

# Sluneční skvrny od A do Z

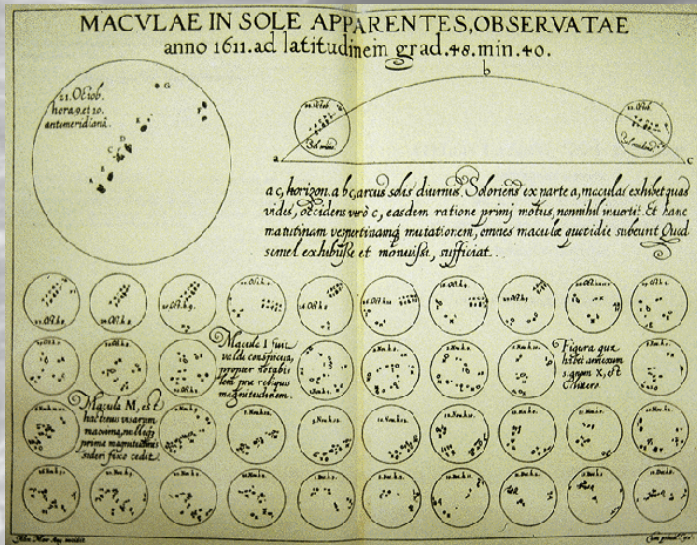
Michal Sobotka  
Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov



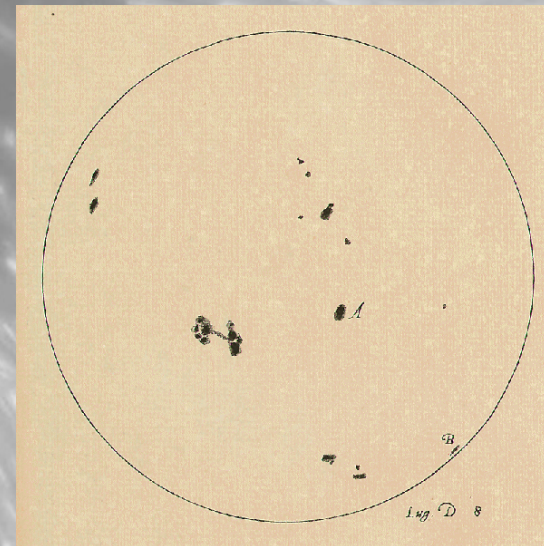
# Sluneční skvrny – historie

Příležitostná pozorování velkých skvrn pouhým okem  
První pozorování dalekohledem:

- 1610 Thomas Harriot
- 1611 Johann Fabricius (první publikace o skvrnách)
- 1611 Christoph Scheiner
- 1611 Galileo Galilei (skvrny jsou útvary na povrchu Slunce, objev sluneční rotace, pozorování skvrn projekcí)



Scheiner



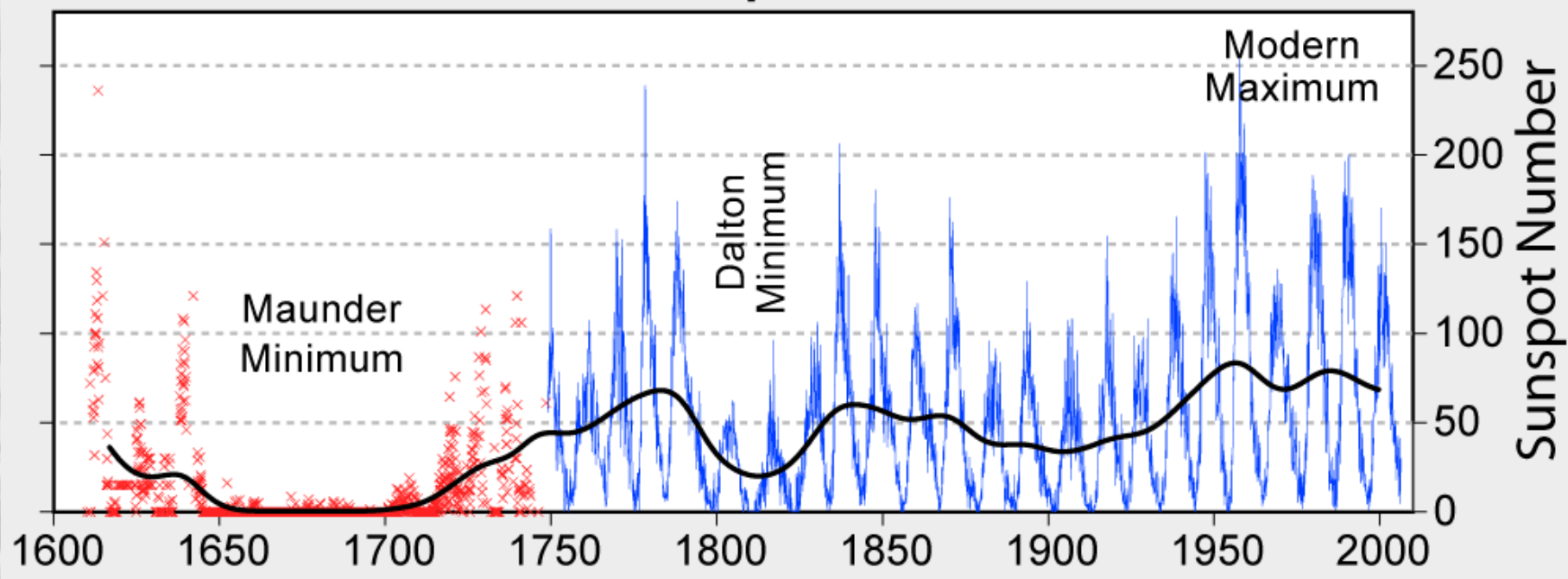
Galileo



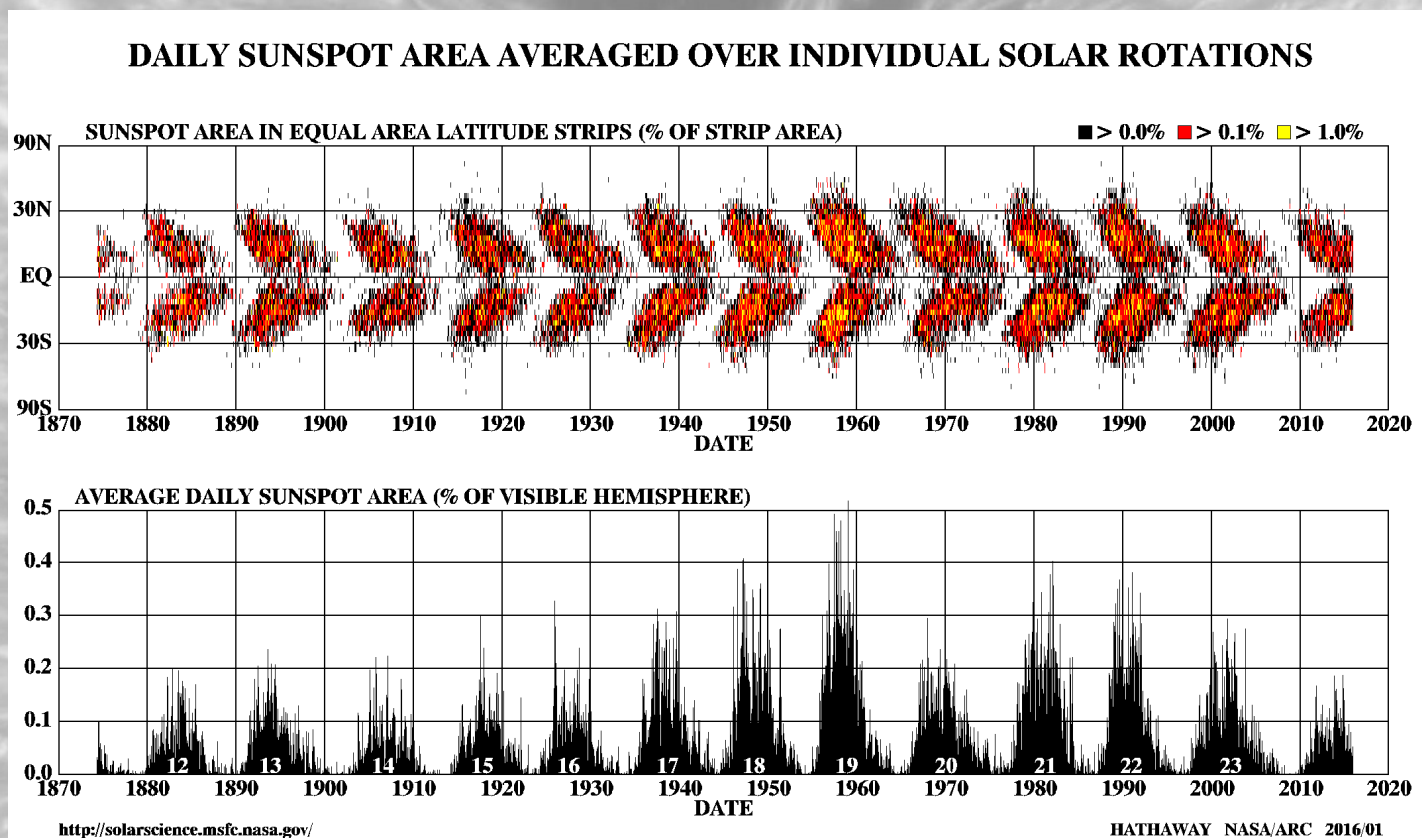
# Sluneční skvrny - statistika výskytu

1843 – Heinrich Schwabe a později Rudolf Wolf: objev slunečního cyklu (perioda 7,5 – 14 let, přibližně 11 let)

Relativní číslo (Wolf):  $R = k (10 g + s)$



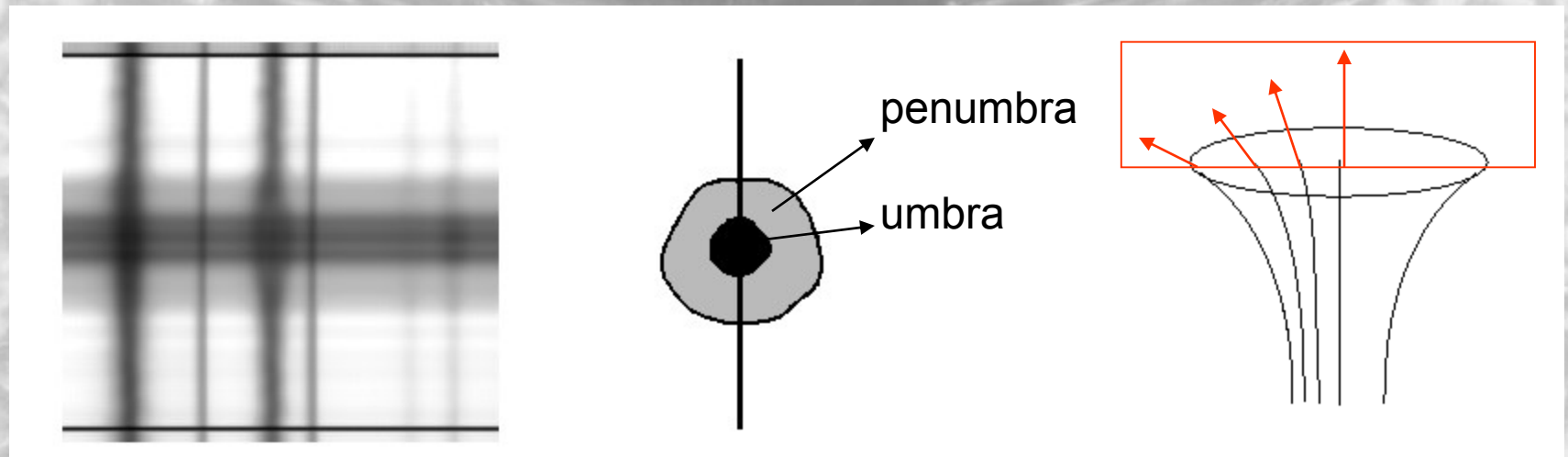
## 1863 – Richard Carrington a nezávisle Gustav Spörer: motýlkový diagram



Na začátku cyklu se aktivita objevuje ve vyšších šířkách a postupně se přesunuje k rovníku.

# Sluneční skvrny - magnetické pole

1908 – G. E. Halle poprvé pozoroval magnetické rozštěpení spektrálních čar ve skvrnách

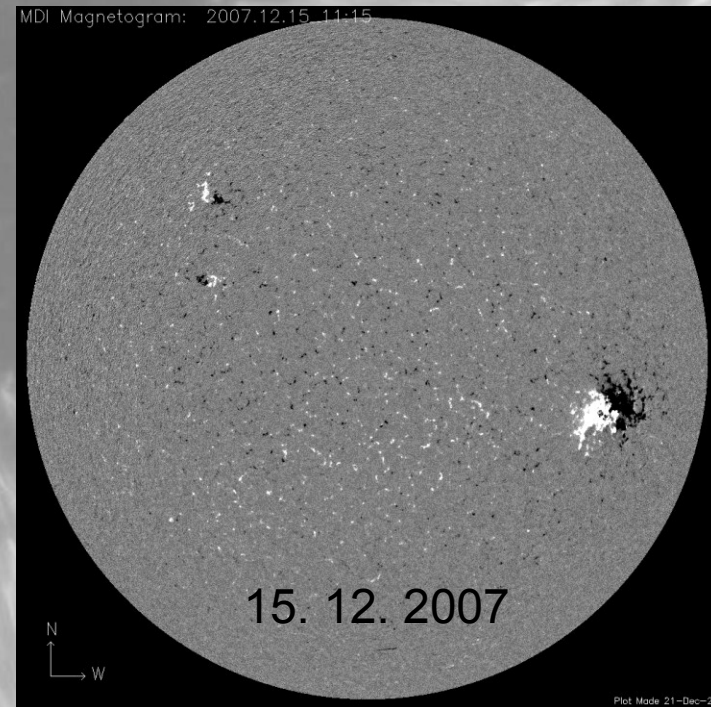
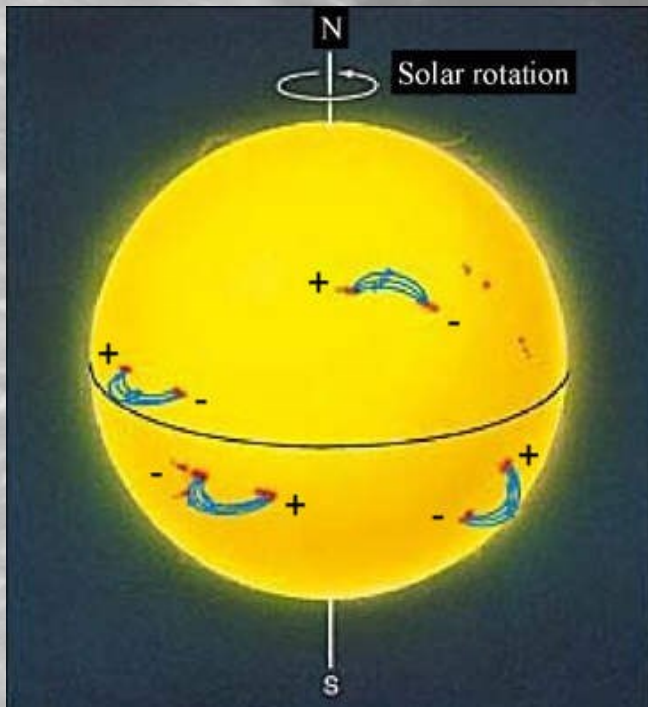


Magnetické pole dosahuje hodnot  $0,3 \text{ T}$  ( $3000 \text{ G}$ ) ve středu skvrny, s rostoucí vzdáleností od něj slábne a stále více se odklání od svislého směru.



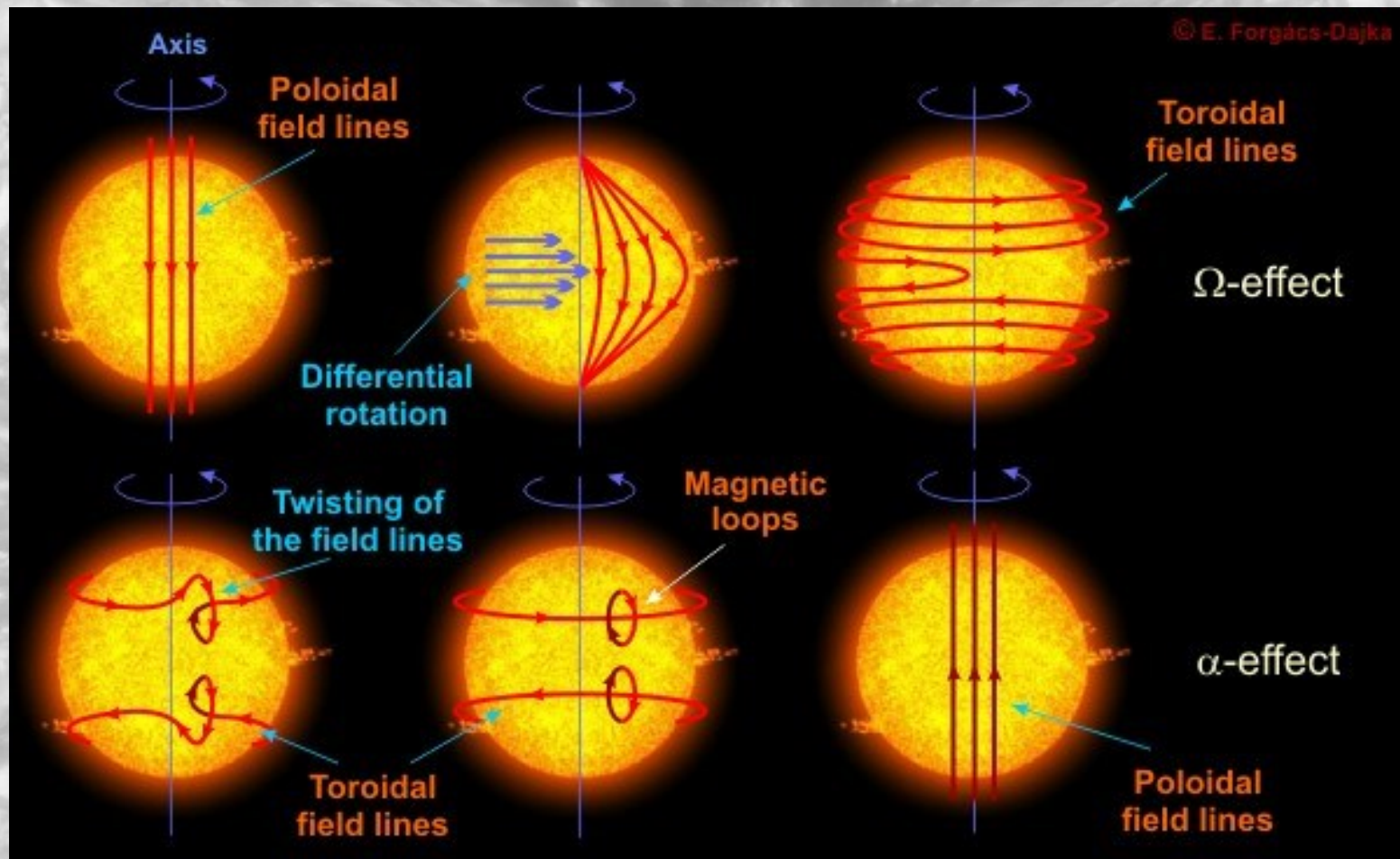
# Magnetický sluneční cyklus

Během jedenáctiletého cyklu se globální magnetické pole Slunce přepóluje. Polarity vedoucích (západních) a následujících (východních) částí skupin skvrn se v dalším cyklu vymění. Původní polarita se tedy obnoví až po dvou slunečních cyklech, tj. po 22 letech.



# Sluneční dynamo

Pracuje hluboko v konvektivní zóně a vytváří magnetické pole na úkor energie diferenciální rotace a konvektivních pohybů.

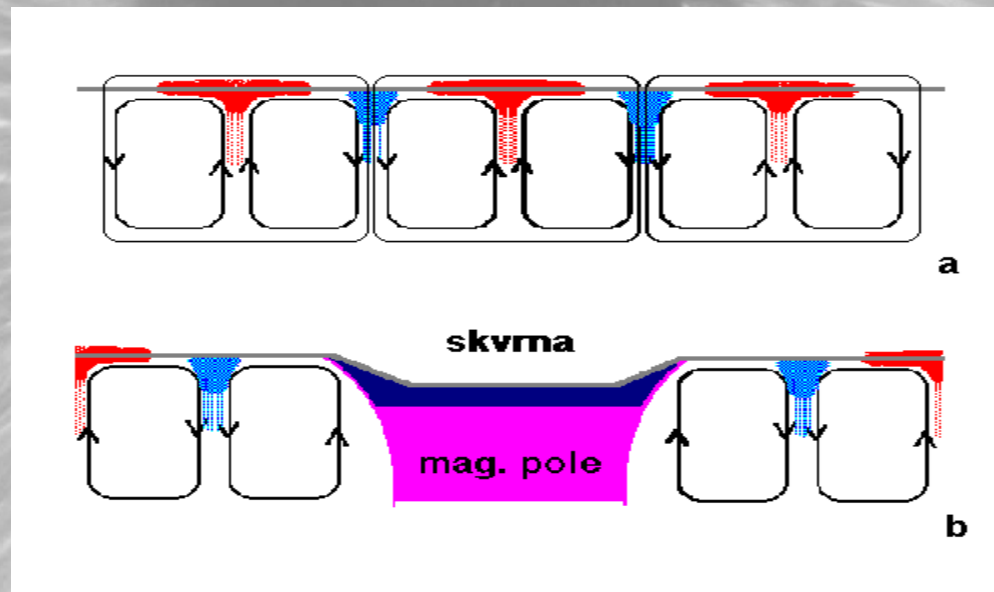




# Proč jsou skvrny temné?

Umbra skvrn je asi o 2000 K chladnější než fotosféra.

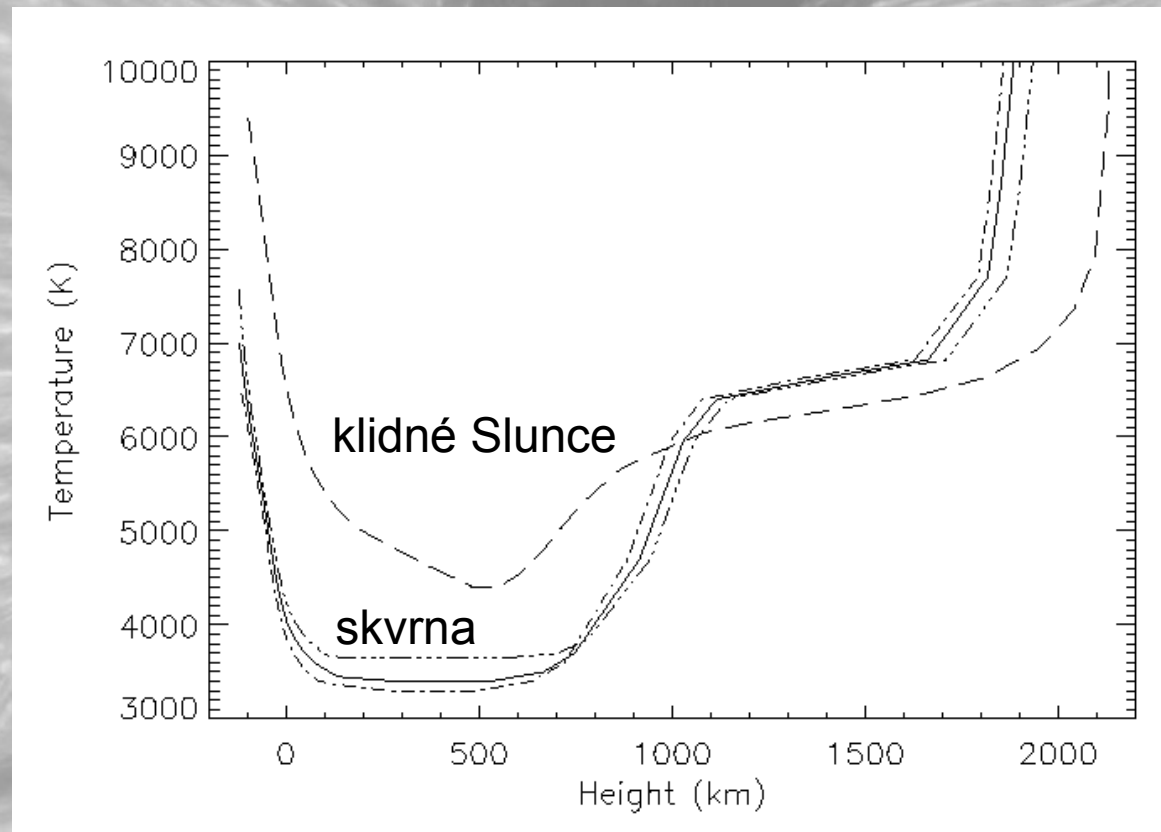
1941 – L. Biermann: Magnetické pole brání konvektivnímu přenosu energie z hlubších vrstev pod skvrnou tím, že znemožňuje pohyb ionizovaného plynu (plazmatu) napříč siločar. Magnetický tlak ve skvrně vyrovnává tlak okolního horkého plynu a skvrnu tak stabilizuje.



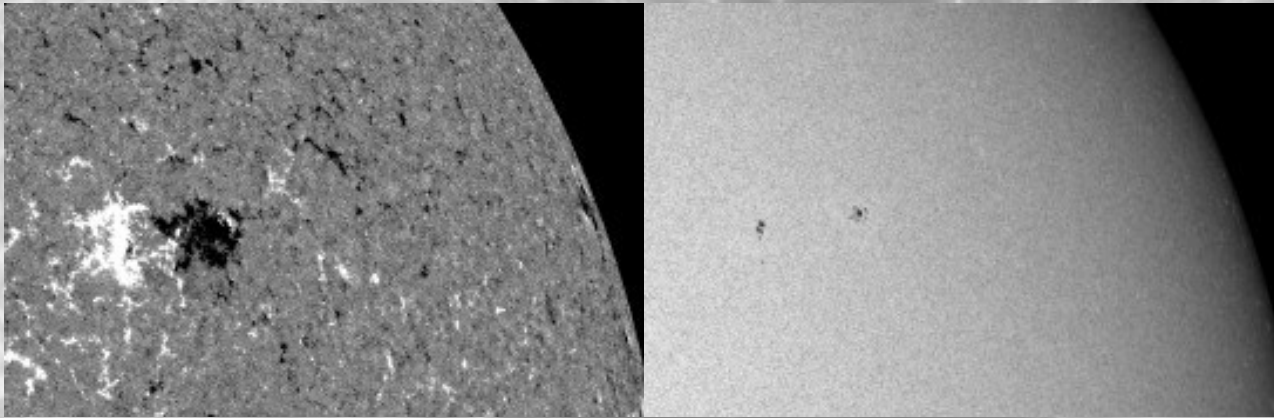


# Teplota ve skvrnách

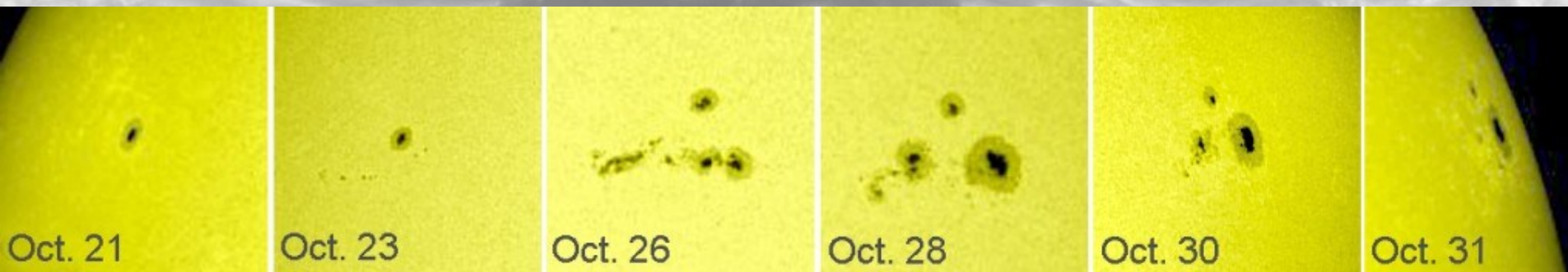
Teplota závisí na výšce ve sluneční atmosféře. Ve fotosféře (0 – 500 km) s výškou klesá, v chromosféře roste. Závisí také na magnetickém poli: čím je pole silnější, tím je teplota nižší.



# Zrod a vývoj skvrn



Magnetická oblast, póry (bez penumbry) nebo malé skvrny



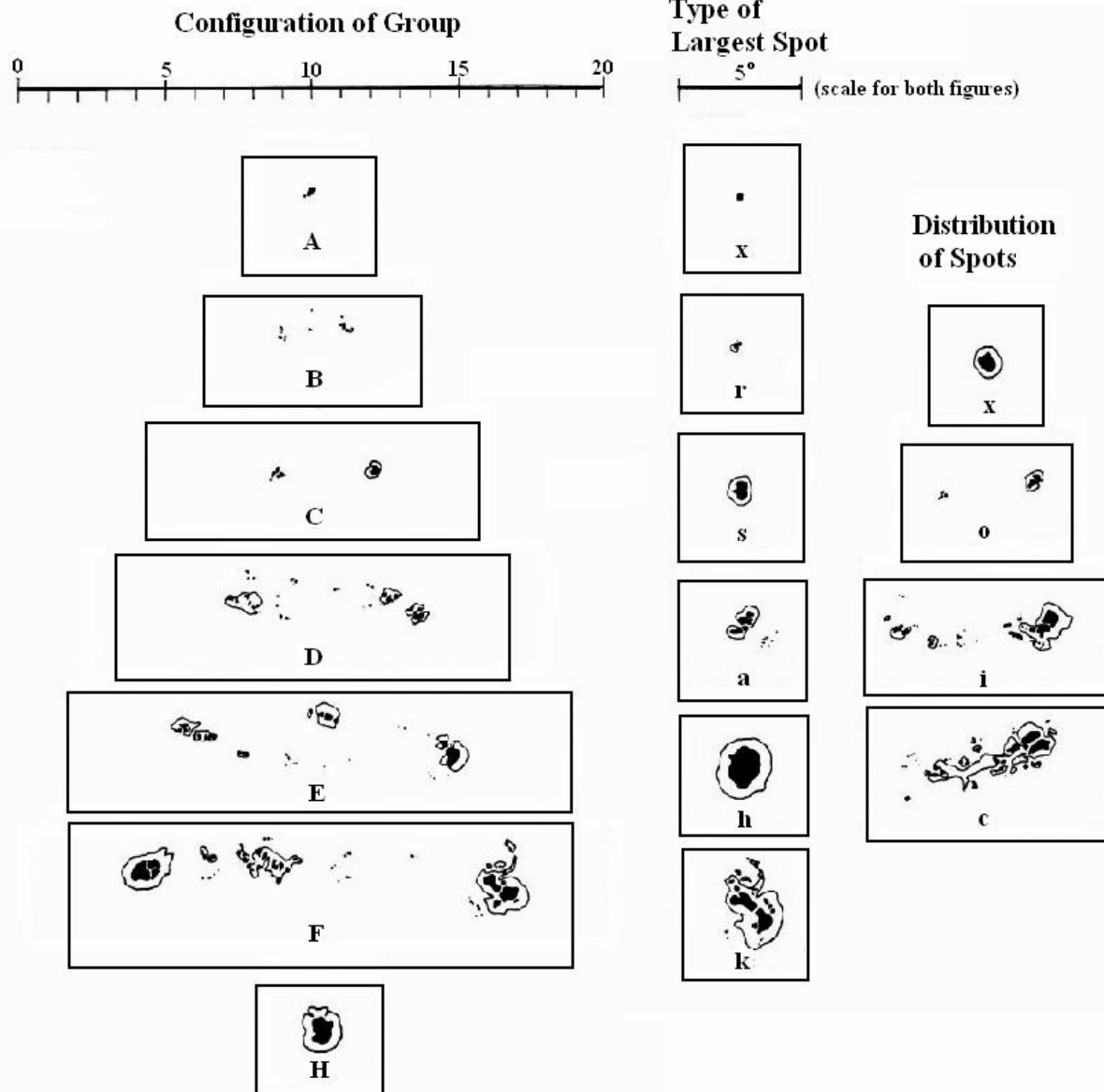
Vývoj skupiny skvrn (SDO, 2010)

Životní doba skvrny je od několika hodin do několika měsíců.



# Modified Zurich Sunspot Classifications

Courtesy of A.L.P.O. Solar Section - Rik Hill

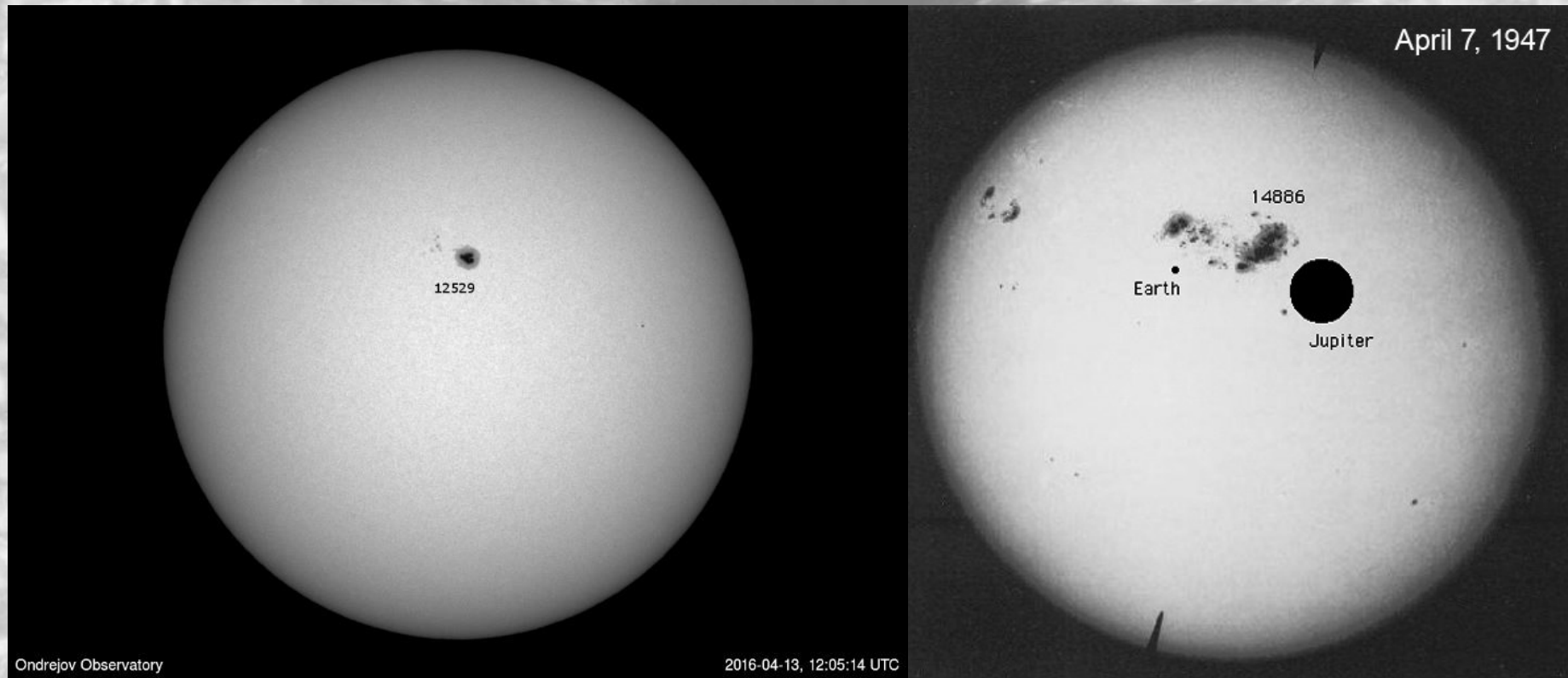


## Klasifikace skupin skvrn McIntosh, 1990

Ve skupinách typu *Fsi*, *Fki* a *Fkc* se často vyskytují sluneční erupce.

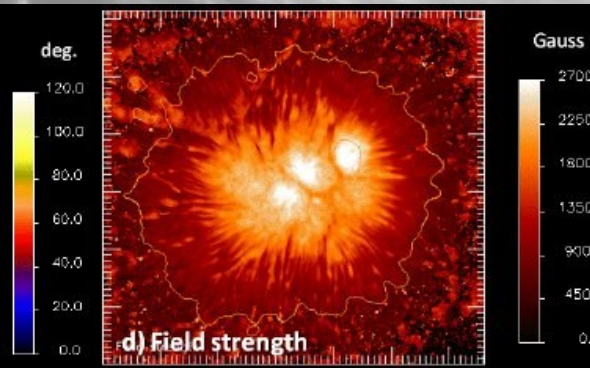
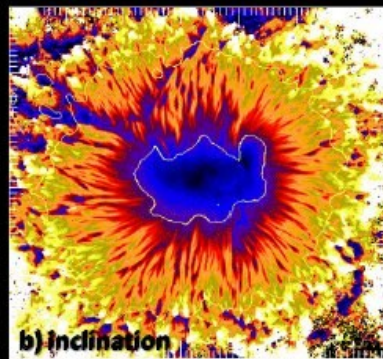
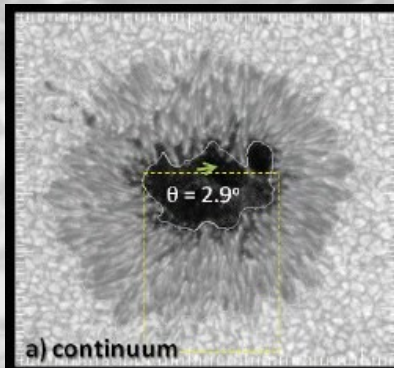
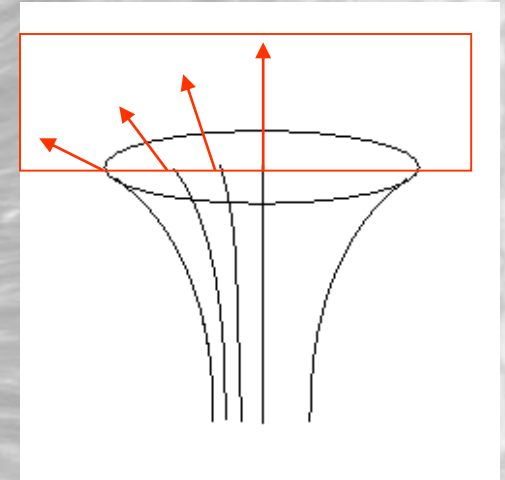
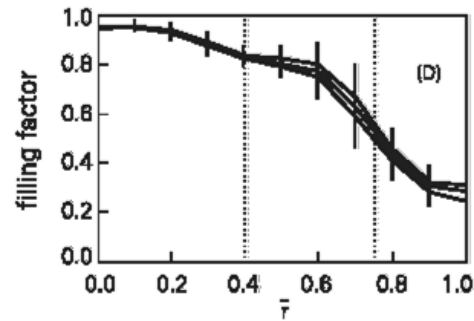
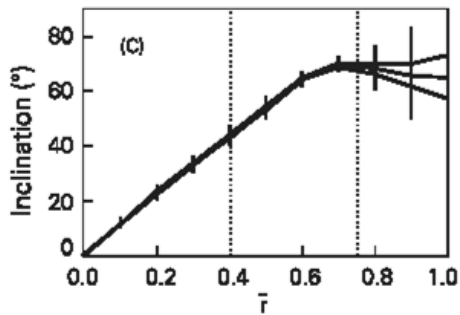
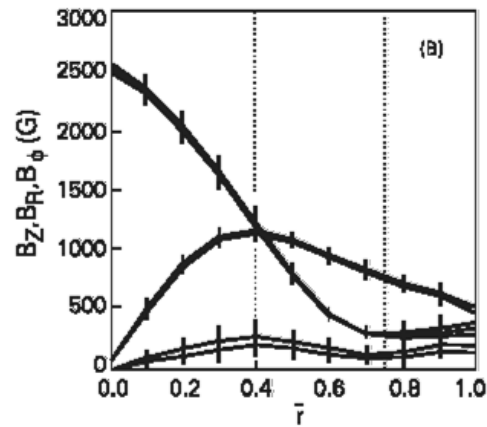
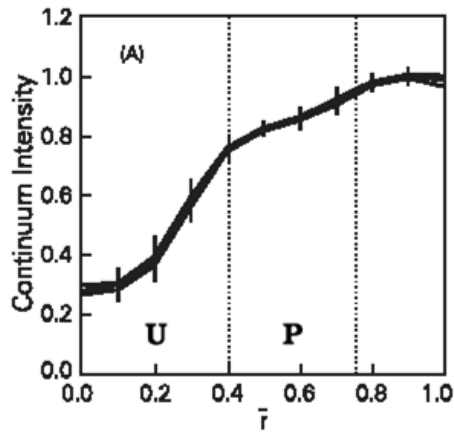
# Velikost skvrn

Od asi 1000 km (malá póra) do asi 100 000 km.  
Skvrny větší než 50 000 km jsou viditelné pouhým okem.



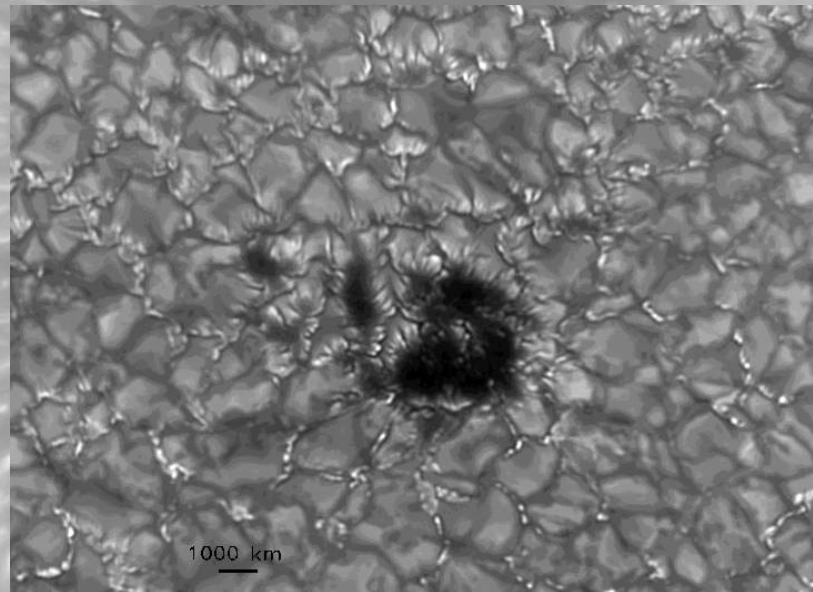


# Magnetické pole skvrn



# Sluneční póry

jsou malé skvrny bez penumbry. Jejich magnetické pole je slabší než u skvrn (asi  $2/3$ ) a nestačí k rozevření siločar na okraji umbry natolik, aby vznikla penumbra. Žijí nejvýše několik dnů – buď se z nich vyvinou skvrny nebo zaniknou.

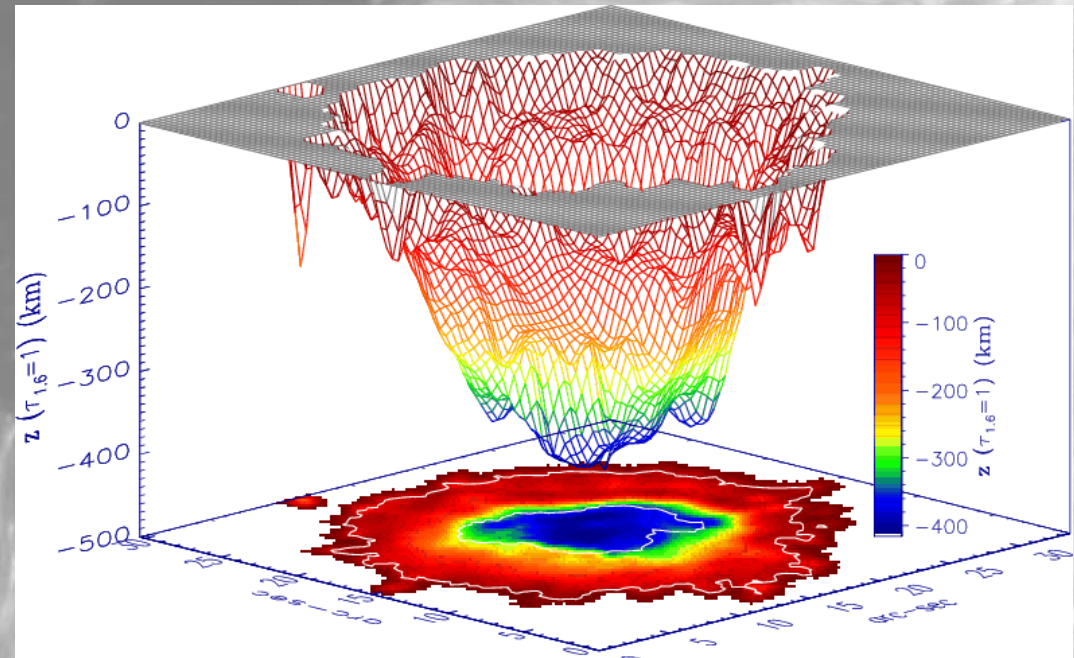




# Wilsonova deprese

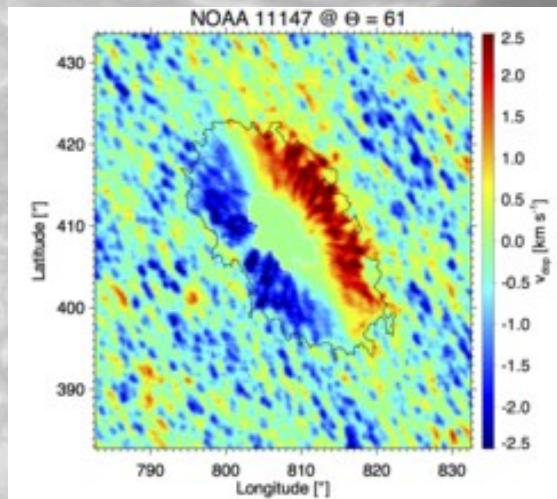
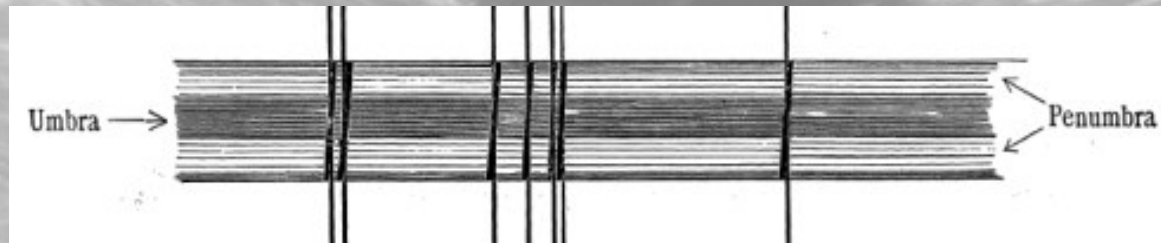
Objevena A. Wilsonem v roce 1769. Povrch Slunce ( $h=0$ ) je ve skvrnách asi o 400 km níž než v okolí. Skvrny jsou průhlednější než okolí díky nižší teplotě a tlaku plynu.

$$P_{\text{spot}}(z) + B^2(z)/2\mu = P_{\text{ext}}(z)$$



# Pohyby ve skvrnách - Evershedův jev

1909 – J. Evershed našel Dopplerův posuv spektrálních čar v penumbře skvrn a vysvětlil ho jako horizontální proudění plynu směrem od umbrы – Evershedův jev.

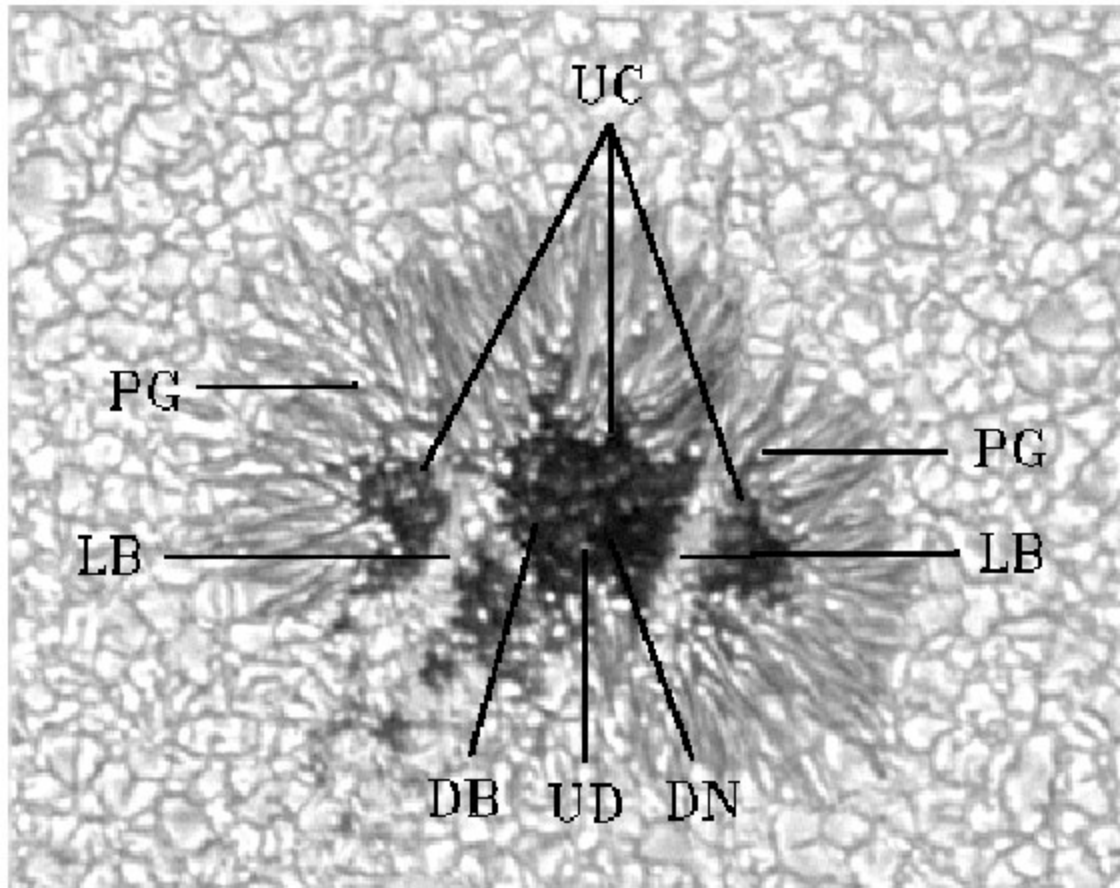


Evershedovo proudění o rychlosti 1–3 km/s je nejlépe vidět u skvrn ležících mimo střed slunečního disku.



# Jemná struktura

Sluneční skvrny vznikají vzájemným působením pohybujícího se plazmatu a magnetického pole. Tyto procesy se odehrávají v širokém rozsahu prostorových škál, od desítek do desítek tisíců kilometrů.



UC – umbrální jádro  
PG – penumbrální zrno  
LB – světelný most  
DB – difúzní pozadí  
UD – umbrální bod  
DN – temné jadérko  
Jasná a temná vlákna  
(filamenty) v penumbře

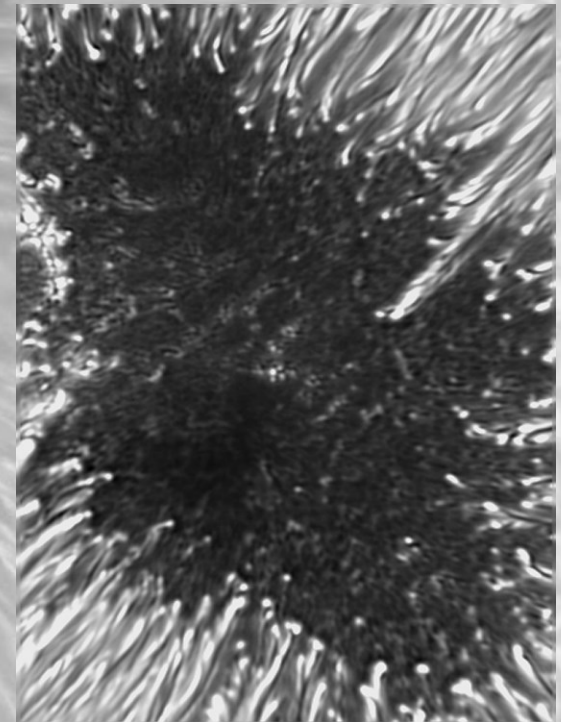
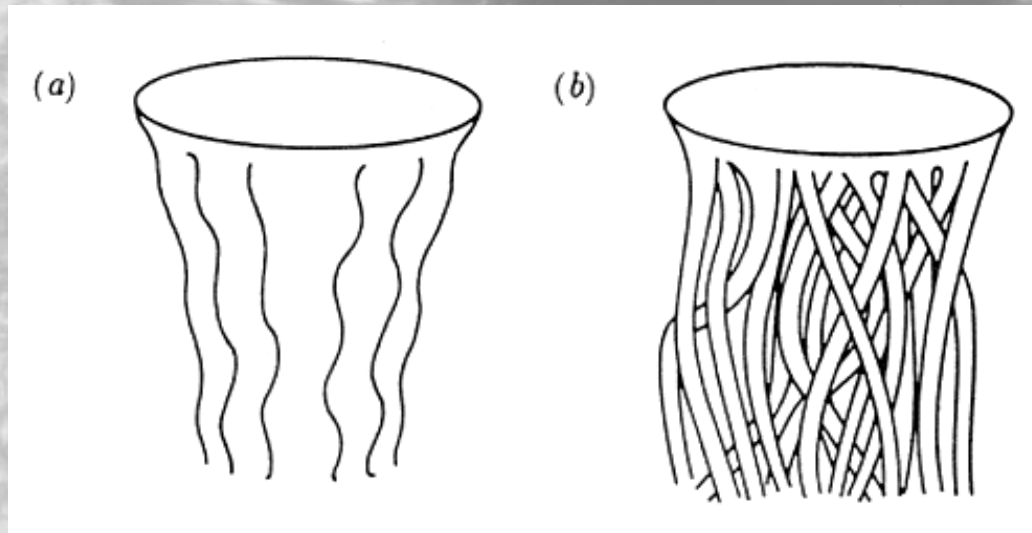
# Umbra

## Dva možné modely magnetické struktury umbry

(a) Monolitická silotrubice s magnetokonvekcí uvnitř

(b) Svazek tenkých silotrubic (spaghetti model)

Oba modely jsou schopny vysvětlit pozorované struktury.

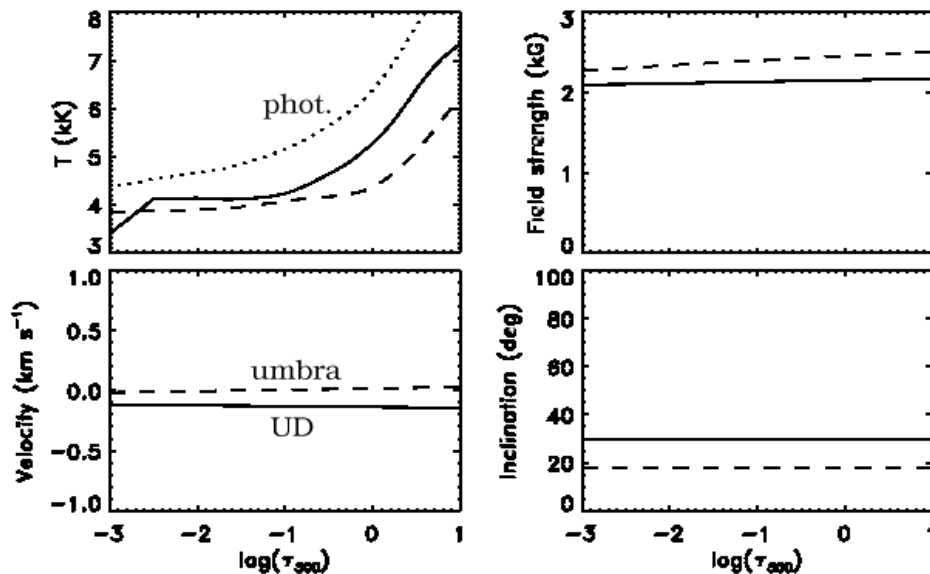




# Umbrální body

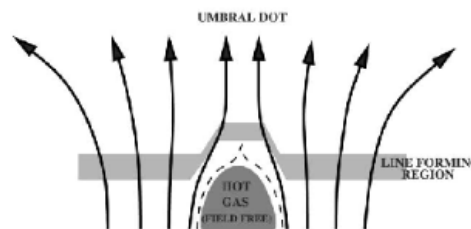
Malé jasné útvary v umbře, pozorované na samé hranici rozlišení (kolem 100 km) → je velmi obtížné určit jejich velikost, teplotu, magnetické pole a další charakteristiky. Důsledek magnetokonvekce (monolit. silotrubice) nebo pronikání horkého plynu (svazek silotrubic).

Modely:    semiempirický ↓    simulace →

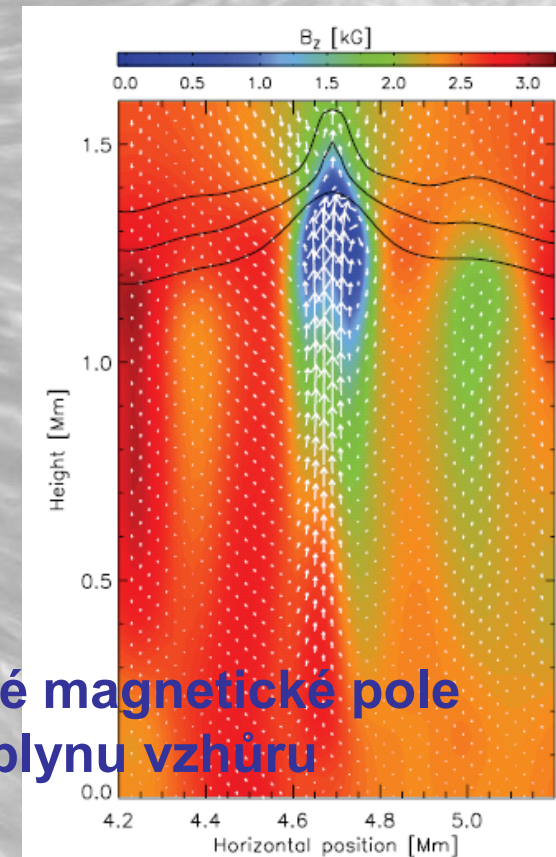


Socas Navarro, Martínez Pillet, Sobotka, Vázquez (2004)

2D (scanning) spectroscopy, 0.5-m SVST, LPSP

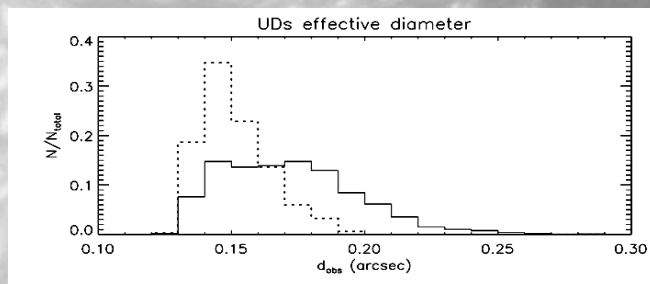
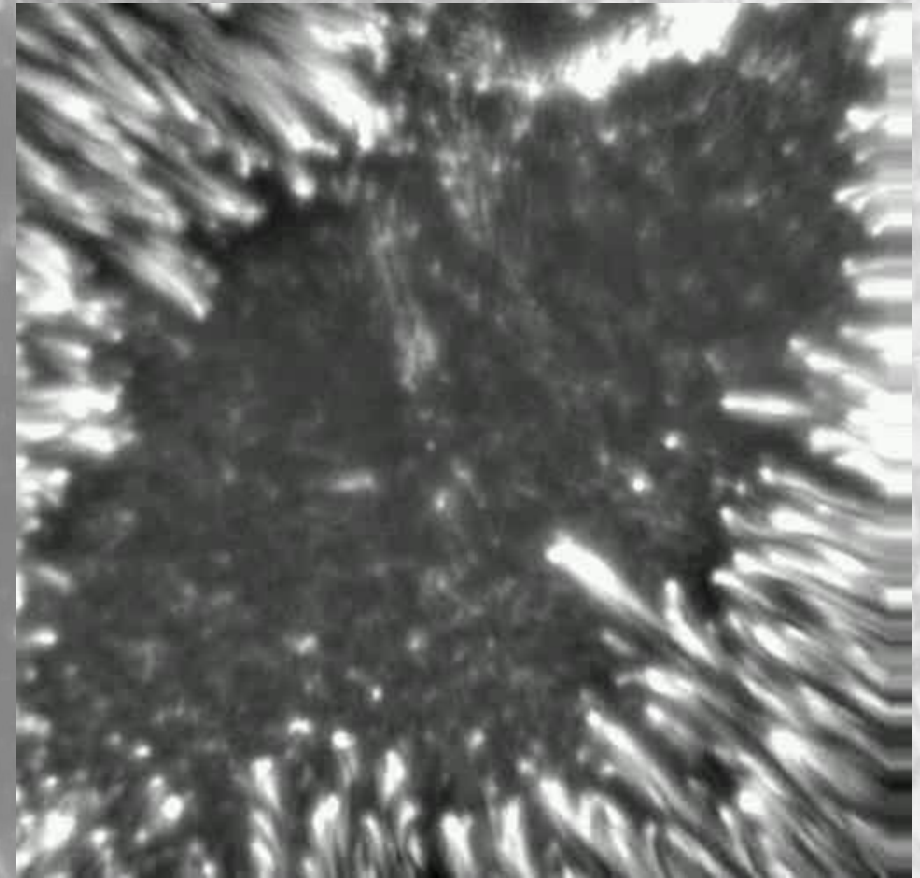
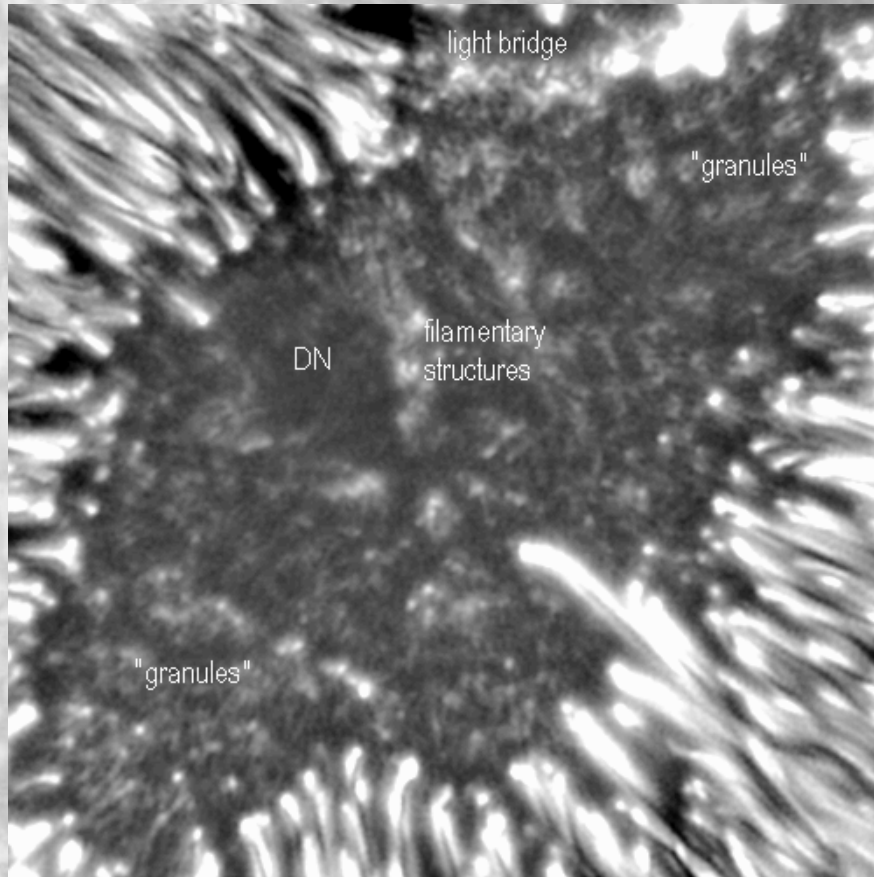


Zeslabené magnetické pole a pohyb plynu vzhůru



Schüssler & Vögler 2006

# Pohyb a velikost umbrálních bodů



Horizontální pohyby v umbře 300 – 500 m/s.  
Většina umbrálních bodů je rozlišena dalekohledem o průměru 1 m. Průměrná velikost umbrálních bodů je 120 km.

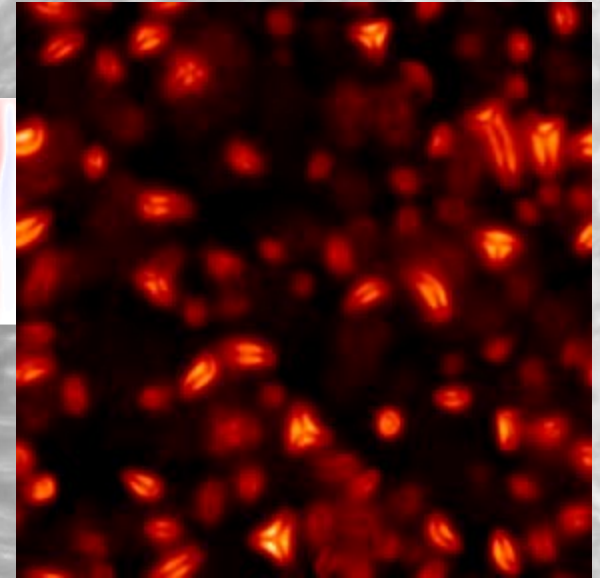
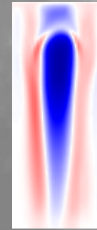


# Substruktury v umbrálních bodech

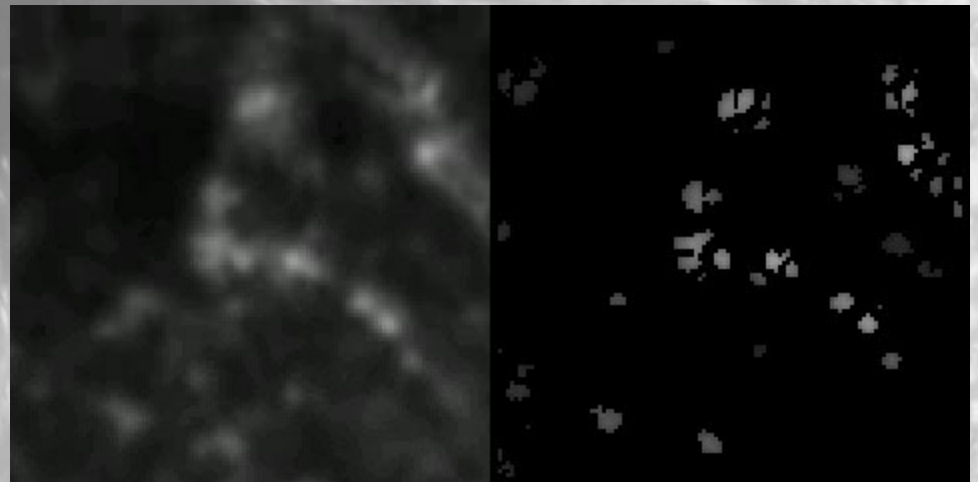
Simulace magnetokonvekce v umbře  
(M. Schüssler a A. Vögler 2006)

- tmavé pruhy v umbrálních bodech
- sestupné proudění okolo u. bodů

Oba jevy byly potvrzeny pomocí pozorování s velmi vysokým prostorovým rozlišením (100 km).



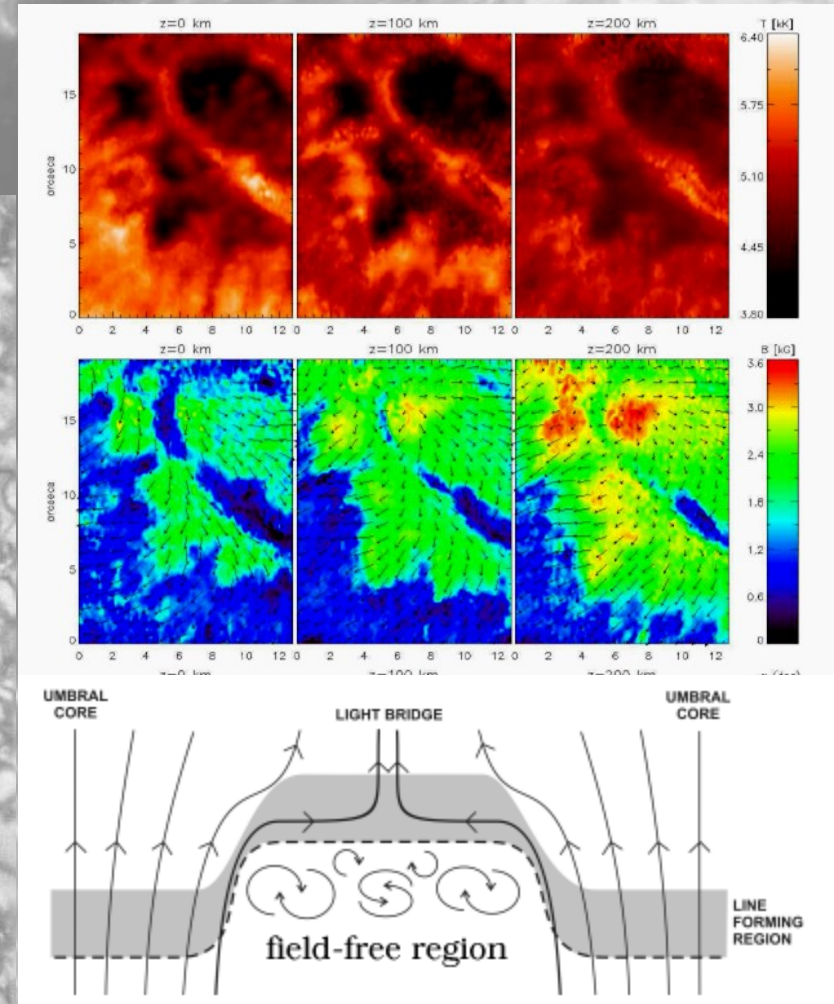
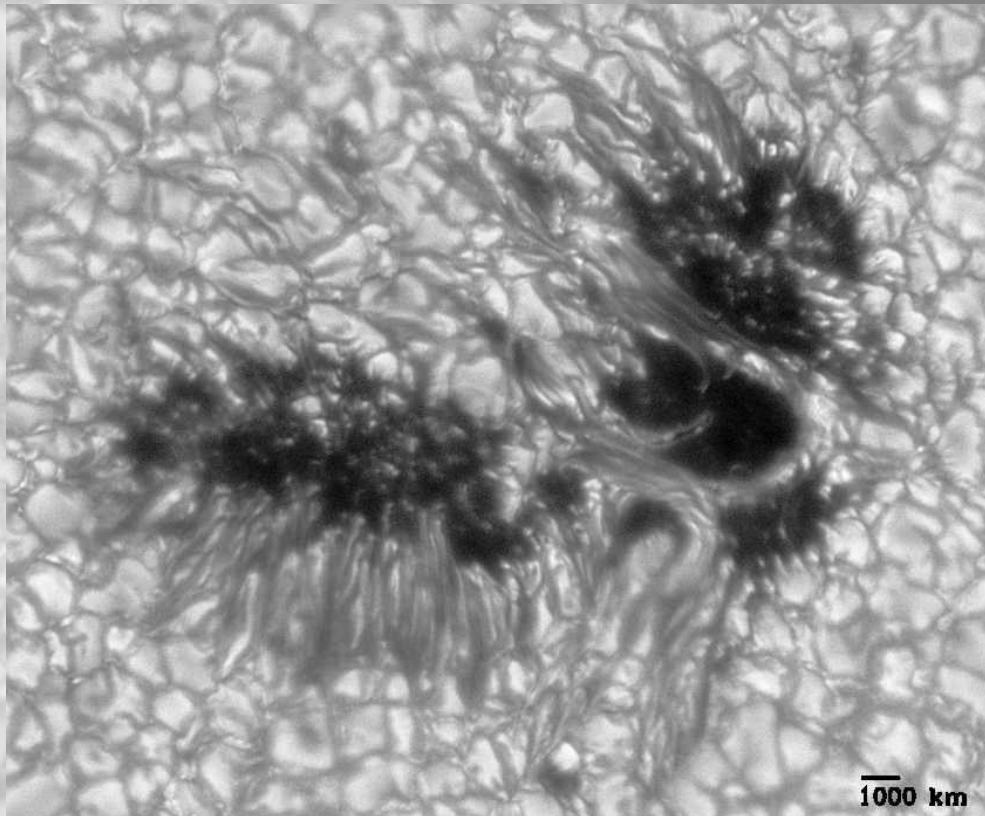
M. Sobotka a K. Puschmann,  
2009



# Světelné mosty

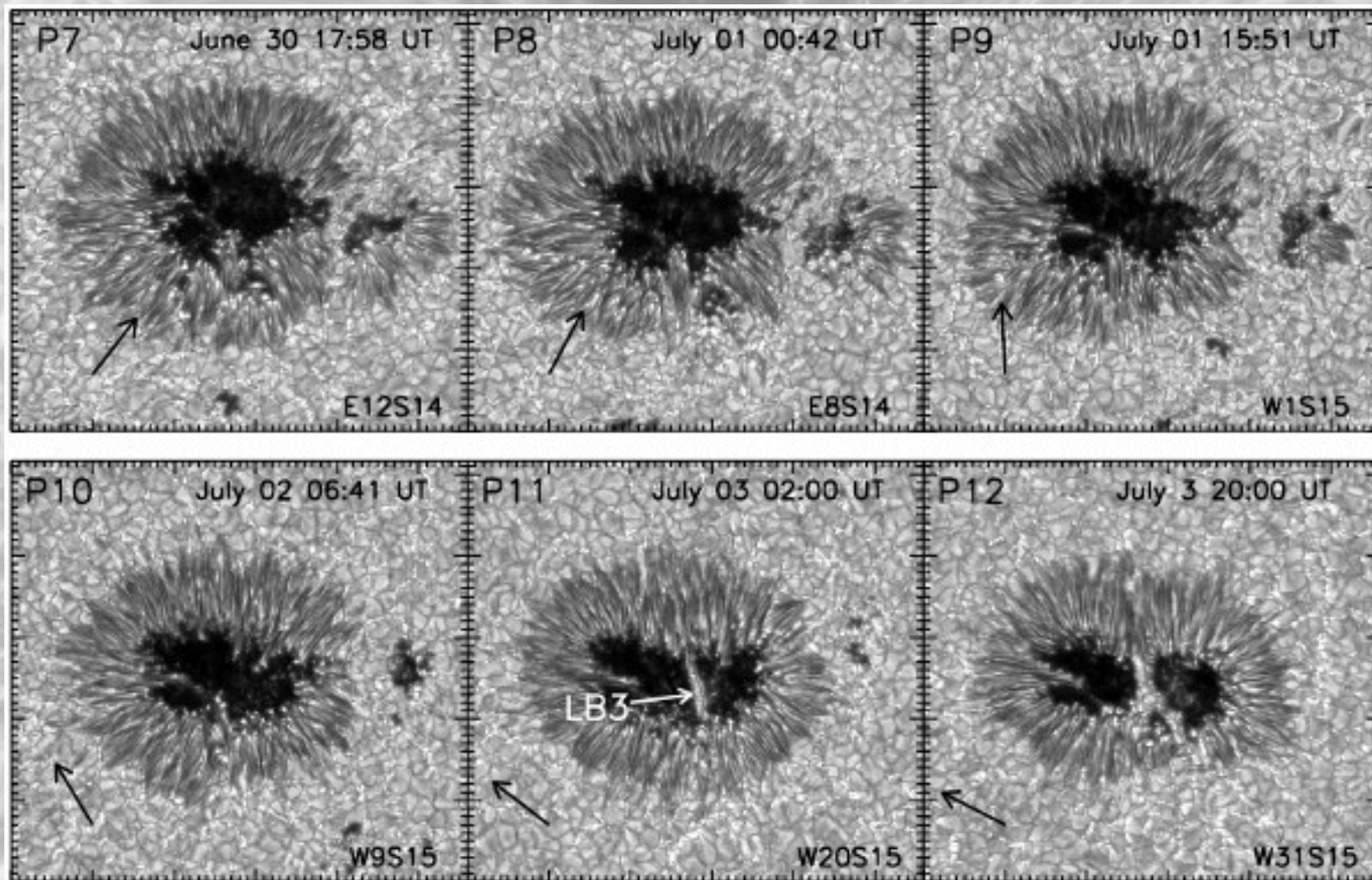
Jasné protáhlé struktury různé šířky s bohatou vnitřní strukturou, které oddělují umbrální jádra nebo jsou vnořeny do umbry. Magnetické pole ve světelných mostech je slabší a více nakloněné než v okolní umbře.

Ve spodních vrstvách pozorujeme konvektivní pohyby nahoru a dolů.





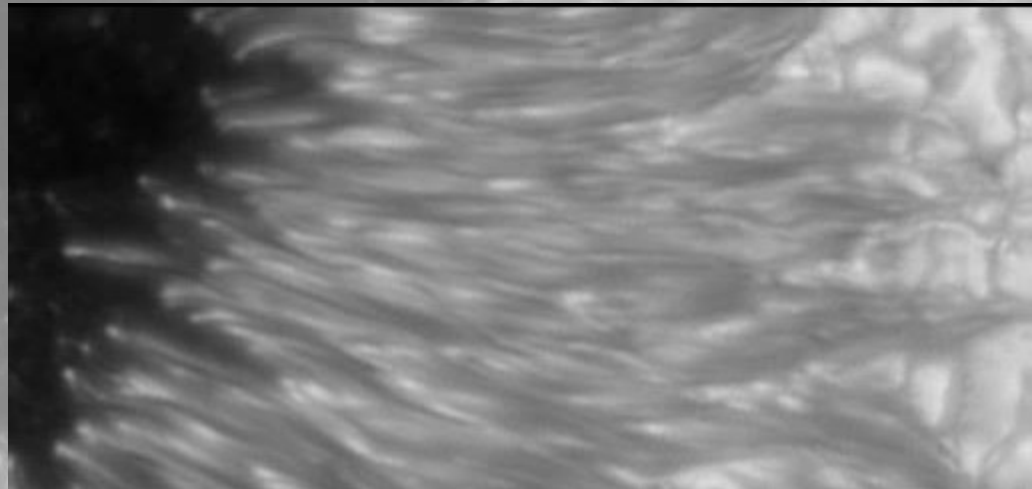
# Vznik světelného mostu



# Penumbra

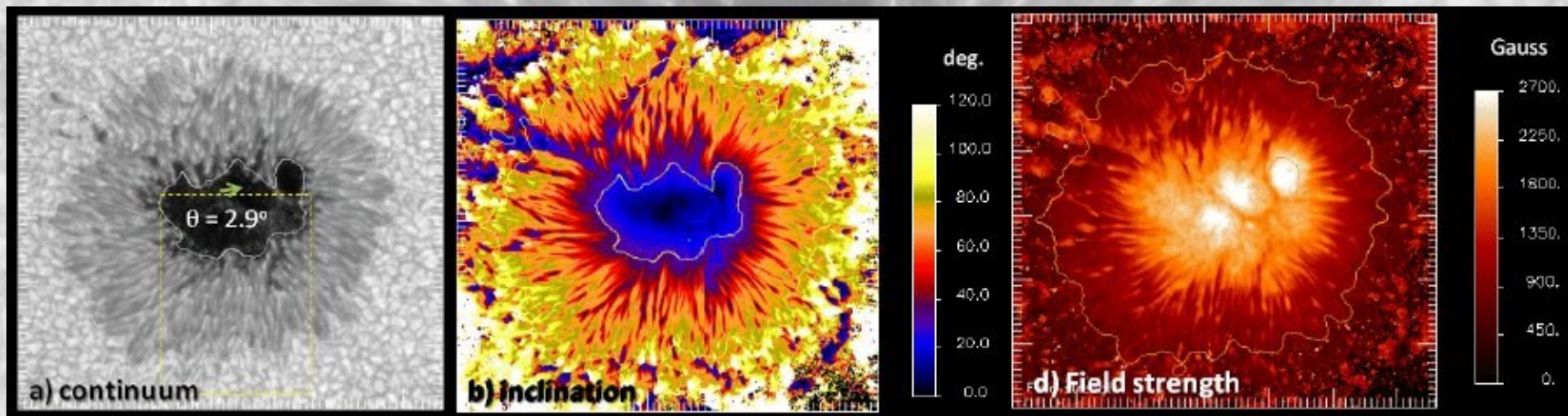
Je tvořena jasnými a tmavými vlákny o šířce od 100 km výš. Podél jasných vláken se pohybují penumbrální zrna rychlostí kolem 500 m/s. Ve vnitřní penumbře míří do umbry a mění se na umbrální body. Ve vnější penumbře některá zrna míří ven z umbry a mění se na granule.

reálný čas 90 minut →





# Magnetické a rychlostní pole v penumbře

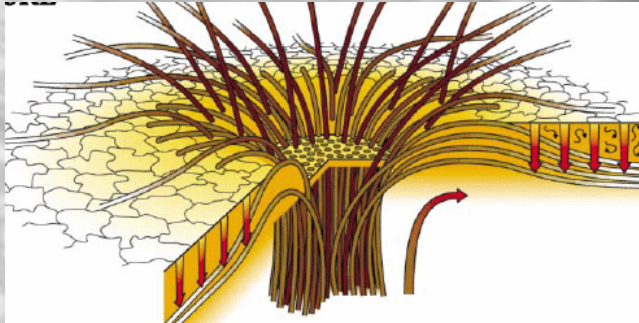


Magnetické pole má rovněž vláknitou strukturu, která však příliš nesouvisí s viditelnými jasnými a tmavými vlákny:

Vnitřní penumbra: v jasných vláknech je magnetické pole slabší, téměř vodorovné, a pozorujeme silné proudění plynu (4 km/s).

Vnější penumbra: v jasných vláknech magnetické pole míří více vzhůru a proudění je slabší než v okolí. Evershedův tok je soustředěn do tmavých vláken.

# Pokus o vysvětlení magnetické struktury penumbry



## Dva systémy magnetických silotrubic

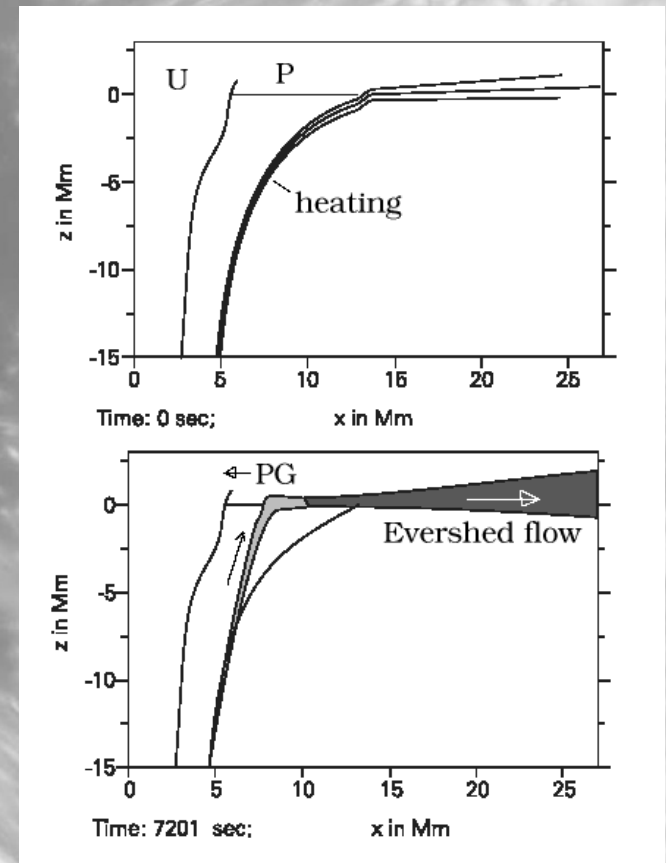
- mírně rozevřený (pozadí)
- téměř horizontální (vlákna)

## Model stoupajících silotrubic

vysvětluje Evershedův tok a pohyb penumbrálních zrn

## Radiální nemagnetické mezery

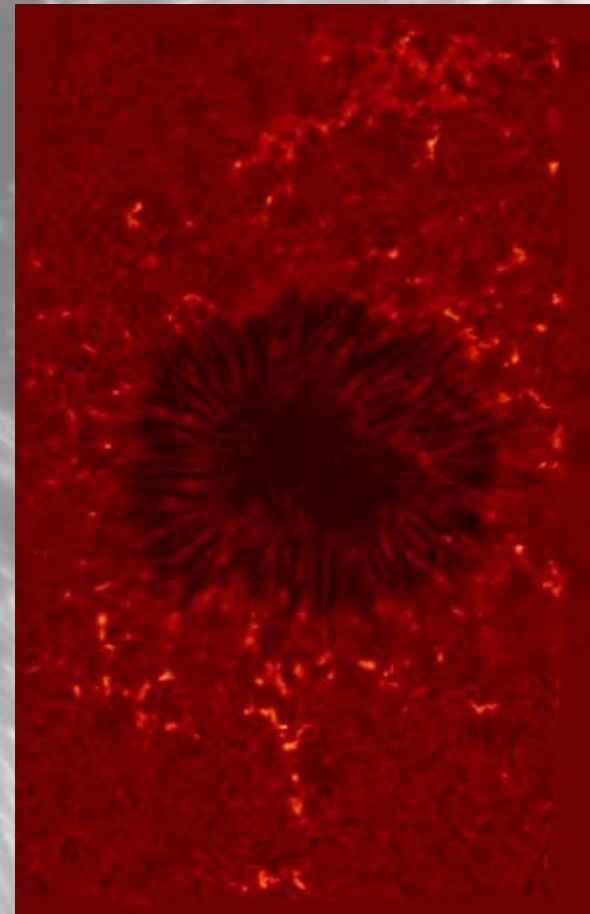
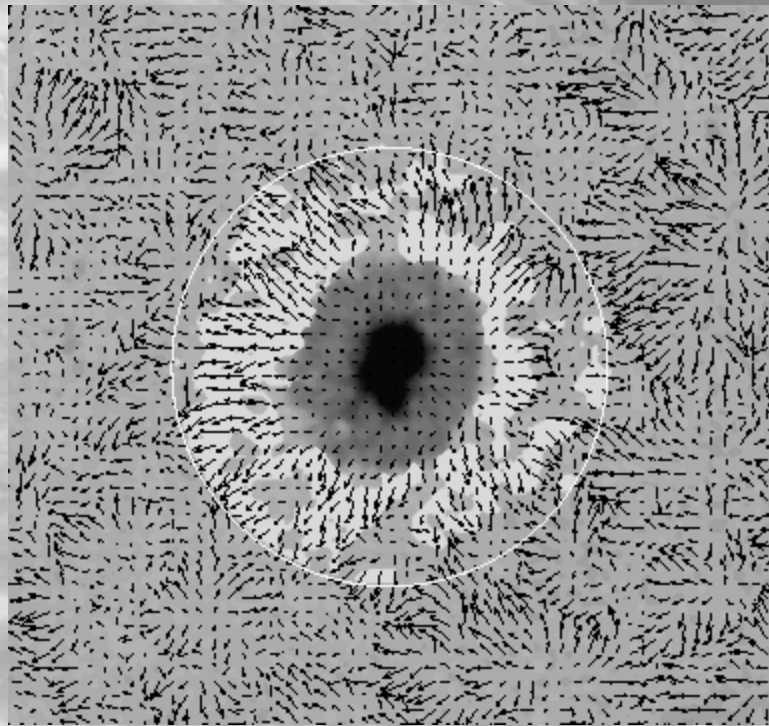
se zvýšenou konvekcí, přivádějí tepelnou energii z konvektivní zóny pod penumbrou





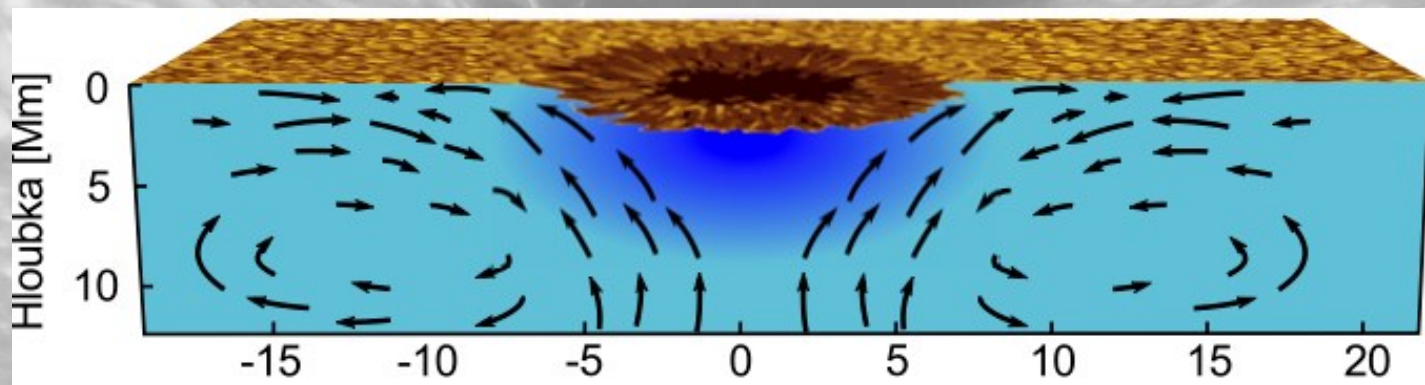
# Proudění kolem skvrn - moat

Moat (příkop) je prstencová oblast kolem skvrny, kde se granule a magnetické uzlíky pohybují rychlostí 0,5–1 km/s směrem od skvrny.



2 hodiny reálného času

Pohyby v oblasti moat jsou patrně projevem proudění kolem skvrny pod povrchem Slunce, jak naznačují výsledky helioseismických měření a modelů. Takové proudění mechanicky stabilizuje skvrnu a prodlužuje její životní dobu.

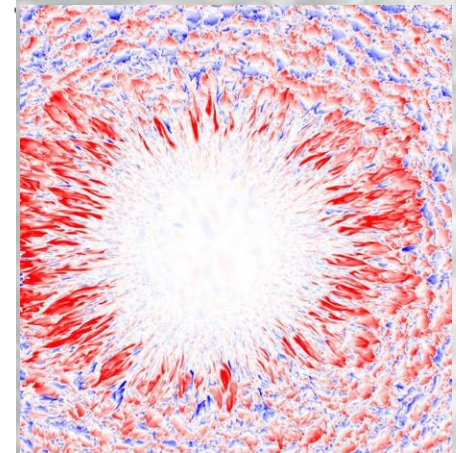
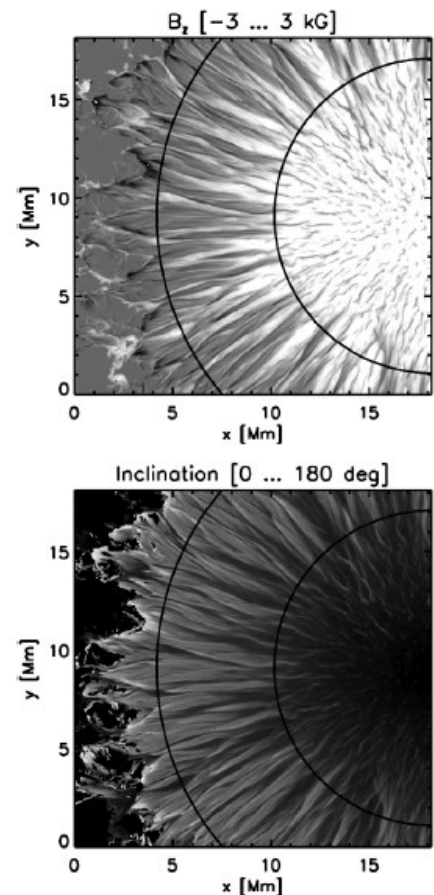
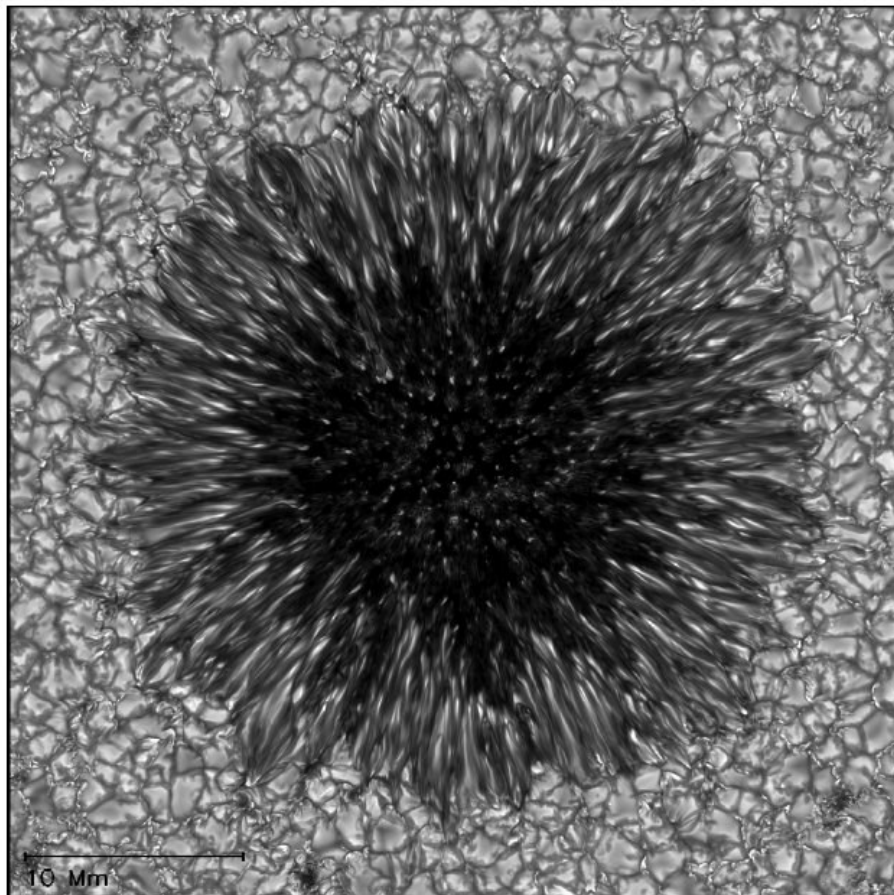


Pod skvrnu můžeme nahlédnout pomocí metod **lokální helioseismologie**. Měla by nám přinést poznatky o teplotě a magnetickém poli do hloubky 10 000 km, ale tak daleko ještě nejsme. Zatím nám musí postačit rychlosti proudění.



# Numerické simulace

M. Rempel od roku 2009 vytváří skvrny na superpočítači. Simulace jsou založeny na řešení MHD rovnic spolu s přenosem záření.



**Evershedův tok**

**Díky za pozornost**