



**PROGRAM  
CEZHRANIČNEJ  
SPOLUPRÁCE**  
SLOVENSKÁ REPUBLIKA  
ČESKÁ REPUBLIKA



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



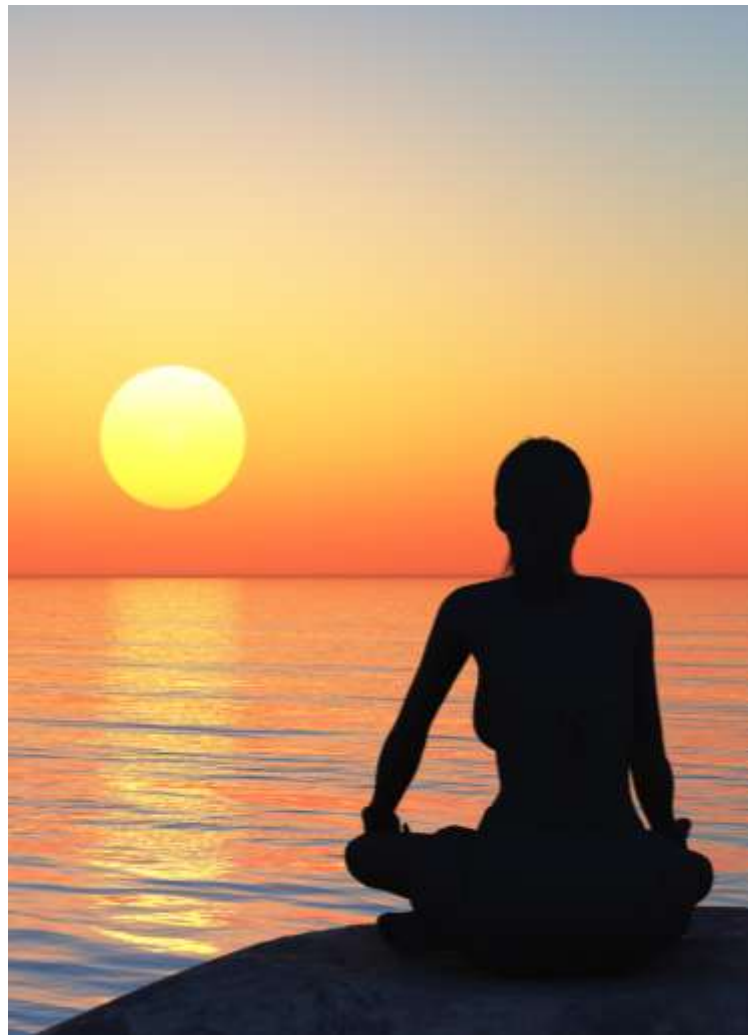
**FOND MIKROPROJEKTŮ**

# Sluneční dynamika

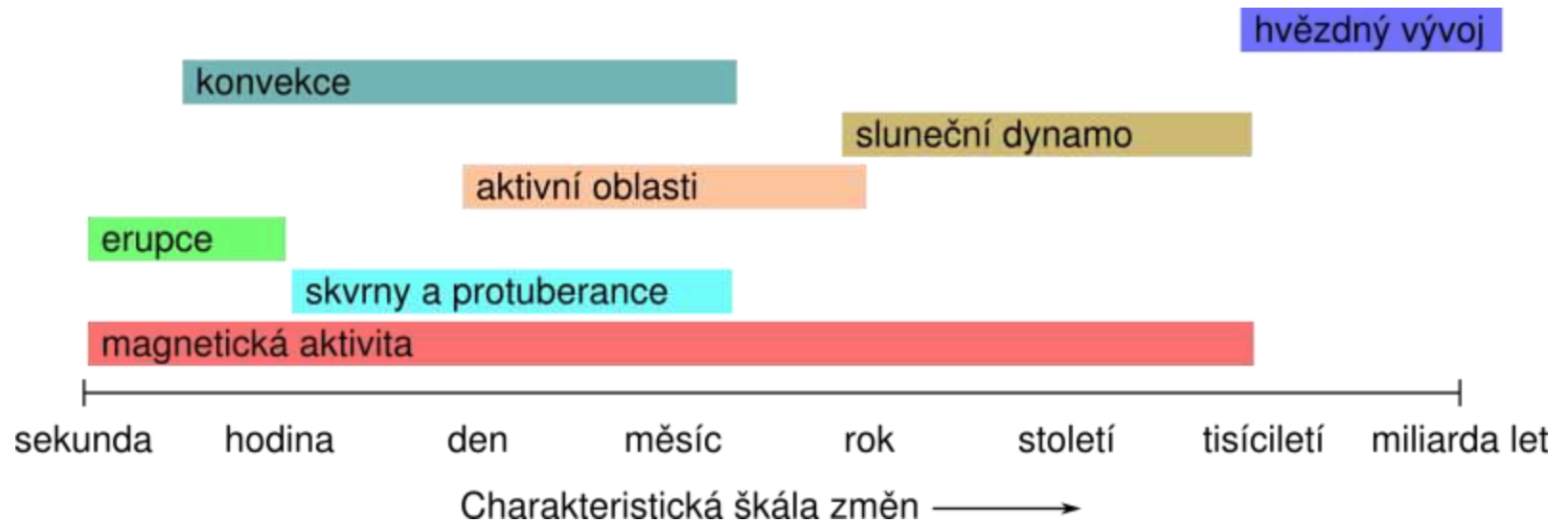
Michal Švanda  
Astronomický ústav AV ČR  
Astronomický ústav UK

# Slunce: dynamický systém

- Neměnnost Slunce
  - Iluze
  - Slunce je proměnná hvězda
- Sluneční proměny
  - Díky vývoji
  - Dynamika hmoty
  - Magnetická pole



# Škálogram sluneční proměnnosti



# ***Odbočka: způsoby přenosu energie***

## ■ Zářením

- Látka je pro dané záření alespoň částečně průhledná
  - Možné interakce, rozptyl, pak se mluví spíše o difúzi záření

## ■ Vedením

- Předává se tepelný pohyb nositelů energie mezi sebou, převážně srážkami

## ■ Prouděním

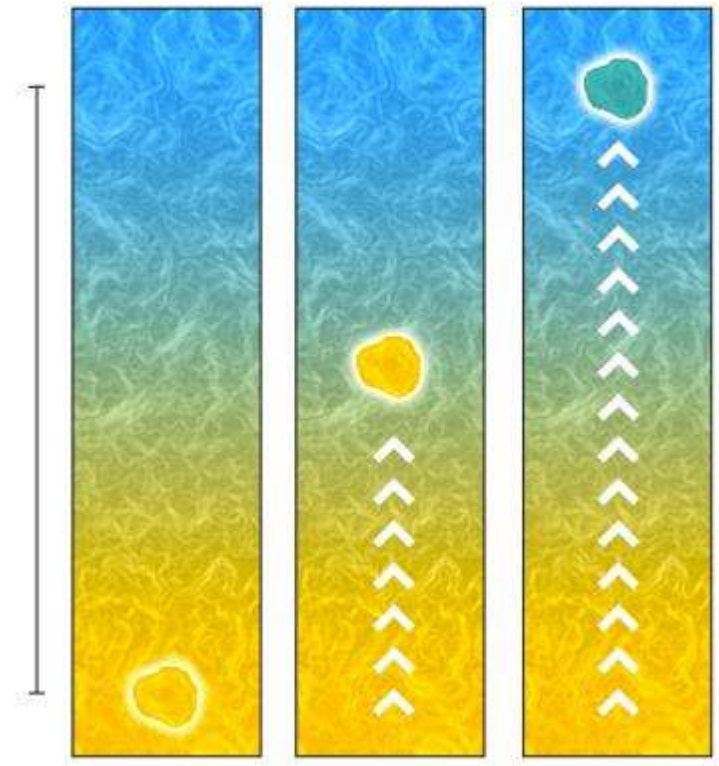
- Velkorozměrový odnos přehřátého materiálu do chladnějších míst

## ■ Proudění = konvekce

- Souvisí se lokálními změnami termodynamické rovnováhy, uplatní se až jako poslední, jinak je energeticky nevýhodná
- Samovolná konvekce: v tekutinách s teplotní stratifikací v gravitačním poli
- Lze vynutit

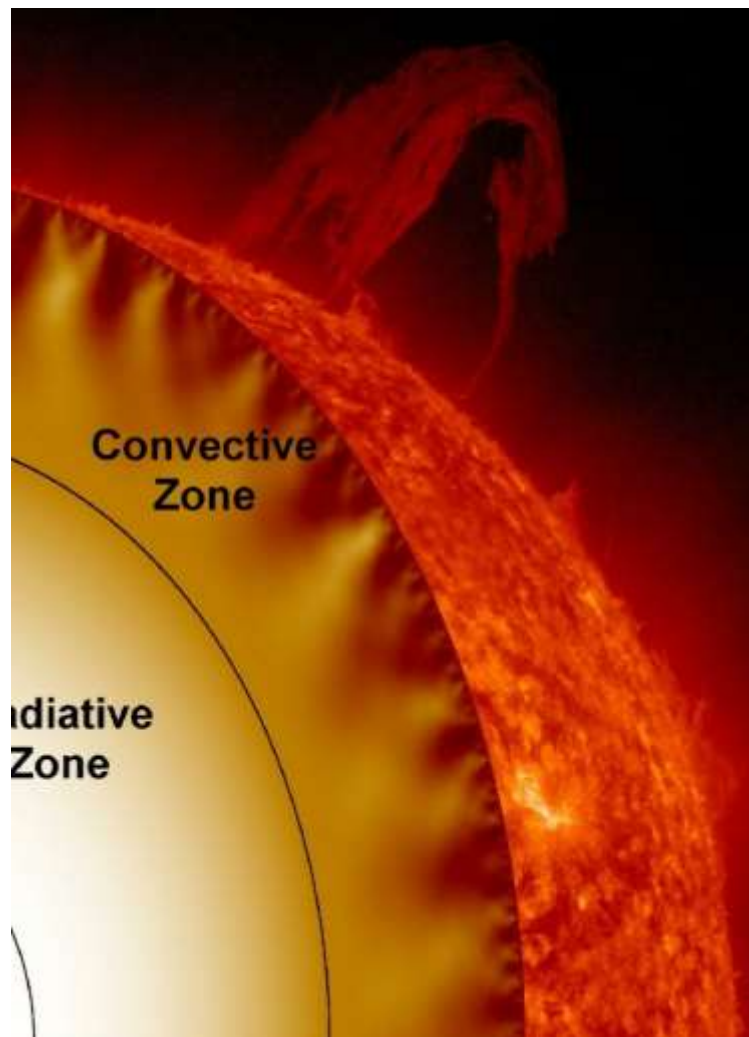
# Konvekce ve hvězdách

- Přehřátá bublina stoupá ve stratifikované látce proti směru gravitace (má menší hustotu, Archimédův zákon)
- V určitém místě splyne bublina s okolím
  - Uražená vzdálenost – *směšovací délka*
- Pro bublinu lze napsat pohybovou rovnici a řešit rovnováhu a transfer tepla
  - *Teorie směšovací délky*



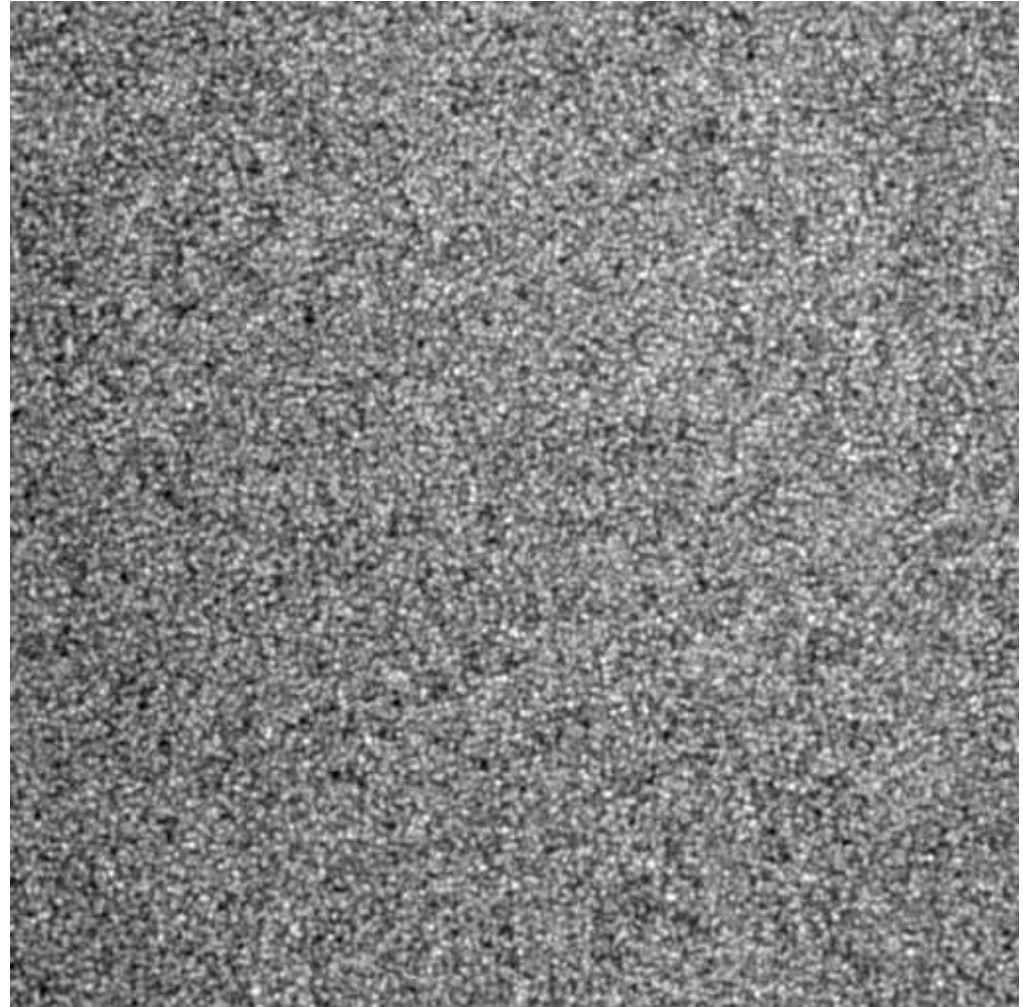
# Konvekce ve Slunci

- Zřejmě hierarchická
- Ve většině konvektivní zóny efektivní (pomalá, adiabatická), ale přípovrchové vrstvy více turbulentní – superadiabatická zóna, prudké drobení konvektivní škály
- Postihujeme však pouze svrchní vrstvy, hlouběji se “podívat” nelze



# Granulace

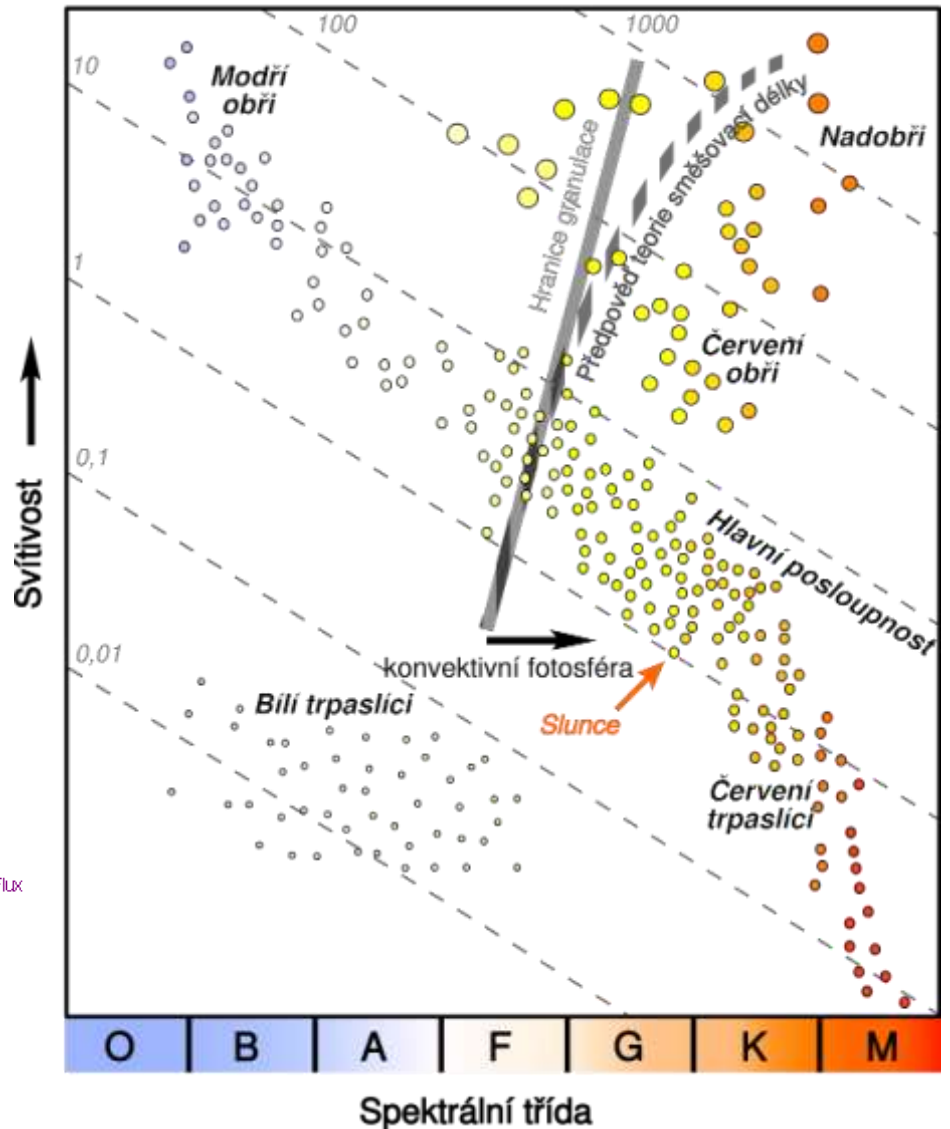
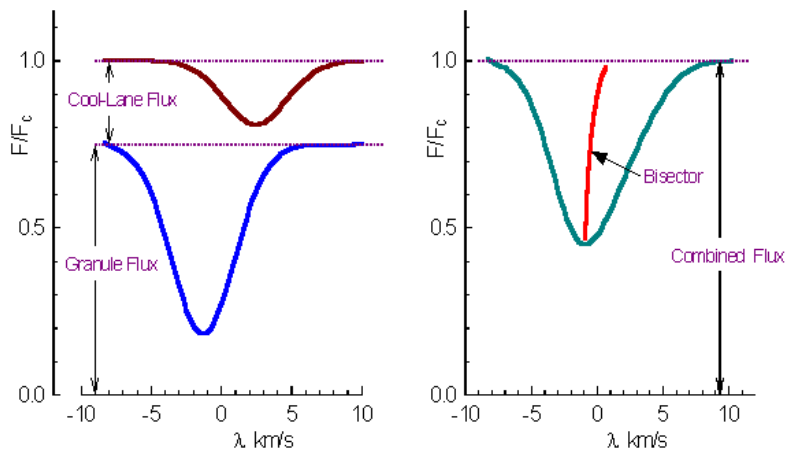
- Pozorovatelná v bílém světle
- Buňky s typickým rozměrem 1000 km a životní dobou 3 až 17 minut
- Pokrývají celý sluneční povrch až na oblasti silných magnetických polí – zde nabývají degenerované podoby
- Velké rychlosti





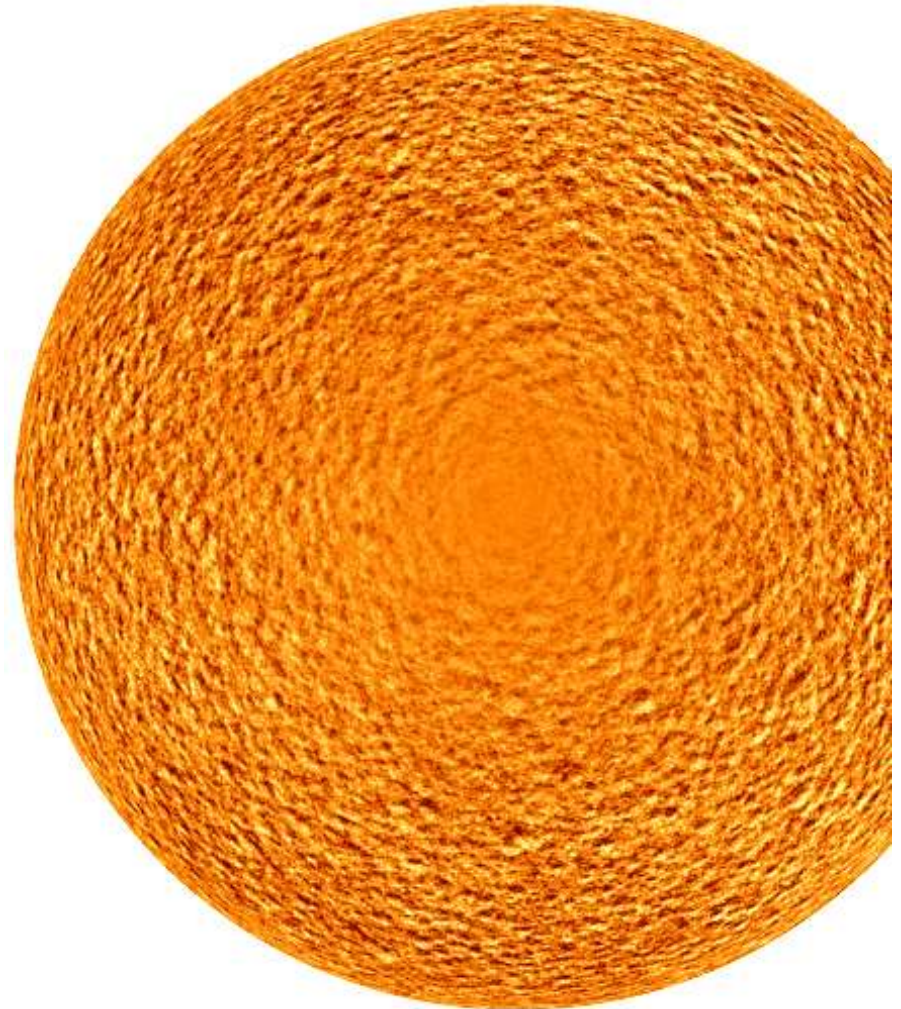
# Granulace na H-R diagramu

- Granulace ve fotosférách chladných hvězd běžná
- Na přítomnost lze usoudit z asymetrických profilů fotosférických čar



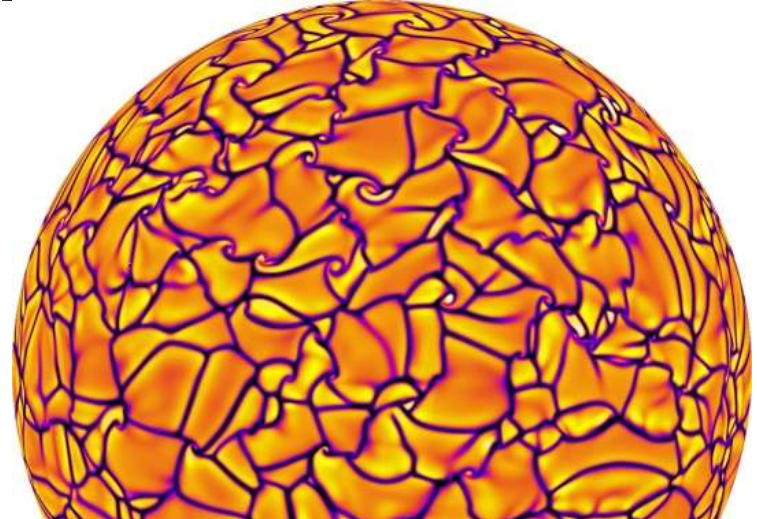
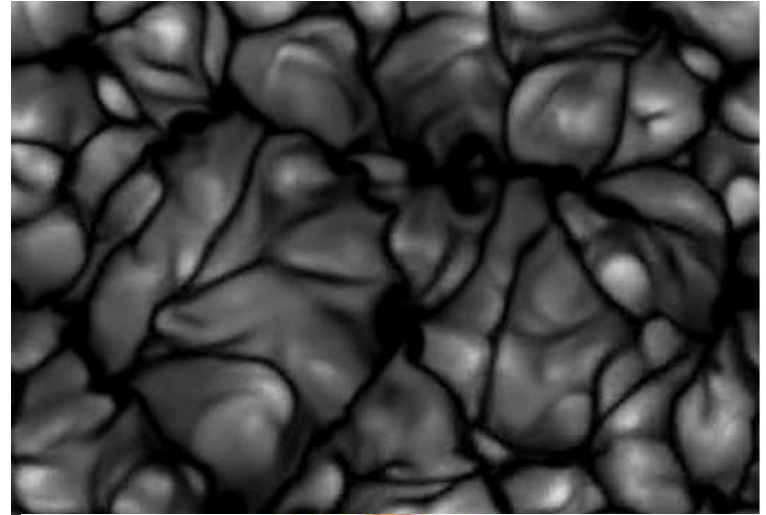
# Supergranulace

- 30 Mm
- ~ 24 hodin
- Horizontální rychlostní pole (300 m/s vs. 20 m/s)
- Koncentrují magnetické pole na svých hranicích
- Mizerná tepelná fluktuace střed-okraj 5 K (se stejnou chybou)
- Rekombinace He vede k růstu  $\gamma$ 
  - Ovšem nepotvrzuje se



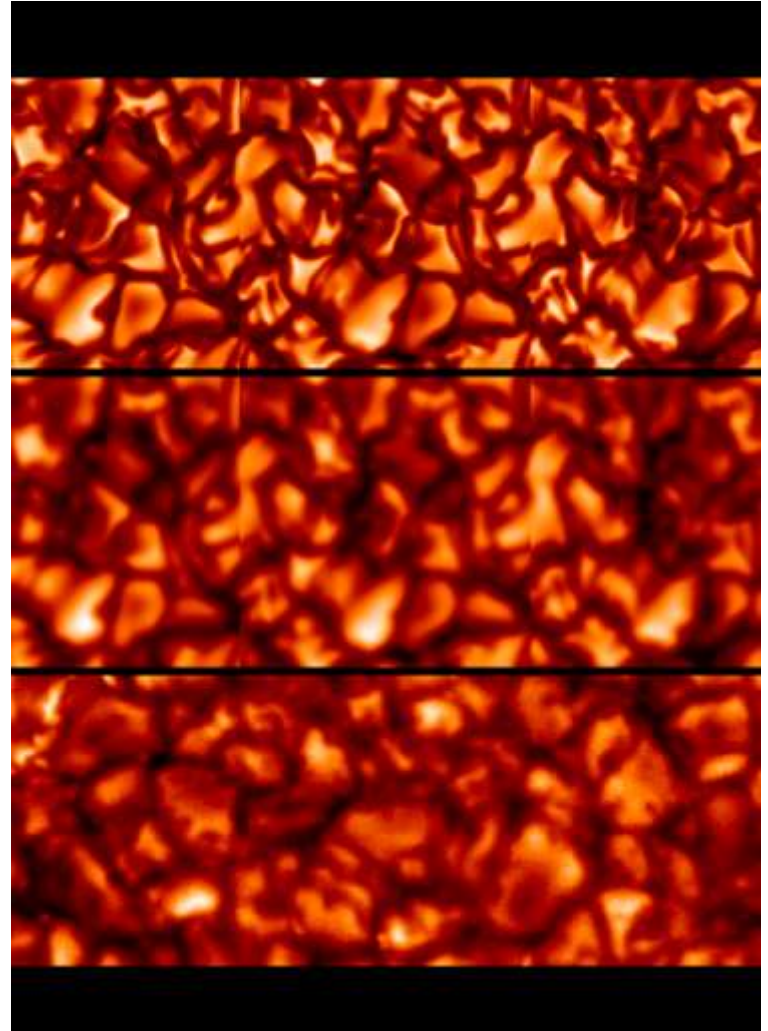
# Mesogranulace, obří buňky?

- Mesogranule
  - ~6 Mm
  - ~1 hodina
  - Není jasné, zda vůbec existují
  - Formovány explodujícími granulemi
- Obří buňky
  - Kontroverzní
  - ~ 100 Mm
  - ~ 7 dní
  - Pomalé horizontální pohyby ~10 m/s
  - Objevují se v numerických simulacích
  - Pozorování obtížná



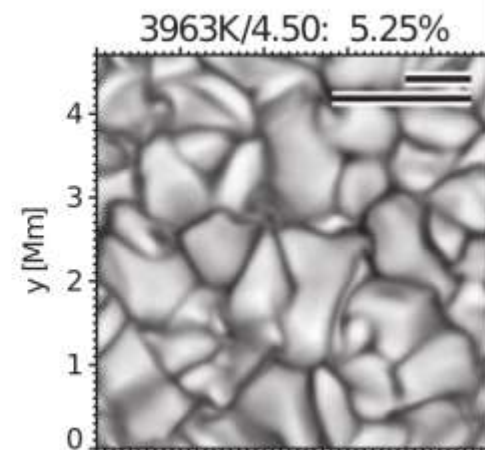
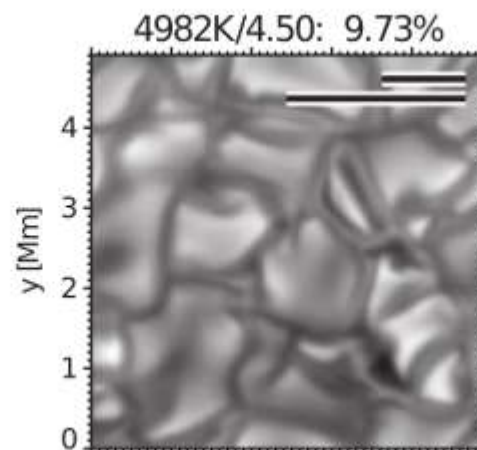
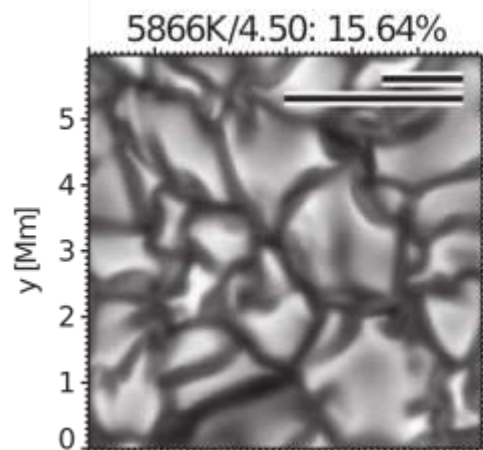
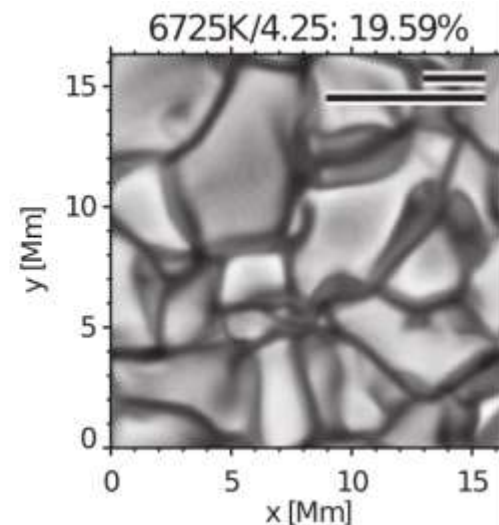
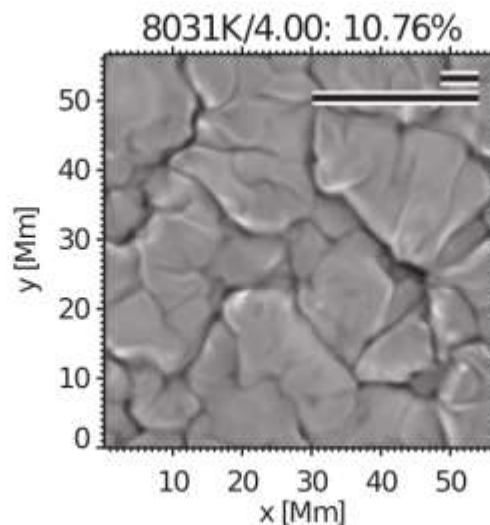
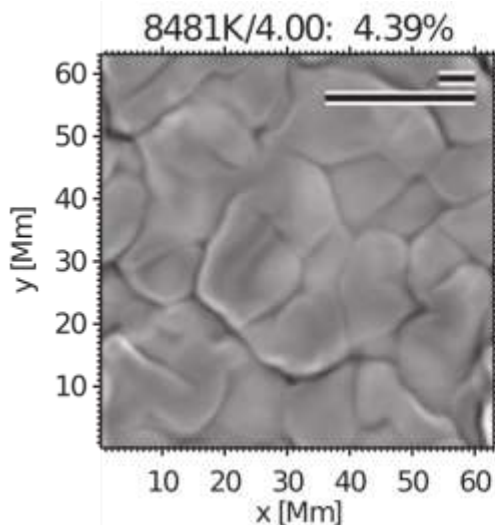
# Simulace konvekce

- Granulace považována za vyřešený problém
  - Parametry numerických simulací věrně reprodukojí vlastnosti granulí
  - Mnoho kódů používaných na světě



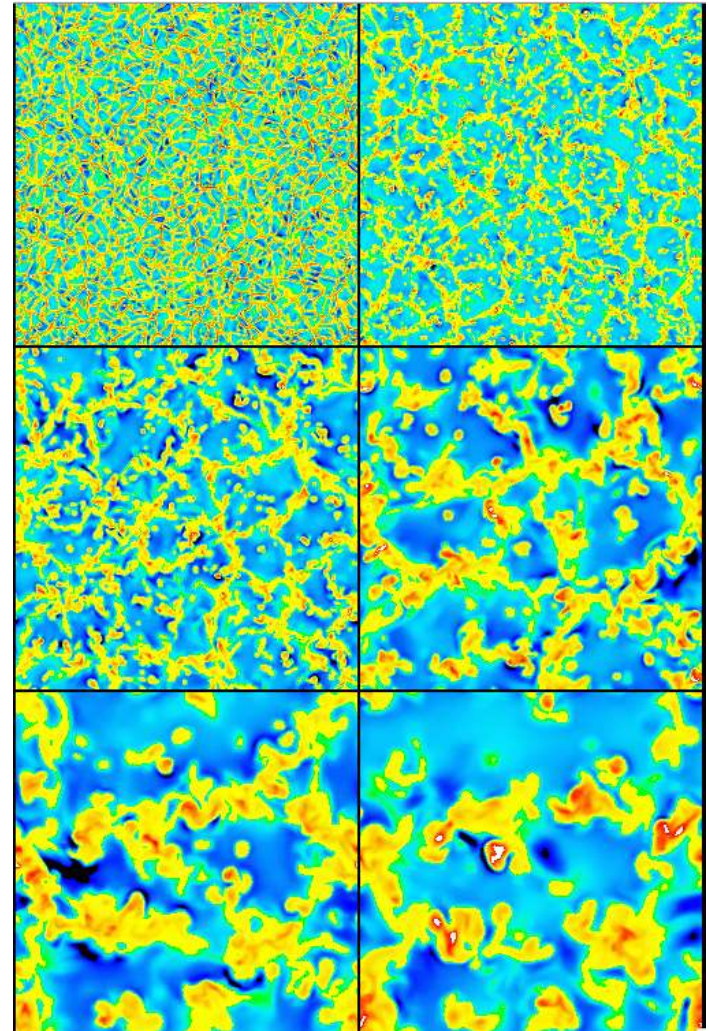


# Granulace jiných hvězd



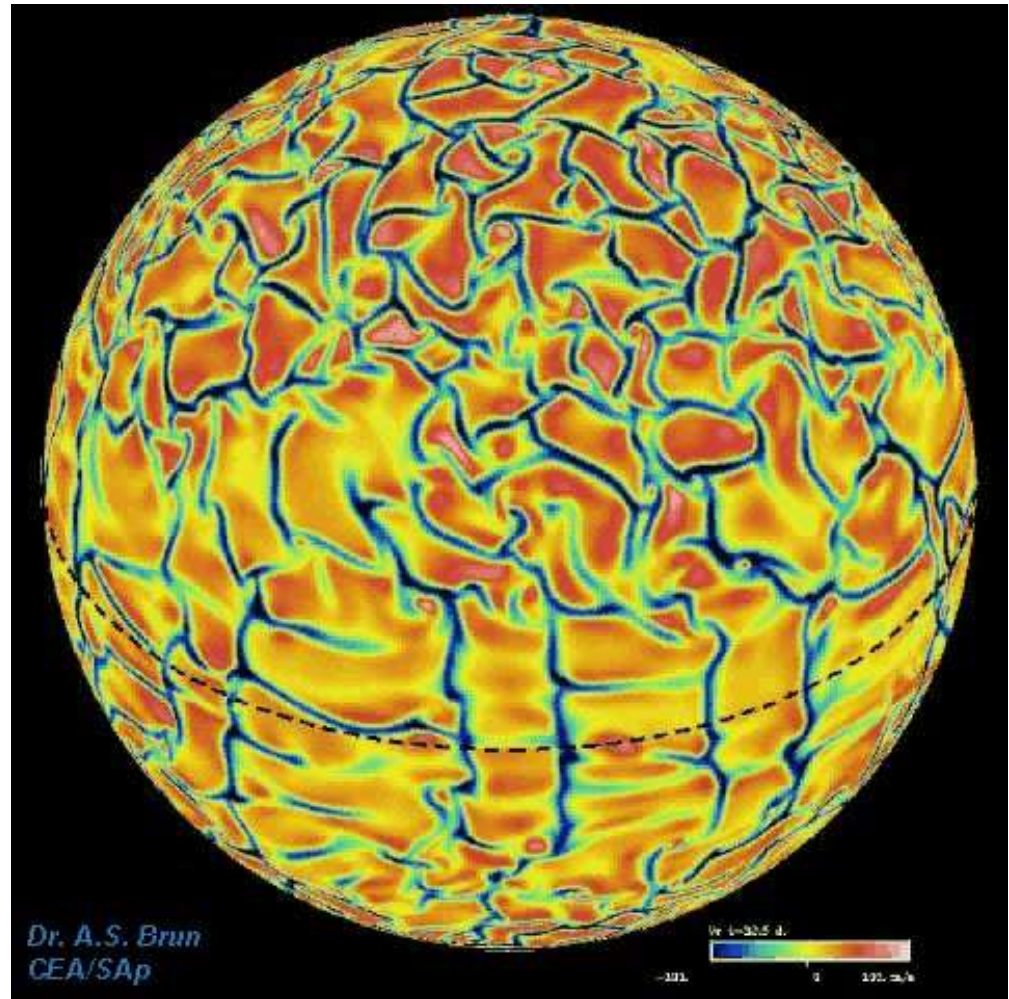
# Hierarchická konvekce v simulaci

- 3-D konvekce v  
přípovrchových vrstvách
- Horizontální řezy v  
hloubkách 2, 4, 6, 8, 12,  
16 Mm pod povrchem
- Škála se mění



# Globální konvekce

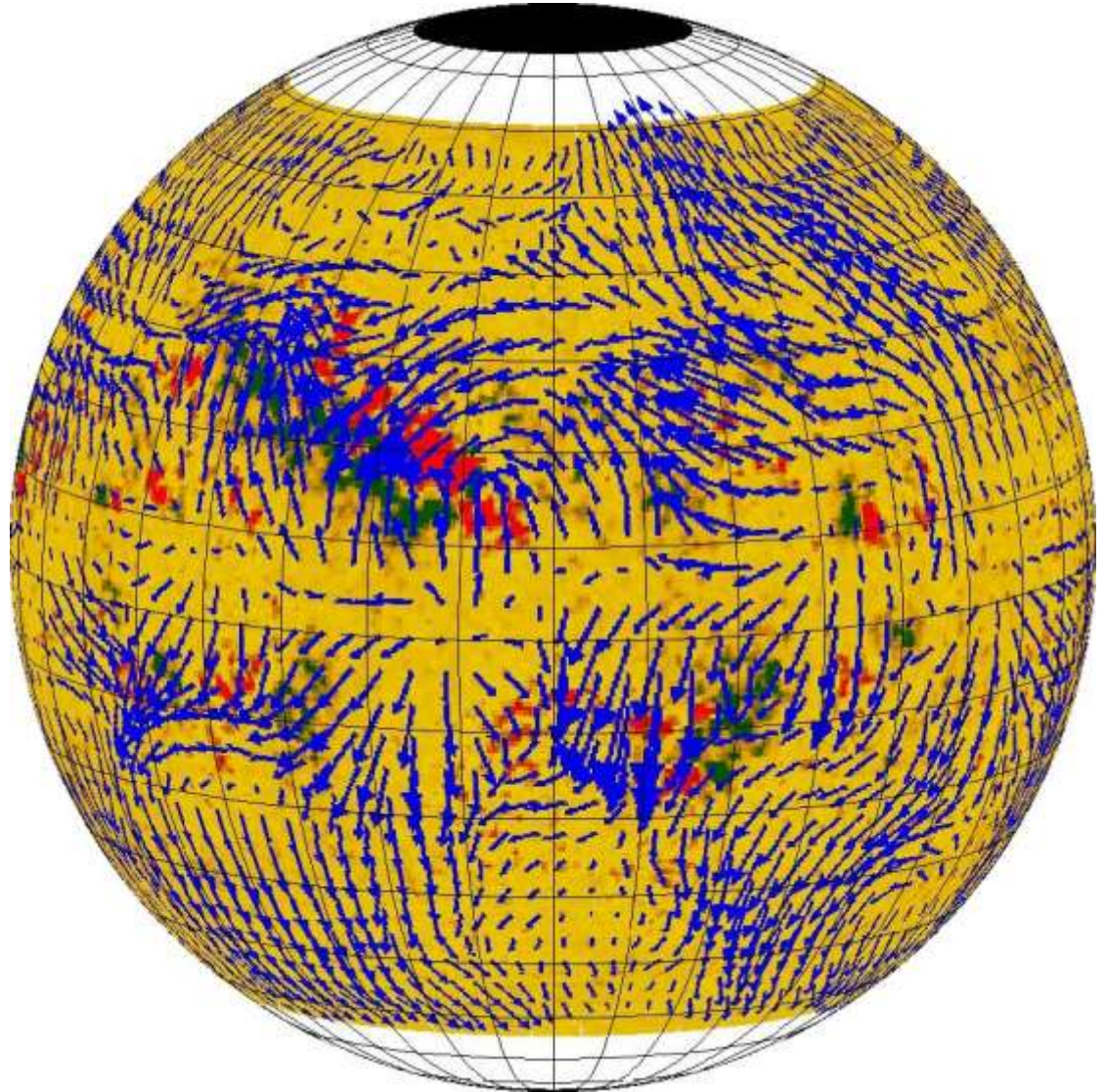
- Idealizované řešení (M)HD rovnic ve sférické geometrii
- Zahrnuje konvektivní obálku až na posledních 5 % (superadiabatická zóna)
- Produkovány obří buňky
- Vyzváno helioseismologií



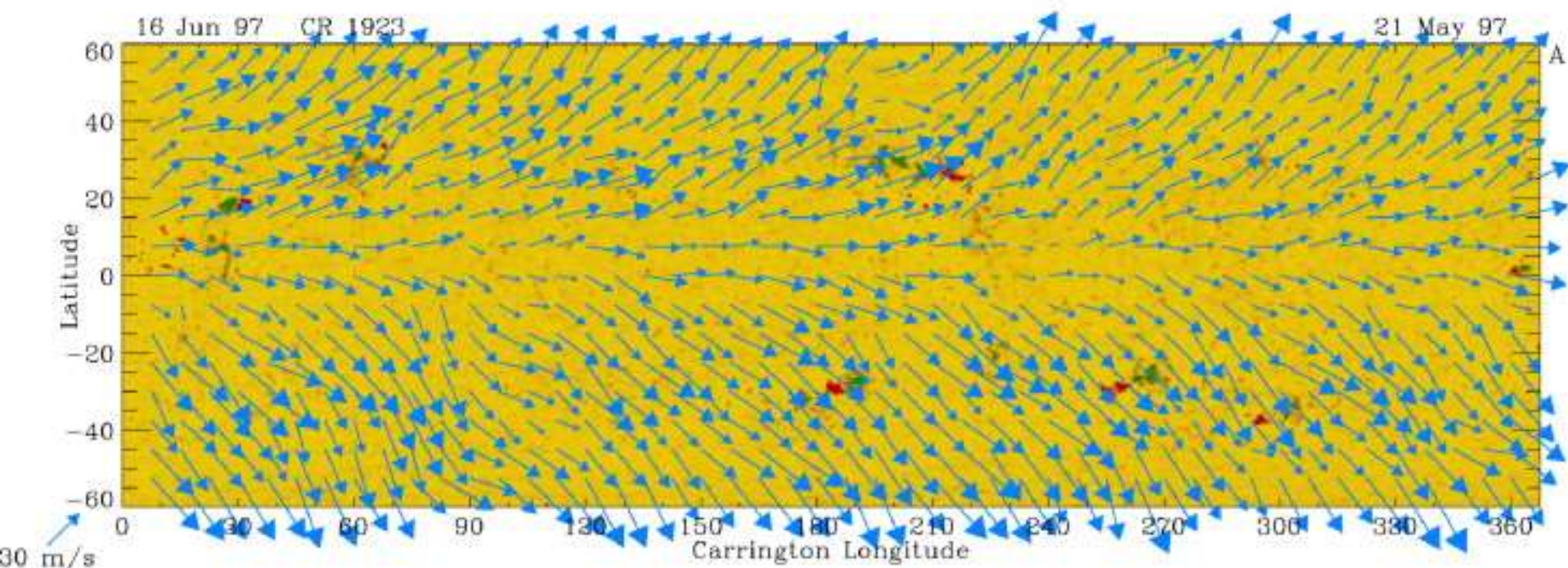
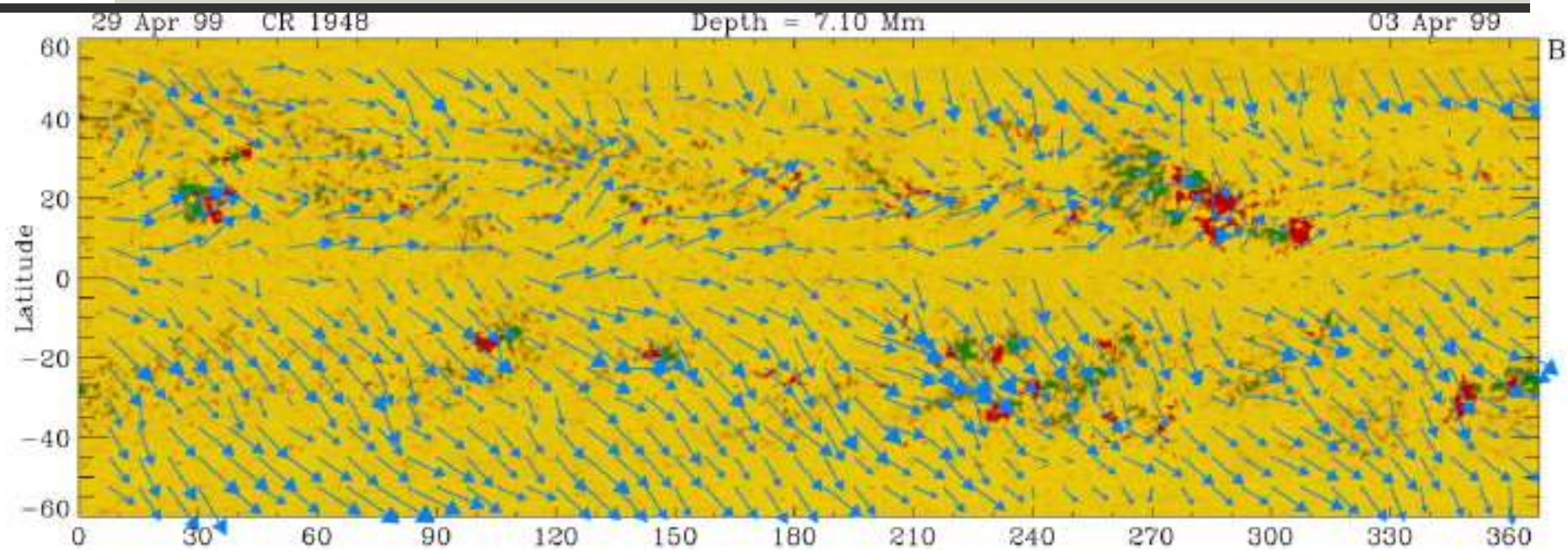


# Velkorozměrové proudění

- “podpovrchové počasí”
- “tlakové výše a níže na Slunci”
- Ovlivňováno aktivitou





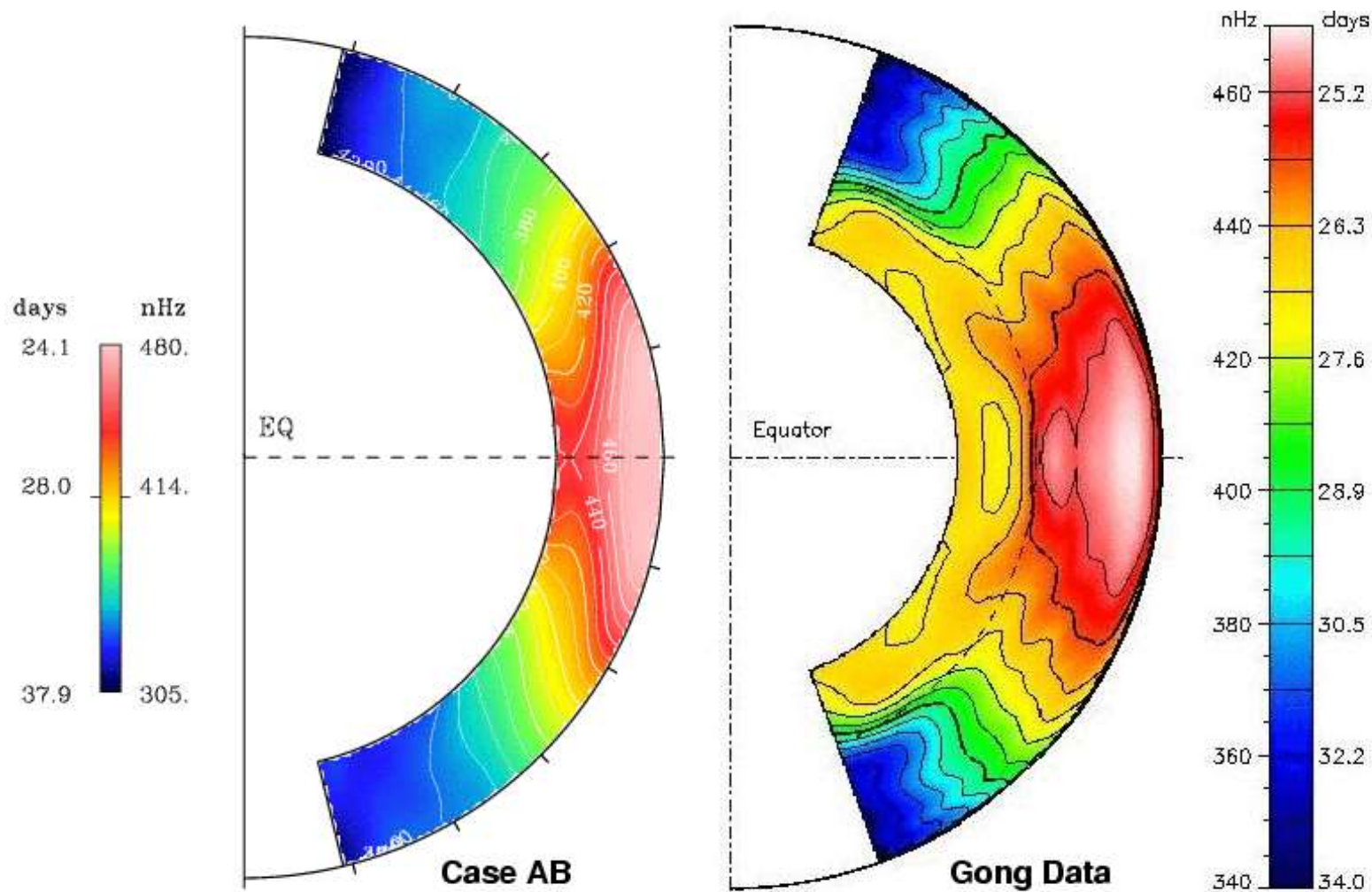


# Rotace Slunce

- Pomalá ~měsíc, ~1610 podle pohybů skvrn, Galileo
  - 1858, Carrington, střední rotační perioda skvrn je  $13^{\circ}12'$  za den, čili  $T=27,2753$  dne
- Diferenciální
  - 1863, Carrington,  $\omega = A + B \sin^{7/4} b$
  - Dnes se používá  $\omega = A + B \sin^2 b + C \sin^4 b$
  - Lepší popis expanzí na Legendreovy nebo Gegenbauerovy polynomy, či jiné ortogonální báze
- Nesymetrická vůči rovníku
- Ovlivněná magnetickými poli

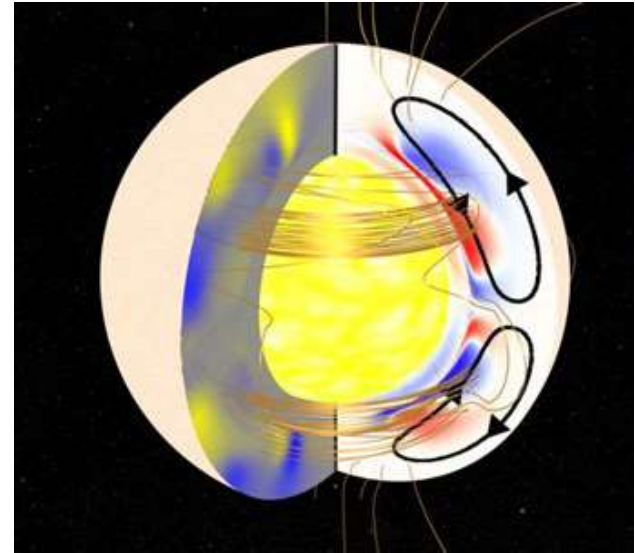


# Helioseismický rotační profil



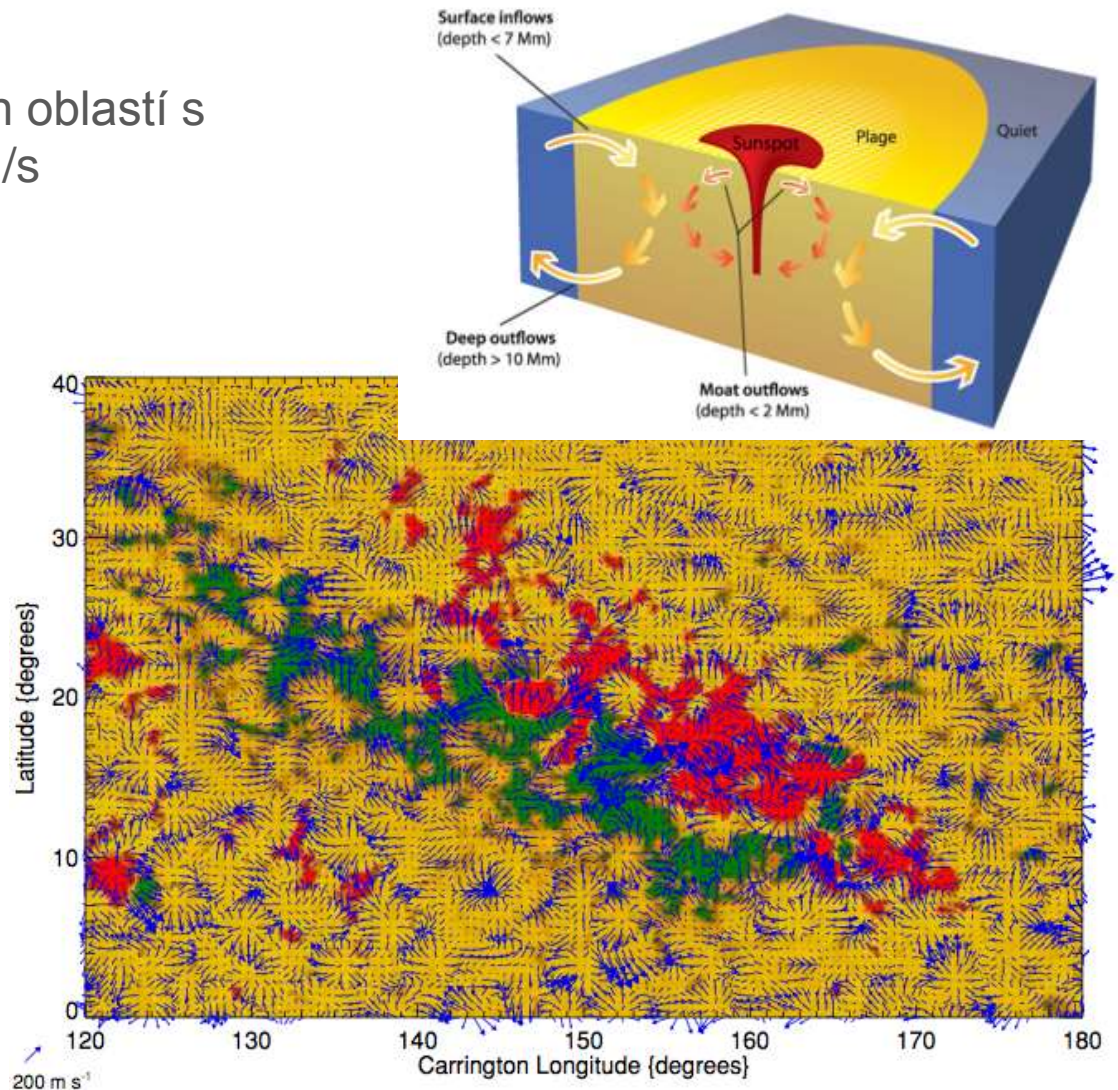
# Meridionální proudění

- Pomalý ( $\sim 10$  m/s) tok od rovníku k pólům
- (Zřejmě) odpovědný za odnos magnetického pole k pólu, přepólování globálního pole a jeho recyklaci
- Projeví se pouze statisticky – lokální rychlosti jsou až o dva řády větší
- Jeden z faktorů mající vliv na diferenciální rotaci
- Hlubková struktura nejasná



# Cirkulace kolem aktivních oblastí

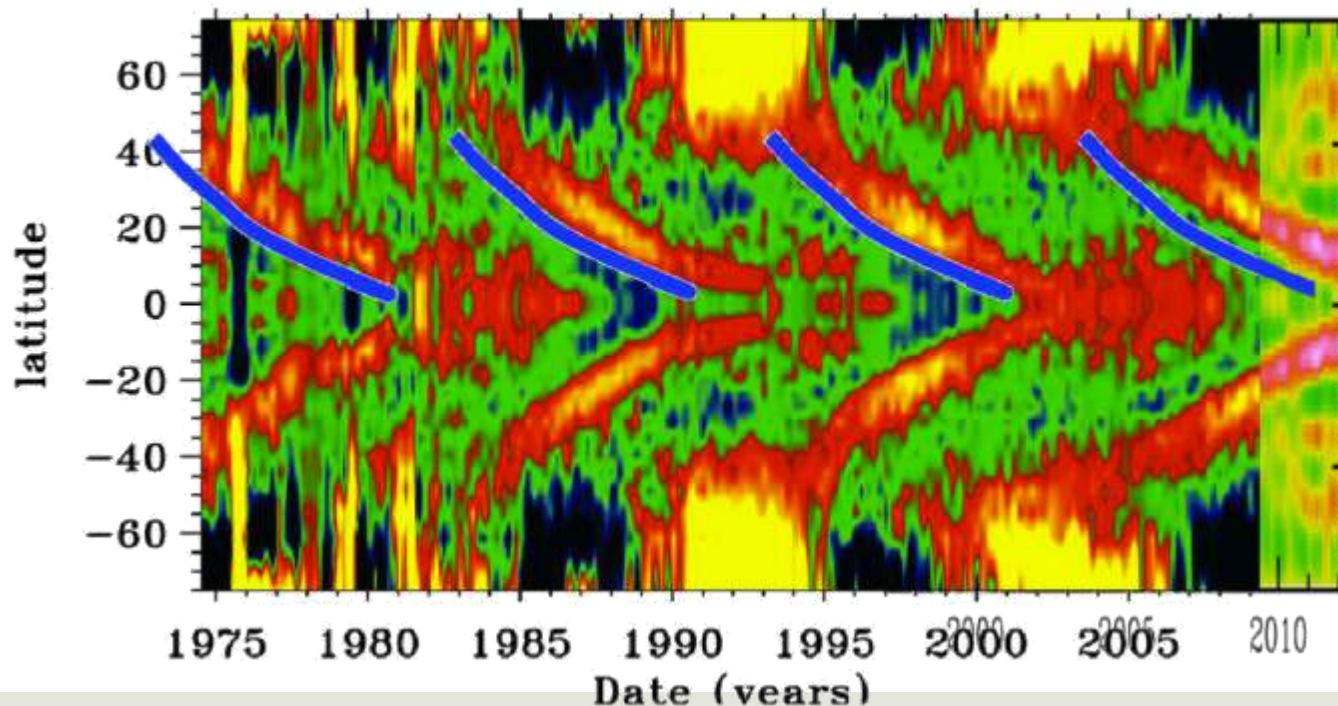
- Přípovrchové vrstvy
  - Vtok do aktivních oblastí s amplitudou 50 m/s
- Hlouběji
  - Výtok od aktivních oblastí s amplitudou 50 m/s
- Aktivní oblast stabilizována (?) cirkulačním límcem





# Cyklická složka rotace

- Diferenciální rotace i meridionální cirkulace mají složku měnící se s cyklem aktivity
  - Torzní oscilace
  - Vtoky to pásů aktivity
  - Obojí zřejmě důsledkem cirkulačních toků kolem aktivních oblastí
    - Avšak co v období nízké aktivity?

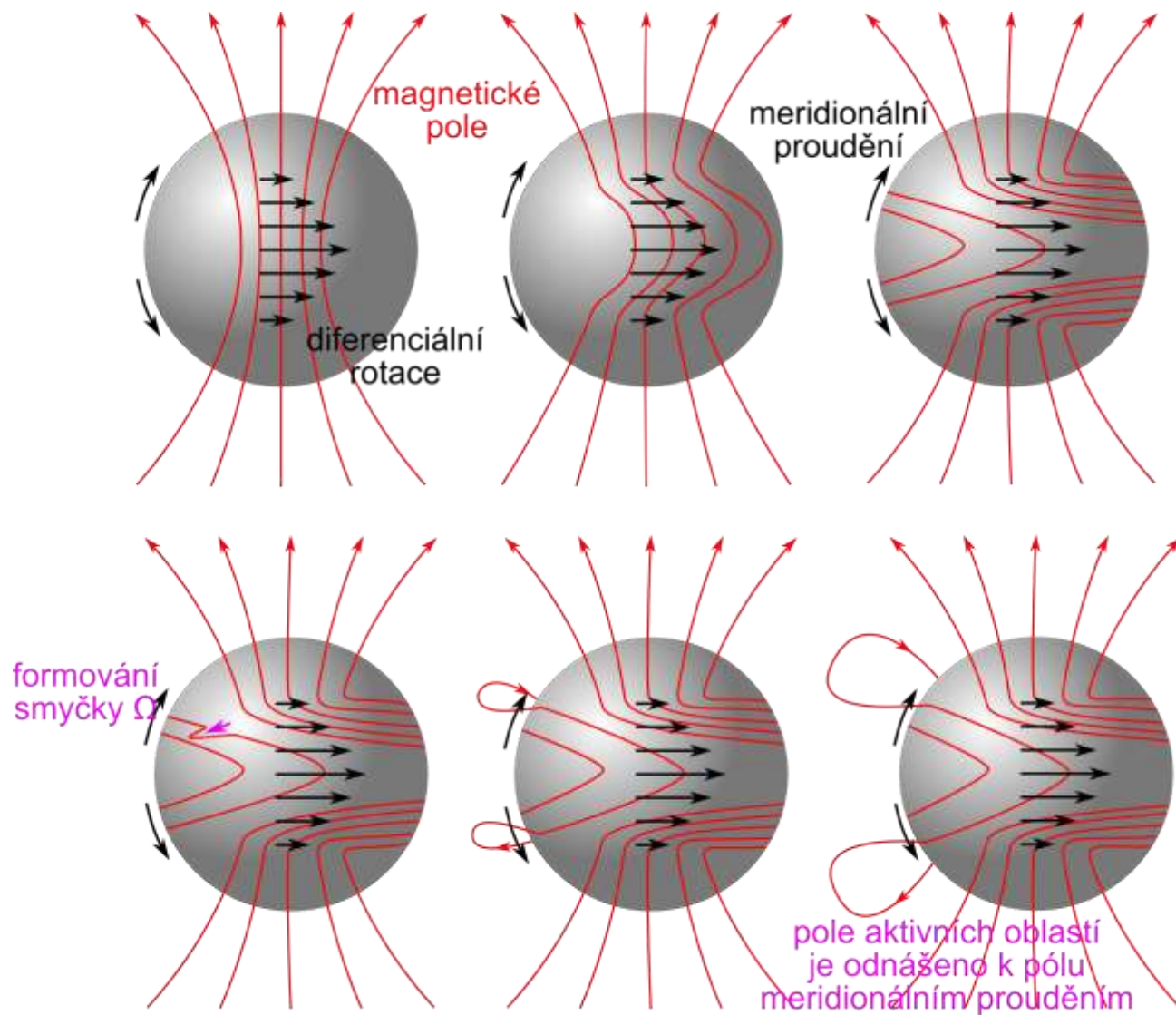


# Vlivy na magnetismus

- Slunce: ve stavu plazmatu
- *Plazma: kvazineutrální plyn nabitých a ionizovaných částic, který vykazuje kolektivní chování*
- Pohyby částic silně ovlivňovány elektromagnetickými silami
- Na Slunci plazma vysoce vodivé
- Magnetické pole zmrzlé
- Pohyby plazmatu mohou generovat/zesilovat původní magnetické pole
- Pro sluneční dynamo je proudění alfou a omegou

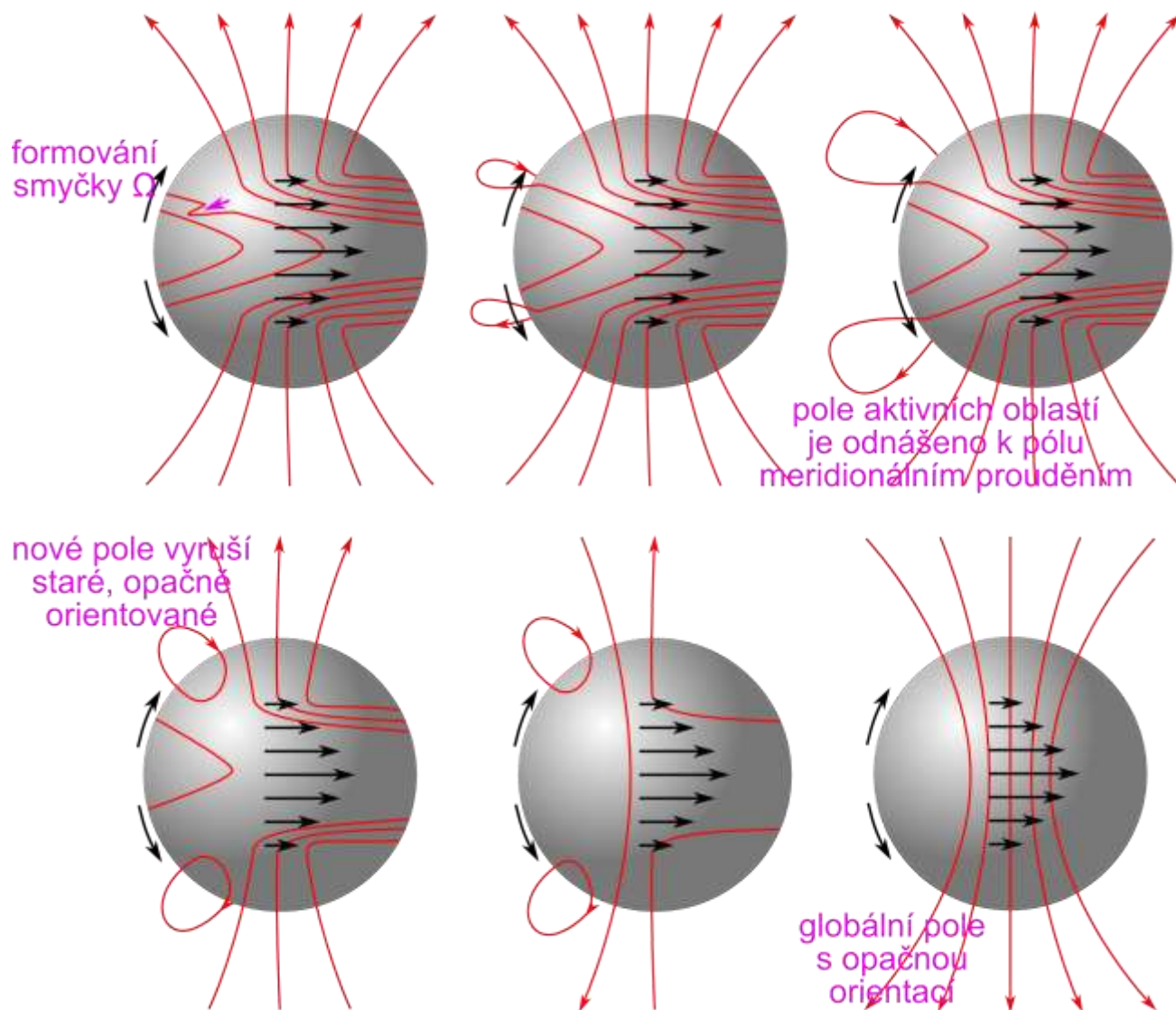
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

# Sluneční dynamo, 1. část



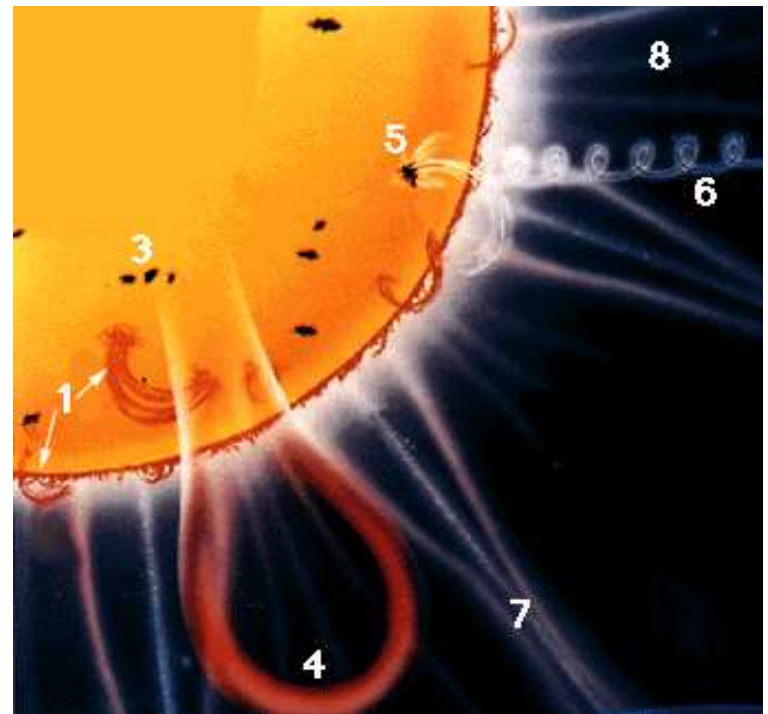


# Sluneční dynamo, 2. část



# Dynamo a aktivita

- Dynamo poskytuje cyklicky se měnící magnetické pole prostupující konvektivní zónu
- Nestability – silotrubice vychlípeny a jsou donuceny stoupat
- Prolamují fotosféru, vytahují se vysoko to atmosféry
- Formují známé jevy sluneční aktivity
  - Skvrny
  - Protuberance
  - Koronální smyčky
- Rozpadají se
  - Neexplozivně i explozivně





**Konec druhé části...**