

Sluneční magnetismus

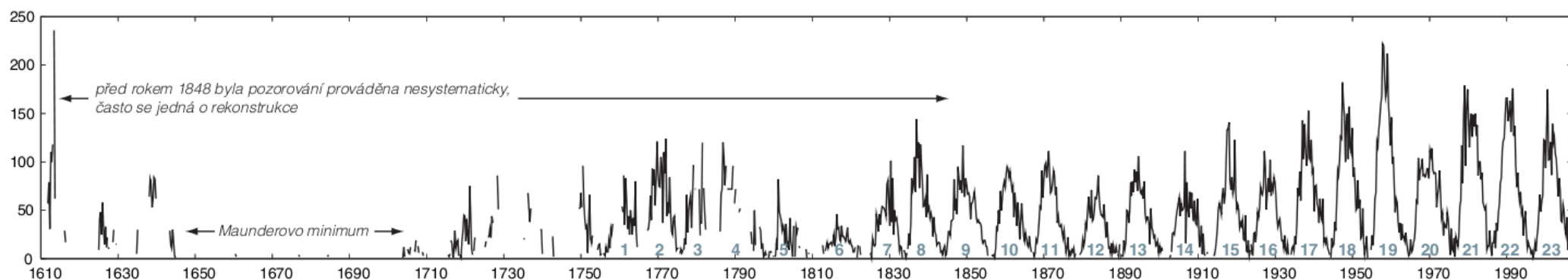
Sluneční fyzika
LS 2013/2014

Michal Švanda

Astronomický ústav MFF UK
Astronomický ústav AV ČR

Sluneční cyklus

- Hlavní cyklus – 11 let
 - Objev – Heinrich Schwabe (1834)
 - Hale – 22 let, složený ze dvou 11letých
 - 7,5 – 16 let (11,2 je střední délka trvání)
 - V počtu slunečních skvrn, jejich ploše, mohutnosti erupcí, ...
 - Od ~1760 číslovány, v současnosti je cyklus 24 ve vzestupné fázi

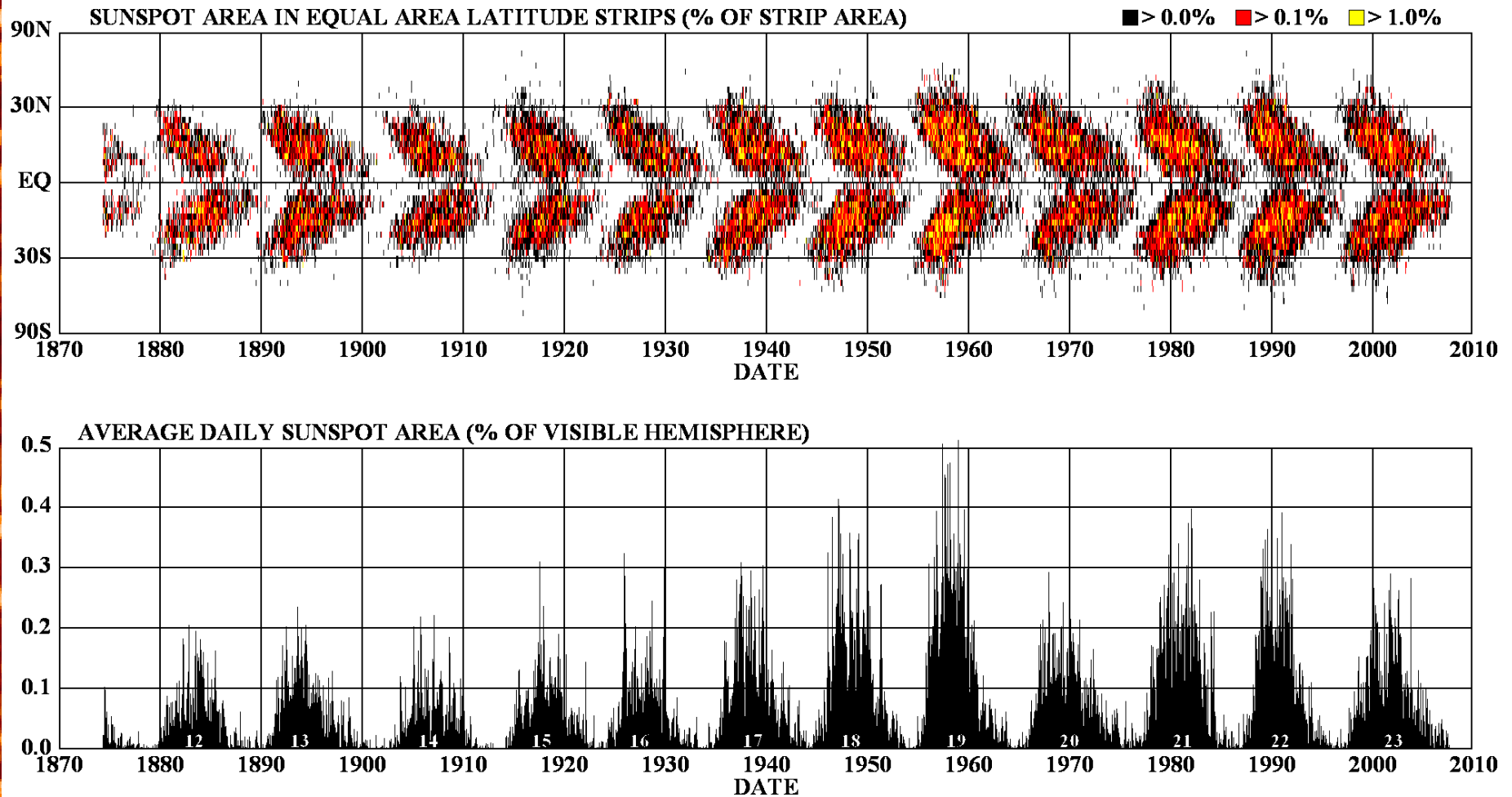


Hlavní projevy 11- (22-) letého cyklu

- Mění se počet a mohutnost aktivních jevů
- Lokalizované aktivní jevy migrují k rovníku
- Polarita vedoucích skupin skvrn a globálního magnetického pole se cyklus od cyklu mění
- Magnetické pole se zesiluje a zase „rozpouští“ periodicky
 - Operuje jakýsi typ dynamo

Sluneční dynamo: projevy (1)

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



Sluneční dynamo: projevy (2)

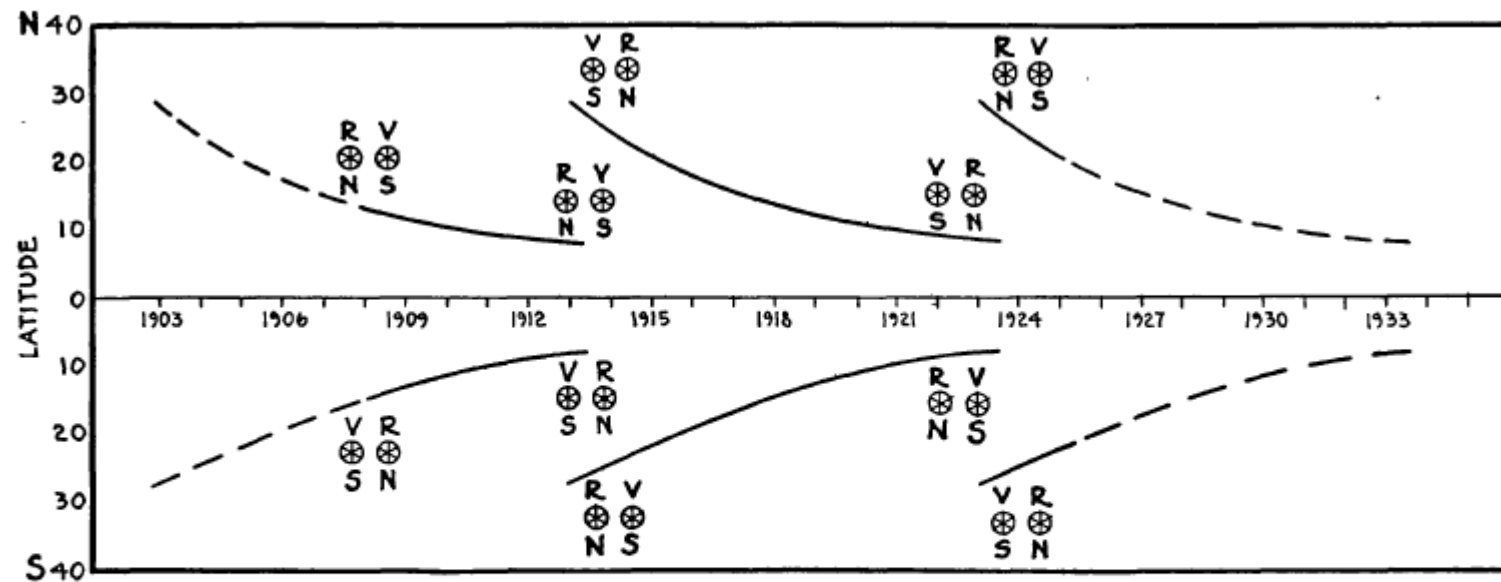
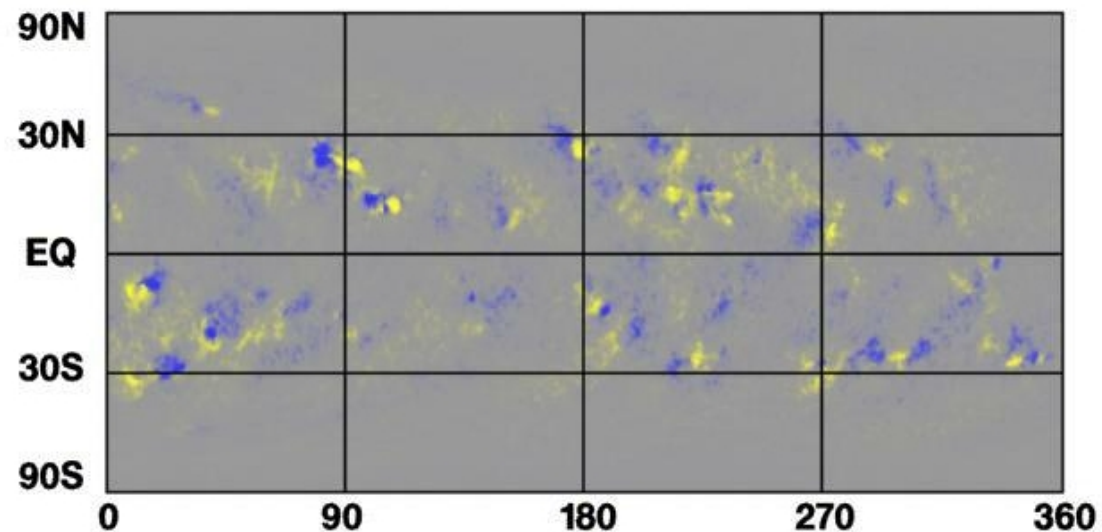


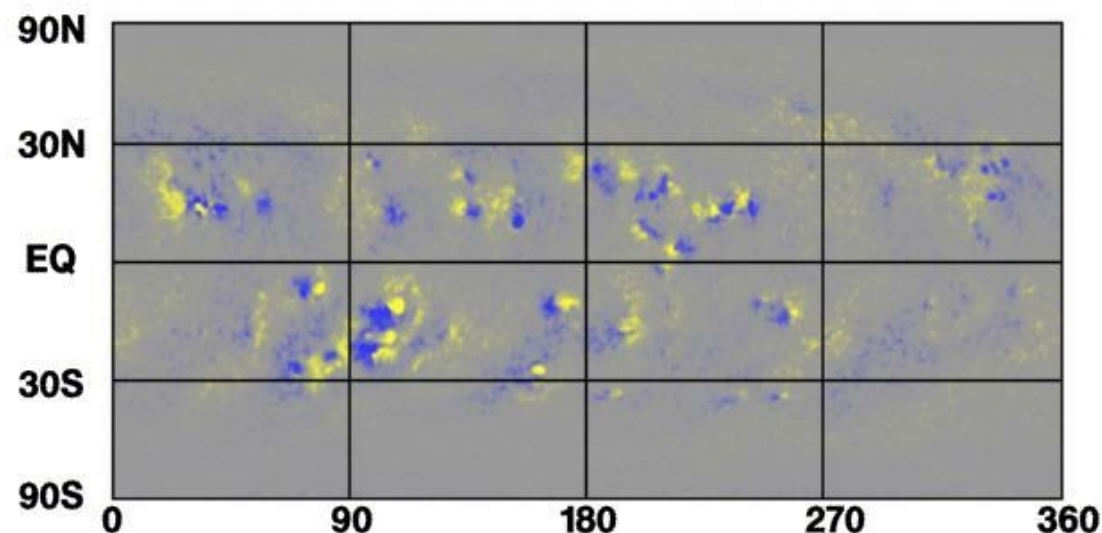
FIG. 18.—The law of sun-spot polarity. The curves represent the approximate variation in mean latitude and the corresponding magnetic polarities of spot groups observed at Mount Wilson from June 1908 to January 1925. The preceding spot is shown on the right.

Sluneční dynamo: projevy (3)

Cycle 21



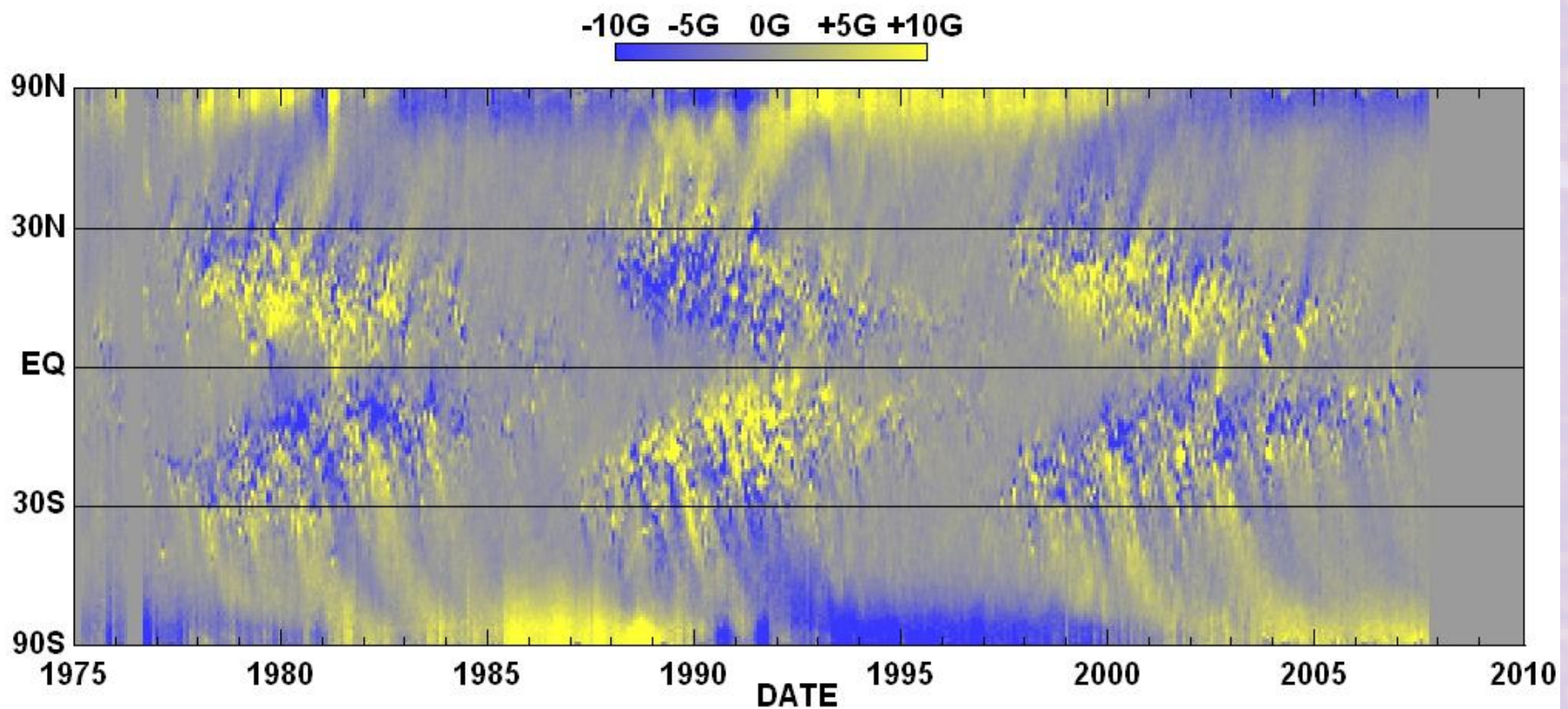
Cycle 22



Sluneční dynamo: projevy (5)

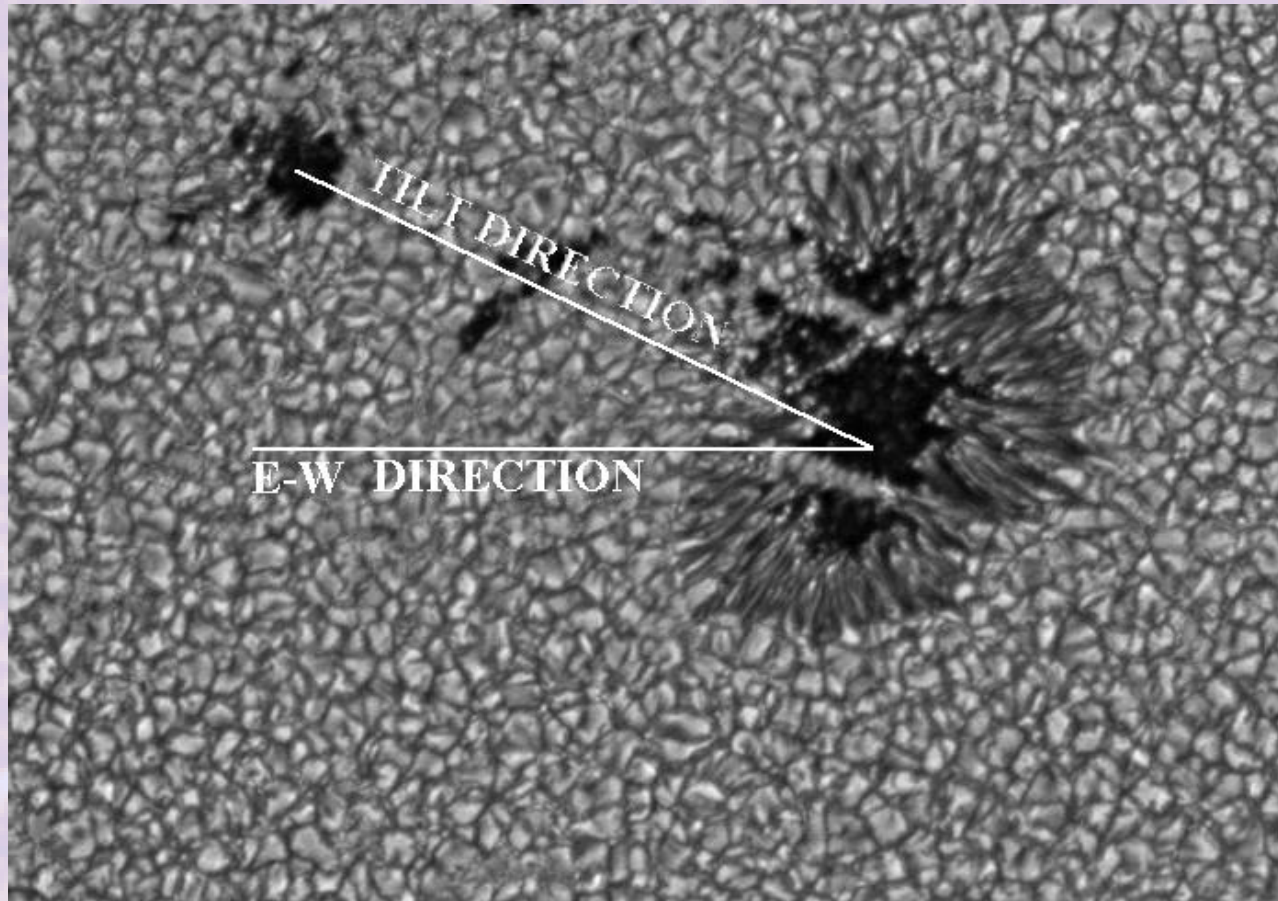


Sluneční dynamo: projevy (5)



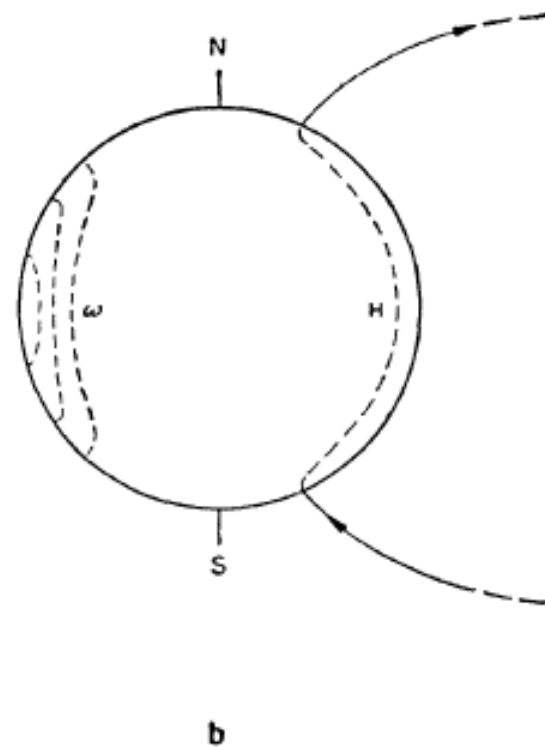
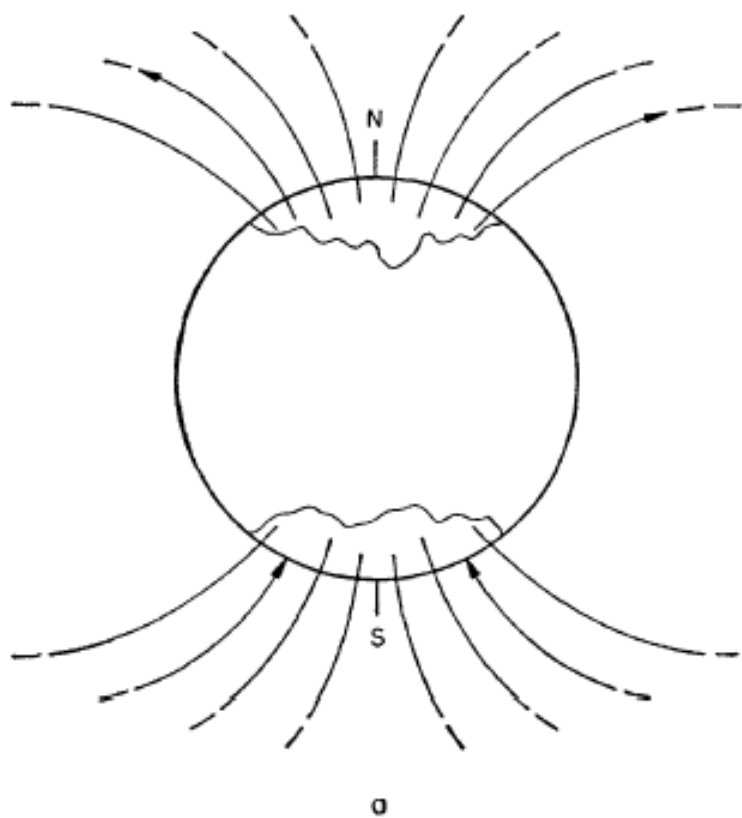
NASA/MSFC/NSSTC/Hathaway 2007/10

Joyův zákon



- Rozvinuté bipolární skupiny jsou skloněné (otočené) vůči rovnoběžkám

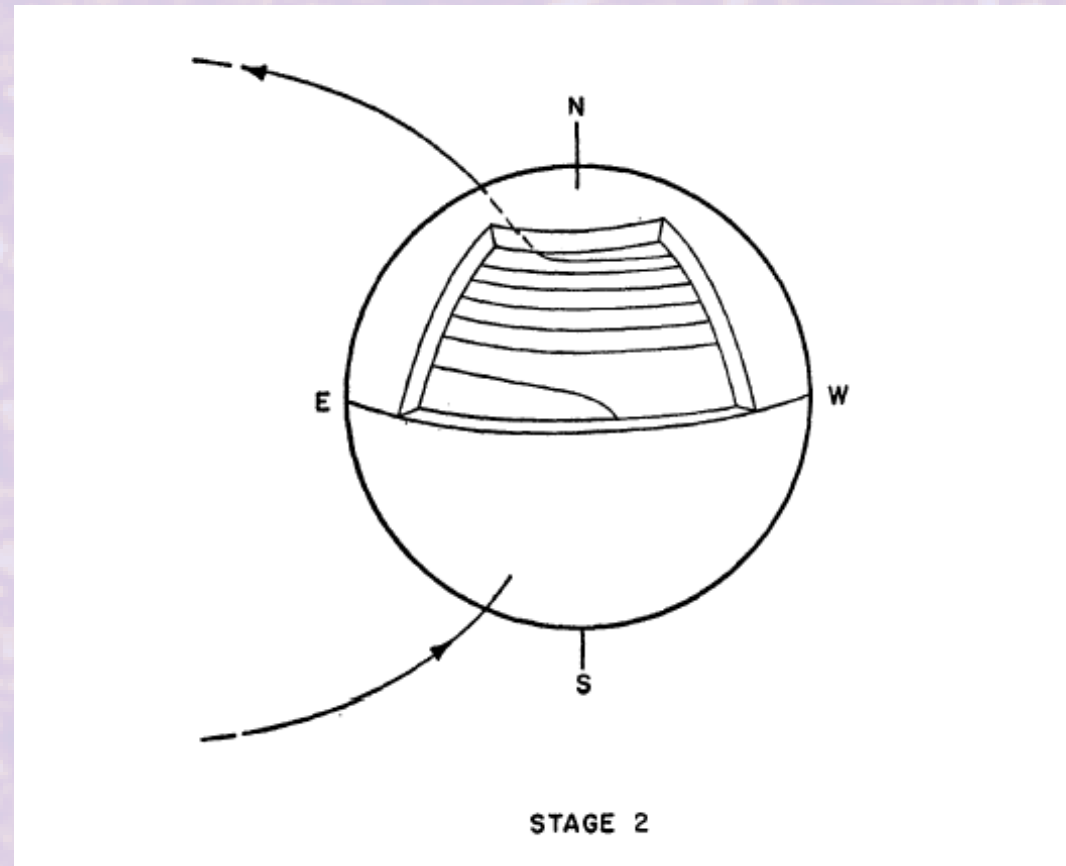
Babcockovo dynamo (1)



STAGE I

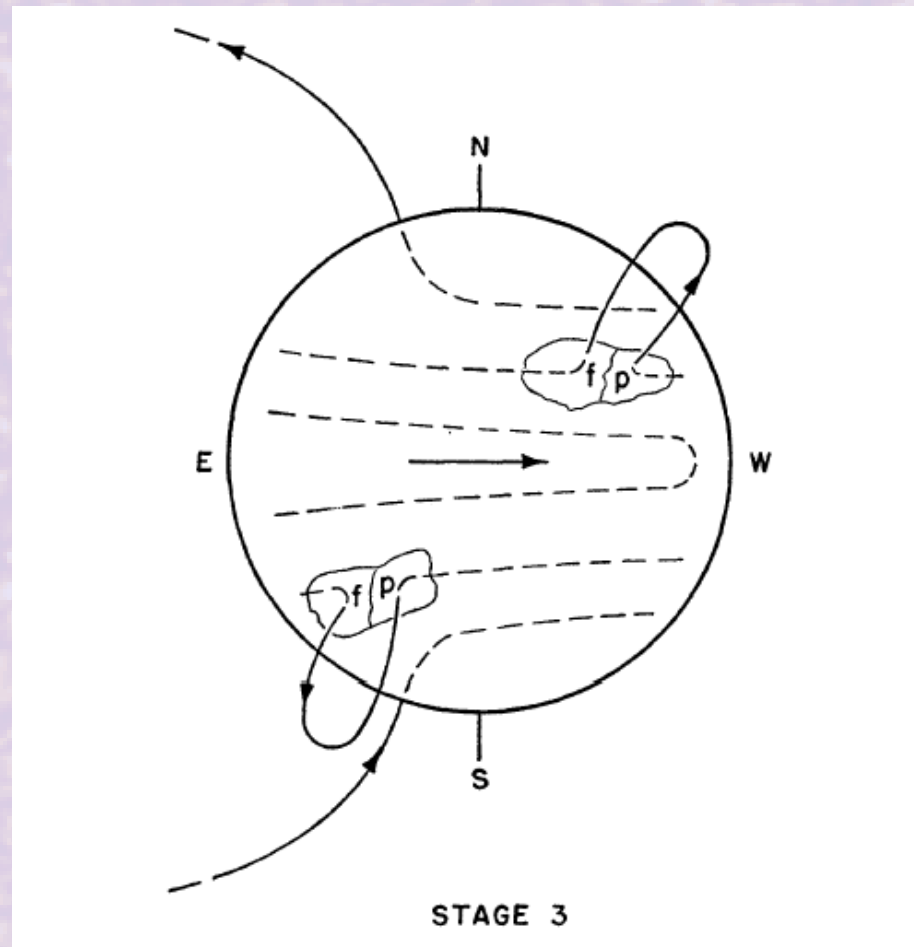
Babcockovo dynamo (2)

- Akce diferenciální rotace (Ω efekt) mění poloidální pole na toroidální – pole je v plazmatu zmrzlé



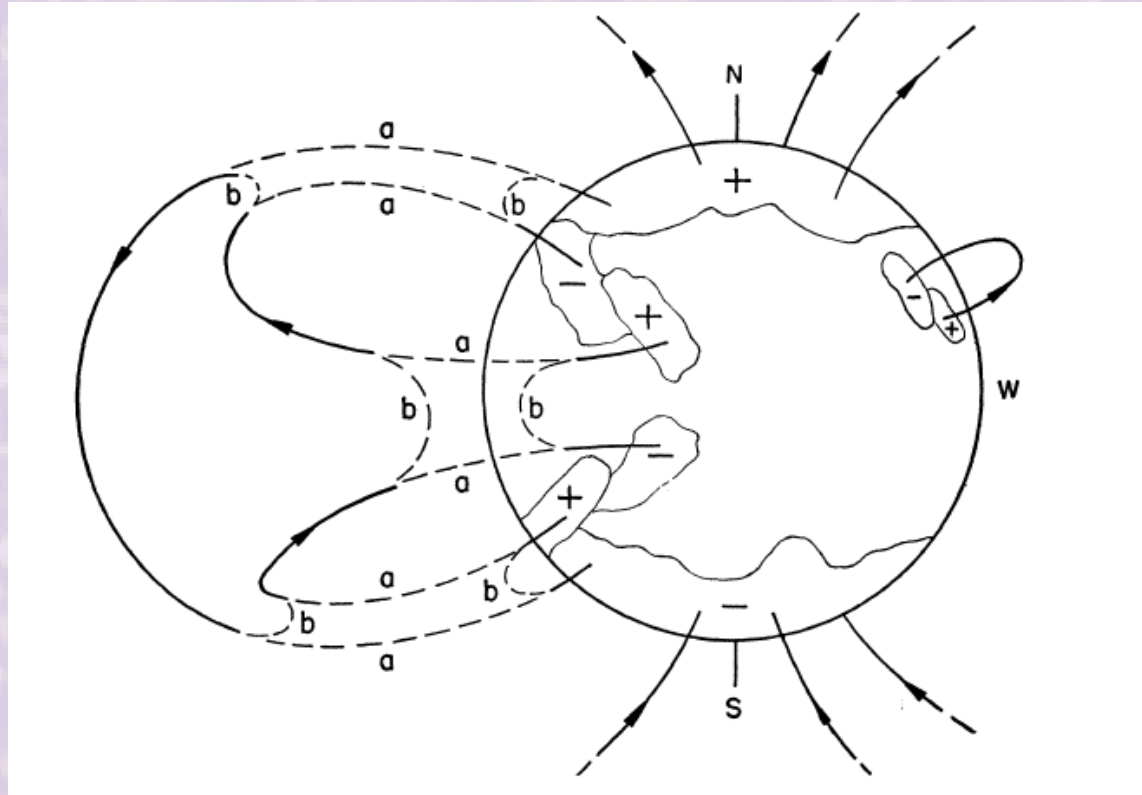
Babcockovo dynamo (3)

- Magnetické trubice vzplývají a formují aktivní oblasti
 - Joyův zákon – pole nejsou čistě toriodální, ale mají svoji poloidální složku, která je opačná proti původnímu globálnímu poloidálnímu poli

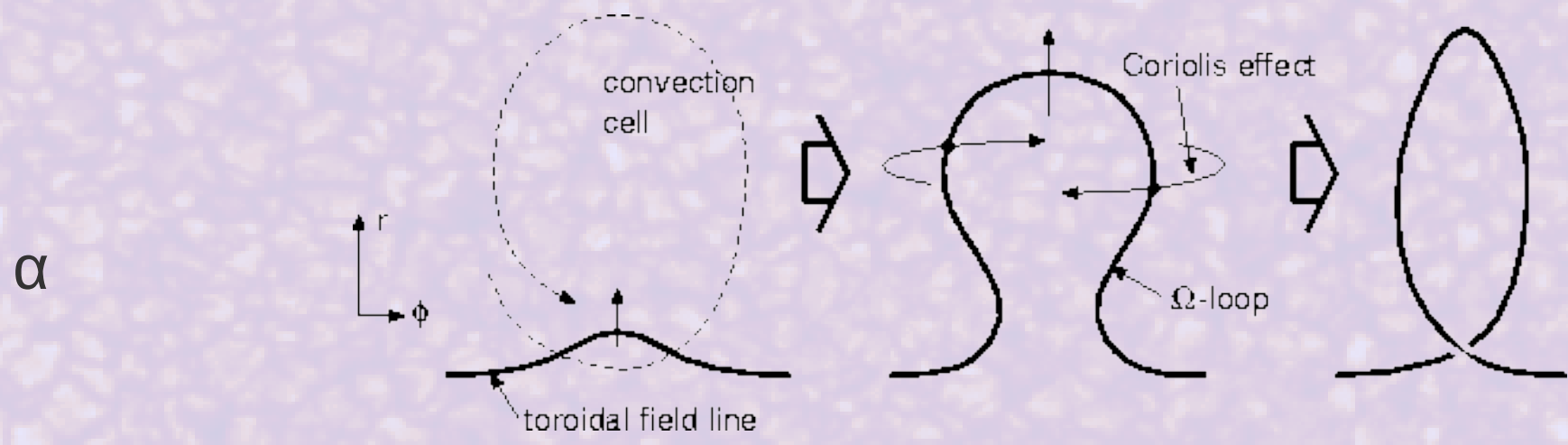
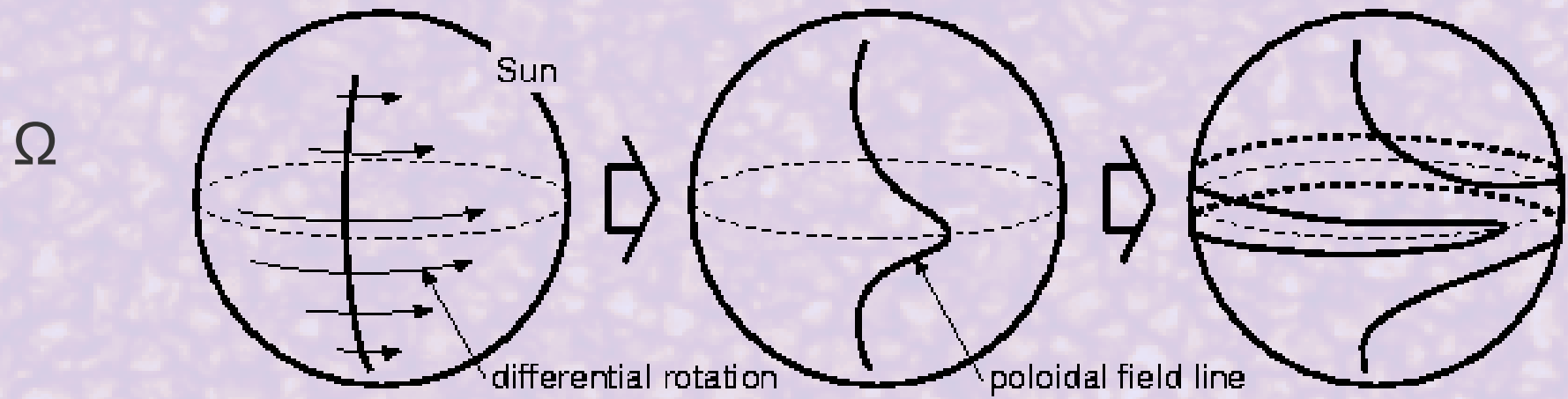


Babcockovo dynamo (4)

- Pole v aktivních oblastech interaguje s globálním polem a přepojuje se v koróně. Značná část pole anihiluje, formuje se globálně opačná polarita, která je převážně poloidální



α a Ω efekt



Parkerovo kinematické dynamo

$$B = B_0 \exp \left[\left(-\eta_t k^2 + \sqrt{\frac{k \alpha \Omega}{2}} \right) t + i \left(\sqrt{\frac{k \alpha \Omega}{2}} t + kx \right) \right]$$

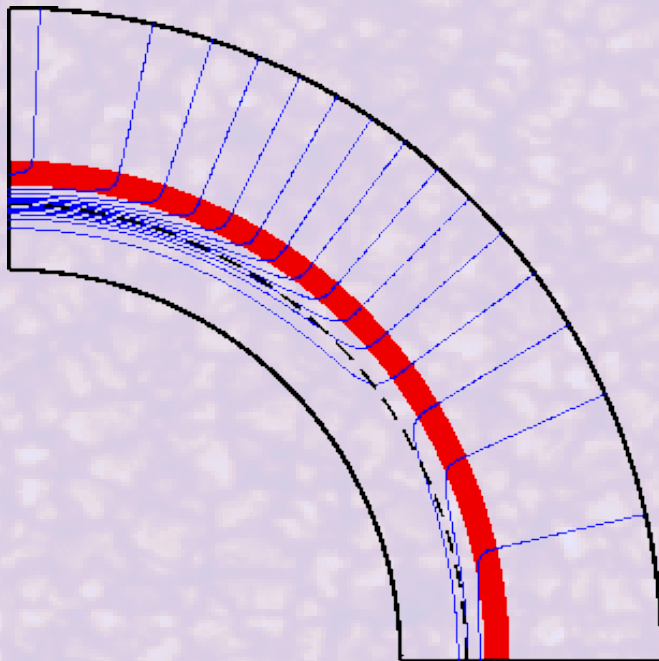
Pro $\alpha\Omega < 0$ se propaguje vlna ve směru k rovníku – odpovídá slunečnímu případu. Potřebujeme ještě způsob, jak magnetické pole “zničit” – α -quenching

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \left(\frac{B}{B_0} \right)^2}$$

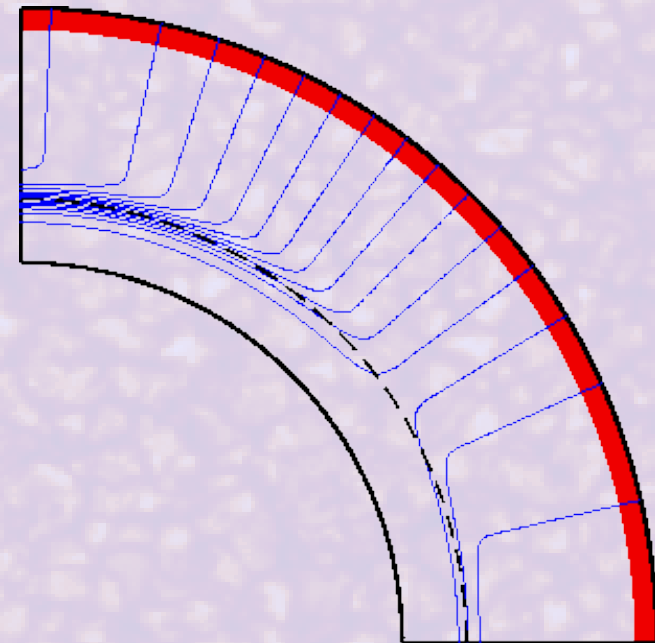
Modifikované řešení Parker-Yoshimura znaménkové pravidlo $\alpha \, d\Omega/dr < 0$, což se ovšem na Slunci nepozorovalo (60. a 70. léta), 80. léta – helioseismologie prakticky stanovuje $d\Omega/dr \sim 0$ pro konvektivní zónu. Další měření – podpovrchové oblasti (posledních $0,05 R$) ukazují nárůst rotační rychlosti s hloubkou

Babcockovo-Leightonovo dynamo

Operuje v přípovrchových vrstvách



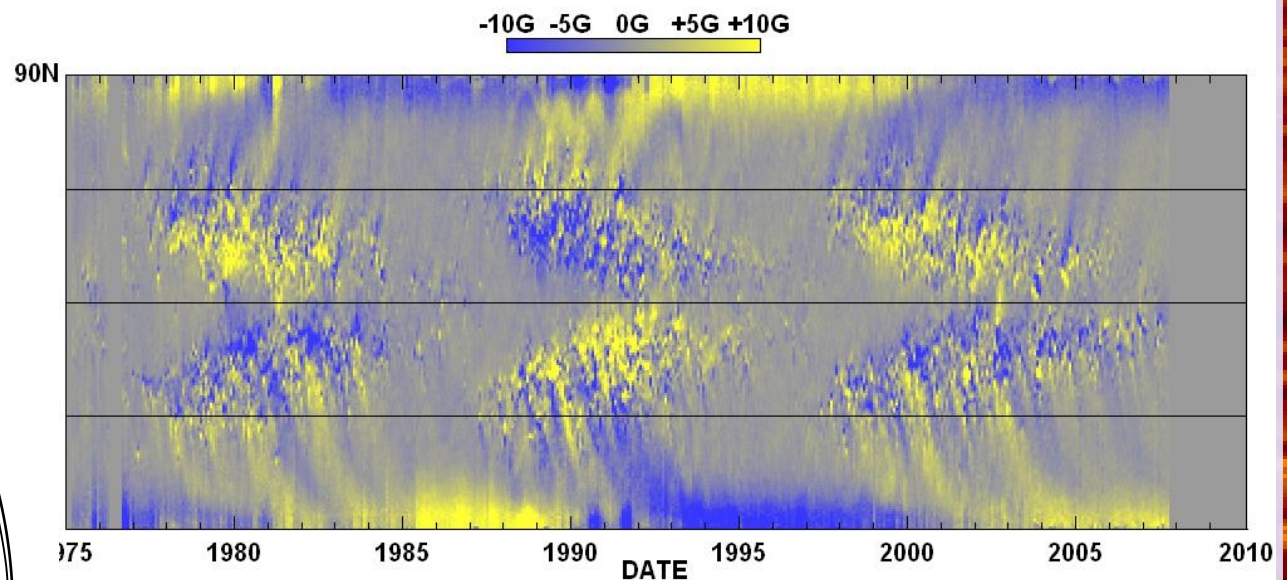
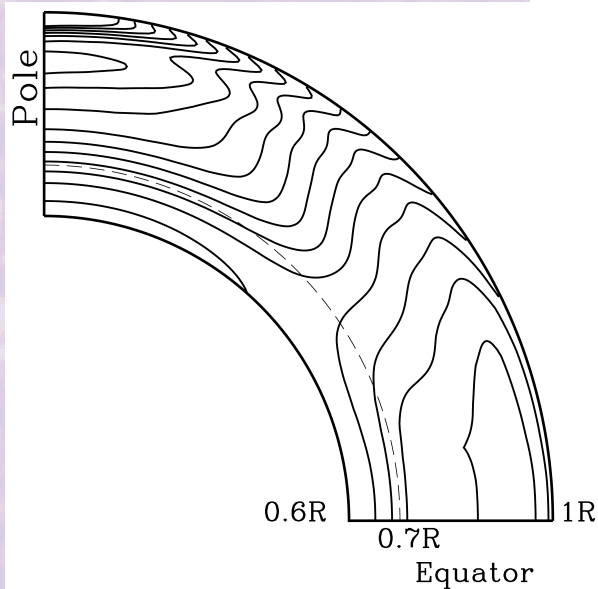
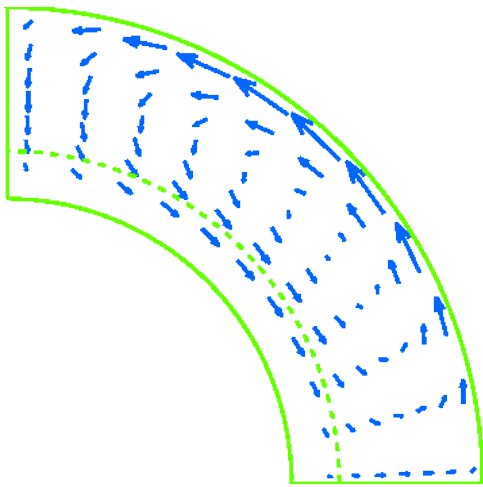
Klasické dynamo: oba efekty operují v hloubce, zřejmě na dně konvektivní zóny



B-L dynamo: α -efekt se vyskytuje v přípovrchových vrstvách, oba efekty jsou prostorově odděleny

Role meridionálního toku

- Důležitý při odnosu následné (trailing) polarity k pólu, podepisuje se na změně celkové polarity



NASA/MSFC/NSSTC/Hathaway 2007/10

Babcockovo-Leightonovo dynamo

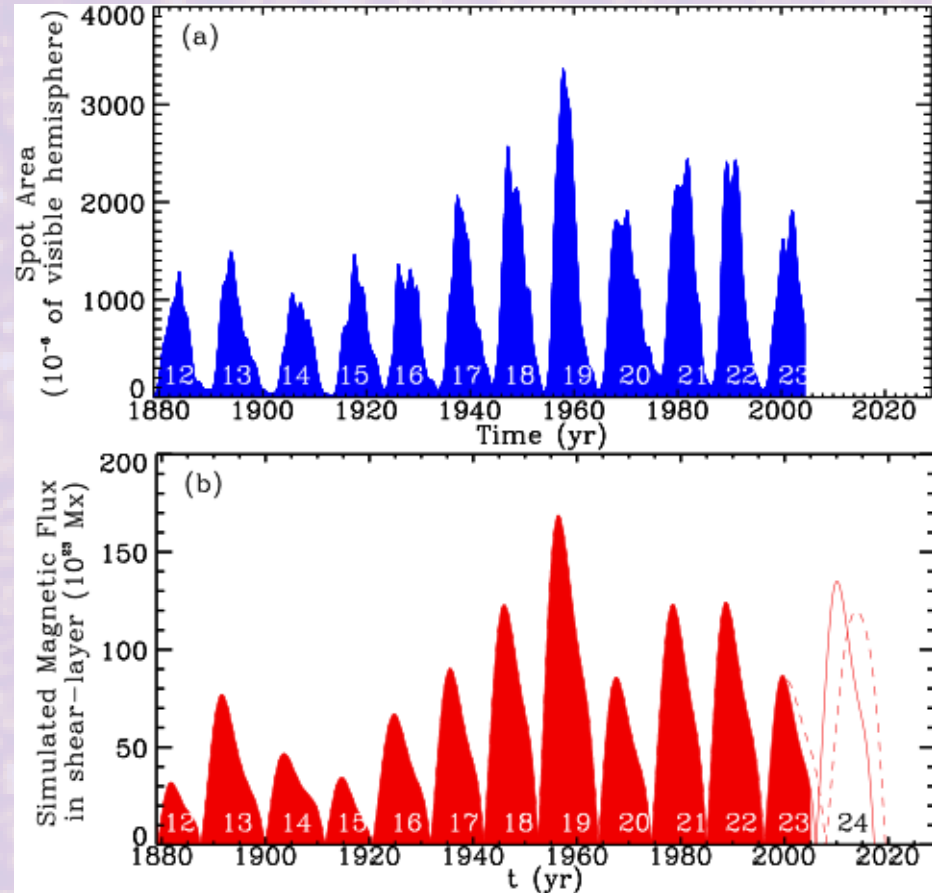
• Produkuje:

- Délku cyklu 22 let (nastavena meridionálním prouděním)
- Fázový posun mezi k rovníku migrujícím toroidálním polem a k pólu migrujícím poloidálním polem
- 10-100 kG toroidální pole na dně konvektivní zóny (nutné pro formaci skvrn ve správných šířkách)
- Polární pole ~ 10 G
- Slabá antikorelace mezi amplitudou a délkou cyklu

• Neprodukuje:

- Asymetrie mezi severní a jižní polokoulí
- Není samovybuzené, čili po velkých minimech by se už nenastartovalo (možná existence dalších efektů), vyžaduje primordinální pole, které jen přerozděluje a zesiluje v cyklu

- Numerické simulace
- Flux-transport (meridional flow dominated) × difusion-dominated
- Předpovědi
 - Nedůležité pro fyziku
 - Důležité pro aplikace
 - NASA
 - Elektronika
 - Rozvody
 - Kosmické počasí



Magnetická pole na Slunci

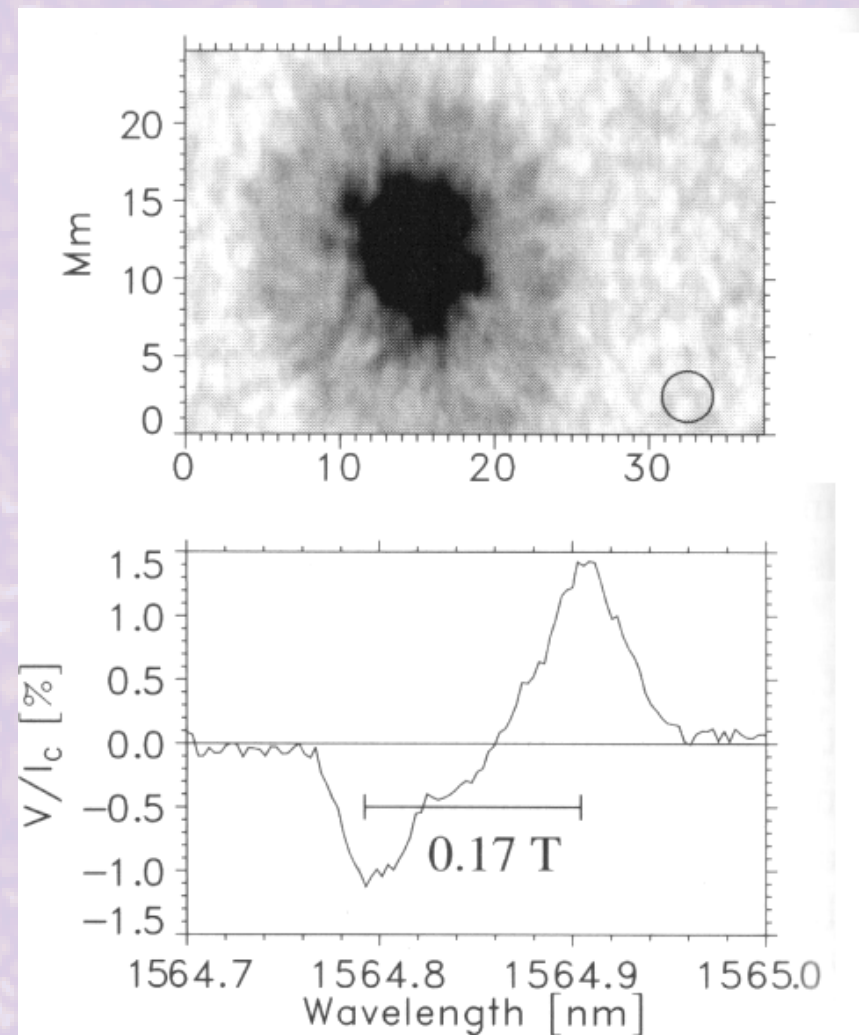
- Pozorována
 - Ve fotosféře (skvrny, knoty, fakule, póry, jasné body)
 - V chromosféře (vláknitá struktura, plage, spikule, protuberance)
 - V koróně (protuberance, paprsková struktura)
- Obecně 3-D struktura
- Vývoj v čase
 - Vznik, vývoj a rozpad skvrn
 - Dynamika malorozměrových magnetických polí
 - Erupce, vývoj protuberancí
- Pozorovací metody
 - Zeemanův jev
 - Hanleho jev
 - (Spektro)polarimetrie

Pozorovací důkazy magnetických trubic

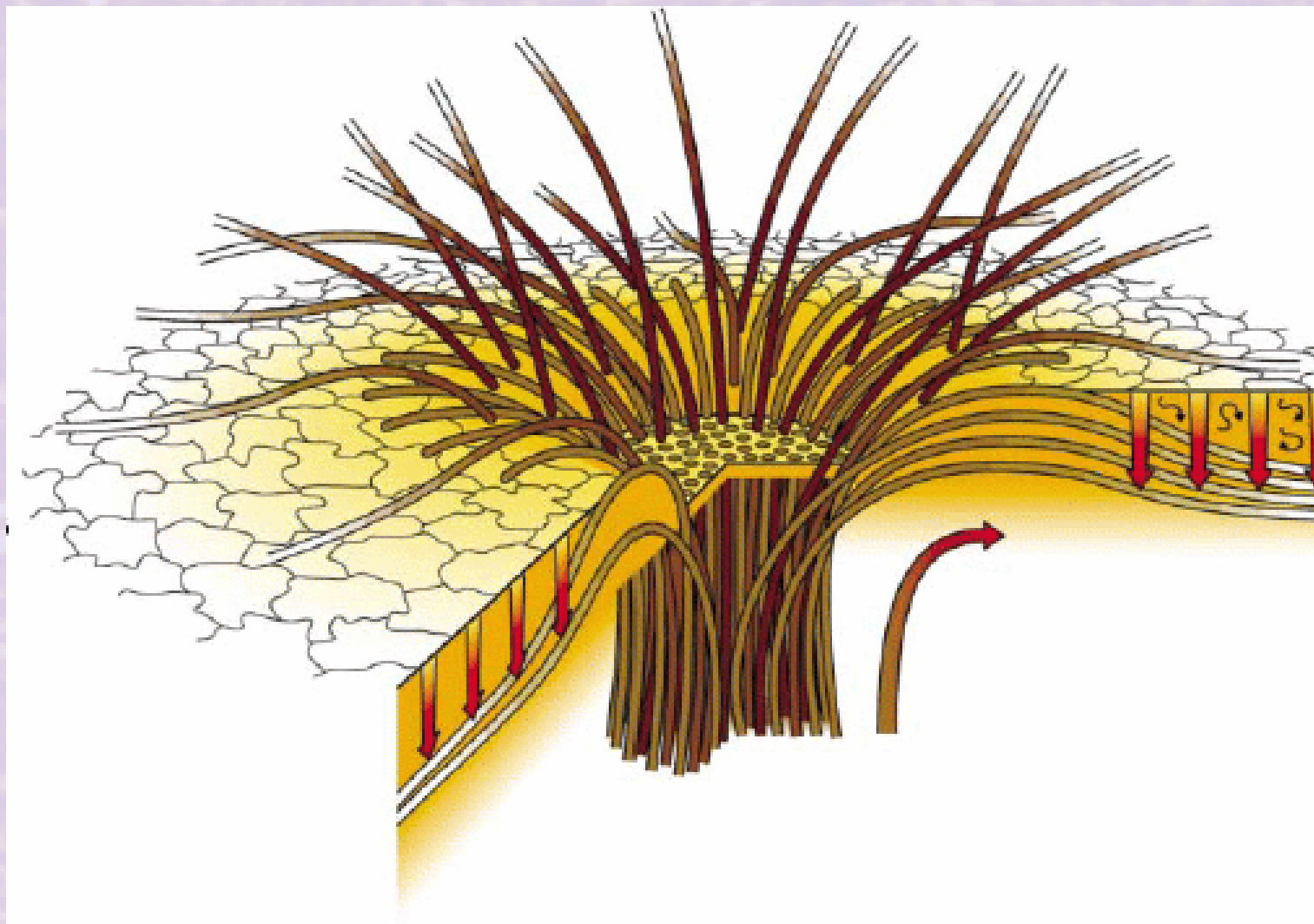
- Skvrny – velké tlusté trubice se silným polem <math><6000\text{ Gaussů}</math>
 - Póry – slabší trubice, $B \sim 1500\text{ G}$
- Magnetické knoty – neviditelné v bílém světle, viditelné ve spektrogramech kvůli rozšíření Zeemanem
- Malé magnetické elementy – CH-pásky v G-bandu (430 nm)
 - Pohyby v intergranulárních prostorech 0,5–5 km/s, velikosti 150–600 km, v oblastech koncentrovaných magnetických polí
- Fakule – v oblastech koncentrovaného magnetického pole
 - Důsledek deprese mg. pole – „evakuovaná“ oblast, pohled na „horké stěny“

Magnetické knoty

- V okolí skvrn, neviditelné ve V, zeemanovské pole v IR
- Opačná polarita než skvrna
- Celkově srovnatelný tok jako skvrna
- Pozorují se toky dolů
- ? zpět se ponořující trubice ze svazku tvořící skvrnu?

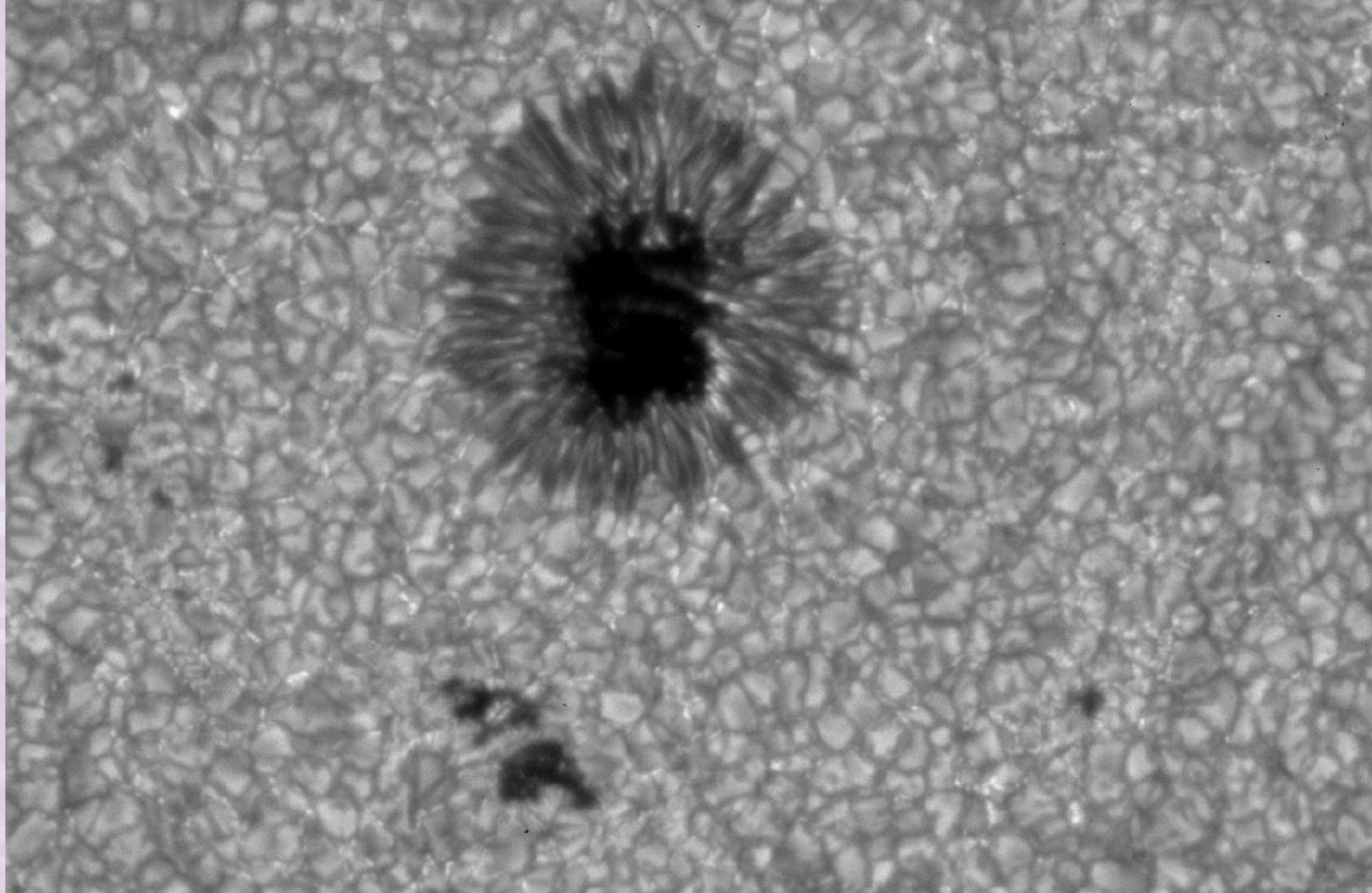


Vracející se svazky



Sluneční skvrna

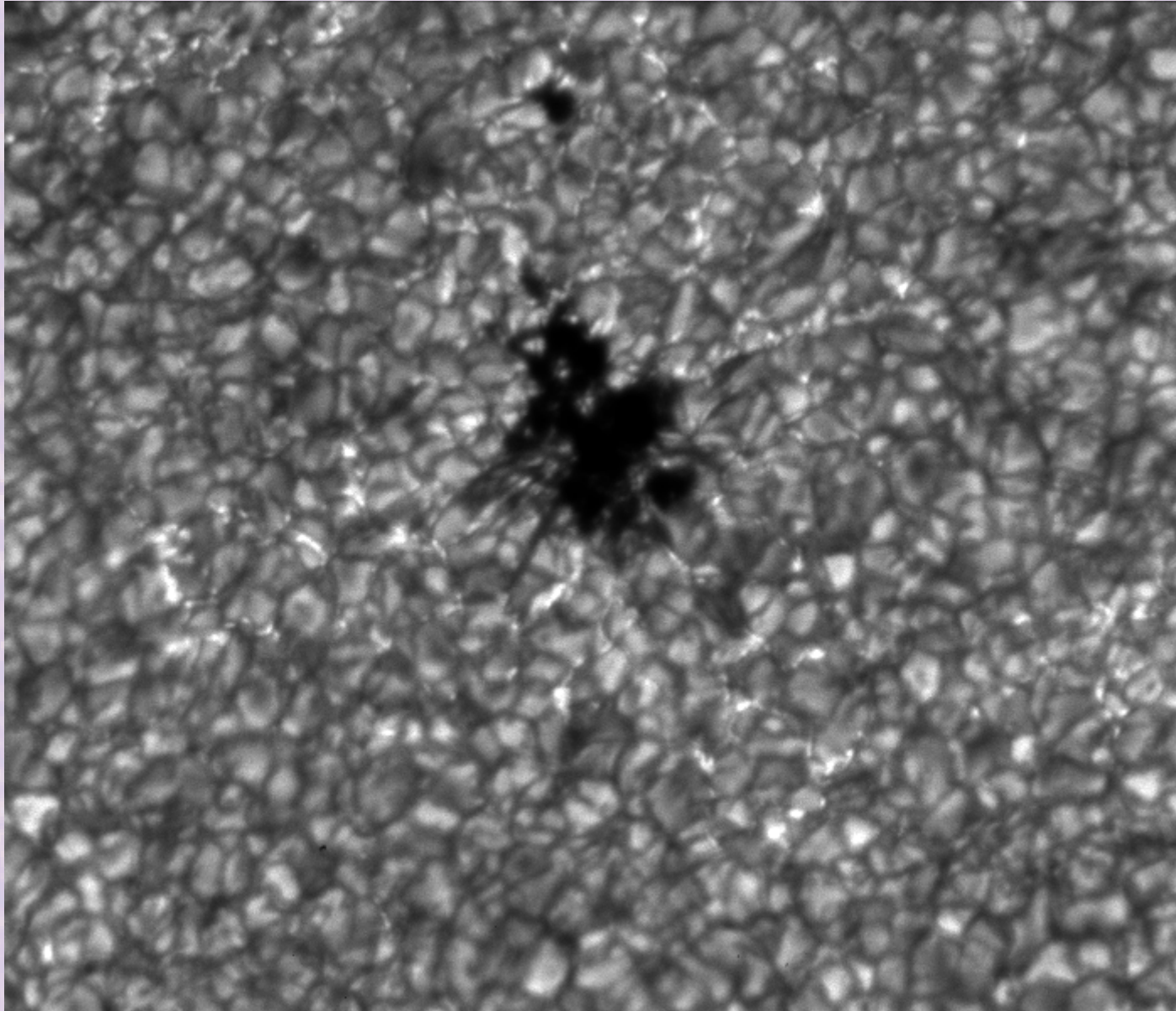
14 June 1994: Continuum Intensity



Source: Kiepenheuer/Uppsala/Lockheed (P. Brandt, G. Simon, G. Scharmer, D. Shine)

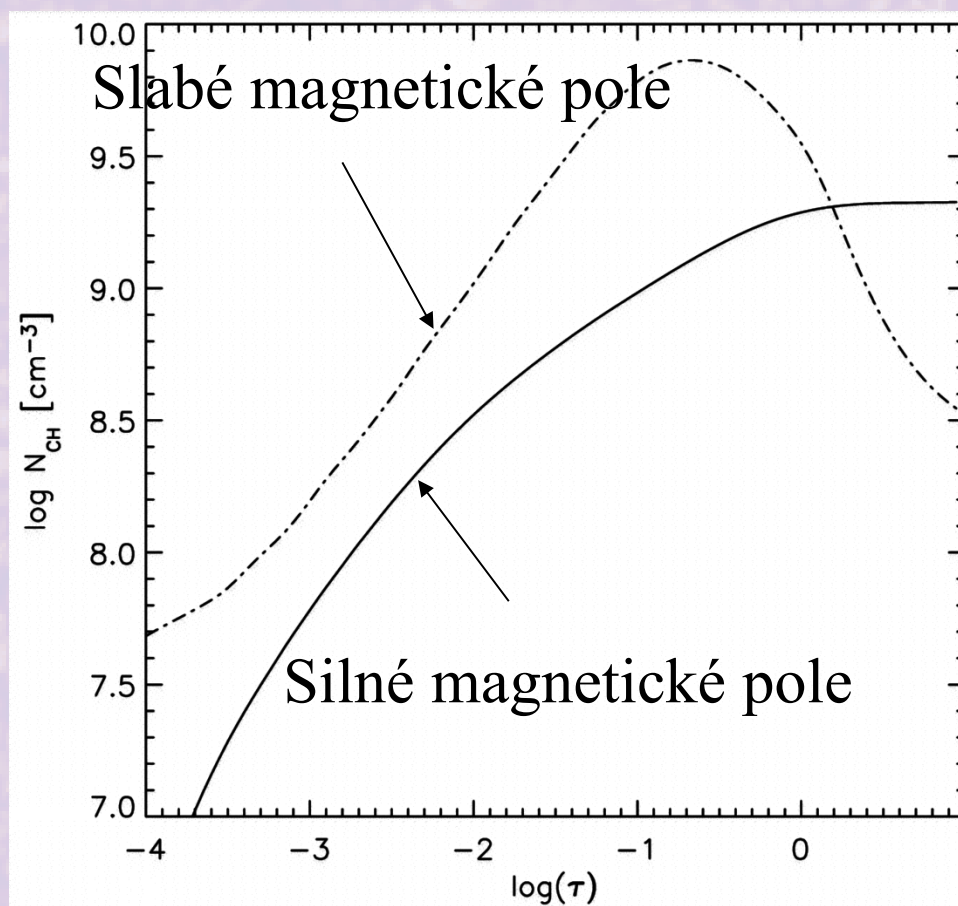
HAO A-003

Malé magnetické elementy



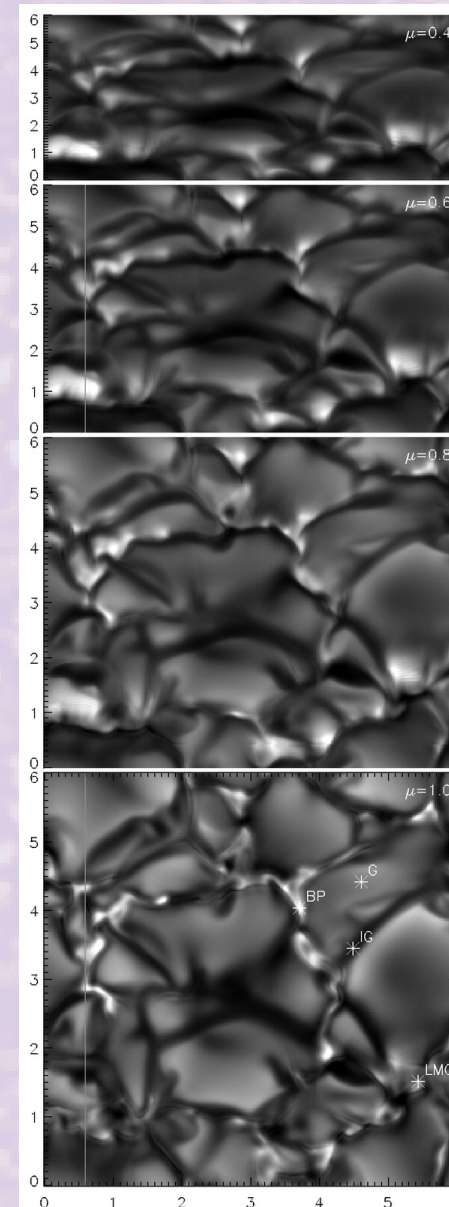
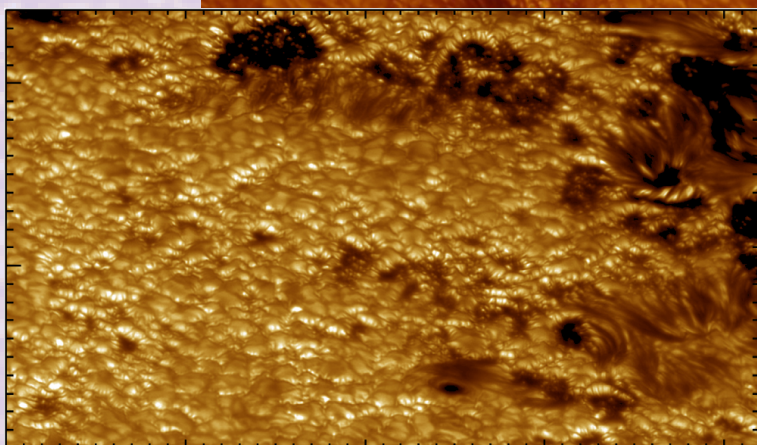
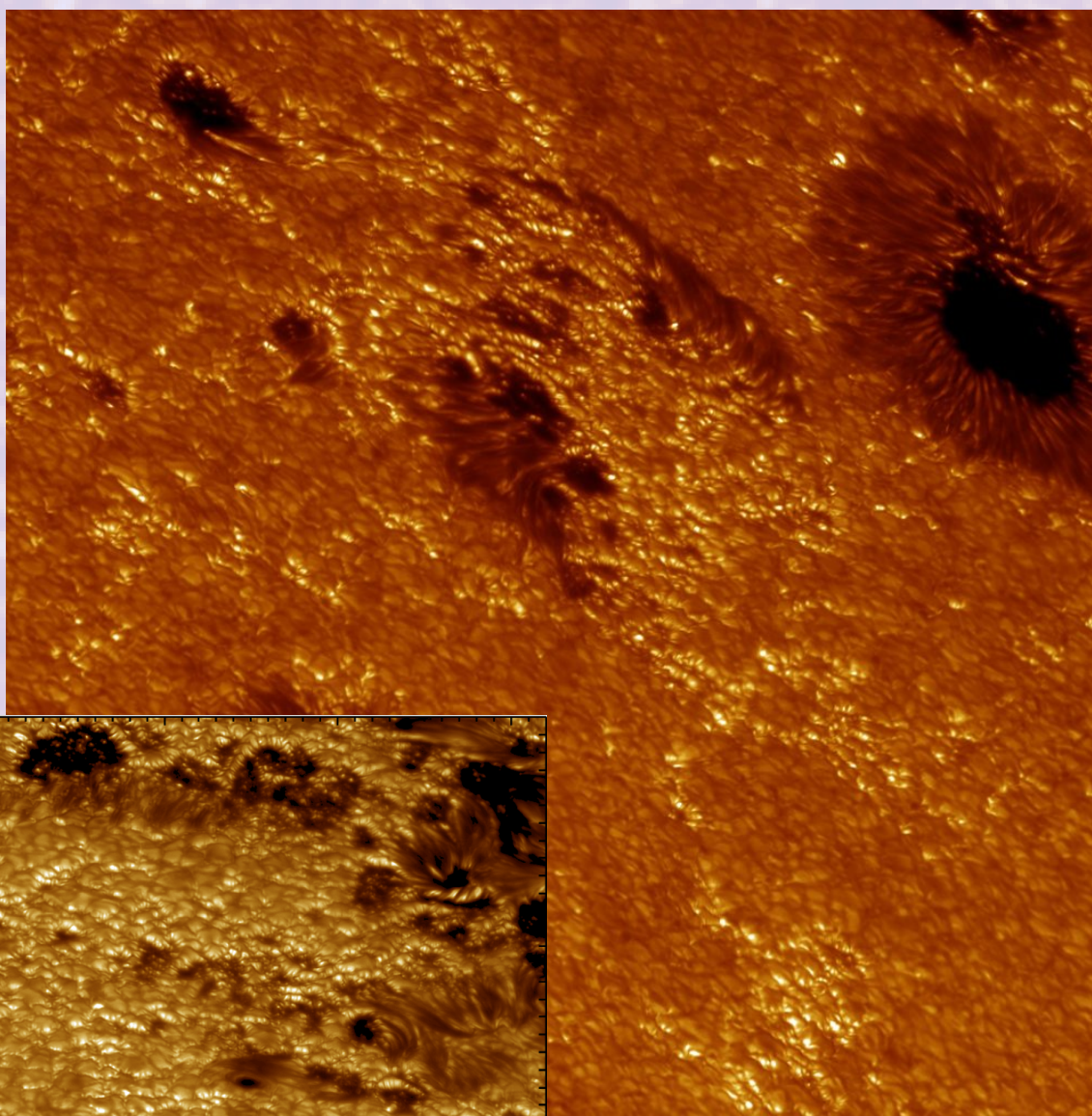
Zjasnění magnetických elementů v G-bandu

- V magnetických oblastech dochází k rozpadu molekul CH
 - Vyšší teplota (vyšší rychlost disociace)
 - Je důsledkem podélného ohřevu téměř transparentního vnitřku trubice
 - Nižší hustota (méně asociativních kolizí)
- Nižší koncentrace CH
 - nižší absorpce v pásu molekuly
 - relativní zjasnění

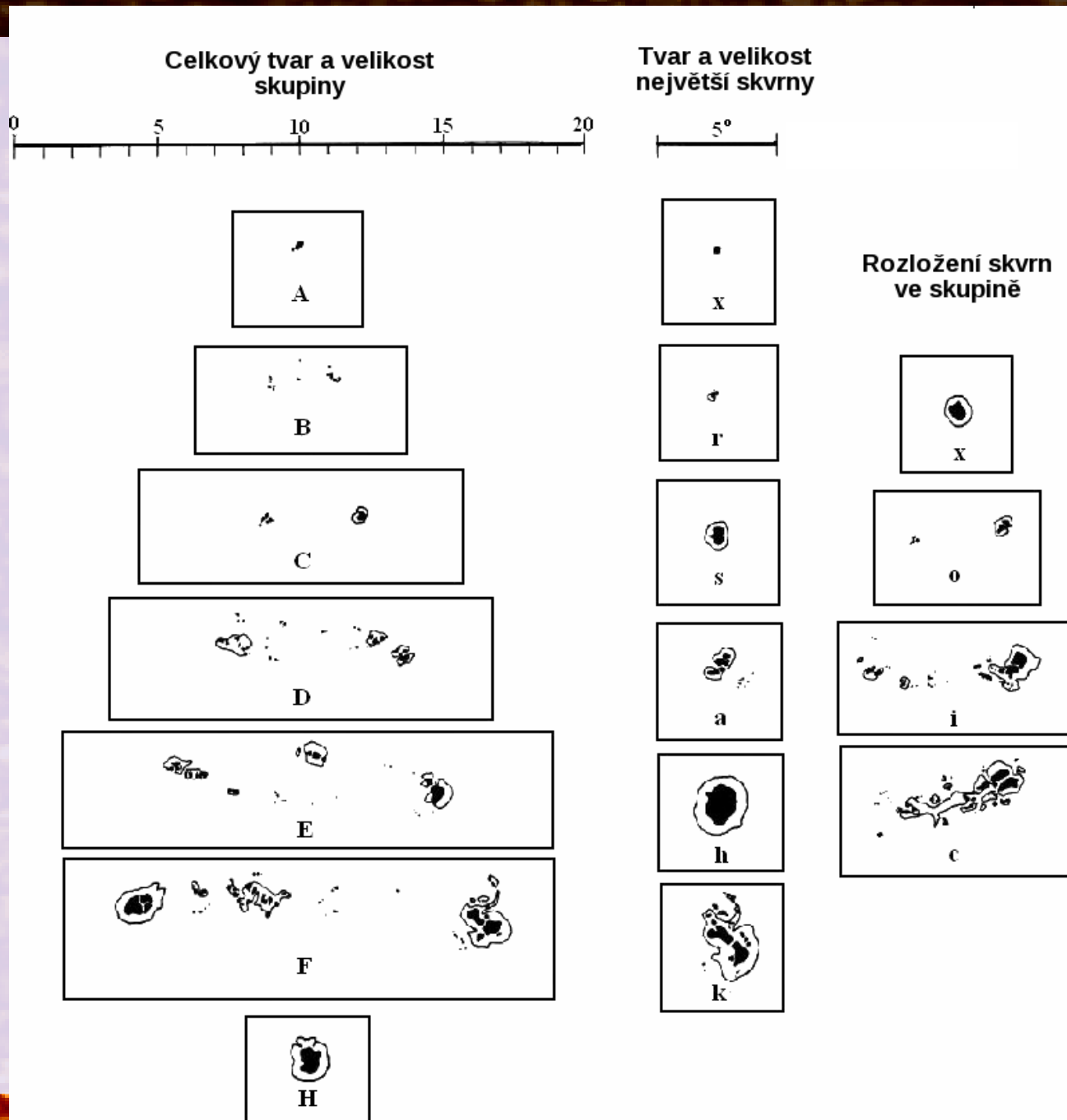


Hloubka formování pásu G

Fakule



McIntoshova klasifikace slunečních skvrn



Morfologická klasifikace aktivních oblastí

- α – unipolární skupina
- β – skupina mající obě polarity, jež jsou oddělené
- γ – skupina, kde jsou obě polarity 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 polarity
- 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

Velkorozměrová struktura

• Umbra

- Temná jádra, mezi nimi často světelné mosty, hlouběji ve fotosféře (až o 1000 km) – Wilsonova deprese
- Silnější magnetické pole (až 6000 G), pole je víceméně vertikální k fotosféře

• Penumbra

- Vlákňitá
- Pole slabší (~1500 G), více skloněné k fotosféře (~70 stupňů vůči normále)

• Moat

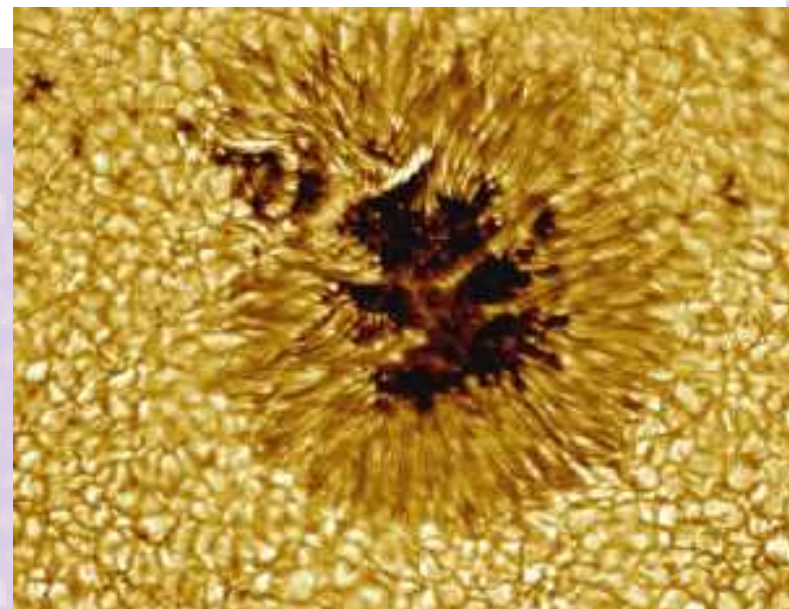
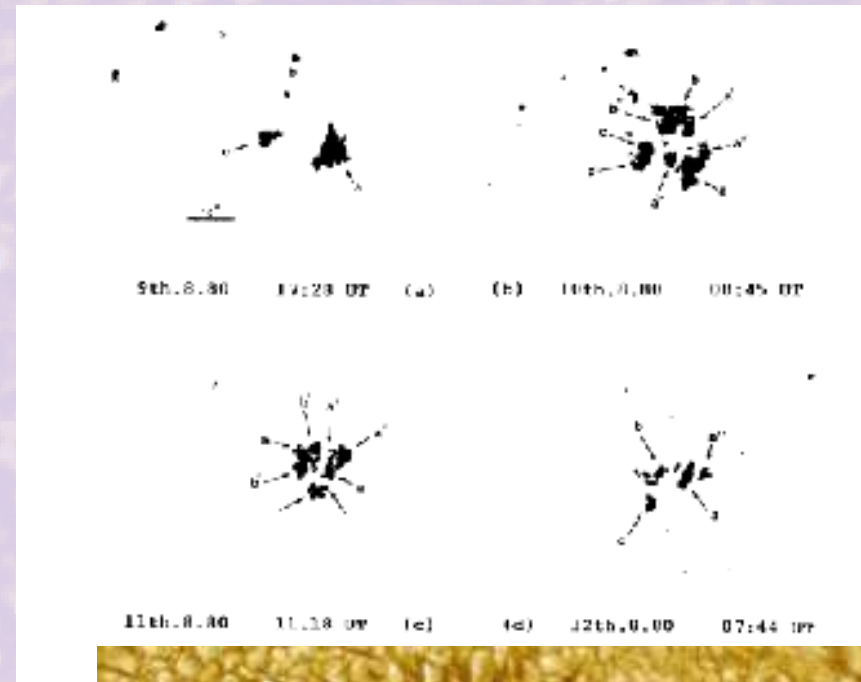
- Tok od penumbry ven

• Evershedův jev

- Systematický tok (~4 km/s) v penumbře radiálně ze skvrny

- Fragmenty, z nichž skvrna vzniká – jsou k sobě tlačeny supergranulemi
- Udržují si identitu
- Rozpad opět po fragmentech

- Samotné vynořování – Ω loop
- Dynamická diskonexe od kořenů



Vynořování magnetického pole



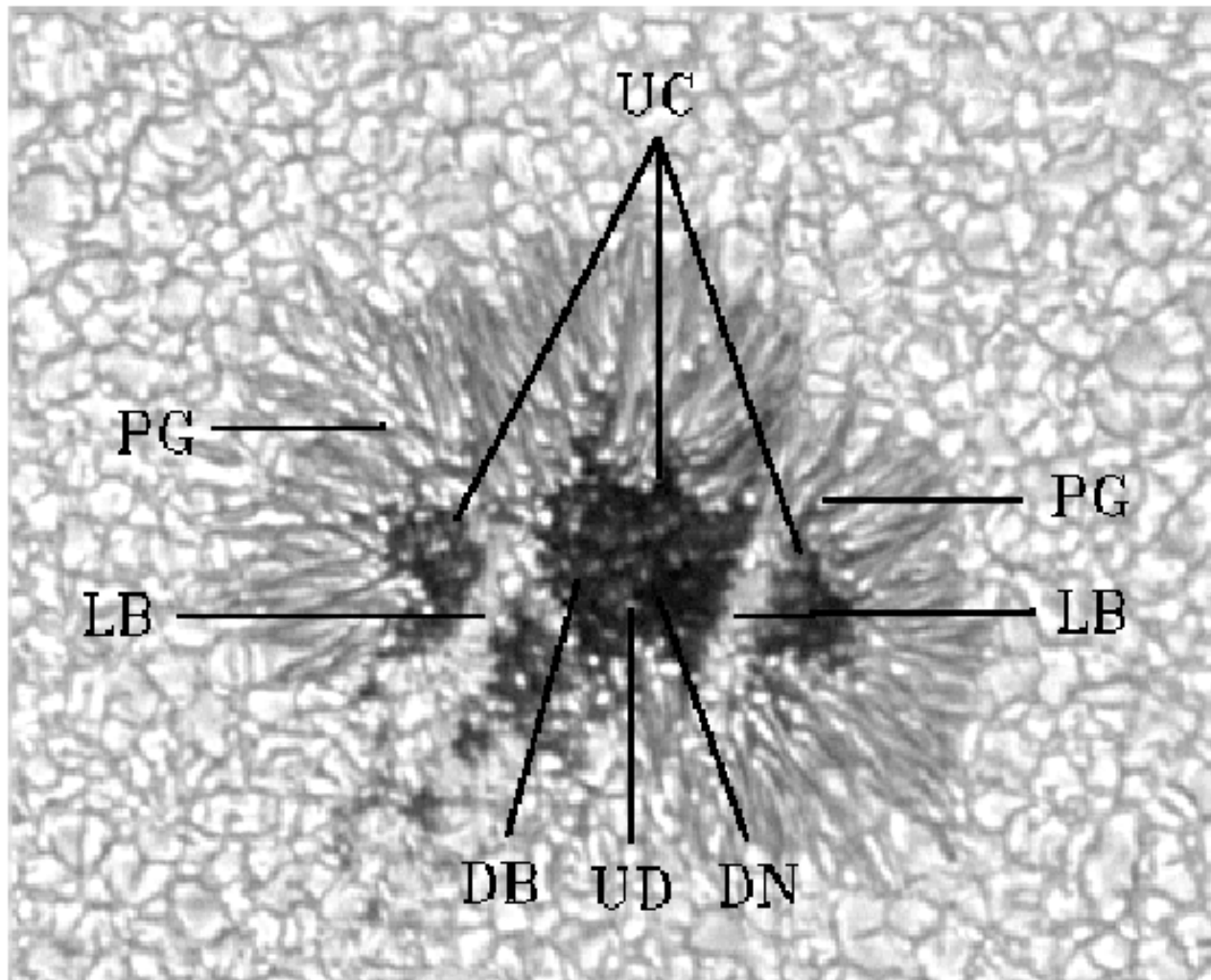
- Umbrální body
 - Většinou nerozlišené – v histogramu není typická velikost
 - Formují se na hranicích fragmentů
 - Zřejmě degenerované granule
- Světelné mosty
 - Slabší pole, skloněnější než v umbře (jeskyně)
 - Často granulární struktura
- Penumbrální filamenty
 - V podstatě stále neznámá tloušťka
 - Tmavé (více skloněné) a světlé
- Penumbrální zrna
 - Tvoří jasné filamenty, radiální pohyby (uvnitř do umbry, vně do klidné fotosféry)

Jemná struktura v pohybu



Jemná struktura sluneční skvrny – obrázek

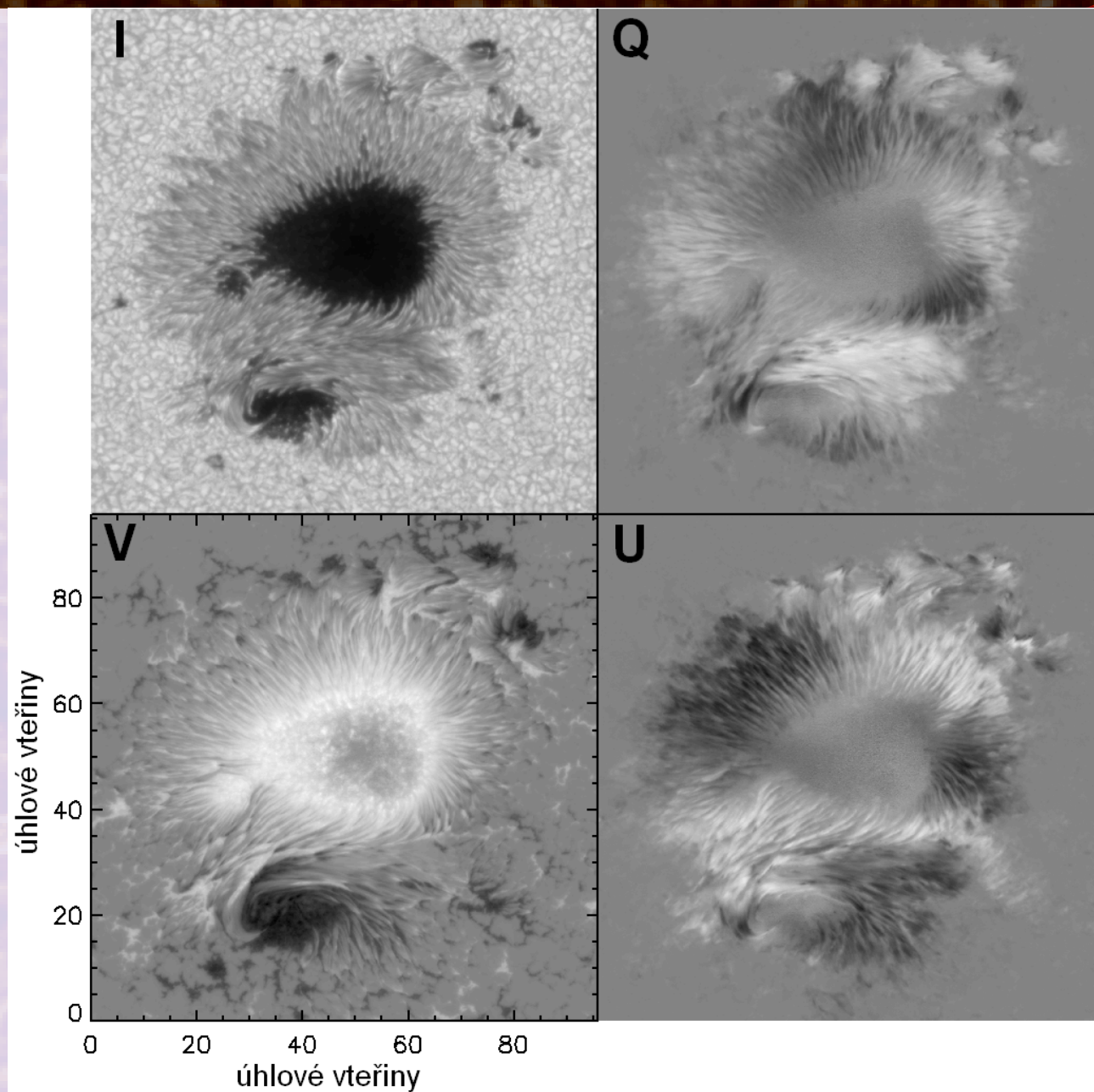
UC - umbral core, PG - penumbral grain, LB - light bridge, UD - umbral dot, DN - dark nucleus, DB - diffuse background



Polarimetrická pozorování slunečních skvrn

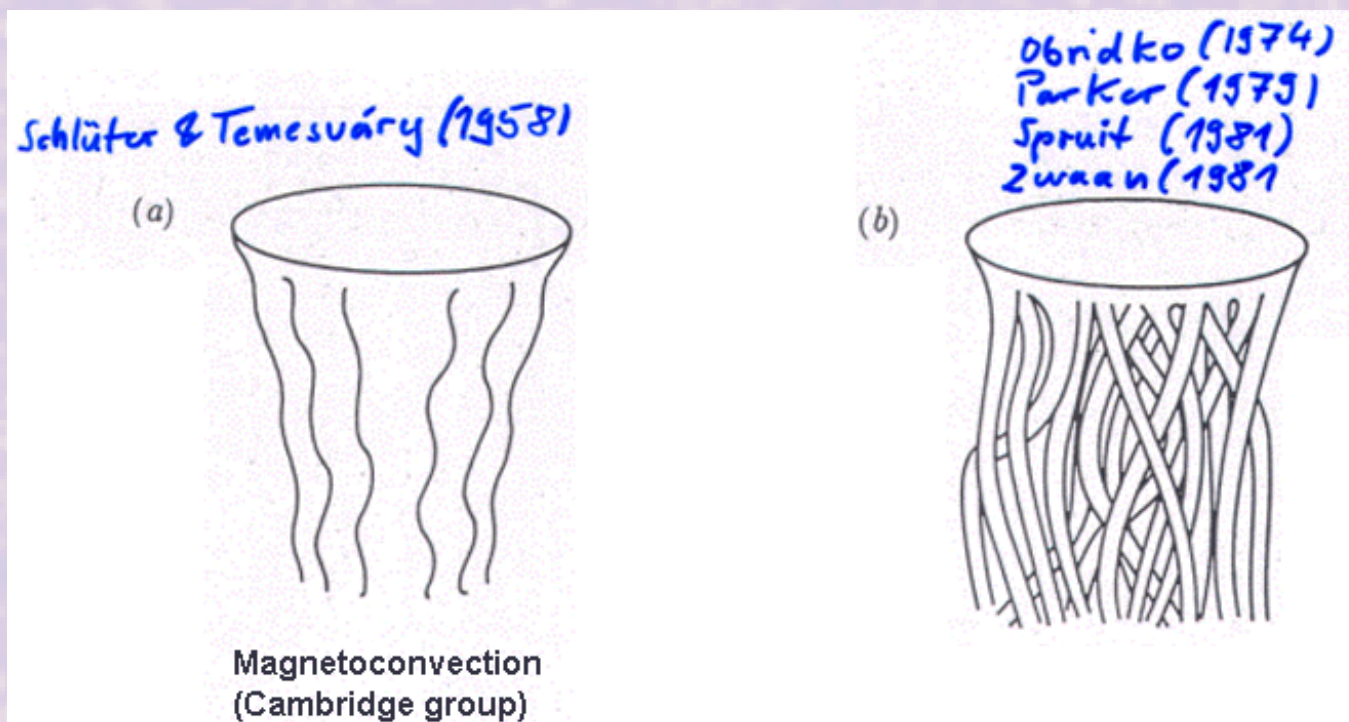
Stokes

- I
- Q
- U
- V



Modely slunečních skvrn

- Jednolitá trubice (magnetokonvekce)
- Svazkový model (spegheti)
- Mezi nimi nelze rozhodnout na základě fotosférických pozorování



Magnetokonvektivní model

- Jednoduchá trubice, důsledek řešení MHD rovnic v konvektivním prostředí
- Též vysvětluje dění v umbře i penumbře jako důsledek degenerované granulace

