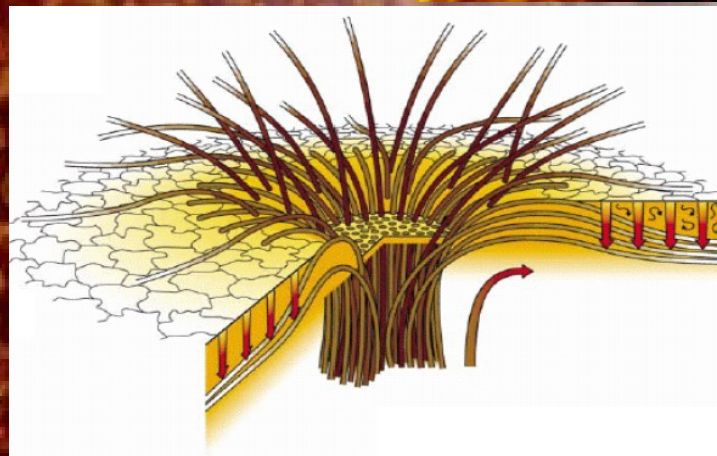
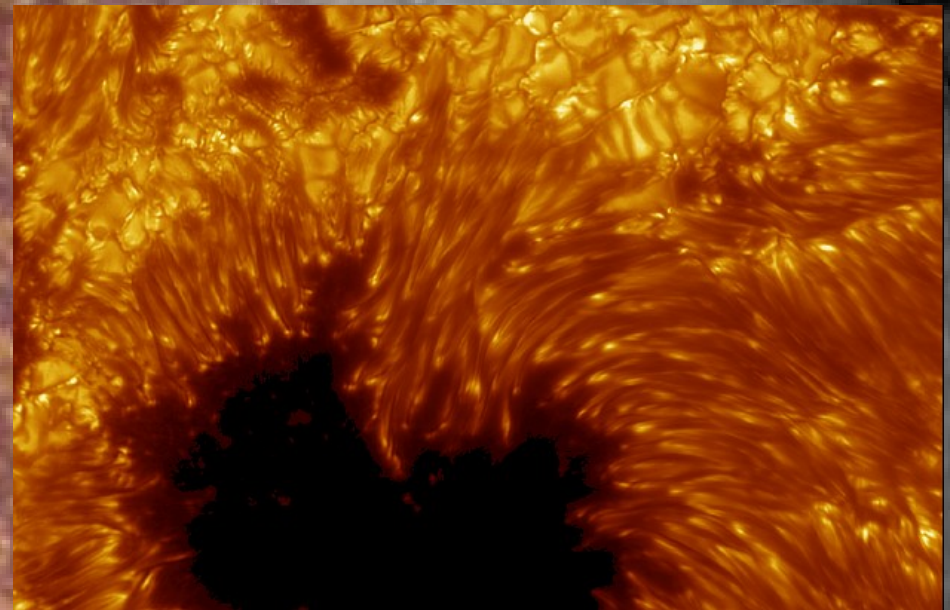
Sluneční skvrny (8)

- Dva modely sluneční skvrny – jednotrubicový a „spaghetti“
- Nelze rozhodnout, helioseismologie mírně nadřazuje špagetám



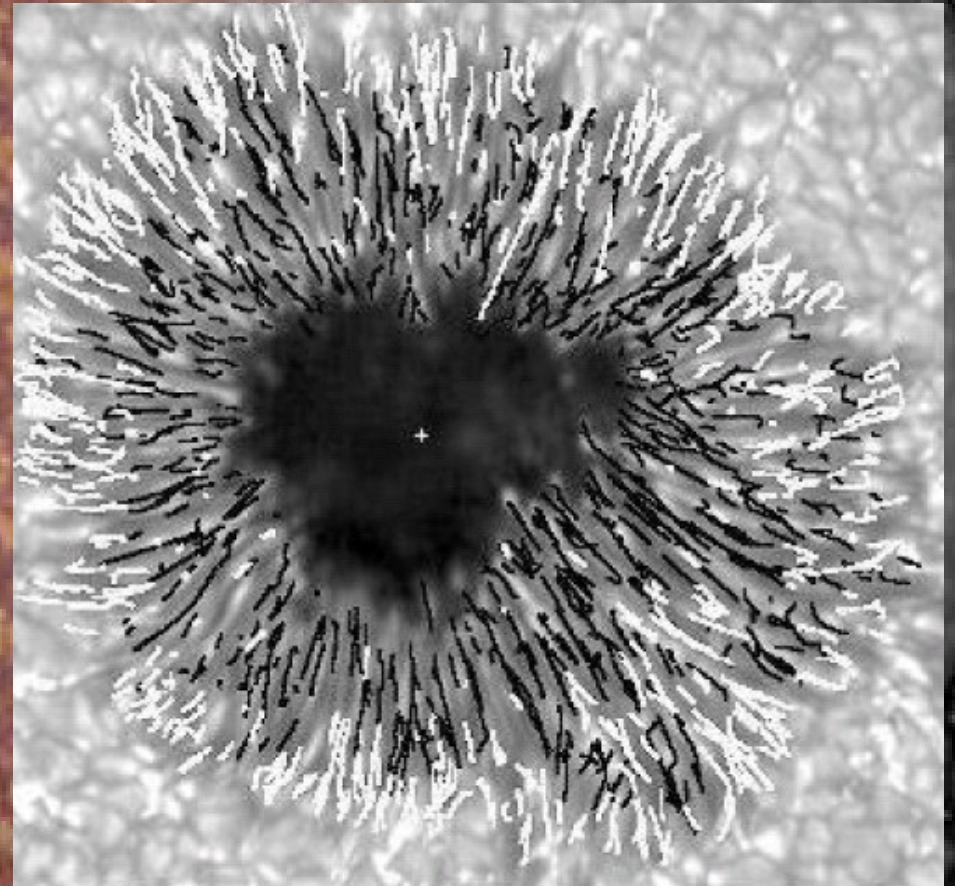
Sluneční skvrny (9)

- Vlákňitá, z penumbrálních filamentů (100 km)
- Tmavá penumbrální jádra



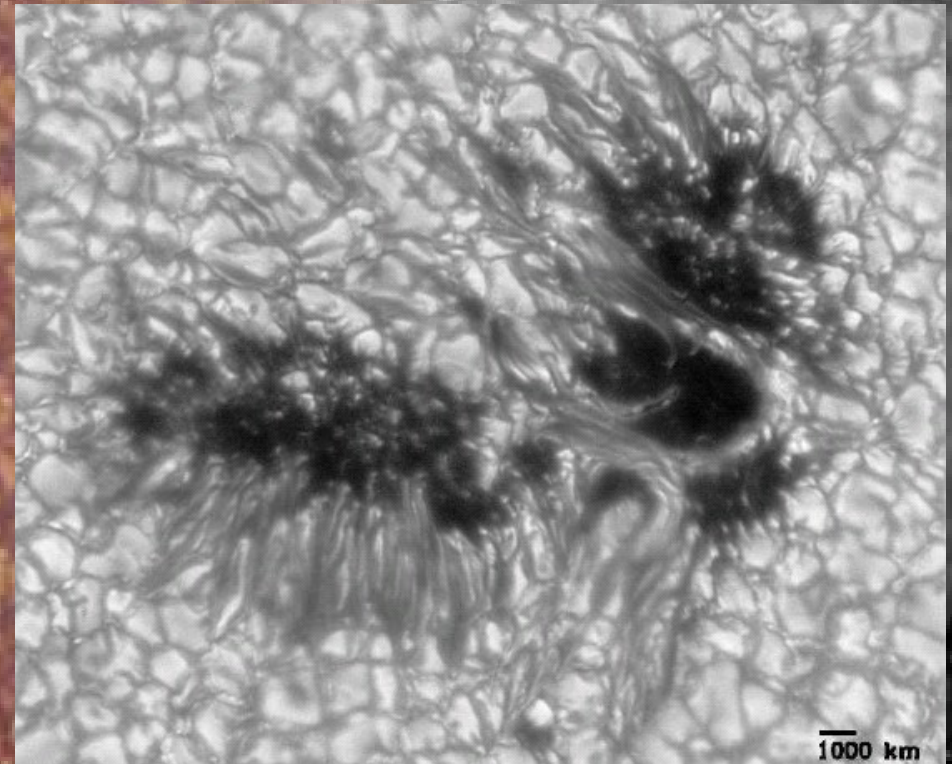
Sluneční skvrny (10)

- Penumbraální zrna
 - Vnitřní – dovnitř rychlostí 500 m/s
 - Vnější – ven ze skvrny (750 m/s), 1/3 překročí hranice penumbry
 - Životnost 40(25) min



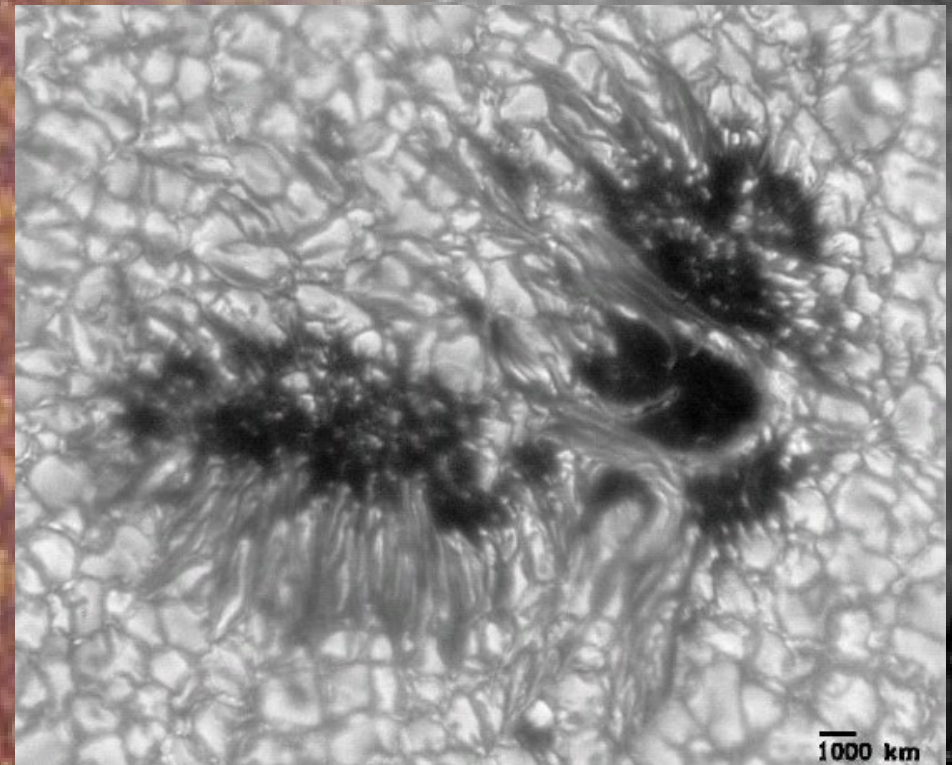
Sluneční skvrny (11)

- Velká skvrna – z fragmentů (přetrvávají jako temná jádra), mezi nimi světelné mosty nebo umbrální body



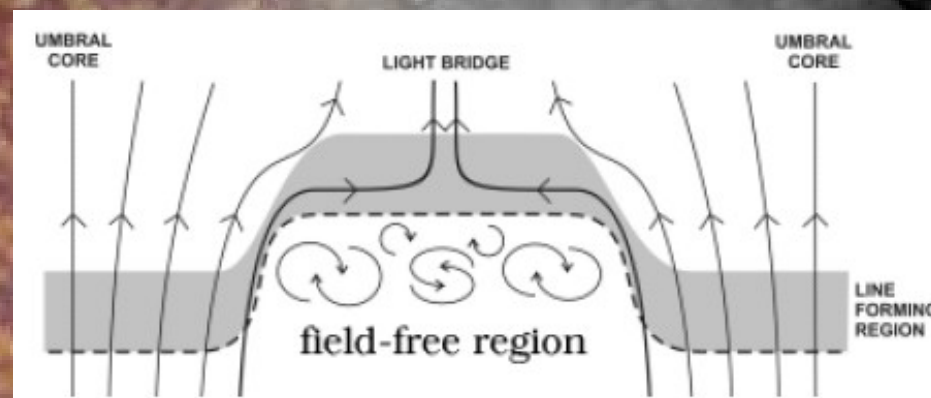
Sluneční skvrny (12)

- Světelný most
 - Filamentární
 - Granulární (zrna cca 900 km)
 - Vývoj – rozpad na řetězec umbrálních bodů, při rozpadu skvrny scénář opačný



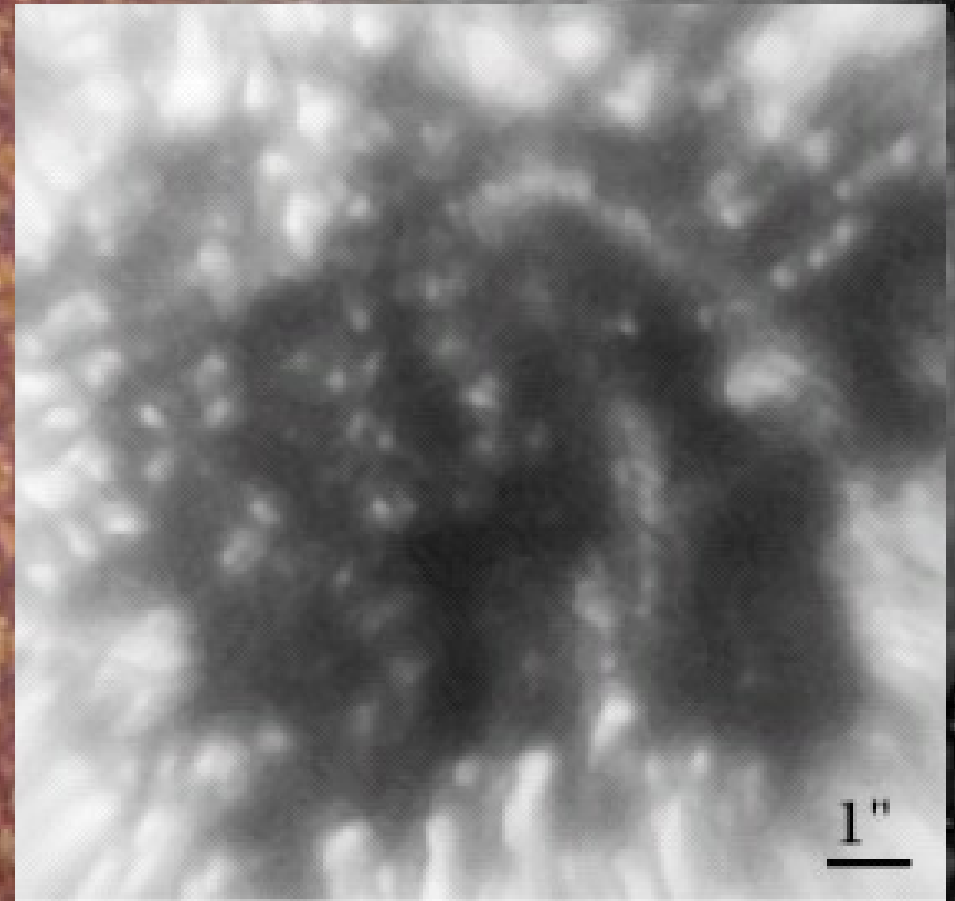
Sluneční skvrny (13)

- Magnetické pole redukováno (o 1,5 kG)
- Více skloněno, ale ne jako v penumbře
- Mírně vyvýšeny (o cca 500 km), ale rozhodně se neklenou



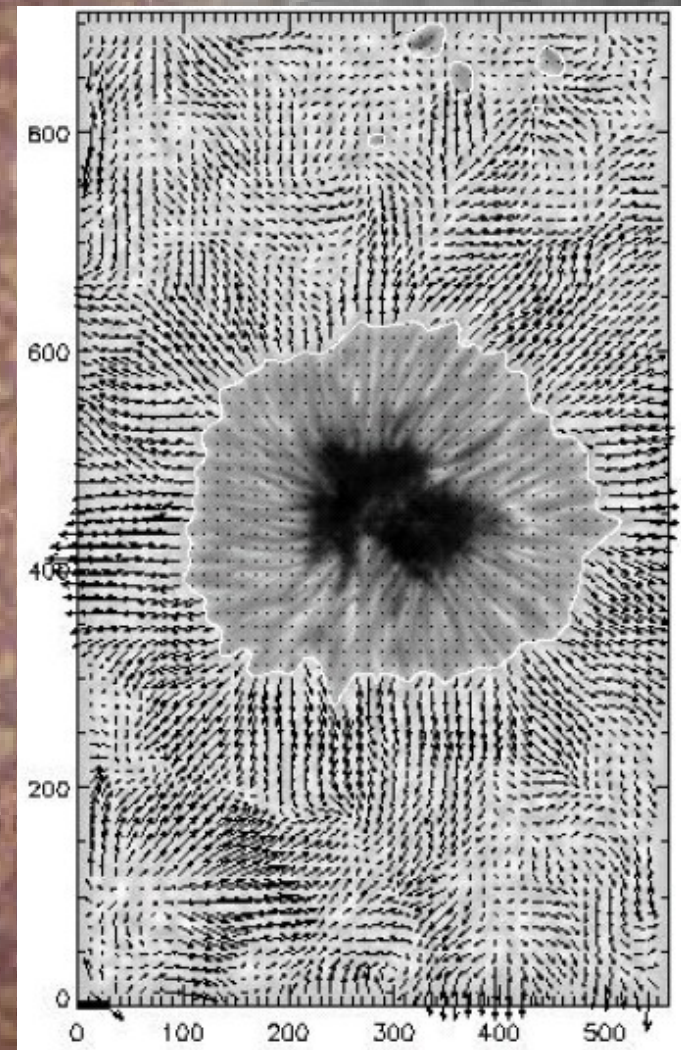
Sluneční skvrna (14)

- **Umbrální body**
- Typický rozměr kolem 125 km (problém!)
- Jas obvykl 0,2—0,7
- Chaotické pohyby uvnitř umbry

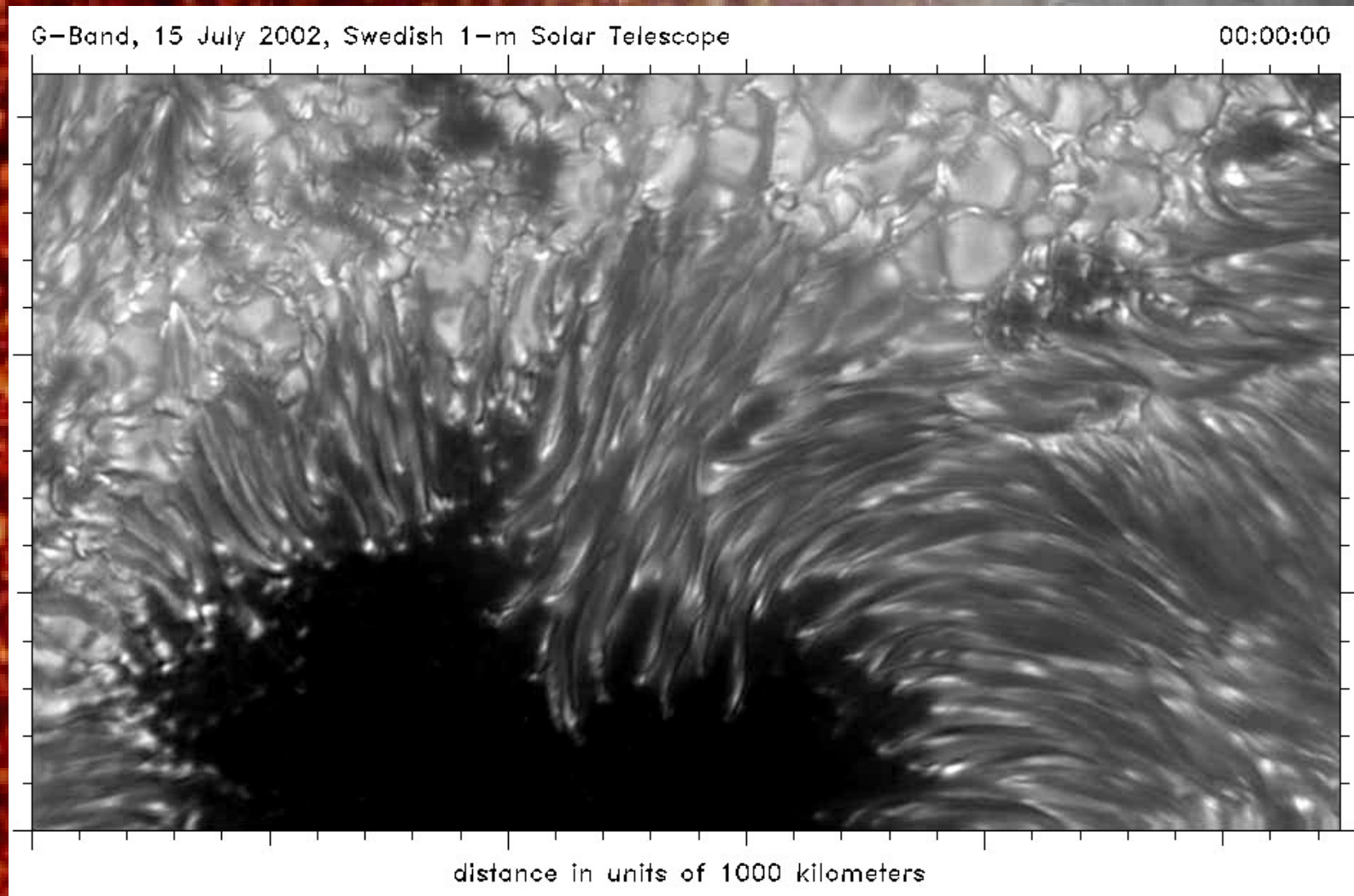


Sluneční skvrna (15)

- Moat – oblast divergentního toku v okolí skvrny u vyvinutých skvrn, nemusí být symetrický



Sluneční skvrny (16)



Vysoké rozlišení

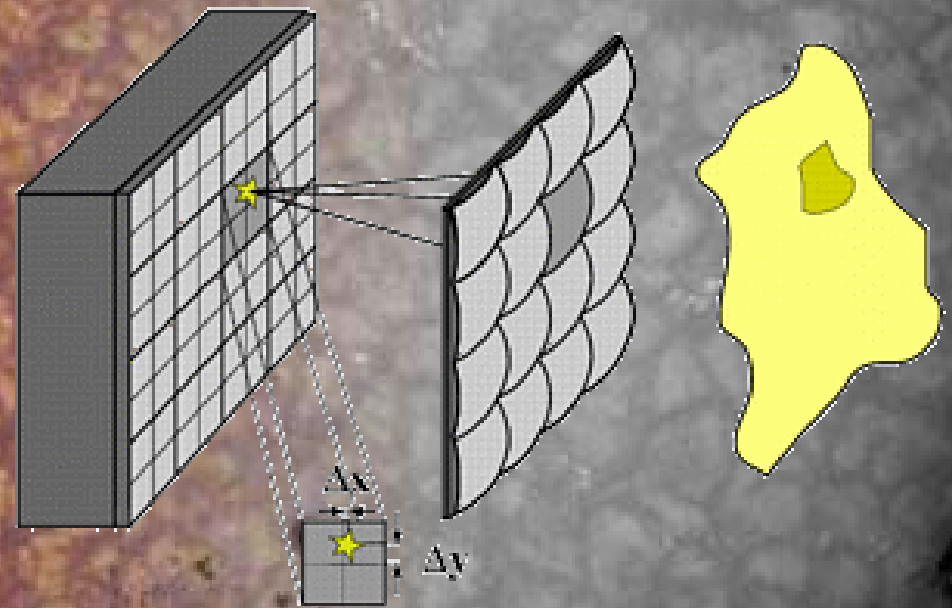
- Pozorování detailů – omezení přístrojovou technikou a hlavně seeingem
 - Anisoplanatismus
- Bez dalších technik maximální rozlišení z pozemních pozorování – 1" (725 km)
- *Odbočka: Friedův parametr*
- Seeing jako $\lambda^{-1/5}$

Techniky vysokého rozlišení

- Napravení porušené vlnoplochy ještě před dopadem na objektiv – adaptivní optika – dobré výsledky, drahé
- Chytré průměrování z krátkých expozic – odstranění nasnímaného seeingu ze sekvence snímků – modifikovatelné, pomalé
- Nejčastěji kombinace

Adaptivní optika

- Deformovatelné zrcátko
- Rychlá elektronika
- Hartmann-Shackův senzor

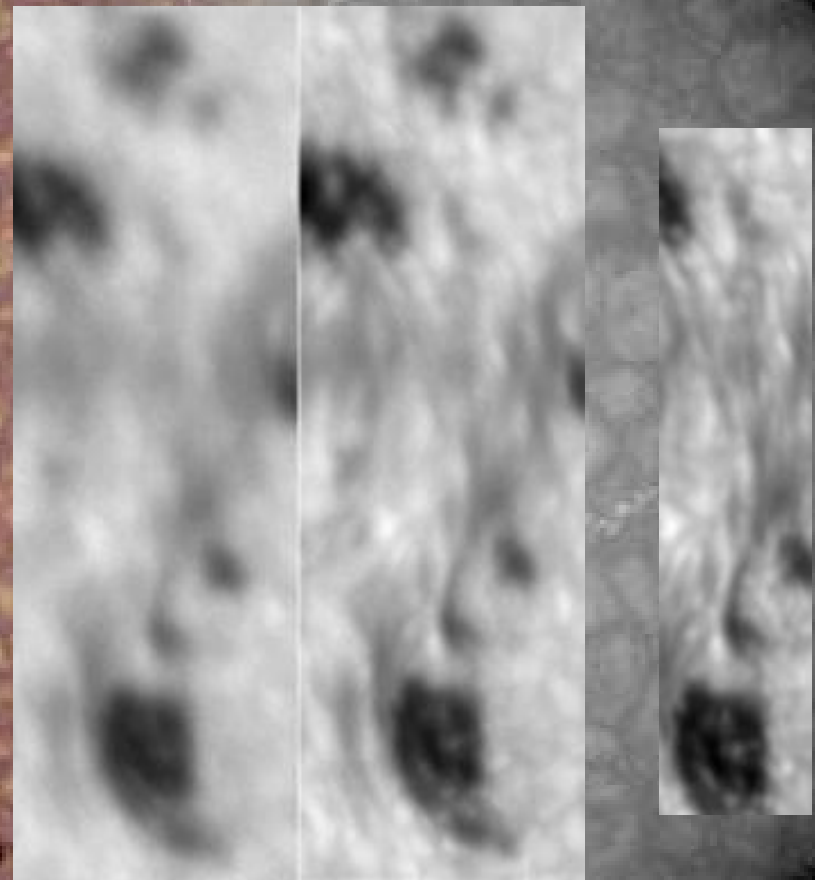


Krátké expozice

- Seeing se mění na škále 0,1--0,01 s – krátké expozice=repräsentace náhodné veličiny, zmražení dané repräsentace
- Série = pokaždé náš snímek+jiná repräsentace seeingu – chytré průměrování = *skvrnková interferometri (průměrování v kvadrátu, nepotlačuje vysoké frekvence)*

Fázová diverzita

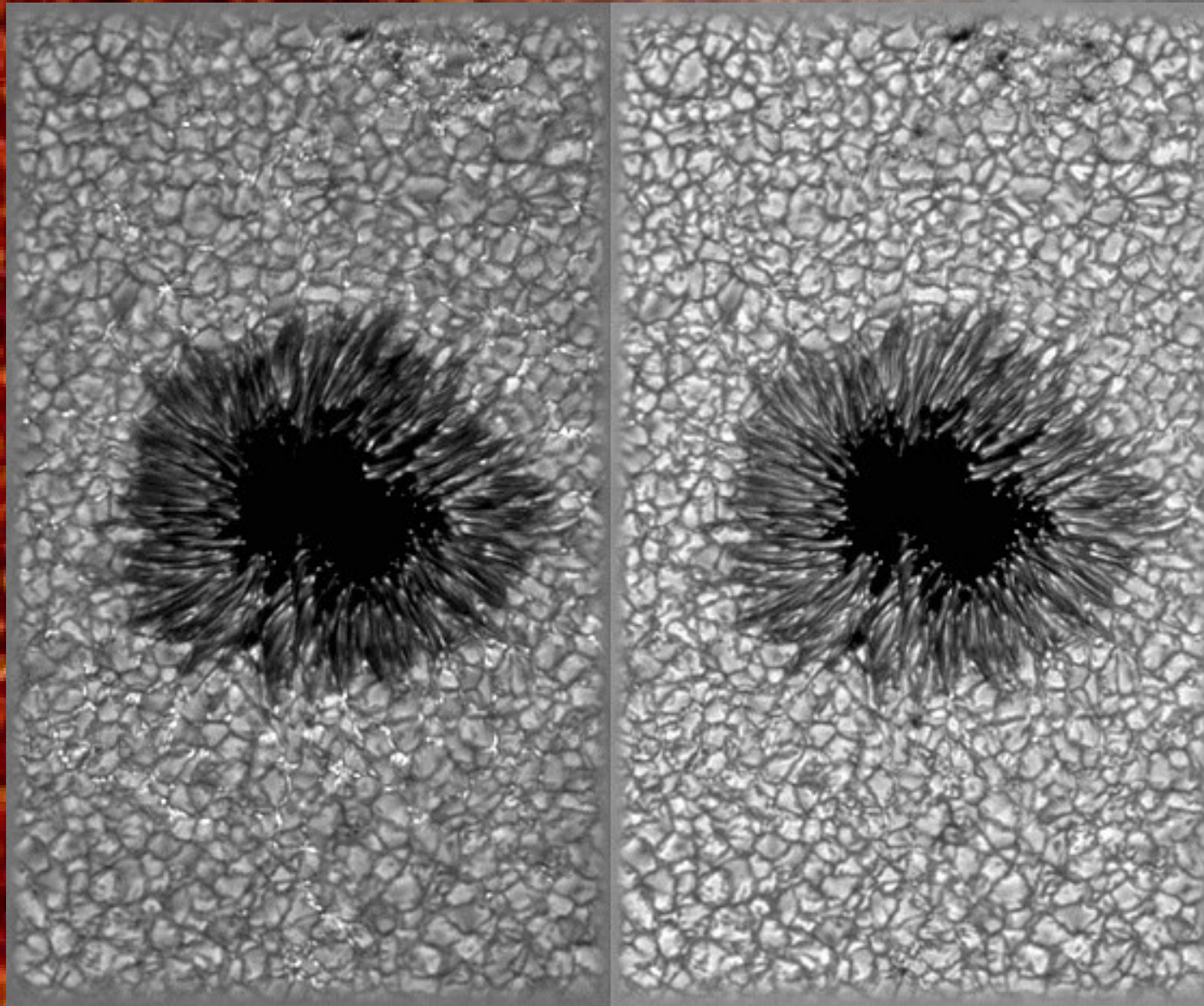
- Stejný snímek v ohnisku a mírně mimo ohnisko (rozostřeno o známou vzdálenost)
- Z teorie aberací lze na základě této znalosti vypočítat poruchovou funkci



Jiná spektrální pásma

- Fotosféra – spojitě tepelné záření (čáry $H\alpha$, CaI K a H apod. jiné vrstvy)
- Mimo viditelné spektrum – blízká infračervená oblast (malý seeing, ale velký dalekohled) a G-band (kolem 430 nm, pozorovány malé magnetické elementy – roli hraje molekula CH)

G-band / kontinuum

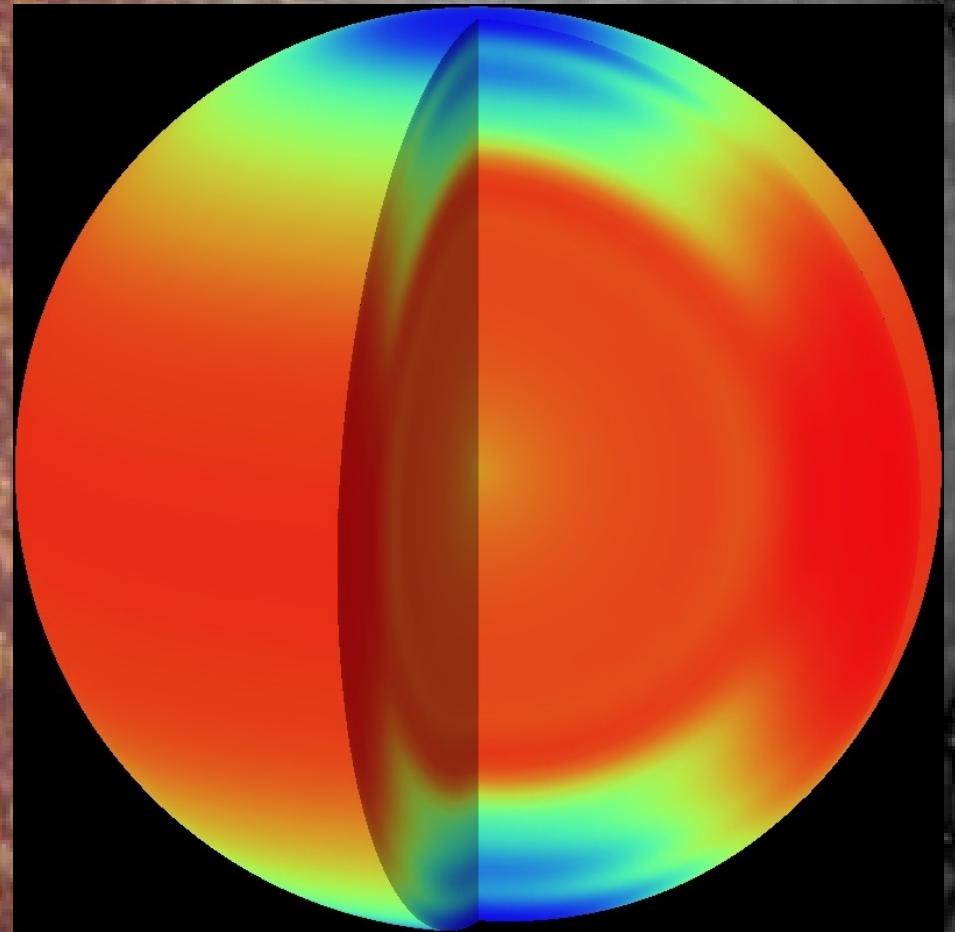


Dynamika fotosféry

- Spousta pozorování, neexistuje zatím žádná přímá a přitom dostatečně podrobná metoda určená ke studiu fotosférické dynamiky (pohyby hmoty/pohyby struktur)
- Stále není moc jasné, co je nebo není správně
 - Přímé dopplerovské měření
 - Tracování struktur (FT, LCT, ...)
 - Helioseismologie

Sluneční (diferenciální) rotace

- Parametry časem proměnné (závislost na aktivitě?)
- Pozorována z pohybů objektů i z pohybu plazmatu, parametry se často liší v týž okamžik



Turbulentní konvekce

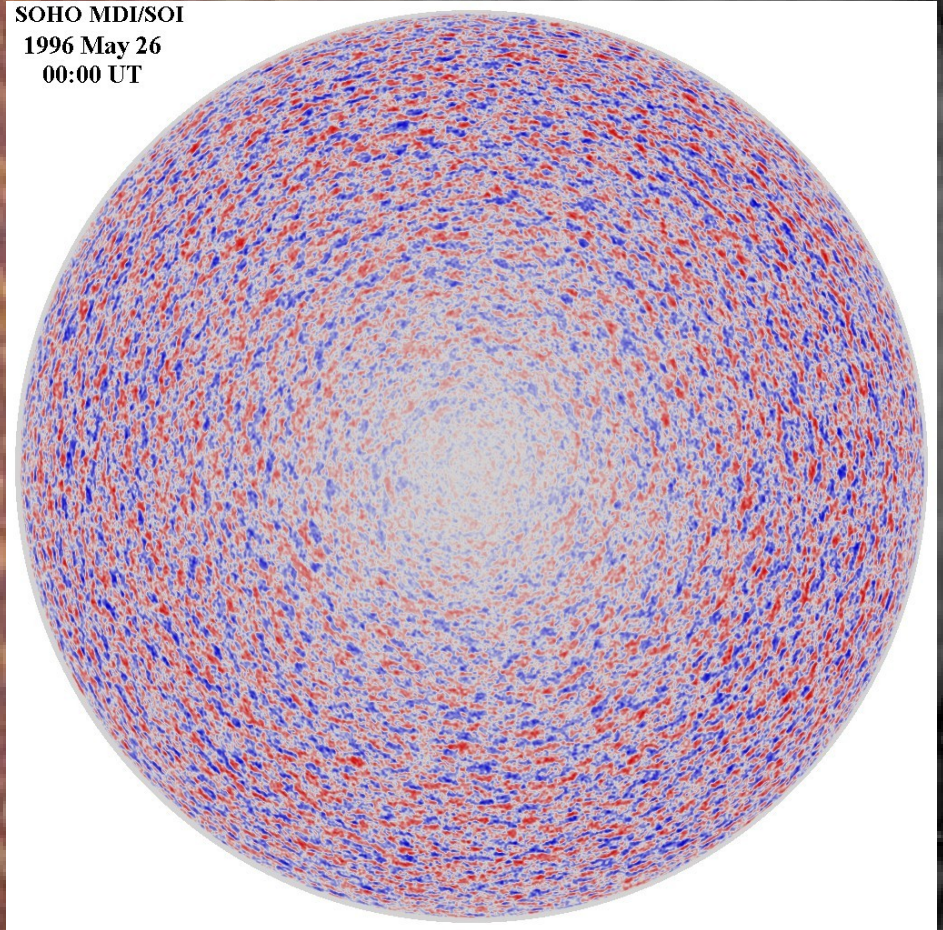
- „Postižena“ „třetina“ slunečního nitra
- Chaotický pohyb
- Pomalý teplý stoupavý proud uvnitř, rychlý chladný klesající proud na okrajích



Supergranulace

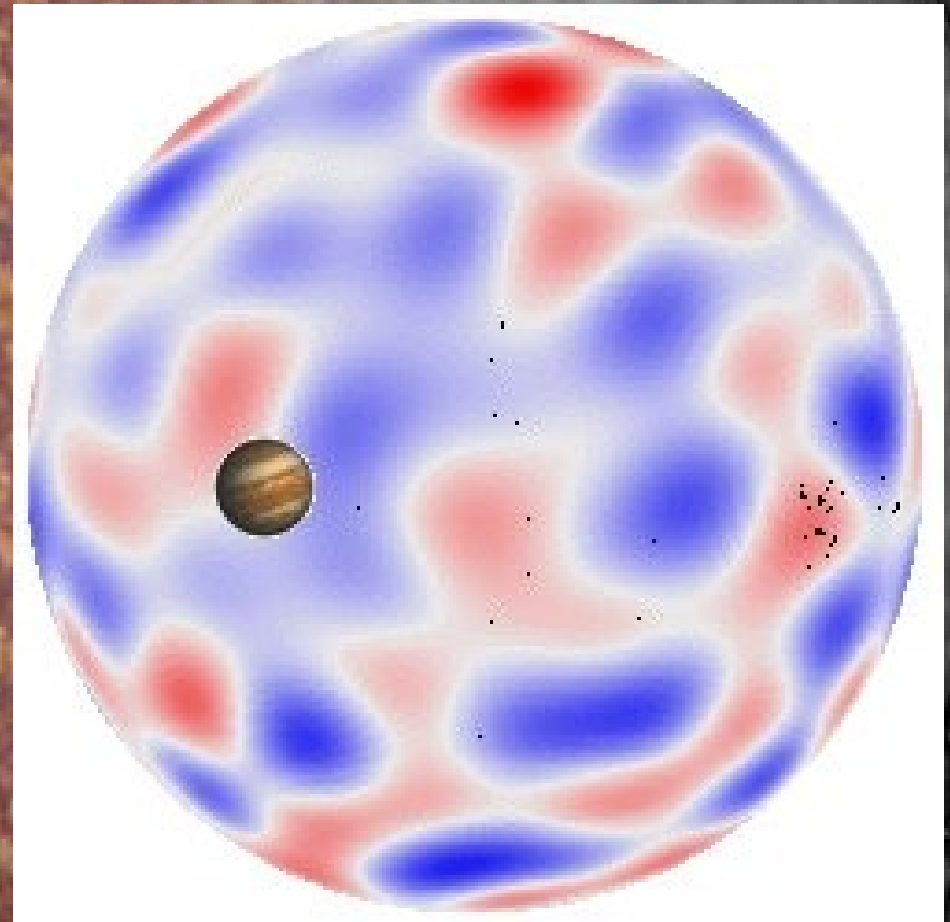
- 30 Mm, 24 h, 300 m/s
horizontálně
- 10 Mm do nitra,
přerozdělování
středněrozměrového
magnetického toku
- *Mesogranulace ???*

SOHO MDI/SOI
1996 May 26
00:00 UT



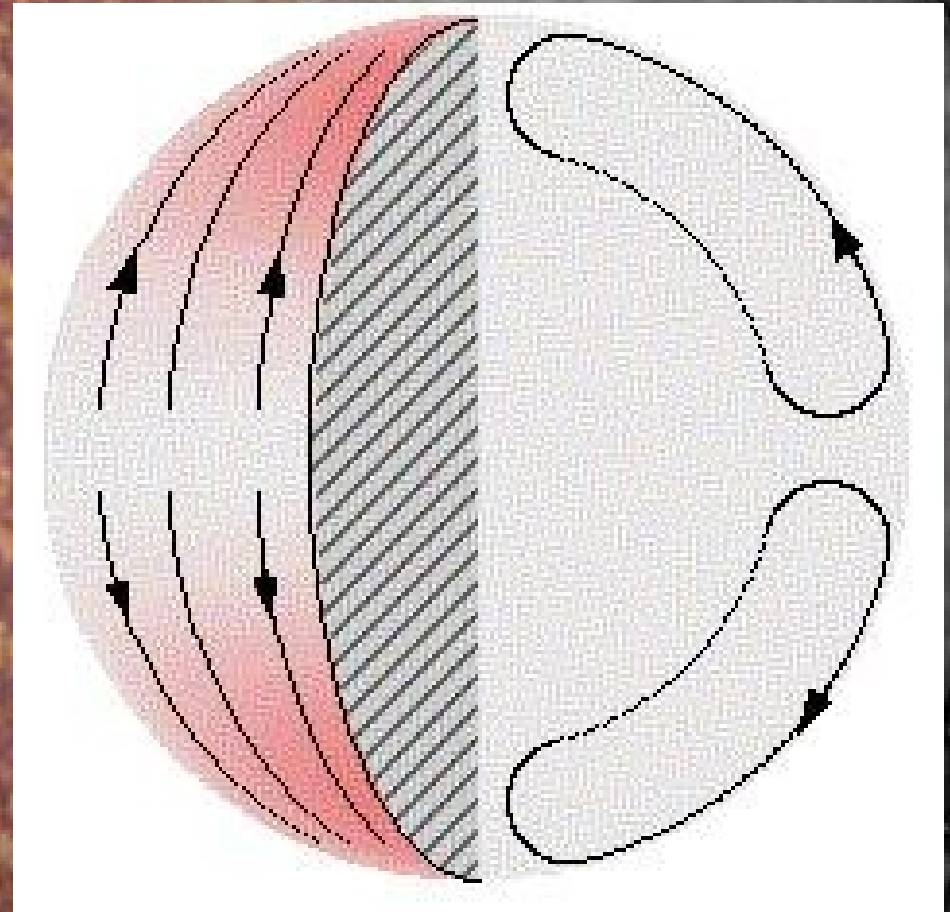
Obří buňky

- Zatím bez přímé detekce, úvahy od 60tých let
- 300 Mm, přes týden, 50 m/s horizontálně
- Nepřímé evidence – důsledek omezovacích podmínek?

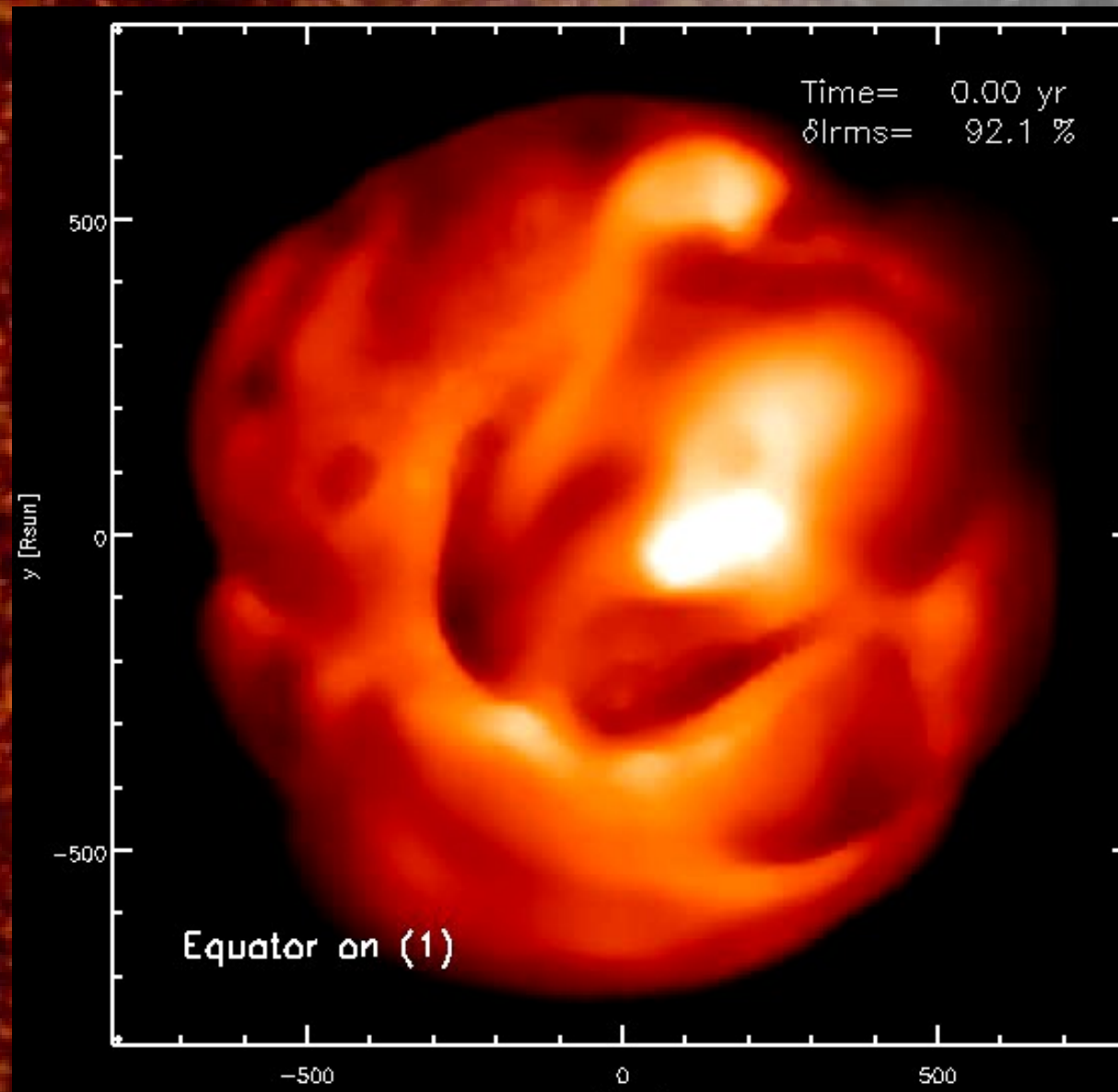


Meridionální tok

- Pomalý 20 m/s proud od rovníku k pólů
- V mnoha pracích detekován, parametry často odlišné



Globální konvekce



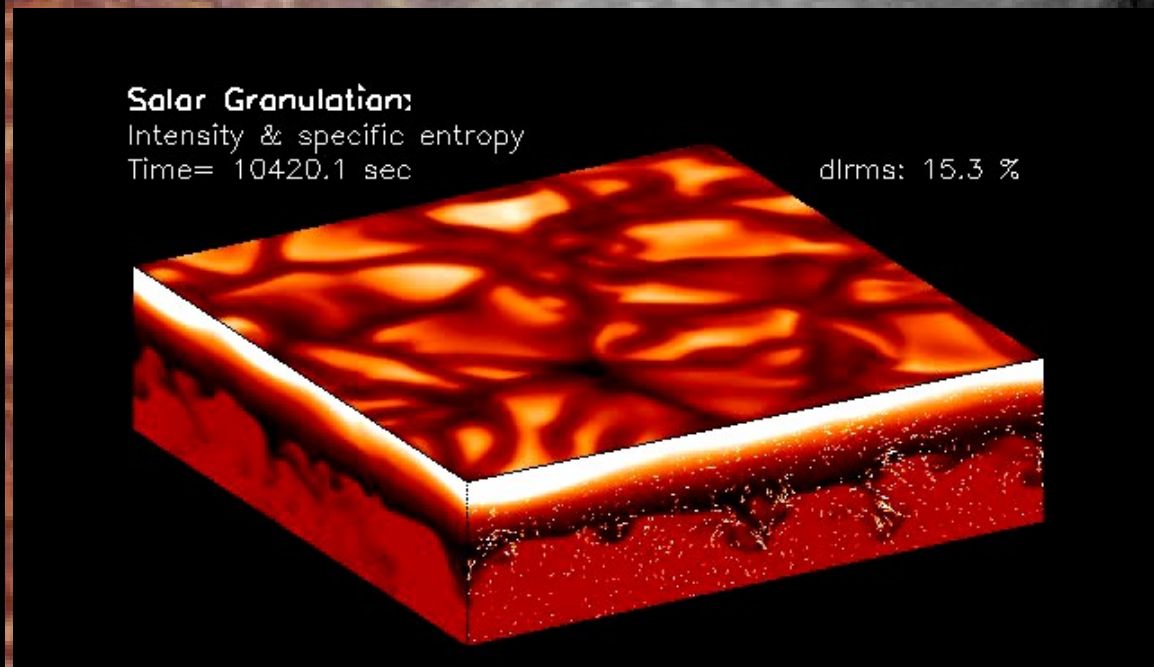
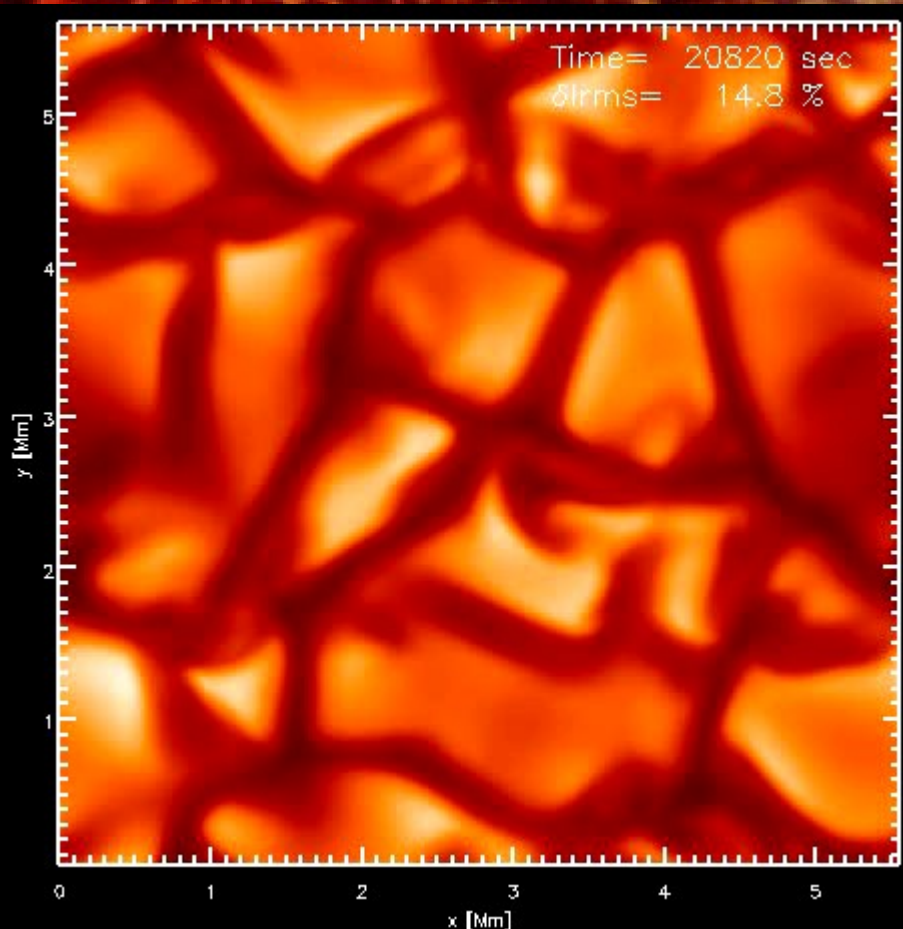
Vztah k magnetickému poli

- Stále otevřená otázka
- Vertikální pohyby jsou polem potlačovány
- Horizontální – obvykle to vypadá, že si jedno zvíře toho druhého nevšimá (ojedinělý helioseismický výsledek poukazující na konvergentní toky v magnetických oblastech rychlostí 50 m/s); dále statistické závislosti

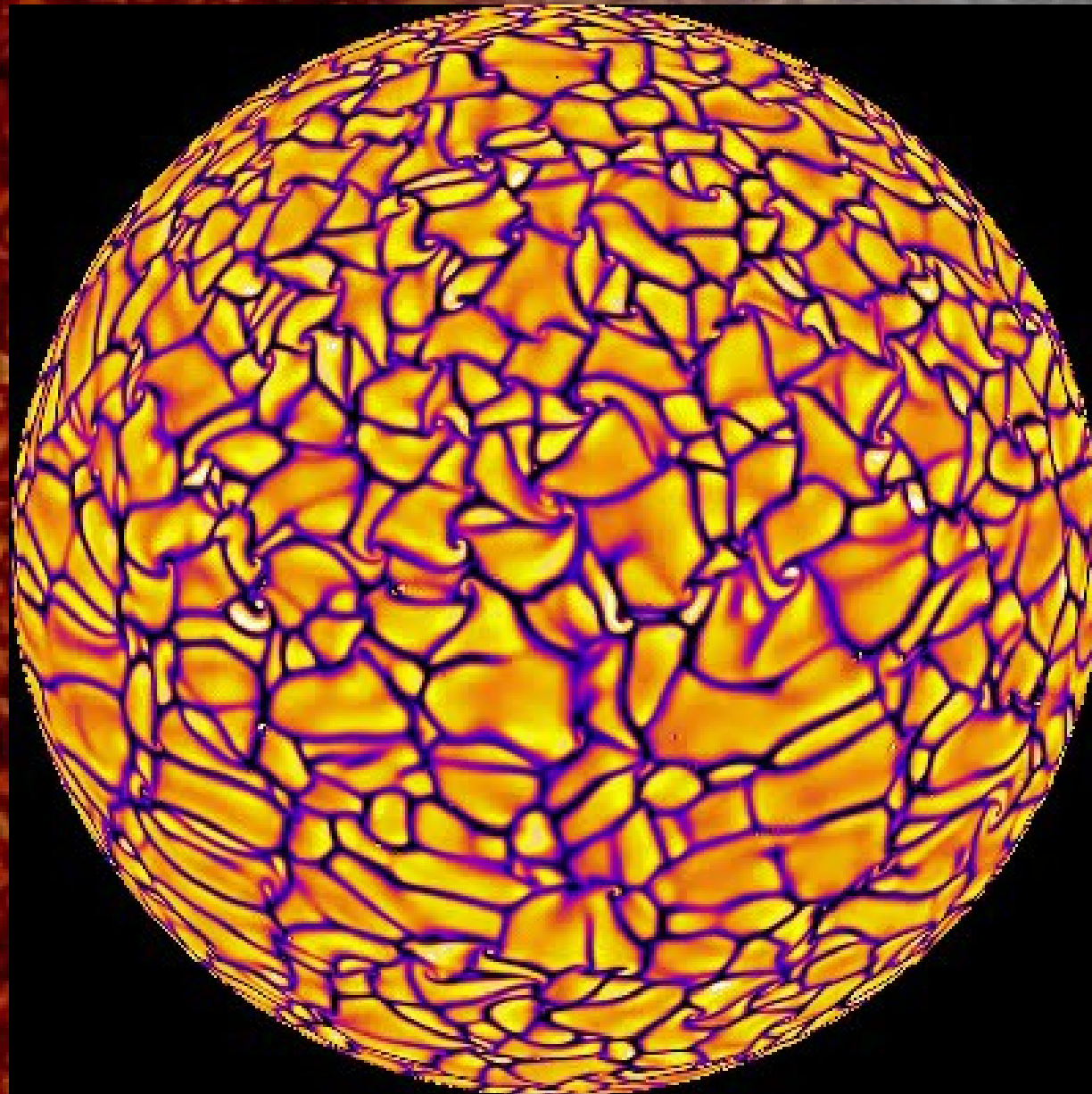
Teoretické modely

- Svízel – na dnešní počítače ještě pořád dost náročné
 - Mats Carlsson, box 6000x6000x3000 km, výpočet na 16 procesorech – za dva roky cca 16 minut reálného slunečního času
- Velkorozměrové simulace – Sasha Brun – spousta volných parametrů, je schopen reprodukovat leccos

Simulace granulace



Globální konvekce



Budoucnost ...

- Sluneční fotosféra = zajímavá, dynamická a stále dosti tajemná vrstva slunečního nitra
- Pořád ještě dost otázek, které budou zaměstnávat astronomy léta
- Potřeba podrobnějších a kvalitnějších dat