

Novinky ve výzkumu slunečních skvrn

M. Sobotka, Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, ČR, msobotka@asu.cas.cz

Abstrakt

V posledních letech se díky novým přístrojům (např. Švédskému slunečnímu dalekohledu na La Palmě nebo Slunečnímu optickému teleskopu na družici Hinode) začal intenzivně rozvíjet výzkum slunečních skvrn v optickém oboru s vysokým prostorovým rozlišením, dosahujícím až 100 km na povrchu Slunce. Fotometrie a spektropolarimetrie umbry a umbrálních bodů vytvořily předpoklady pro úspěšné modelování magnetokonvekce v umbře. Díky vysokému rozlišení se zpřesnily naše znalosti jak o morfologii tak o dynamice jemné struktury umbry. Byl pozorován proces vzniku světelných mostů a nalezena uzavřená struktura magnetického pole nad nimi. V penumbře byla objevena tmavá jádra v jasných penumbrálních filamentech a spektropolarimetrická měření dovolila rozlišit fyzikální podmínky v jasných a tmavých strukturách penumbry. Zdá se, že na základě těchto pozorování bude možné rozhodnout, která z teorií (stoupající silotrubice nebo nemagnetické mezery) lépe vystihuje skutečnost. Z výsledků studia proudění kolem skvrn a pór lze usuzovat na mechanismy jejich stability a rozpadu.

1. ÚVOD

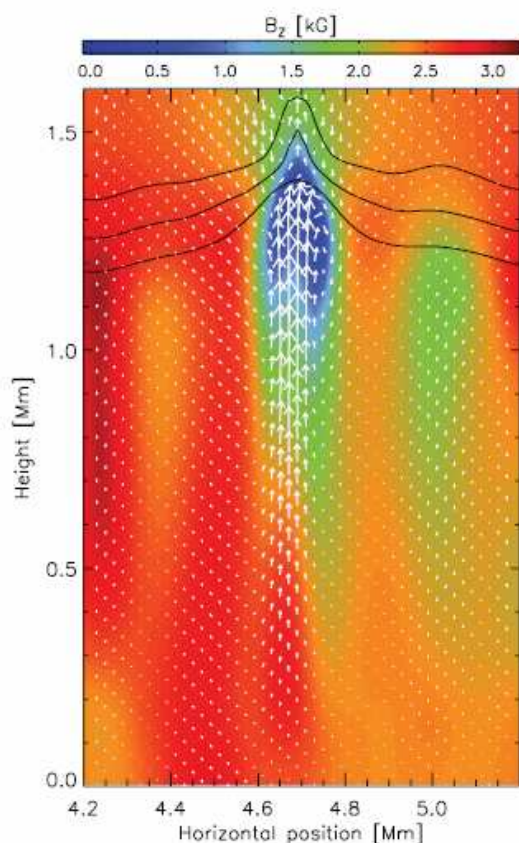
V tomto příspěvku se pokusíme o aktualizaci přehledu o slunečních skvrnách otištěném ve sborníku z 15. Celoštatního slunečního seminára (Sobotka 2000). Za oněch osm let došlo k významnému rozvoji našich znalostí o skvrnách díky novým přístrojům, dávajícím výborný obraz s velmi vysokým úhlovým rozlišením – např. metrový Švédský sluneční dalekohled na La Palmě (SST), poskytující od roku 2002 rozlišení téměř 0,1" nebo půlmetrový Sluneční optický dalekohled (SOT) na japonské družici Hinode, vypuštěné v roce 2006, který není zatížen degradací obrazu v atmosféře Země. Rozvinuly se metody spektropolarimetrické analýzy a rovněž teoretické modely spolu s výpočetní technikou dospěly do stavu umožňujícího realistické simulace konvekce v silném magnetickém poli.

Sluneční skvrny mají na úrovni fotosféry velmi bohatou a dynamickou strukturu. Vnitřní část skvrny, umbra, bývá často rozdělena *světelnými mosty* na několik *umbrálních jader*, jejichž nejtemnější části s nejsilnějším magnetickým polem se nazývají *temná jádérka*. V umbře pozorujeme velmi malé (100 – 200 km) světlé *umbrální body*. Vnější část skvrny, penumbra, má výraznou strukturu tvořenou jasnými a temnými *vláknky*. Podél jasných vláken se pohybují světlá *penumbrální zrna*. Malé skvrny, u nichž se nevyvinula penumbra, se nazývají *póry*. Kolem většiny skvrn s penumbrou se pozoruje prstencovitá oblast, *moat* (příkop) v níž se plazma, magnetické elementy, fakulární body a granule pohybují směrem od skvrny (podrobnosti viz např. Sobotka a Roudier 2006). V práci se věnujeme novým poznatkům o struktuře skvrn, které byly získány v období po roce 2000.

2. UMBRA A UMBRÁLNÍ BODY

Skvrny vznikají potlačením konvektivního přenosu tepla silným magnetickým polem v horní části konvektivní zóny. Pozorovaná teplota umbry a existence jasných struktur však nasvědčují tomu, že proudění v umbře nemůže být potlačeno beze zbytku. Existují dvě základní koncepce magnetické struktury umbry: *monolitická silotrubice*, ve které probíhá magnetokonvekce (např. Thomas a Weiss 2004), a *svazek tenkých silotrubic* oddělených nemagnetickým plazmatem, které může pronikat až k viditelnému povrchu Slunce (Parker 1979). V prvním případě vznikají jasné struktury jako magnetokonvektivní útvary, které ve svém středu obsahují vzestupné proudění plazmatu a v jejich okolí se nacházejí sestupné proudy. Ve druhém případě jsou jasné struktury projevem horkých sloupců nemagnetického plazmatu, které pronikají k povrchu mezi silotrubicemi svazku a obsahují pouze vzestupné proudění. Ve svém výsledku se obě koncepce projevují velmi podobně, takže na základě pozorování je velmi obtížné rozhodnout, která lépe odpovídá realitě.

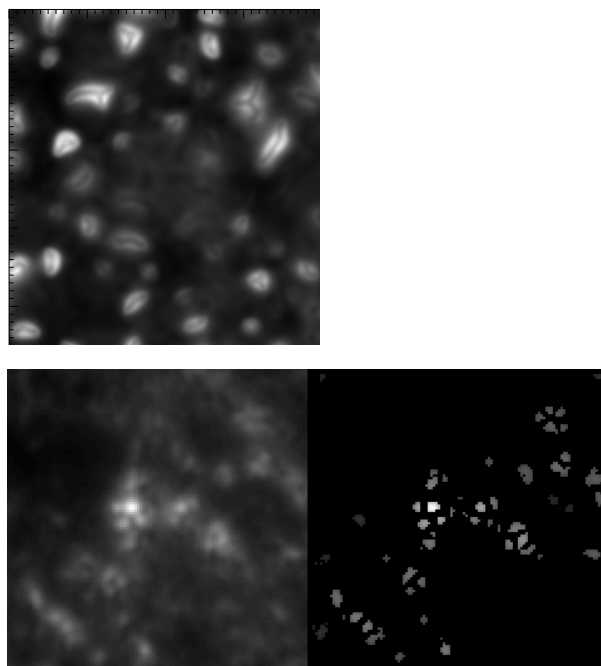
Schüssler a Vögler (2006) numericky simulovali magnetokonvekci v umbře, jejímž výsledkem jsou stoupající „bubliny“ horkého plazmatu se sníženou intenzitou magnetického pole (obr. 1). Tyto bubliny mají horizontální průměr 200 – 300 km, životní dobu kolem 30 minut a jsou až 2,4x jasnější než okolí, což celkem dobře odpovídá pozorováním umbrálních bodů. Na jejich okrajích se vyskytují úzké sestupné proudy. Ve většině simulovaných umbrálních bodů jsou vidět *tmavé pruhy*, které jsou způsobeny zvýšenou hustotou a opacitou na vrcholu bublin (obr. 2).



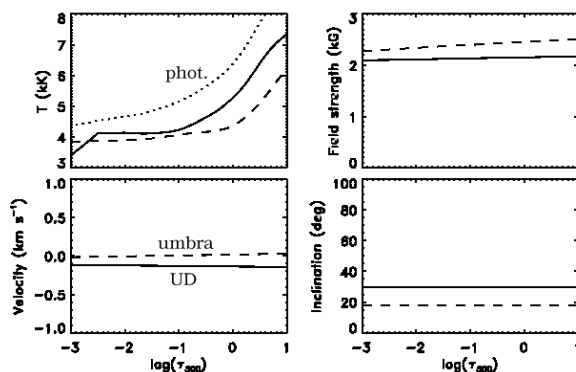
Obr. 1. Vertikální řez simulovaným umbrálním bodem. Barevná škála odpovídá intenzitě magnetického pole a šipky rychlosti proudění (max. 2,7 km/s). Převzato z publikace Schüssler a Vögler (2006).

K porovnání teoretických představ se skutečností jsou nutná spektropolarimetrická pozorování s velmi vysokým úhlovým rozlišením, jejichž zpracováním (inverzí) získáme informace o teplotě, vertikální rychlosti a vektoru magnetického pole. Příklad výsledku takového pozorování je na obr. 3 (Socas Navarro a kol. 2004). Vidíme, že umbrální body mají teplotu vyšší než okolní umbra pouze v dolní části fotosféry (do výšky 100 km nad $\tau = 1$) a plazma v nich proudí vzhůru rychlostí 100 až 200 m/s. Magnetické pole je nižší asi o 10 % než v okolí, přičemž tento rozdíl klesá s rostoucí výškou, a je více nakloněné. To vše naznačuje, že umbrální body jsou hluboko ve fotosféře a magnetické pole se nad nimi uzavírá, což je v souladu jak s koncepcí monolitické silotrubice, tak i svazku tenkých silotrubic.

Jednou z mála možností, jak rozhodnout mezi oběma koncepcemi, je detekce sestupných proudů na hranicích umbrálních bodů. Bharti a kol. (2007a) studovali dopplergramy velkých (300 km) umbrálních bodů, pořízené na Dunnově slunečním dalekohledu (DST), Sacramento Peak. Nalezli vzestupné proudění asi 400 m/s obklopené sestupnými proudy 300 m/s. Jejich pozorování tak potvrzuje přítomnost magnetokonvekce v umbře.



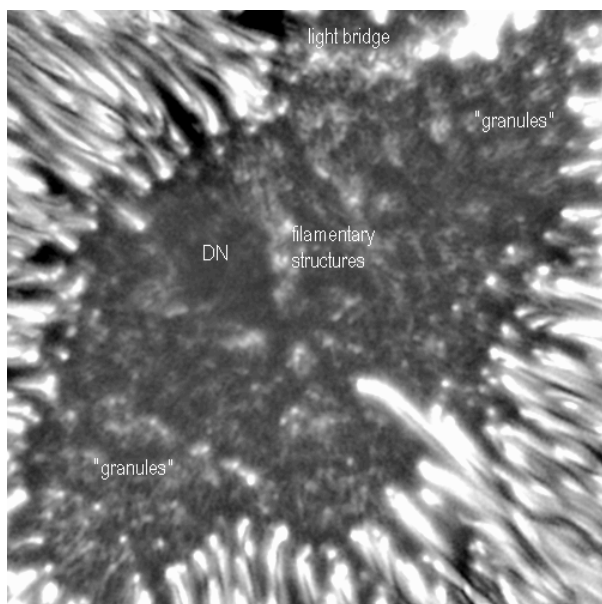
Obr. 2. Nahoře: simulované umbrální body s tmavými pruhy (Schüssler a Vögler 2006). Dole: umbrální body pozorované 18. 6. 2004 na SST (Sobotka a Puschmann, připravováno). Vlevo původní snímek, vpravo segmentovaný obraz s izolovanými jasnými strukturami. Velikost pole je 4,8" x 4,8".



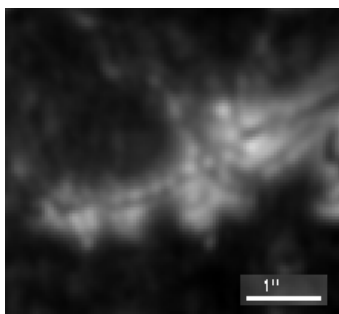
Obr. 3. Průběh teploty, vertikální rychlosti, intenzity a sklonu magnetického pole s optickou hloubkou v umbrálním bodu podle Socas Navarro a kol. (2004). Plná čára – umbrální bod, čárkovaná – okolní umbra.

Bharti a kol. (2007b) našli v širokopásmových snímcích (*G-band*), pořízených družicí Hinode, tmavé pruhy ve velkých (přes 1000 km) „umbrálních bodech“. Je sporné, zda tak velké světlé struktury by neměly být spíše považovány za části světelných mostů. Nicméně tmavé pruhy byly též pozorovány autorem článku v umbrálních bodech o velikosti 300 km (obr. 2) v rekonstruovaných snímcích pořízených v roce 2004 na SST.

Ukazuje se, že metrový dalekohled (např. SST) dokáže prostorově rozlišit většinu umbrálních bodů (Sobotka a Hanslmeier 2005). Jejich typická velikost je



Obr. 4. Struktura velké umbry se shluky umbrálních bodů podobnými malým granulím a s filamentárními strukturami. Snímek pořízený na SST v roce 2004 byl zvýrazněn odečtením interpolovaného pozadí. Velikost zorného pole je $20'' \times 20''$ (Sobotka a Puschmann 2007).

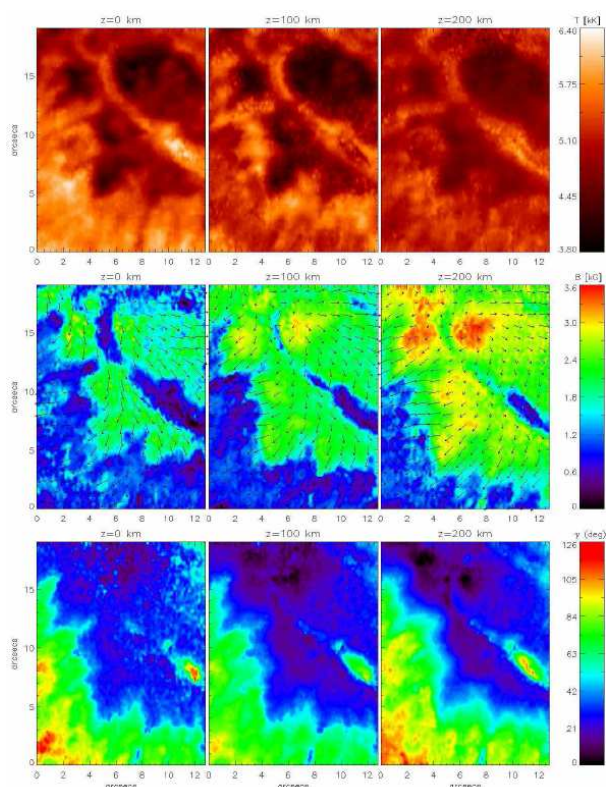


Obr. 5. Centrální tmavý kanál ve světelném mostu (SST, 2004)

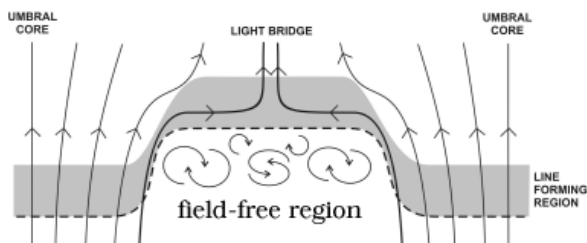
120 km. Při takovém rozlišení má umbra velmi složitou strukturu (obr. 4). Sobotka a Puschmann (2007) pozorovali ve velké umbře stabilní shluky umbrálních bodů, připomínající malé granule, a filamentární struktury s centrálními tmavými kanály, pravděpodobně zárodky světelných mostů. Umbrální pozadí není jednolitě, ale má velmi slabou zrnitou nebo vláknitou strukturu, přes kterou se pohybují umbrální body. Tato pozorování jsou motivací pro další teoretické úvahy.

3. SVĚTELNÉ MOSTY

Světelné mosty mají zrnitou či vláknitou strukturu. Oddělují umbrální jádra nebo mohou být zcela vnořeny do umbry. Podél mostů se pozorují horizontální pohyby jasných zrn (Berger a Berdyugina 2003). Mnoho světelných mostů má *centrální tmavý kanál* (obr. 5). Tento kanál je v případě širokých mostů analogií mezigranulárního prostoru, ve kterém tečou sestupné



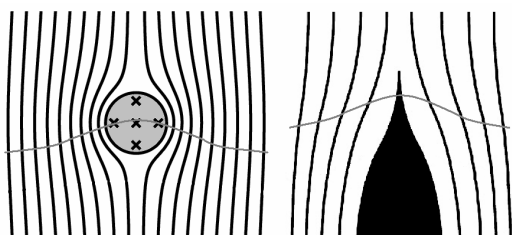
Obr. 6. Mapy teploty (nahore), intenzity magnetického pole (uprostřed) a jeho sklonu (dole) v umbře a světelném mostu, vypočtené ze spektropolarimetrických měření pro hloubky 0 (vlevo), 100 (uprostřed) a 200 km ve fotosféře (vpravo). Převzato z práce Jurčák a kol. (2006).



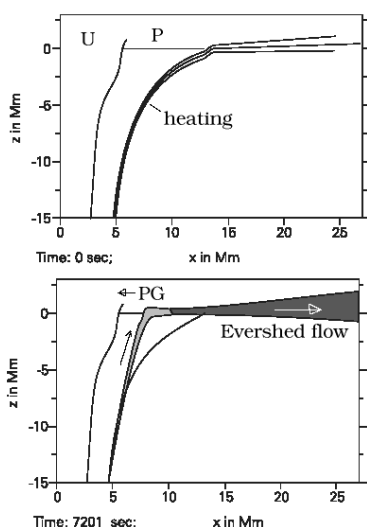
Obr. 7 Schematický řez světelným mostem a magnetickou klenbou nad ním (Jurčák a kol. 2006).

konvektivní proudy (Berger a Berdyugina 2003). U úzkých mostů je, podobně jako tmavé pruhy v umbrálních bodech, způsoben zvýšenou hustotou a opacitou plazmatu v ose mostu (Berrilli a kol. 2007). Přítomnost tmavých kanálů ukazuje na konvektivní původ světelných mostů.

Jurčák a kol. (2006) vypočetli mapy teploty, intenzity magnetického pole a jeho sklonu ke kolmici ve světelném mostu a okolní umbře ze spektropolarimetrických měření získaných na La Palmě (obr. 6). Na mapách intenzity magnetického pole vidíme, že šířka světelného mostu (kde je pole silně redukováno) klesá s výškou. Zároveň je magnetické pole více nakloněné než v okolí. Z toho plyne, že magnetické pole se uzavírá nad horkou nemagnetickou oblastí (obr. 7) a



Obr. 8. Příčný řez modely magnetické struktury penumbry: stoupající silotrubice (vlevo) a nemagnetická mezer (vpravo). Šedá čára naznačuje viditelný povrch Slunce. Převzato z práce Jurčák a Bellot Rubio (2008).



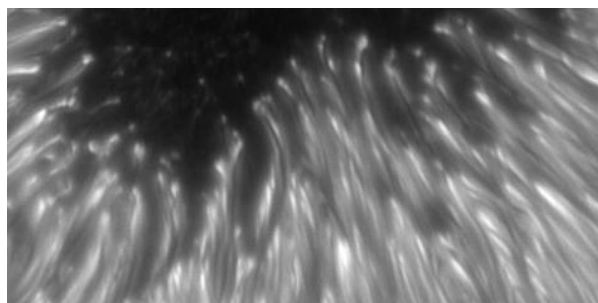
Obr. 9. Dvě vývojová stadia stoupající silotrubice. Ohřev (nahore) a vznik penumbrálního zrna (PG) a Evershedova toku (dole). U – umbra, P – penumbra. Převzato z práce Schlichenmaier a kol. (1998).

vytváří tzv. magnetickou klenbu. Nemagnetická oblast je zahřívána konvekcí podobně jako v klidné fotosféře. Konvektivní ohřev světelných mostů potvrzuje fakt, že v nich pozorujeme výrazné vertikální rychlosti nahoru i dolů.

Světelné mosty jsou tedy hluboké útvary, ve kterých konvekce „zvítězila“ nad magnetickým polem skvrny. Tento proces probíhá postupně a bývá předzvěstí rozpadu skvrny. Katsukawa a kol. (2007) po několik dnů pozorovali pomocí Hinode/SOT vznik světelného mostu v důsledku postupné migrace umbrálních bodů po přibližně stejné dráze od vnitřní hranice penumbry hluboko do umbry. Po šesti dnech dosáhl most opačného okraje umbry a pak se jeho okrajové části přilehly k penumbrě během jednoho dne rozpadly.

4. PENUMBRA

Struktura penumbry je z fyzikálního hlediska velmi složitá. Četná spektroskopická pozorování (viz rozsáhlý přehled Solanki 2003) ukazují na to, že místa se zvýšenou rychlostí proudění plazmatu směrem ze



Obr. 10. Tmavá jádra v jasných vlákních penumbry (SST, 18. 6. 2004).

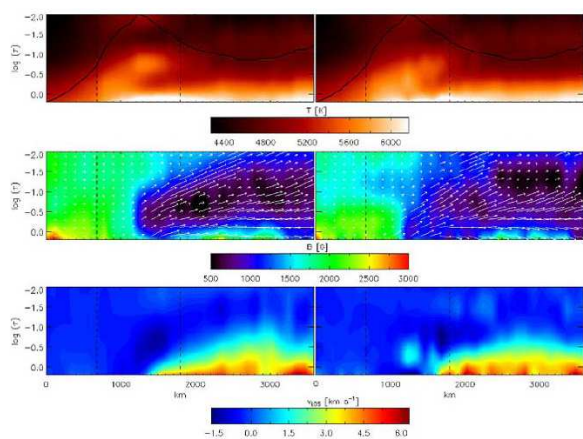
skvrny (tzv. Evershedův tok) mají slabší a více nakloněné magnetické pole než okolní penumbra. Magnetickou a rychlostní strukturu penumbry však dosud nebylo možné jednoznačně přiřadit k její jasové struktuře, tedy k penumbrálním vláknům.

V diskusi o původu penumbrálních vláken byly navrženy dva modely (obr. 8): model stoupajících silotrubic (Schlichenmaier a kol. 1998) a model nemagnetických mezer (Spruit a Scharmer 2006). Model stoupajících silotrubic předpokládá hlubokou penumbru zasahující do konvektivní zóny, kde v důsledku plazmových nestabilit dochází k ohřevu plazmatu v tenkých silotrubicích. Ohřáté plazma proudí v silotrubici nahoru a ven z penumbry (Evershedův tok), přičemž v důsledku vztlakové síly se silotrubice napřimuje a její průsečík s viditelným povrchem Slunce, pozorovaný jako světlé penumbrální zrno, se pohybuje směrem do skvrny (obr. 9). V části silotrubice blíže k umbrě je teplota vyšší než v okolí, avšak proudící plazma postupně chladne a vzdálenější část silotrubice se jasně již neliší od okolí. Nevýhodou tohoto modelu je, že nedokáže vysvětlit poměrně vysoký pozorovaný jas penumbry.

Model nemagnetických mezer předpokládá mělkou penumbru, ve které jsou jasná vlákna tvořena protáhlými oblastmi horkého nemagnetického plazmatu, které proniká zespodu z konvektivní zóny. Jasná vlákna jsou v tomto modelu zahřívána po celé délce a ne pouze na svém začátku, jako je tomu v případě stoupajících silotrubic. To lépe vysvětluje pozorovaný jas penumbry, ale vůbec neobjasňuje původ Evershedova toku a penumbrálních zrn.

Zajímavým objevem, uskutečněným při uvedení SST do provozu, jsou tenká protáhlá tmavá jádra (obr. 10), táhnoucí se podél osy mnoha jasných penumbrálních vláken (Scharmer a kol. 2002). Původ těchto útvarů se v modelu nemagnetických mezer vysvětluje zvýšenou hustotou a opacitou na vrcholku horké nemagnetické oblasti pronikající z konvektivní zóny, podobně jako v případě tmavých pruhů v umbrálních bodech.

Spektropolarimetrická pozorování na Hinode/SOT s úhlovým rozlišením 0,3" umožnila přímé určení vektoru magnetického pole a rychlosti plazmatu ve vnitřní penumbrě (Jurčák a kol. 2007). Ve spodních vrstvách fotosféry jasných vláken je zeslabené, téměř



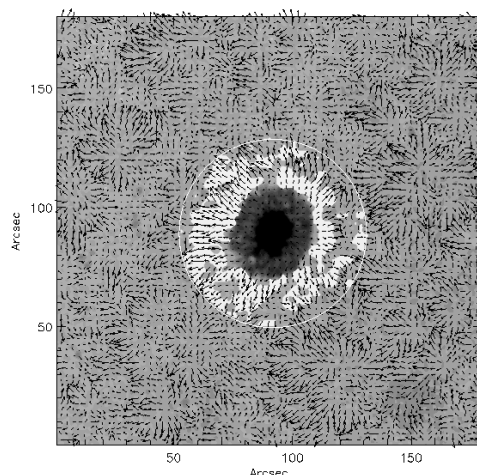
Obr. 11. Vertikální řezy fotosférou penumbrálního zrna (poloha vyznačena svislými tečkovanými čarami) v rozsahu optických hloubek $0,01 < \tau < 1,5$. Nahoře teplota, uprostřed intenzita magnetického pole spolu s rychlostmi proudění podél siločar (bílé šipky), dole rychlost podél zorného paprsku. Levé a pravé řezy se liší v použitých parametrech inverzního programu (Jurčák a Sobotka 2007).

horizontální magnetické pole a plazma zde proudí rychlostí až 4 km/s. Ve vnější penumbře je situace jiná: v jasných vlákních je magnetické pole méně nakloněno a proudění je slabší než v okolí (Jurčák a Bellot Rubio 2008). Proudění (Evershedův tok) je soustředěno do temných vláken s téměř horizontálním magnetickým polem. Tato pozorování podporují model stoupajících silotrubic, protože odpovídají útvarům obsahujícím proudící plazma, které jsou jasnější než okolí jen na svém počátku (ve vnitřní penumbře) a ve větší vzdálenosti od umby jsou temné. Struktury nalezené ve výškovém rozvrstvení teploty a intenzity magnetického pole v penumbrálním zrnu (Jurčák a Sobotka 2007, obr. 11) rovněž naznačují přítomnost stoupajících silotrubic.

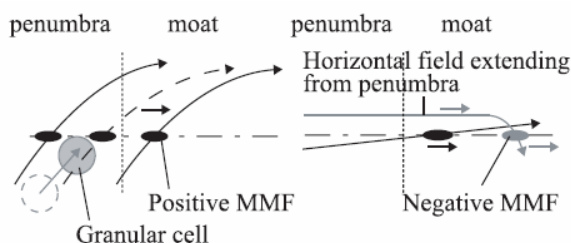
5. PROUDĚNÍ KOLEM SKVRN A PÓR

Sluneční skvrny a póry jsou dynamické systémy, doprovázené specifickými pohyby plazmatu v sub-fotosférických vrstvách a ve fotosféře. Oblasti *moat* (obr. 12) s uspořádanými pohyby plazmatu, granulí a magnetických elementů směrem od skvrny s penumbrou pozoroval již Sheeley (1969). U slunečních pór byl nalezen opačný směr horizontálních pohybů: v zóně široké asi 1500 km se granule pohybují směrem k póře a některé do ní pronikají (Sobotka a kol. 1999).

Hurlburt a Rucklidge (2000) a Botha a kol. (2006) se pokusili objasnit tyto pohyby pomocí podrobných numerických simulací konvekce v okolí magnetických silotrubic, představujících skvrny a póry. V důsledku ochlazování plazmatu v okolí chladné silotrubice vzniká sestupné proudění, které vytváří kolem silotrubice konvektivní „límeč“ s konvergentním tokem nahore ve fotosféře a divergentním tokem dole v konvektivní zóně. Tento límeč mechanicky stabilizuje silotrubici. Konvergentní tok je přímo pozorovatelný ve



Obr. 12. Pohyby fotosférických granulí kolem staré stabilní skvrny. Oblast *moat* je vyznačena bíle (Sobotka a Roudier 2006).



Obr. 13. Dva druhy pohyblivých magnetických útvarů (MMF) u vnějšího okraje penumbry: MMF odtržené od penumbry granulí (vlevo), a MMF jako pokračování horizontálního magnetického pole penumbry (vpravo). Převzato z práce Kubo a kol. (2007).

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

Jedním z možných mechanismů rozpadu slunečních skvrn je difuze magnetického pole prostřednictvím pohyblivých magnetických útvarů (*moving magnetic features*, MMF, Harvey a Harvey 1973), které se pohybují radiálně směrem od skvrny. Cabrera Solana a kol. (2006) objevili, že pohyb některých MMF je pokračováním Evershedova toku z penumbry do oblasti *moat*. Vztah mezi MMF a penumbrálním magnetickým polem studovali Kubo a kol. (2007) na základě dat z Hinode/SOT. Nalezli dva druhy MMF (obr. 13). MMF prvního druhu mají magnetické pole se stejnou polaritou jako skvrna, s poměrně malým sklonem pole vzhledem ke kolmici. Tyto MMF jsou odtrženy od skvrny granulí, které se objevují na vnějším okraji penumbry. To naznačuje, že granulózní pohyby zasahující do vnější penumbry mohou mít vliv na rozpad sluneční skvrny. MMF druhého druhu souvisejí s pokračováním horizontálního magnetického pole penumbry do oblasti *moat* a mohou mít stejnou nebo opačnou polaritu než skvrna (obr. 13).

4. SHRNUTÍ

Tento přehled o novinkách ve výzkumu slunečních skvrn není samozřejmě úplný a je značně ovlivněn zaměřením autora. Soustředili jsme se zde na fyziku skvrn na úrovni fotosféry a pod ní, která je rozhodující pro pochopení pozorované struktury skvrn, jejich vzniku a vývoje. Nové poznatky, které jsme zde zmínili, lze stručně shrnout do následujících bodů:

1. Současná pozorování umbry a umbrálních bodů s vysokým prostorovým rozlišením a realistické numerické simulace jasně potvrzují přítomnost magnetokonvekce v umbře.

2. Nově objevené tmavé pruhy v umbrálních bodech, stejně jako tmavá jádra penumbrálních vláken a tmavé centrální kanály ve světelných mostech jsou důsledkem lokálně zvýšené hustoty a opacity na vrcholech oblastí stoupajícího horkého plazmatu. V širokých světelných mostech s vyvinutou konvekcí jsou centrální tmavé kanály místem klesajícího chladného plynu.

3. Světelné mosty jsou hluboké konvektivní útvary, nad nimiž se uzavírá magnetické pole umbry v podobě magnetické klenby.

4. Byly navrženy dva alternativní modely původu penumbrálních vláken – model stoupajících silotrubic a model nemagnetických mezer. Současná pozorování podporují spíše model stoupajících silotrubic.

5. Kolem skvrn a pór existuje konvektivní proudění, které přispívá k jejich stabilitě. Pohyblivé magnetické útvary (MMF) naproti tomu odvádějí magnetický tok ze skvrn, což nakonec může vést k jejich rozpadu.

Poděkování

Práce vznikla za podpory Grantové agentury AV ČR (grant IAA 30030808) a výzkumného záměru AV ČR AVOZ 10030501.

LITERATURA

- Berger, T. E., Berdyugina, S. V.: 2003, *Astrophys. J.* 589, L117.
Berrilli, F., Giordano, S., Del Moro, D., Penza, V.: 2007, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2007*, abstract SH22A-0844.
Bharti, L., Jain, R., Jaaffrey, S.N.A.: 2007a, *Astrophys. J.*, 665, L79.
Bharti, L., Joshi, C., Jaaffrey, S.N.A.: 2007b, *Astrophys. J.*, 669, L57.
Botha, G. J. J., Rucklidge, A. M., Hurlburt, N. R.: 2006, *MNRAS*, 369, 1611.
Cabrera Solana, D., Bellot Rubio, L. R., Beck, C., del Toro Iniesta, J. C.: 2006, *Astrophys. J.*, 649, L41.
Harvey, K., Harvey, J.: 1973, *Solar Phys.*, 28, 61.
Hurlburt, N.E., Rucklidge, A.M.: 2000, *MNRAS*, 314, 793.
Jurčák, J., Bellot Rubio, L. R., Ichimoto, K., *et al.*: 2007, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, S601.
Jurčák, J., Bellot Rubio, L. R.: 2008, *Astron. Astrophys.*, 481, L17.
Jurčák, J., Martínez Pillet, V., Sobotka, M.: 2006, *Astron. Astrophys.*, 453, 1079.
Jurčák, J., Sobotka, M.: 2007, *Solar Phys.*, 241, 223.
Katsukawa, Y., Yokoyama, T., Berger, T. E., *et al.*: 2007, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, S577.
Kubo, M., Ichimoto, K., Shimizu, T., *et al.*: 2007, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, S607.
Parker, E. N.: 1979, *Astrophys. J.*, 234, 333.
Scharmer, G. B., Gudiksen, B. V., Kiselman, D., *et al.*: 2002, *Nature*, 420, 151.
Schlichenmaier, R., Jahn, K., Schmidt, H. U.: 1998, *Astron. Astrophys.*, 337, 897.
Schüssler, M., Vögler, A.: 2006, *Astrophys. J.*, 641, L73.
Sheeley, N.R.: 1969, *Solar Phys.*, 9, 347.
Sobotka, M.: 2000, *Zborník referátov z 15. celoštátneho slnečného seminára*, Patince, ed. B Lukáč, SÚH Hurbanovo, p. 25.
Sobotka, M., Vázquez, M., Bonet, J. A., *et al.*: 1999, *Astrophys. J.*, 511, 436.
Sobotka, M., Hanslmeier, A.: 2005, *Astron. Astrophys.*, 442, 323.
Sobotka, M., Puschmann, K. G.: 2007, in *Modern Solar Facilities – Advanced Solar Science*, F. Kneer, K. G. Puschmann, A. D. Wittmann (eds.), Universitätsverlag Göttingen, p. 205.
Sobotka, M., Roudier, Th.: 2006, *Zborník referátov z 18. celoštátneho slnečného seminára*, Modra, ed. I. Dorotovič, SÚH Hurbanovo, 03.
Socas Navarro, H., Martínez Pillet, V., Sobotka, M., Vázquez, M.: 2004, *Astrophys. J.*, 614, 448.
Spruit, H. C., Scharmer, G. B.: 2006, *Astron. Astrophys.*, 447, 343.
Solanki, S. K.: 2003, *Astron. Astrophys. Rev.*, 11, 153.
Thomas, J. H., Weiss, N. O.: 2004, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 42, 517.