

Horizontální pohyby granulí v blízkosti slunečních skvrn

M. Sobotka, Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, ČR, msobotka@asu.cas.cz
Th. Roudier, Observatoire du Pic du Midi, Tarbes, Francie

Abstrakt

Mnoho slunečních skvrn v pozdním stadiu vývoje je obklopeno prstencovým „příkopem“ (anglicky *moat*), kde pozorujeme systematické radiální pohyby granulí a magnetických elementů směrem od skvrny. V práci analyzujeme série snímků skvrn v bílém světle, pořízené družicí TRACE. Pomocí metody lokální korelace (LCT) měříme pohyby fotosférických granulí v blízkosti skvrn různých velikostí, tvarů a v různých stadiích vývoje. Oblasti *moat* definujeme na základě rychlostí granulí. Uvádíme předběžné výsledky, popisující výskyt oblastí *moat*, jejich velikosti a rychlosti v nich v závislosti na velikostech a vývojových fázích skvrn. Dále rozebíráme pozorované tvarové a rychlostní asymetrie oblastí *moat* včetně jejich závislosti na fázích vývoje a vlastních pohybech skvrn.

1. ÚVOD

Sluneční skvrny jsou dynamické systémy, doprovázené specifickými pohyby plazmatu v sub-fotosférických vrstvách, ve fotosféře a nad ní. Sheeley (1969) poprvé poukázal na existenci prstencovité oblasti kolem skvrny, kde magnetické pole není statické. Tato oblast obklopuje skvrnu podobně jako hradní příkop a byla nazvána anglicky *moat* (příkop). Sheeley a Bhatnagar (1971) našli z Dopplerova posuvu spektrálních čar v oblastech *moat* systematické proudění plazmatu směrem od skvrny. Časové série spektroheliogramů, magnetogramů, snímků v bílém světle a ve spektrálním pásu *G* ukazují, že magnetické elementy, fakulární body a granule se v oblasti *moat* pohybují převážně směrem od skvrny rychlostí 0,5–1 km/s, což je zhruba dvojnásobek rychlosti v supergranulích (Muller a Mena 1987, Shine a kol. 1987, Brickhouse a Labonte 1988, Bonet a kol. 2005). Oblasti *moat* byly pozorovány především u starých slunečních skvrn.

Odstředivý pohyb v oblasti *moat* se pokusili vysvětlit Brickhouse a Labonte (1988), kteří vycházeli z modelu sluneční skvrny vypracovaného Meyerem a kol. (1974): Přebytek tepla v konvektivní zóně pod skvrnou vede k vzestupnému proudění v okolí skvrny a k divergentnímu toku ve fotosféře. V hloubce kolem 10 000 km se naopak předpokládá přítomnost konvergentního proudění, které mechanicky stabilizuje skvrnu. Alternativní vysvětlení nabízejí numerické simulace konvekce v okolí magnetických silotrubic (Hurlburt a Rucklidge 2000): V důsledku ochlazování plazmatu v okolí skvrny vzniká sestupné proudění, které vytváří kolem skvrny konvektivní „límeč“ s konvergentním tokem nahore a divergentním tokem dole, tedy přesně naopak než v modelu Meyera a kol. (1974). Tento

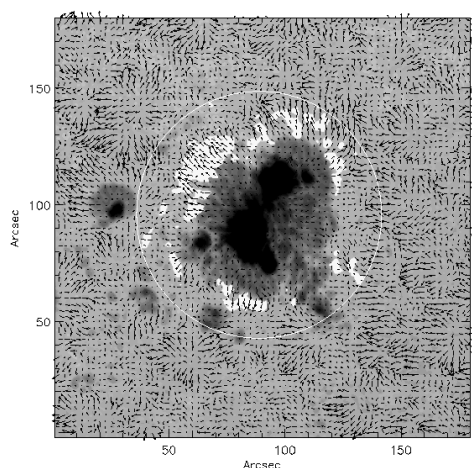
límeč je však skryt pod penumbrou a *moat* je tvořen dalším konvektivním systémem, jenž límeč obklopuje a v němž se plazma pohybuje opačným směrem.

V této práci využíváme série snímků v bílém světle, pořízené družicí Transition Region and Coronal Explorer (TRACE), ke studiu oblastí *moat* na základě měření horizontálních pohybů granulí v okolí slunečních skvrn.

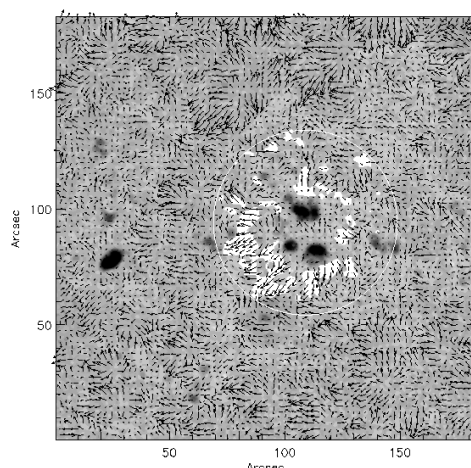
2. DATA A JEJICH ANALÝZA

Z databáze TRACE (http://trace.lmsal.com/trace_cat.html) jsme vybrali série snímků v bílém světle o délce kolem 1 hodiny, zachycující 32 slunečních skvrn v období 2000–2004. Prostorové a časové rozlišení sérií je 1" (0,5"/pixel) a 0,5–1 minuta. Kritériem výběru skvrn byla poloha v centrální oblasti slunečního disku a zastoupení skvrn různých typů a vývojových fází, bez ohledu na přítomnost oblastí *moat*.

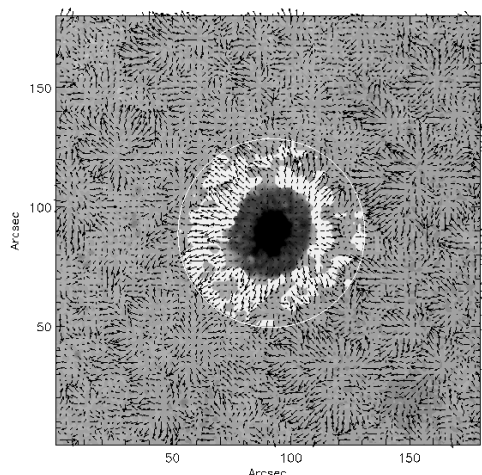
V sériích snímků byla nejprve provedena stabilizace obrazu, odstraňující pohyb skvrn v důsledku sluneční rotace a nepřesností zaměření družice. Dále byla aplikována třírozměrná Fourierova k - ω filtrace k potlačení pětiminutových oscilací, které by mohly vnášet nepřesnosti při určování pohybů granulí. Zpracované série snímků mají zorné pole 3'12" x 3'12". Pohyby struktur byly měřeny metodou lokální korelace (LCT, November a Simon 1988) s korelačním oknem o velikosti 3". Výsledkem jsou mapy horizontálních rychlostí granulí v okolí všech 32 studovaných skvrn. Rychlosti jsou průměrnými hodnotami během trvání dané série. Oblasti *moat* byly definovány v mapách rychlostí na základě následujících dvou podmínek: (1) absolutní hodnota horizontálních rychlostí granulí musí



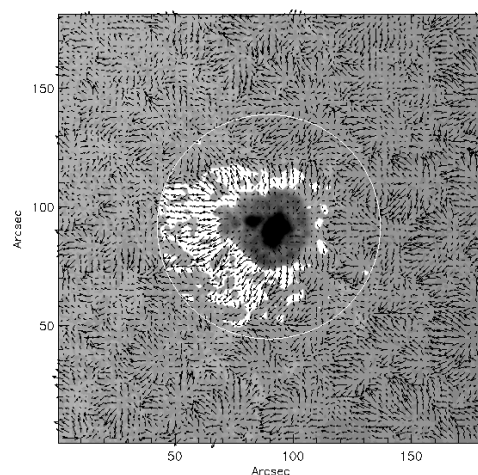
Obr. 1. NOAA 9415, mladá rostoucí skvrna. Délka vodorovné šipky v levém dolním rohu odpovídá rychlosti 1 km/s.



Obr. 3. NOAA 9313, stará zanikající skvrna.



Obr. 2. NOAA 10554, stará stabilní skvrna.



Obr. 4. NOAA 9339, stará skvrna, asymetrický moat.

být větší než 0,25 km/s; (2) granule se musí pohybovat přibližně radiálně od středu skvrny, tj. odchylka vektorů rychlosti od směru ke středu skvrny musí být menší než $\pm 30^\circ$.

Skvrny jsme rozdělili do dvou skupin: 14 „mladých“ skvrn, které ještě nedosáhly maximální velikosti, a 18 „starých“ skvrn, nacházejících se v maximu vývoje a po něm. Z rychlostních map a z průměrných obrazů, které vznikly integrací všech snímků dané série, jsme měřili plochy a poloměry slunečních skvrn a oblastí *moat*, asymetrii plochy *moat*, průměrné rychlosti horizontálního pohybu granulí v oblasti *moat* a mimo ni, směrovou asymetrii v rozložení rychlostí a rychlost vlastního pohybu skvrn vůči okolní klidné granulaci. Příklady rychlostních map s oblastmi *moat* označenými bílou barvou uvádíme na obrázcích 1–4. Bílé kružnice vymezují oblasti, ve kterých byly testovány podmínky (1) a (2).

3. VÝSLEDKY

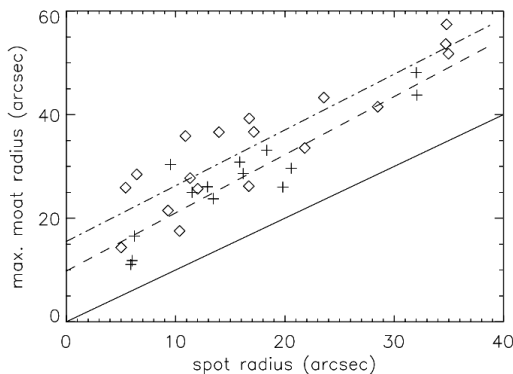
Z obrázků 1–4 vidíme na první pohled, že alespoň částečná oblast *moat* je přítomna jak u mladých tak u starých skvrn a přetrvává i kolem skvrn v pokročilém stadiu rozpadu. Dále vidíme, že plochy *moat* mají většinou asymetrický, sektorový tvar. Asymetrie přítomna nezávisí na poloze na slunečním disku, takže můžeme vyloučit efekt projekce.

Kvantifikujeme nyní velikosti a asymetrie oblastí *moat* ve vztahu k velikostem a vývojovým fázím skvrn. Střední hodnota poměru plochy skvrny a plochy oblasti *moat* je přibližně rovna jedné v případě mladých skvrn a dvěma u starých skvrn. Staré skvrny mají tedy relativně větší oblasti *moat*, což pravděpodobně souvisí s lépe vyvinutým systémem subfotosférického proudění kolem skvrny. Definujme maximální poloměr $R_{moat} = \sqrt{[(A_{max} + A_{spot})/\pi]}$ jako efektivní poloměr hypotetické oblasti *moat* s plochou A_{max} , kterou získáme extrapolací nejlépe vyvinutého sektoru *moat* do všech směrových úhlů kolem skvrny. A_{spot} je plocha skvrny, která také musí být zahrnuta do výpočtu efektivního

poloměru. Z našich měření vyplývá, že závislost R_{moat} na poloměru skvrny $r_s = \sqrt{A_{\text{spot}}/\pi}$ je přibližně lineární:

$$R_{\text{moat}} = 9,8'' + 1,1 r_s \quad \text{pro mladé skvrny,}$$

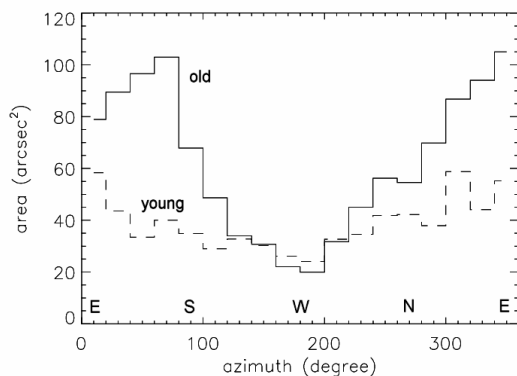
$$R_{\text{moat}} = 15,5'' + 1,1 r_s \quad \text{pro staré skvrny.}$$



Obr. 5. Závislost maximálního poloměru oblasti moat na poloměru skvrny. „+“ – mladé skvrny, „◊“ – staré skvrny.

Tento fakt je ilustrován na obr. 5, kde jsou zobrazena jednotlivá měření spolu s výše uvedenými lineárními aproximacemi pro mladé (čárkovaně) a staré (čérchovaně) skvrny. Plná čára odpovídá hodnotám $R_{\text{moat}} = r_s$. Vidíme, že maximální šířka oblasti moat $R_{\text{moat}} - r_s$ je téměř nezávislá na poloměru skvrny, avšak liší se podle vývojového stadia (10" pro mladé skvrny a 16" pro staré). Hodnoty $R_{\text{moat}} - r_s$ jsou srovnatelné s typickým poloměrem supergranule (14" – 20").

Asymetrii plochy jsme studovali tak, že jsme oblast moat rozdělili do 18 sektorů po 20°. Orientace 0° odpovídala východnímu směru a 90° jižnímu. Pro každý sektor jsme vypočetli příslušnou plochu oblasti moat. Průměrné hodnoty ploch pro mladé a staré skvrny jsou vyneseny na obr. 6. Oblasti moat jsou většinou asymetrické ve směru východ – západ. Většina plochy moat leží na východ od skvrny, zatímco na západě je plocha minimální a občas úplně chybí. Tato asymetrie



Obr. 6. Rozložení plochy moat podle směrových úhlů. Čárkovaně – mladé skvrny, plně – staré skvrny.

je velmi silná v případě starých skvrn. U mladých skvrn není tak výrazná, pravděpodobně proto, že oblast moat není ještě dostatečně vyvinuta.

Dalším parametrem jsou rychlosti horizontálních pohybů granulí, které byly měřeny v okolí skvrn, ohraničeném kružnicemi na obrázcích 1–4, zvláště v oblasti moat a mimo ni. Průměrné hodnoty rychlostí (tabulka 1) v oblasti moat jsou nižší u mladých skvrn. To svědčí o tom, že systém subfotosférického proudění kolem skvrny se rozvíjí postupně. Rovněž rychlosti mimo moat jsou nižší u mladých skvrn, což může být způsobeno rozptýleným magnetickým polem v jejich okolí.

	mladé skvrny	staré skvrny
moat	$0,38 \pm 0,03$ km/s	$0,41 \pm 0,03$ km/s
mimo moat	$0,20 \pm 0,04$	$0,24 \pm 0,04$

Tab. 1. Průměrné rychlosti horizontálních pohybů granulí.

Podobně jako plochy, i absolutní hodnoty rychlostí vykazují směrovou asymetrii. V tabulce 2 uvádíme průměrné rychlosti ve východní a západní části moat (dělení prochází středem skvrny ve směru sever – jih). Rychlosti ve východní části (jež jsou orientovány východním směrem) jsou mírně vyšší než v západní části (rychlosti orientovány k západu), přičemž tato asymetrie je výraznější u starých skvrn.

	mladé skvrny	staré skvrny
východní	$0,38 \pm 0,03$ km/s	$0,41 \pm 0,03$ km/s
západní	$0,36 \pm 0,04$	$0,37 \pm 0,03$

Tab. 2. Průměrné rychlosti ve východní a západní části oblasti moat.

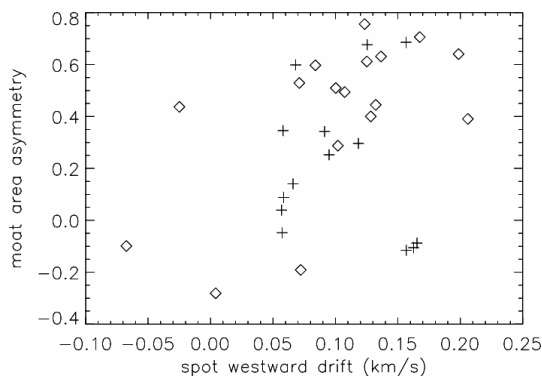
Vzhledem k tomu, že při stabilizaci obrazů v sérii byl souřadný systém svázán se studovanou sluneční skvrnou, rychlost vlastního pohybu skvrny ve fotosféře můžeme získat měřením průměrné rychlosti granulí ve velkých oblastech klidné granulace daleko od skvrn. V tabulce 3 jsou uvedeny průměrné rychlosti vlastního pohybu skvrn ve směru od východu k západu spolu s počty měřených skvrn. Vedoucí a zadní skvrny ve skupinách byly uvažovány odděleně. Jedna stará zadní skvrna byla ze vzorku vypuštěna pro velkou zbytkovou chybu ve stabilizaci obrazu. Ve směru sever – jih jsou rychlosti blízké nule. I přes značný rozptyl individuálních rychlostí (střední kvadratická odchylka $\pm 0,06$ km/s) zjišťujeme, že mladé skvrny, vedoucí

	mladé skvrny	staré skvrny
vedoucí	$0,11$ km/s (9)	$0,12$ km/s (13)
zadní	$0,09$ (5)	$0,04$ (4)

Tab. 3. Průměrné rychlosti vlastních pohybů skvrn vzhledem k okolní klidné granulaci. V závorkách jsou uvedeny počty skvrn.

i zadní, driftují k západu rychlostí kolem 0,1 km/s. U starých skupin skvrn se projevuje separace vedoucích a zadních částí skupiny, přičemž k západu driftují převážně vedoucí skvrny. Podobný vlastní pohyb skvrn odvodili např. Gilman a Howard (1985) a van Driel-Gesztelyi a Petrovay (1990) z pozičních pozorování.

Naskytá se otázka, souvisí-li východo-západní asymetrie ploch oblastí *moat* a asymetrie rychlostí v nich s vlastním pohybem skvrn. Jako míru asymetrie jsme zvolili normalizovaný rozdíl ploch východní a západní části oblasti *moat* a normalizovaný rozdíl průměrných rychlostí v těchto plochách. V případě rychlostí nebyla nalezena žádná korelace mezi asymetrií a vlastním pohybem. Na obr. 7 jsou vyneseny míry asymetrie ploch oproti rychlostem vlastního pohybu mladých a starých skvrn. U mladých skvrn není patrna žádná korelace, ale v případě starých skvrn pozorujeme zvyšování míry asymetrie plochy *moat* s rostoucí rychlostí vlastního pohybu (korelační koeficient 0,6). Je tedy možné, že u skvrn s dostatečně vyvinutým prouděním v oblasti *moat* je tvar oblasti ovlivněn vlastním pohybem skvrny fotosférou.



Obr. 7. Závislost míry asymetrie plochy *moat* na rychlosti vlastního pohybu. „+“ – mladé skvrny, „◇“ – staré skvrny.

4. ZÁVĚRY

V práci jsme se zabývali studiem oblastí *moat* kolem slunečních skvrn v různých fázích vývoje. Tyto oblasti byly definovány na základě horizontálních pohybů granul směřujících radiálně od skvrny. *Moat* mají jak staré tak mladé skvrny, avšak u starých skvrn je, vzhledem k ploše skvrny, *moat* větší a granule v něm se pohybují rychleji. Průměrná rychlost granul v oblasti *moat* je přibližně 0,4 km/s. Maximální šířka *moat* je téměř nezávislá na velikosti skvrny, avšak závisí na její vývojové fázi: u mladých skvrn je menší (10") a u starých větší (16"). Tyto hodnoty jsou srovnatelné s typickým poloměrem supergranule.

Oblasti *moat* jsou asymetrické, protažené ve směru k východu. Tato asymetrie je výraznější u starých skvrn, kde je *moat* více vyvinut, a může být ovlivněna rychlostí vlastního pohybu skvrny ve fotosféře.

Poděkování

Autoři děkují teamu TRACE za poskytnutí cenného pozorovacího materiálu. Práce vznikla za podpory Grantové agentury AV ČR (grant IAA 3003404), klíčového projektu AV ČR K-2043105 a s významnou podporou University Paula Sabattiera v Toulouse.

LITERATURA

- Bonet, J.A., Márquez, I., Muller, R., Sobotka, M., Roudier, Th.: 2005, *Astron. Astrophys.*, 430, 1089.
- Brickhouse, N.S., Labonte, B.J.: 1988, *Solar Phys.*, 115, 43.
- van Driel-Gesztelyi, L., Petrovay, K.: 1990, *Solar. Phys.*, 126, 285.
- Gilman, P.A., Howard, R.: 1985, *Astrophys. J.*, 295, 233.
- Hurlburt, N.E., Rucklidge, A.M.: 2000, *MNRAS*, 314, 793.
- Meyer, F., Schmidt, H.U., Weiss, N.O., Wilson, P.R.: 1974, *MNRAS*, 169, 35.
- Muller, R., Mena, B.: 1987, *Solar Phys.*, 112, 295.
- November, L.J., Simon, G.W.: 1988, *Astrophys. J.*, 333, 427.
- Sheeley, N.R.: 1969, *Solar Phys.*, 9, 347.
- Sheeley, N.R., Bhatnagar A.: 1971, *Solar Phys.*, 19, 338.
- Shine, R.A., Title, A.M., Tarbell, T.D., Topka, K.P.: 1987, *Science*, 238, 1203.