

Vývoj a pohyby jemných struktur na vnější hranici penumbry

*M. Sobotka, Astronomický ústav AV ČR, CZ-25165 Ondřejov, Česká republika,
msobotka@asu.cas.cz*

*R. Muller, Observatoire du Pic du Midi, 57 Avenue d'Azereix, B.P. 826, F-65008
Tarbes, France*

*J.A. Bonet a I. Márquez, Instituto de Astrofísica de Canarias, E-38200 La Laguna,
Tenerife, España*

Abstrakt

V článku jsou studovány horizontální pohyby granulí v blízkosti sluneční skvrny a vývoj penumbrálních zrn u hranice penumbry s fotosférickou granulací. Pozorování byla získána na Švédském vakuovém slunečním dalekohledu, La Palma, a analyzována metodami lokální korelace a sledování objektů. V granulaci pozorujeme četná centra divergentních horizontálních pohybů, způsobených především explodujícími granulemi. V okolí vyvinutých skvrn nacházíme organizovaný pohyb granulí a center divergence směrem od penumbry. Ve vnější penumbře se penumbrální zrna pohybují většinou ke hranici s fotosférou. Asi 2/3 penumbrálních zrn zaniká v blízkosti této hranice. Ostatní penumbrální zrna tuto hranici překračují, mění se buď v granule nebo v malé jasné objekty a pokračují v pohybu směrem od skvrny.

1. ÚVOD

Sluneční skvrny a póry vznikají díky silnému magnetickému poli, které proniká k viditelnému slunečnímu povrchu. Skvrny, na rozdíl od pór, jsou obklopeny penumbrou, v níž je magnetické pole téměř vodorovné. Sloupec chladného plynu tvořící skvrnu nebo póru ovlivňuje proudění v okolní konvektivní zóně. Tento fakt je důležitý pro úvahy o stabilitě slunečních skvrn a pór. Horizontální proudění, pozorované v bílém světle v sériích snímků s vysokým prostorovým a časovým rozlišením, je různé v okolí skvrn a pór:

Skvrny:

1. Většina penumbrálních zrn (Muller 1973) ve vnější penumbře se pohybuje směrem ven, ke hranici s fotosférickou granulací (Sobotka a kol. 1999a, Sobotka a Sütterlin 2001).

2. Temné difúzní oblasti, spojené s tmavými penubrálními vlákny, se rovněž pohybují směrem ven (Zirin a Wang 1989, Shine a kol. 1994).

3. Granule v oblasti obklopující skvrnu (tzv. „moat“, česky příkop) se pohybují směrem od skvrny (Muller a Mena 1987, Shine a kol. 1987, Wang a Zirin 1992).

Póry:

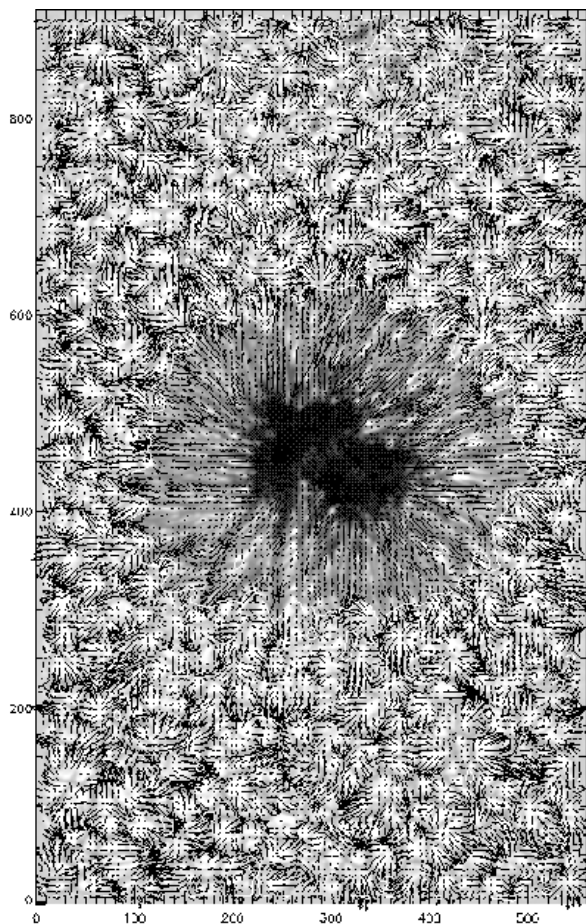
1. Granule v zóně široké 1500 km kolem póry směřují dovnitř ke hranici póry. Některé z nich touto hranicí projdou do umbry (Sobotka a kol. 1999).

2. Výše uvedené granulární pohyby jsou pravděpodobně řízeny centry divergentních horizontálních pohybů, tedy explodujícími granulemi nebo mesogranulemi (Sobotka a kol. 1999b).

V této práci se zabýváme horizontálními pohyby granulí v okolí stabilní sluneční skvrny a vztahy penumbrálních zrn s okolní granulací.

2. POZOROVÁNÍ

Skvrna NOAA 8620 byla pozorována 7. června 1999 na Švédském vakuovém slunečním dalekohledu, La Palma, (Scharmer a kol. 1985) v blízkosti středu slunečního disku ($\mu=0,93$). Dvě časové série obrazů s prostorovým rozlišením 0,25" byly snímány současně ve vlnových délkách $4507\pm 4,5$ Å (modrá oblast) a $4308\pm 5,5$ Å (pás G). Oba kanály byly vybaveny děličí obrazu umožňujícími rekonstrukci snímků metodou fázové diversity. Po standardní kalibraci a opravě o rotaci zorného pole byly snímky pořízené v modré oblasti rekonstruovány pomocí algoritmu fázové diversity (Gonsalves 1982, Löfdahl a Scharmer 1994) a zbaveny tak degradace obrazu vlivem dalekohledu a turbulence v atmosféře Země.



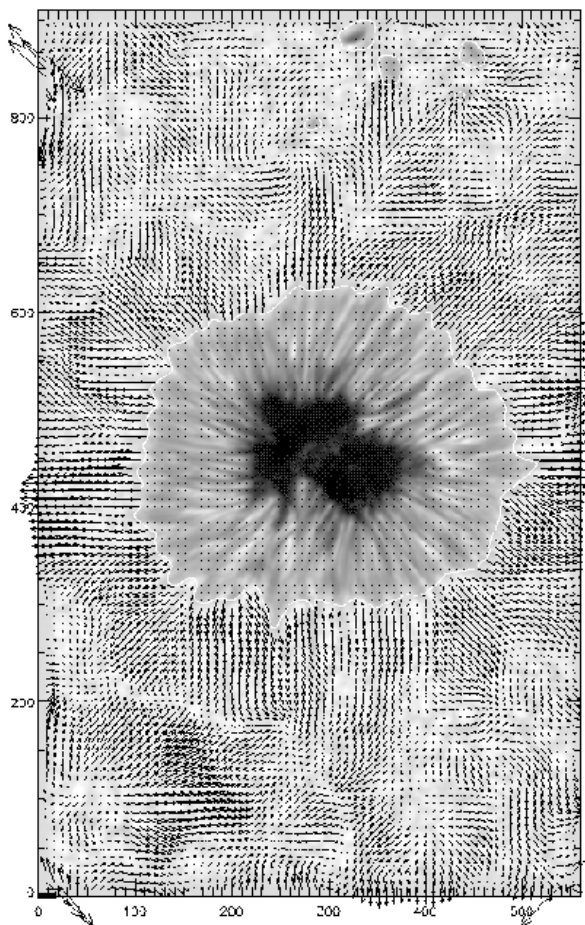
Obr. 1: Jedna z 24 map horizontálních rychlostí v intervalu 5 minut. Souřadnicová jednotka je 1 pixel (0,083"). Délka černé úsečky u souřadnic (0,0) odpovídá rychlosti 1 km/s. Obraz skvrny vznikl sečtením všech snímků v sérii.

Rekonstruované snímky byly opraveny o pohyb a deformaci obrazu. Akustické oscilace byly odstraněny pomocí $k - \omega$ filtru. Byla tak získána dvouhodinová série 288 snímků s časovým rozlišením 25 s. Pozorovaná sluneční skvrna je ve středu zorného pole 46" x 75" (560 x 910 pixelů). Díky rekonstrukci je kvalita obrazu velmi vysoká a extrémně stabilní během celého dvouhodinového období.

3. POHYBY GRANULÍ V OKOLÍ SKVRNY

Horizontální pohyby granulí v celém zorném poli byly studovány pomocí metody lokální korelace (LCT, November a Simon 1988). Zvolená velikost korelačního okna byla 0,75" (přibližně polovina typické velikosti granulí) a mapy rychlostí byly integrovány v úsecích po pěti minutách. Z dvouhodinové série snímků tak byla získána posloupnost 24 map. Jedna z nich (13. v pořadí) je na obr. 1. V celém zorném poli vně sluneční skvrny pozorujeme četná centra divergentních horizontálních pohybů („růžice“) o velikosti asi 3", způsobená hlavně explodujícími granulemi.

Časoběrný film sestavený z 24 rychlostních map ukazuje, že v zóně široké asi 8" kolem skvrny (moat) se



Obr. 2: Mapa horizontálních rychlostí center divergence, ukazující odstředivé pohyby v oblasti kolem skvrny. Škála rychlostí se liší od obr. 1.

růžice pohybují směrem od skvrny. Pro podrobnější studium tohoto pohybu byly mapy rychlostí přepočteny na mapy divergence. Tyto mapy byly vyhlazeny filtrem, který v nich zachoval jen takové útvary, které spolehlivě reprezentují polohy růžic. Metodou LCT (korelační okno 2", integrace 2 hodiny) pak byly ze série 24 vyhlazených map odvozeny rychlosti pohybu center divergence – růžic (obr. 2).

Z obr. 1 a 2 lze odvodit dva typy pohybů v oblasti (moat) kolem skvrny:

1. Lokální divergentní pohyby granulí, které se neliší od pohybů v oblastech dále od skvrny a jsou způsobeny převážně explodujícími granulemi.
2. Uspořádaný, přibližně radiální pohyb směrem od skvrny, který s sebou unáší granule a centra divergentních pohybů. Rozsah tohoto pohybu je patrný na obr. 2.

Na obr. 2 také vidíme, že rychlosti růžic jsou obecně menší v horní části zorného pole, kde se vyskytuje několik pór, než v dolní části pole, kde pozorujeme v rozsahu souřadnic (0-250, 0-200) rychlosti až 1 km/s. Tyto vysoké rychlosti mohou být důsledkem

přítomnosti hranice supergranule. Střední velikosti rychlostí a jejich standardní odchylky, popisující rozptyl individuálních hodnot, pro oblast (moat) kolem skvrny a pro dolní a horní část zorného pole jsou shrnuty v tabulce 1. První řádek tabulky odpovídá přímo měřeným rychlostem granulí (např. na obr. 1). Druhý řádek charakterizuje pohyby center divergence na větších prostorových škálách (obr. 2). Třetí řádek udává vektorové rozdíly prvních dvou rychlostních polí, tj. „čisté“ rychlosti v centrech divergence – růžicích.

Tabulka 1: Střední horizontální rychlosti (km/s).

Oblast	Moat	Dole	Nahoře
Granule	0,79±0,43	0,80±0,44	0,73±0,41
Růžice	0,51±0,13	0,36±0,21	0,25±0,12
Rozdíl	0,64±0,36	0,72±0,38	0,68±0,39

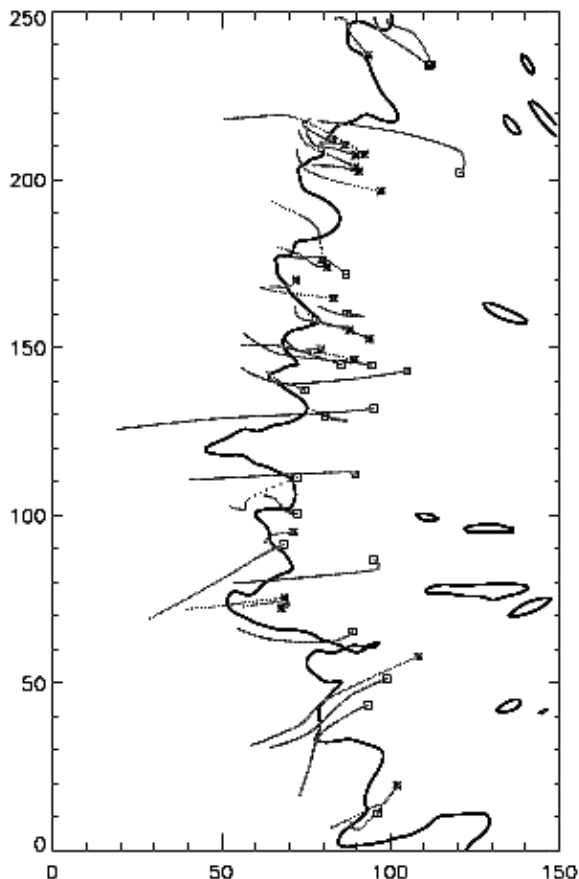
Střední rychlosti granulí jsou téměř stejné v oblasti kolem skvrny a v dolní části zorného pole, která zahrnuje klidnou granulaci a hranici supergranule. V horní části pole s granulací a malými pórami jsou rychlosti menší, pravděpodobně v důsledku zesíleného magnetického pole v pórách a kolem nich. Střední rychlost pohybu růžic je největší v oblasti kolem skvrny, kde jsou pohyby radiálně uspořádány, a nejmenší v horní části pole kolem pór. Rozdíl rychlostí, tj. „čisté“ rychlosti v růžicích, odpovídající lokálním rychlostem v explodujících granulích, jsou největší v dolní oblasti zorného pole, kde můžeme očekávat velmi slabé či žádné magnetické pole. Naopak nejmenší jsou v oblasti kolem skvrny. To naznačuje, že magnetické pole rozptýlené ve fotosféře snižuje rychlost expanze v explodujících granulích.

4. INTERAKCE PENUMBRÁLNÍCH ZRN S OKOLNÍ GRANULACÍ

Prohlídkou časosběrného filmu sestaveného z 288 rekonstruovaných snímků v modrém světle bylo zjištěno, že penumbrální zrna, která se pohybují ven, směrem ke hranici (P/G) mezi penumbrou a fotosférickou granulací, se vyvíjejí třemi následujícími způsoby:

1. Zanikají v penumbře, aniž by dosáhla hranice.
2. Překračují hranici P/G a pokračují v pohybu v granulaci jako malé jasné objekty.
3. Po překročení hranice P/G zvětšují velikost a mění se na granule, které se pohybují od skvrny.

Abychom tento vývoj zkoumali objektivně, použili jsme v části zorného pole s kusem penumbry a přílehlou granulací algoritmus pro sledování objektů (Sobotka a kol. 1997). Výběr jasných objektů se řídil následujícími kritérii: nejkratší životní doba 250 s, nejvyšší střední rychlost 4 km/s, nejmenší průměrná velikost 0,28" a průměrná intenzita v rozsahu 0,9 – 1,15 střední fotosfé-

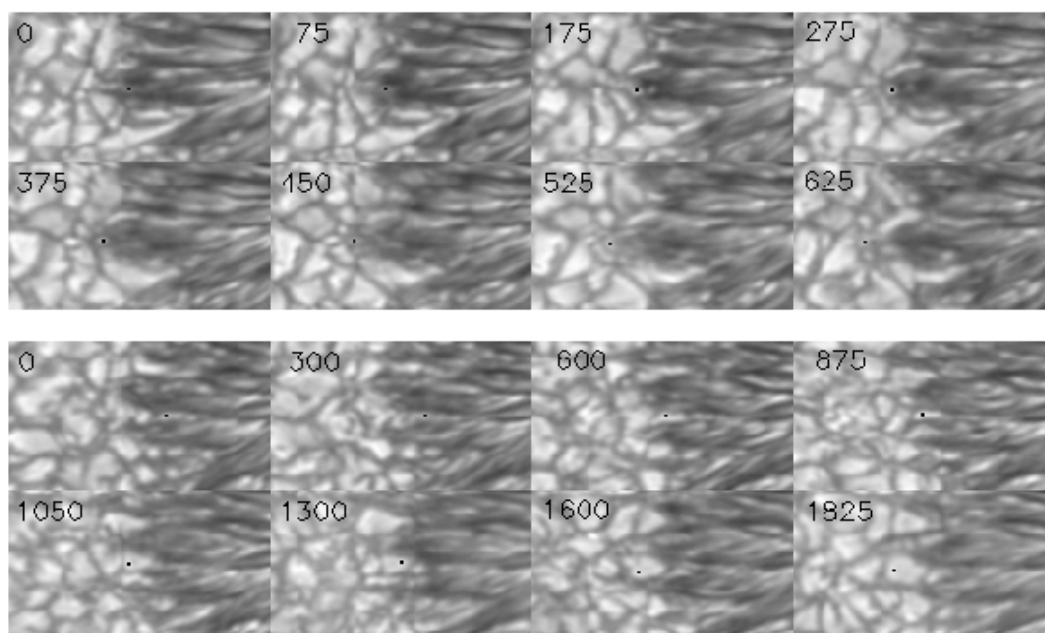


Obr. 3: Trajektorie penumbrálních zrn, která prošla vnější hranicí penumbry (plná čára). Počátky trajektorií malých objektů jsou označeny * a počátky trajektorií granulí □.

rické intenzity. Ze 712 nalezených objektů byly vyloučeny ty, jejichž sledování bylo nespolehlivé nebo které vznikly v granulaci, a penumbrální zrna pohybující se opačným směrem, tj. k umbře. V konečném vzorku zůstalo 126 penumbrálních zrn, u kterých byly změřeny trajektorie a okamžité rychlosti.

Výsledky jsou následující: Asi 2/3 zrn zaniká před dosažením hranice P/G. 1/6 hranici projde a změní se na malé (průměr < 0.5") jasné fotosférické objekty a 1/6 po průchodu hranicí P/G expanduje a vyvine se v granule. Všechny objekty zachovávají po průchodu hranicí svůj pohyb směrem od skvrny průměrnou rychlostí 1,4 km/s (malé objekty) nebo 1,1 km/s (granule). Na obr. 3 jsou nakresleny jejich trajektorie. Dva příklady demonstrující přeměnu penumbrálního zrna na malý jasný fotosférický objekt a na granuli jsou na obr. 4.

Počty penumbrálních zrn, která nepřekročila hranici P/G a která ji překročila a přeměnila se na malé objekty nebo se vyvinula v granule, jsou shrnuty v tabulce 2. Uvádíme rovněž počty penumbrálních zrn, která zrychlila nebo zpomalila pohyb před překročením hranice P/G nebo během něho. Je zajímavé, že většina zrn, která pak



Obr. 4: Série snímků ukazujících přeměnu penumbrálního zrna na malý jasný fotosférický objekt (nahore) a na granuli (dole). Sledované objekty jsou označeny malými černými tečkami. Čísla udávají uplynulý čas v sekundách. Velikost zorného pole je 12.5" x 7.5".

pokračovala jako malé jasné fotosférické objekty, zpomalila svůj pohyb, zatímco většina zrn, ze kterých se vytvořily granule, zrychlila. Toto zrychlení může souviset s expanzí plynu se slabým (nebo žádným) magnetickým polem, sevřeného mezi temnými penumbrálními vlákny, kde je magnetické pole silnější a téměř vodorovné.

Tabulka 2: Penumbrální zrna poblíž hranice P/G.

Penumbrální zrna	Celkový počet	Zrychlují	Zpomalují
Nepřekročila	85 (67 %)		
→ malé objekty	21 (17 %)	6	13
→ granule	20 (16 %)	11	6

Předvedli jsme, že přibližně třetina penumbrálních zrn, která se pohybují směrem ven ke hranici P/G, uniká z penumbry a proniká do okolní granulace. Tento přímý vztah mezi penumbrálními zrny a granulemi ukazuje na složitou interakci subfotosférických konvektivních pohybů s téměř vodorovným magnetickým polem v penumbře a na nestability vedoucí k výměně tepla přes mezní vrstvu, která odděluje skvrnu od jejího okolí (Jahn a Schmidt 1994).

Poděkování

M.S. oceňuje pohostinnost Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) a Observatoire du Pic du Midi. Švédský vakuový sluneční dalekohled je provozován Švédskou akademií věd na observatoři IAC Roque de los Muchachos, La Palma. Tato práce vznikla díky pod-

poře Grantové agentury České republiky (grant 205/01/0658) a klíčového projektu K2043105 Akademie věd České republiky.

LITERATURA

- Gonsalves A.R.: 1982, Opt. Eng. 21, 829.
 Jahn K., Schmidt H.U.: 1994, A&A 290, 295.
 Löfdahl M.G., Scharmer G.B.: 1994, A&A Suppl. 107, 243.
 Muller R.: 1973, Solar Phys. 29, 55.
 Muller R., Mena B.: 1987, Solar Phys. 112, 295.
 November L.J., Simon G.W.: 1988, ApJ 333, 427.
 Scharmer G.B., Brown D.S., Petterson L., Rehn J.: 1985, Appl. Opt. 24, 2558.
 Shine R.A., Title A.M., Tarbell T.D., Topka K.P.: 1987, Science 238, 1203.
 Shine R.A., Title A.M., Tarbell T.D., Smith K., Frank Z.: 1994, ApJ 430, 413.
 Sobotka M., Brandt P.N., Simon G.W.: 1997, A&A 328, 682.
 Sobotka M., Brandt P.N., Simon G.W.: 1999a, A&A 348, 621.
 Sobotka M., Vázquez M., Bonet J.A., Hanslmeier A., Hirzberger J.: 1999b, ApJ 511, 436.
 Sobotka M., Sütterlin P.: 2001, A&A 380, 714.
 Wang H., Zirin H.: 1992, Solar Phys. 140, 41.
 Zirin H., Wang H.: 1989, Solar Phys. 119, 245.