

# Sluneční skvrny

M. Sobotka, *Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, [msobotka@asu.cas.cz](mailto:msobotka@asu.cas.cz)*

## Abstrakt

V tomto století vzrostly naše znalosti o slunečních skvrnách nebývalou měrou: Haleův objev magnetického pole skvrn v roce 1908, úvahy o mechanismu ochlazování skvrn ve třicátých a čtyřicátých letech, rozvoj teoretických modelů od konce padesátých let, první stratosférické snímky jemné struktury v letech šedesátých a konečně pozemní pozorování s velmi vysokým prostorovým rozlišením. Tento přehled je věnován struktuře a dynamice slunečních skvrn na úrovni fotosféry. Shrnuje základní informace o umbře, penumbře, světelných mostech a o prvcích jemné struktury, tak jak jsou získávány ze spekter a z časových sérií obrazů s vysokým rozlišením a jak jsou fyzikálně interpretovány pomocí teoretických modelů.

## 1. ÚVOD

Lidé pozorují skvrny na Slunci už velmi dlouho. Ve starých čínských kronikách lze najít záznamy o příležitostných pozorováních okem viditelných velkých skvrn a jejich skupin během asi 1800 let. První pozorování skvrn dalekohledem uskutečnil pravděpodobně T. Harriot v roce 1610 a již v následujícím roce se objevila první publikace o skvrnách, napsaná J. Fabriciem. V témž roce (1611) Galileo na základě vlastních pozorování došel k závěru, že skvrny jsou součástí povrchu Slunce a že postupují od východního k západnímu okraji slunečního disku. Tak byla objevena rotace Slunce. V roce 1769 zjistil A. Wilson, že penumbry skvrn se jeví užší na straně bližší k okraji disku než na straně mířící ke středu disku. Usoudil z toho, že viditelný povrch umbry je níže než okolní fotosféra. Tento výškový rozdíl se nyní nazývá Wilsonova deprese. Sporadická a později pravidelná pozorování slunečních skvrn umožnila objevit v 19. století statistické zákonitosti jejich výskytu a cyklus sluneční aktivity.

## 2. MAGNETICKÉ POLE

Poznatky o fyzice slunečních skvrn se objevily teprve s rozvojem spektroskopie a astrofyziky na počátku 20. století. Nejprve, v roce 1906, G. E. Hale odvodil z intenzit spektrálních čar, že teplota skvrn je nižší než v okolní fotosféře. O dva roky později pak pomocí měření Zeemanova rozštěpu magneticky citlivých čar objevil přítomnost silného magnetického pole (Hale, 1908).

Podle současných měření (např. Martínez Pillet, 1997) má magnetické pole největší hodnotu ve středu umbry (až 3000 G) a monotónně ubývá směrem k okraji

skvrny. Sklon siločar pole vzhledem ke kolmici k povrchu je ve středu umbry nulový a roste směrem ven: na rozhraní umbry a penumbry je asi  $40^\circ$  a na vnějším okraji penumbry kolem  $70^\circ$ .

Proč jsou skvrny chladnější než jejich okolí? Odpověď na tuto otázku byla a je hledána právě ve spojitosti s magnetickým polem a jeho interakcí s pohybujícím se elektricky vodivým plazmatem, z něhož je Slunce vytvořeno. Cowling (1934) přišel s myšlenkou, že sluneční skvrny jsou tvořeny mohutnými silotubicemi procházejícími horní částí konvektivní zóny a fotosférou. Na základě tohoto předpokladu Biermann (1941) usoudil, že ochlazování skvrny může být vysvětleno jako důsledek potlačení konvektivního přenosu energie v silném magnetickém poli. Hoyle (1949) uvedl, že magnetické pole potlačuje konvektivní pohyby napříč siločar avšak nikoli podél nich. Protože magnetické siločáry se vějířovitě rozšiřují blízko slunečního povrchu, tepelný tok musí být rozprostřen na větší plochu a tudíž je skvrna ve fotosféře chladnější. Všechny tyto myšlenky byly využity v současných fyzikálních modelech slunečních skvrn.

## 3. FYZIKÁLNÍ MODELY

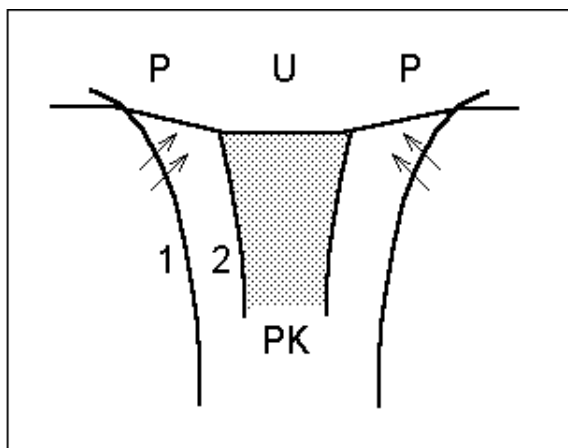
Ideální model sluneční skvrny by měl být dynamický. Měl by vysvětlovat procesy vzniku a rozpadu skvrn i časové a prostorové fluktuace intenzit a rychlostí v umbře a penumbře. Takový model však dosud nebyl sestrojen. Nejobvyklejším přiblížením jsou v současnosti magnetostatické modely, které, navzdory svým omezením, dávají dostatečnou představu o globální struktuře skvrny. Uveďme nyní nejdůležitější z nich.

1. *Podobnostní modely.* Jejich základním předpokladem je podobnost horizontálního rozdělení intenzity magnetického pole v každé výškové hladině. Výsledná konfigurace magnetického pole je pak natolik jednoduchá, že umožňuje analytické řešení modelu (např. Schlüter a Temesváry, 1958).

2. *Kanálové modely.* Jsou založeny na Hoylově myšlence přenosu energie podél magnetických siločar, v kanálech, které divergují s rostoucí výškou. Zahrnují rovněž Biermannův předpoklad potlačení konvektivního ohřevu (Chitre a Shaviv, 1967).

3. *Dvourozměrná magnetostatická rovnováha.* Známeli ze spektroskopických pozorování výškové rozdělení tlaku plynu v atmosféře skvrny, lze řešením rovnic magnetostatické rovnováhy dopočítat konfiguraci magnetického pole. Pizzo (1986) tímto způsobem zkonstruoval modely skvrn různých velikostí.

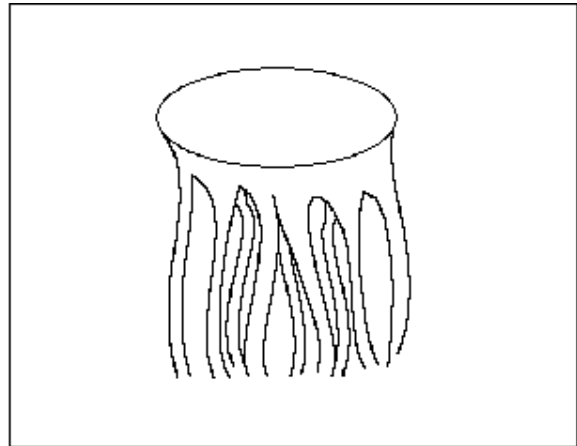
4. *Modely s proudovou vrstvou.* Horizontální mechanická rovnováha skvrny je udržována magnetickými silami, které jsou soustředěny v proudové vrstvě, tenké symetrické oblasti, kde tečou silné elektrické proudy. Nejpokročilejším modelem tohoto typu je model se dvěma proudovými vrstvami (obr. 1), které leží mezi umbrou a penumbrou a mezi penumbrou a okolní konvektivní zónou (Jahn a Schmidt, 1994). Vnitřní proudová vrstva tepelně izoluje umbru, zatímco vnější proudová vrstva dovoluje částečný ohřev penumbry.



**Obr. 1.** Model skvrny se dvěma proudovými vrstvami. Vnější proudová vrstva (1) odděluje penumbrou (P) od okolní konvektivní zóny a umožňuje částečný stranový ohřev penumbry (šipky). Vnitřní proudová vrstva (2) tepelně izoluje umbru (U), která je chladnější díky potlačenému konvektivnímu přenosu energie (PK).

5. *Svazkový (cluster) model.* Na rozdíl od předcházejících modelů, které uvažovaly jedinou velkou magnetickou silotrubici, svazkový model (Parker, 1979) popisuje skvrnu jako dynamický svazek tenkých silotrubic (obr. 2). Mezi nimi jsou oblasti bez

magnetického pole, kde probíhá konvektivní přenos energie. Tento model nabízí přímé vysvětlení jasových nehomogenit v umbrě (např. jasných umbrálních bodů).



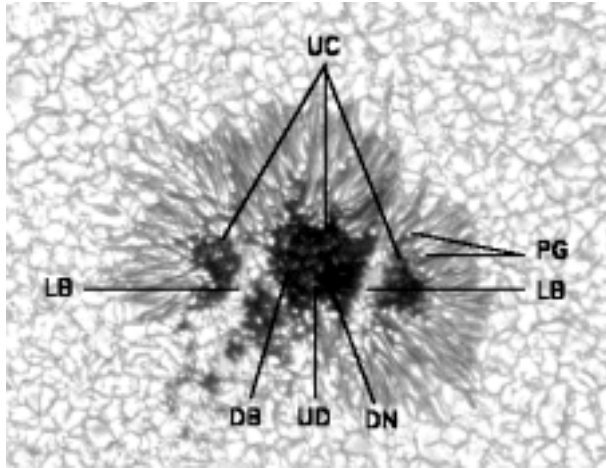
**Obr. 2.** Svazkový model sluneční skvrny, tvořený tenkými magnetickými silotrubicemi, které se slévají na úrovni fotosféry.

Vedle těchto teoretických modelů je třeba zmínit ještě *modely semiempirické*, které potřebují jen málo fyzikálních předpokladů a dovolují přímo určit podmínky ve skvrnách na základě spektroskopických pozorování. Řešením rovnic přenosu záření ve spektrálních čarách lze pomocí tzv. inverzních metod zjistit výškové rozvrstvení teploty, tlaku, hustoty, rychlosti a vektoru intenzity magnetického pole v konkrétní pozorované skvrně (např. Collados a kol., 1994). Nevýhodou těchto modelů je, že poskytují informace pouze z těch vrstev, ze kterých k nám přichází pozorované záření. Nemohou tedy popisovat subfotosférické vrstvy, které jsou klíčové pro pochopení mechanismu vzniku a stability slunečních skvrn.

#### 4. JEMNÁ STRUKTURA

Pozorování slunečních skvrn s vysokým prostorovým rozlišením mají dlouhou historii. Již v 19. století P. A. Secchi vizuálně pozoroval a zobrazil ve své knize "Le Soleil" (1870) většinu objektů jemné struktury. Fotografická pozorování s rozlišením 0.7"- 1" publikoval Chevalier (1916). Dalším mezníkem se staly snímky ze stratosférického balónu "Stratoscope" s rozlišením kolem 0.3", na kterých byly patrné velmi malé jasné útvary v umbrě, "umbral dots" (Danielson, 1964). Po roce 1980 došlo k rychlému rozvoji pozorování s vysokým rozlišením i z pozemních observatoří, hlavně na Pic du Midi, Sacramento Peak a na Kanárských ostrovech. V současné době mají nejlepší pozemní pozorování rozlišení až 0.25" a na připravovaných velkých slunečních dalekohledech s průměrem větším než 1 m, využívajících adaptivní optiku pro kompenzaci chvění ovzduší, se bude rozlišení blížit k 0.1".

Udělejme si nyní přehled nejdůležitějších objektů jemné struktury slunečních skvrn. Jako příklad můžeme použít skvrnu na obr. 3.



**Obr. 3. Základní prvky jemné struktury ve sluneční skvrně:** UC - umbrální jádro (umbral core); PG - penumbrální zrno (penumbral grain); LB - světelný most (light bridge); DB - difúzní pozadí (diffuse background); UD - umbrální bod (umbral dot); DN - temné jádérko (dark nucleus).

Mnoho skvrn má umbru složenou z více nezávislých částí, *umbrálních jader*. Umbrální jádra si většinou zachovávají svoji identitu během celého vývoje skvrny. Z morfologického hlediska se skládají ze dvou složek. Temná složka vypadá jako souvislé pozadí s temnějšími a světlejšími oblastmi, bez jasně oddělených přechodů. Proto jí říkáme *difúzní pozadí*. Nejtemnější místa se nazývají *temná jádérka*. Jasná složka, vystupující z difúzního pozadí, je tvořena *umbrálními body* nebo jejich seskupeními a slabými světelnými mosty.

*Světelné mosty* mají velmi širokou škálu velikostí, intenzit a tvarů. Některé z nich oddělují umbrální jádra, jiné, užší a méně jasné, leží uvnitř. Jejich vnitřní struktura může být buď zrnitá (granulární) nebo vláknitá.

Penumbra skvrn je tvořena *jasnými a temnými vlákny*. V pravidelných skvrnách jsou vlákna rozložena radiálně. Mladé a nepravidelné skvrny mají často vytvořeny jen části penumbry. Malé skvrny bez penumbry se nazývají *póry*. Jasná penumbrální vlákna jsou ve skutečnosti tvořena řetízky malých protáhlých jasných útvarů, *penumbrálních zrn*.

## 5. UMBRÁLNÍ JÁDRA

Mezi základní parametry umbrálních jader patří velikost (plocha nebo průměr), intenzita (jas) a magnetické pole. Každé umbrální jádro se chová jako samostatný objekt, takže v jedné skvrně mohou být jádra s velmi odlišnými parametry.

Důležitým fotometrickým parametrem je minimální intenzita (intenzita nejtmašího místa)  $I_{min}$ , která je obvykle v rozsahu 5 % - 30 % střední intenzity klidné fotosféry  $I_{ph}$  (na vlnové délce 540 nm) a je v dobré korelaci s průměrnou intenzitou difúzního pozadí (Sobotka, Bonet a Vázquez, 1993). Tato korelace dovoluje charakterizovat jas umbrálního jádra pomocí jediné hodnoty. Měření  $I_{min}$  je však ztíženo přítomností tzv. rozptýleného světla, záření okolní fotosféry, které je rozptylováno při průchodu ovzduším Země. Velikost rozptýleného světla závisí na stavu ovzduší, na přístroji a na velikosti a poloze skvrny. Vezmeme-li v úvahu, že může činit několik procent  $I_{ph}$ , vidíme, že při fotometrii umbry je vždy nutné provádět příslušnou opravu (viz např. Martínez Pillet, 1992).

Jaké jsou vzájemné vztahy mezi intenzitou, velikostí a magnetickým polem umbrálních jader? Malé umbry se zdají být jasnější než velké. V šedesátých a sedmdesátých letech se předpokládalo, že tento efekt je způsoben pouze rozptýleným světlem a že všechny umbry jsou přibližně stejně temné, nezávisle na velikosti. Pozdější pozorování, pečlivě opravená o rozptýlené světlo (např. Sobotka, 1985; Martínez Pillet a Vázquez, 1993), však ukázala, že malé umbry (o průměru do 8") jsou opravdu systematicky jasnější než velké.

Vztah mezi magnetickým polem a intenzitou (nebo teplotou) umbrálních jader byl nejdříve předpovězen teorií: Místa s vyšší intenzitou magnetického pole  $B$  by měla být temnější a chladnější než oblasti se slabším magnetickým polem. Tuto předpověď potvrdili experimentálně Martínez Pillet a Vázquez (1993), kteří na základě spektroskopických měření zjistili, že teplota klesá lineárně s rostoucí  $B^2$ . To platí jak pro umbrální jádra jako celek (temnější jádra mají silnější magnetické pole) tak i lokálně pro různá místa v difúzním pozadí uvnitř jader -- například temná jádérka jsou místa s nejsilnějším magnetickým polem uvnitř umbrálního jádra.

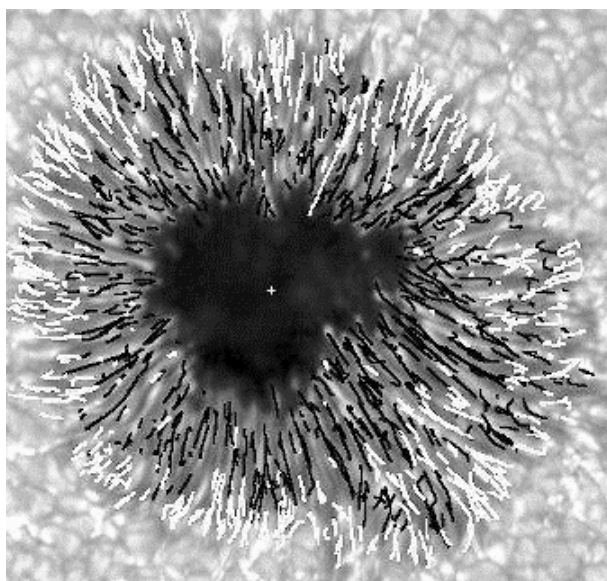
## 6. PENUMBRA

Pro prvky jemné struktury v penumbře je typický protáhlý tvar, důsledek magnetického pole silně skloněného vzhledem k normále k povrchu. Jak bylo již zmíněno, jasná penumbrální vlákna jsou tvořena penumbrálními zrny. Tyto útvary byly podrobně popsány Mullerem (1973) na základě fotografií pořízených na Pic du Midi. Penumbrální zrna mají protáhlý, kometám podobný tvar, s jasnými hlavičkami směřujícími ke středu skvrny. Jejich šířka je přibližně 0.4", délka v rozmezí 0.4" - 4" a intenzita je blízká intenzitě klidné fotosféry. Penumbrální zrna jsou oddělena tenkými tmavými vlákny, která, na rozdíl od jasně ohraničených zrn, vypadají spíše jako temné pozadí obklopující jasná zrna. Průměrná intenzita temných vláken je 0.6  $I_{ph}$ . Je zajímavé, že pojmy

"temný" a "jasný" mají pouze lokální význam, neboť změny jasů na větších prostorových škálách v penumbře jsou větší než místní variace intenzity mezi jasnými penumbrálními zrny a temnými vlákny.

Podívejme se nyní na rozdělení velikosti a sklonu vektoru magnetického pole v penumbře. Již na konci šedesátých let Beckers a Schröter (1969) naznačili, že magnetické pole je více skloněné (vzhledem k normále k povrchu) v temných vláknech než ve světlých. Řešení tohoto problému je velmi obtížné, protože magnetické pole je měřeno pomocí spektrálních čar, které vznikají ve větších výškách než spojité záření, v němž vidíme temné a jasné útvary. Teprve Wiehr (1991) a Hofmann a kol. (1994) na základě pozorování z Kanárských ostrovů ukázali, že magnetické pole je silnější a více skloněné směrem k povrchu v temných vláknech a slabší a méně skloněné v penumbrálních zrnech. Tento poznatek je však stále ještě třeba prověřit novými pozorováními.

Sluneční penumbra je velmi složitým dynamickým systémem. Z časových sérií snímků v bílém světle vidíme, že penumbrální zrna se pohybují. Ve vnitřní penumbře mají typickou rychlost 0.4 km/s směrem ke středu skvrny, ve vnější penumbře převládá pohyb směrem ven ze skvrny rychlostí 0.5 km/s (Sobotka, Brandt a Simon, 1999). Příklad trajektorií pohybů penumbrálních zrn je na obr. 4.



**Obr. 4.** Trajektorie pohybů penumbrálních zrn v pravidelné sluneční skvrně. Černé čáry přísluší pohybům směrem ke středu skvrny, bílé čáry odpovídají pohybům směrem k vnější hranici penumbry.

Temné oblasti ve vnější penumbře, vznikající rozšířením temných vláken, se pohybují velmi rychle (až 3.5 km/s) směrem k vnějšímu okraji penumbry (Shine a kol., 1994). Tento charakter pohybu pokračuje i za hranicí skvrny, kde se granule přiléhající k penumbře pohybují směrem od skvrny rychlostí kolem

1 km/s. Výše zmíněné horizontální pohyby penumbrálních zrn a temných oblastí jsou pouze zdánlivé a nemusejí odpovídat skutečnému proudění plazmatu. Jedná se pravděpodobně o pohyby průsečíků prostorových magnetických struktur s viditelným povrchem Slunce.

Skutečné proudění plazmatu se měří pomocí Dopplerova posuvu spektrálních čar. Již na počátku století objevil Evershed (1909) posuvy a asymetrie spektrálních čar v penumbře, interpretované jako téměř horizontální rychlosti 3 - 4 km/s směrem ven ze skvrny. Evershedův jev je velmi obsáhlé téma. Zde se soustředíme pouze na otázku prostorového rozložení Evershedova pohybu vzhledem k penumbrálním zrnům a temným vláknům. Její řešení je, podobně jako v případě magnetického pole, opět velmi obtížné, vzhledem k rozdílné výšce formování spektrálních čar a spojitého spektra. Ačkoli Beckers a Schröter (1969) již dávno navrhli, že Evershedův pohyb by měl být soustředěn do temných vláken, teprve nedávna pozorování (např. Shine a kol., 1994) potvrdila tuto domněnku. Evershedův pohyb je přítomen v temných vláknech, která jsou téměř horizontální a rovnoběžná se silně skloněnými siločarami magnetického pole.

Shrnutí: Současná pozorovatelská představa o penumbře je založena na dvou složkách. (1) V temných vláknech (penumbrálním pozadí) je magnetické pole silně skloněné vzhledem k normále k povrchu a ve vnější penumbře je téměř vodorovné. V této temné složce jsou pozorovány pohyby směrem ven ze skvrny, ať už ve formě Evershedova jevu nebo horizontálních pohybů. (2) Penumbrální zrna (jasná složka) mají slabší a méně skloněné magnetické pole, jejich příspěvek k Evershedovu efektu je malý a vlastní pohyby směřují ve vnitřní penumbře ke středu skvrny a ve vnější penumbře ven ze skvrny.

## 7. SVĚTELNÉ MOSTY

Světelné mosty jsou jasné a poměrně složité struktury, které procházejí napříč umbrou nebo do ní pronikají na značnou vzdálenost. Jejich životní doba je několik dní, i když jejich tvar se může změnit během několika hodin. Světelné mosty úzce souvisejí s topologií magnetického pole skvrny a hrají důležitou roli ve vývoji skvrn. Jejich fotometrické charakteristiky, morfologie a vnitřní struktura jsou velmi různorodé. Například jas se pohybuje od intenzity slabých umbrálních bodů až po  $I_{ph}$ , šířka od méně než 1" do několika obloukových vteřin, vnitřní struktura může být granulární nebo vláknitá a podobně.

Bylo učiněno mnoho pokusů o morfologickou klasifikaci světelných mostů (např. Bray a Loughhead, 1964; Bumba a Suda, 1983). Zde uvedeme jednoduchou dvouparametrickou klasifikaci (Sobotka, Bonet a Vázquez, 1994): První parametr je spojen s konfigurací celé skvrny a rozlišuje, zda světelný most odděluje umbrální jádra (*silný světelný most*) nebo neodděluje

(slabý světelný most). Druhý parametr souvisí s vnitřní strukturou světelného mostu - buď *granulární* nebo *vláknitý*. Máme tedy celkem čtyři základní typy světelných mostů:

1. Silné granulární mosty: Jsou složeny z granulí podobných fotosférickým a oddělují dvě nebo více umbrálních jader, majících stejnou magnetickou polaritu.

2. Silné vláknité mosty: Rovněž oddělují dvě nebo více umbrálních jader, ale mají vláknitou strukturu. Jsou-li vlákna orientována podélně vůči mostu, jsou magnetické polarity sousedících umbrálních jader stejné. Jsou-li vlákna orientována napříč mostem, jsou magnetické polarity sousedících umbrálních jader opačné.

3. Slabé granulární mosty: Leží uvnitř umbrálního jádra a jsou součástí jeho jasné složky. Jsou složeny z malých jasných zrn podobných umbrálním bodům, které jsou často uspořádány do řetízků.

4. Slabé vláknité mosty: Leží uvnitř umbrálního jádra a jsou součástí jeho jasné složky. Vypadají jako dlouhé úzké výběžky penumbry a jsou složeny z pohybujících se protáhlých jasných zrn podobných penumbrálním zrnům.

Jaké je magnetické pole ve světelných mostech? Podle posledních prací na toto téma (např. Leka, 1997) je magnetické pole v silných světelných mostech nižší o 500 - 1200 G než v okolních umbrálních jádrech a jeho sklon je větší než v umbře, ale menší než v penumbře. Dále bylo dokázáno (Rimmele, 1997), že v mostech probíhají konvektivní procesy. Tato fakta přesvědčivě ukazují na to, že světelné mosty jsou "hluboké" struktury, vytvořené díky velkorozměrovým nehomogenitám v konfiguraci magnetického pole skvrn a že to nejsou pouhé povrchové útvary, jak by snad mohl naznačovat název "mosty".

Vývoj světelných mostů je úzce svázán s vývojem celé skvrny. Při zániku skvrny se často pozoruje, že z řetízků jasných umbrálních bodů se vyvíjejí slabé světelné mosty, které se rozšiřují a zjasňují, až rozštěpí umbrální jádro a stanou se silnými světelnými mosty. Tyto silné mosty se postupně přeměňují na oblasti fotosférické granulace, když se umbrální jádra od sebe začnou vzdalovat. Intuitivně si můžeme představit následující: V důsledku místního zeslabení magnetického pole se zesilují konvektivní procesy a vznikají nejdříve stabilní seskupení umbrálních bodů, případně slabé světelné mosty. S dalším poklesem intenzity magnetického pole se mohou vytvářet větší konvektivní buňky, podobné buňkám v granulaci, a objevují se silné světelné mosty. To je první krok ke znovunastolení podmínek panujících v klidné fotosféře, který ve svých důsledcích vede k rozpadu skvrny. Při vzniku sluneční skvrny může probíhat opačný proces.

## 8. UMBRÁLNÍ BODY

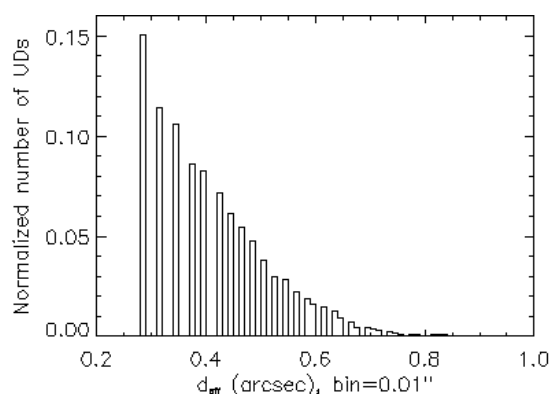
Umbrální body jsou velmi malé jasné objekty různých intenzit, vystupující z temného difúzního pozadí umbrálního jádra. K jejich pozorování potřebujeme výjimečně klidné a průzračné ovzduší a vysoce kvalitní dalekohledy s rozlišovací schopností alespoň 0.3".

Protože umbrální body detekujeme na samé hranici prostorového rozlišení, jejich pozorované intenzity a velikosti se podstatně liší od reálných hodnot. Skutečné intenzity a velikosti se mohou určovat pomocí dvoubarevné fotometrie nebo spektroskopicky. První výsledky dvoubarevné fotometrie (Beckers a Schröter, 1968) ukazovaly na to, že všechny umbrální body mají skutečnou intenzitu srovnatelnou s  $I_{ph}$  a že jejich rozměry jsou velmi malé -- okolo 0.2". Pozdější pozorování však ukázala, že skutečné intenzity a velikosti umbrálních bodů leží v daleko širším rozsahu. Sobotka, Bonet a Vázquez (1993) na základě spektroskopických pozorování a semiempirických modelů našli, že skutečná intenzita  $I_{ud}$  jasných bodů je přímo úměrná lokální intenzitě okolního temného difúzního pozadí  $I_{db}$ :

$$I_{ud} = 3 I_{db}$$

Podobně jako v penumbře, pojmy "jasný" a "temný" mají pouze lokální význam -- difúzní pozadí blízko okraje umbrálního jádra může mít vyšší intenzitu než umbrální body nalézající se v temných oblastech.

Sobotka, Brandt a Simon (1997a) změřili pomocí algoritmu pro sledování objektů pozorované průměry všech umbrálních bodů, které se objevily během časové série snímků sluneční skvrny v trvání čtyři a půl hodiny. Histogram na obr. 5 ukazuje, že počet umbrálních bodů rychle roste se zmenšujícím se průměrem až po mez rozlišení a že v rozsahu 0.28" - 0.9" neexistuje žádná "typická" velikost.



Obr. 5. Normalizovaný počet umbrálních bodů v závislosti na jejich efektivním průměru  $d_{eff}$

Ze stejného pozorovacího materiálu byly určeny životní doby. 66 % umbrálních bodů mělo životní dobu kratší než 10 minut a pouze 7 % existovalo déle než 40 minut. Histogram životních dob je podobný histogramu velikostí -- počet umbrálních bodů roste se zkracující se dobou života.

Ačkoli se umbrální body vyskytují všude v oblasti umbry, jejich prostorové rozdělení není stejnorodé. Vytvářejí seskupení nebo řetízky na některých "preferovaných" místech, zatímco téměř chybí v temných jádérkách. Střední vzdálenost mezi nejbližšími body (0.5" - 0.75") klesá s rostoucí intenzitou difúzního pozadí (Sobotka, Bonet a Vázquez, 1993). Velké a dlouho žijící umbrální body nalézáme převážně v jasnějších oblastech umbry. Nejjasnější umbrální body leží obvykle v periferních částech umbry, kde je intenzita difúzního pozadí nejvyšší. Tyto body se v minulosti pozorovaly nejčastěji, protože byly daleko snáze detekovatelné než body v temných centrálních oblastech umbry. To pravděpodobně vedlo k historickému rozdělení umbrálních bodů na centrální a periferní (Grossmann-Doerth, Schmidt a Schröter, 1986). Některé periferní umbrální body vznikají z penumbrálních zrn, která projdou hranicí umbra/penumbra. V současnosti je obtížné říci, zda se centrální a periferní body fyzikálně liší, protože jejich pozorované vlastnosti (velikosti, životní doby a pohyby) jsou velmi podobné.

Horizontální pohyby umbrálních bodů nejsou příliš uspořádané. Jejich rychlosti jsou v širokém pásmu od 0 do 800 m/s. Dá se říci, že body v centrálních oblastech umbry se pohybují pomaleji (průměrná rychlost 180 m/s) než body v periferních oblastech (270 m/s) a že pohyby umbrálních bodů ve vnějších oblastech jsou převážně orientovány směrem ke středu umbry, ale tyto poznatky nelze brát jako přesná pravidla (Sobotka, Brandt a Simon, 1997b).

Pokud jsou umbrální body důsledkem nějakého konvektivního procesu, dá se očekávat, že v nich budeme pozorovat zeslabení magnetického pole a vzestupné proudění. Spektroskopická měření dlouho nedávala žádný rozdíl vertikálních rychlostí mezi umbrálními body a difúzním pozadím. Teprve Rimmele (1997) našel slabou korelaci mezi vzestupnými rychlostmi řádu 50 m/s a zjasněními malých rozměrů v umbře, odpovídajícími umbrálním bodům a jejich seskupením.

Magnetické pole, určované ze spekter s vysokým rozlišením, nevykazuje fluktuace na prostorových škálách srovnatelných s umbrálními body, ale je zeslabeno až o 20 % v jasnějších oblastech o rozměrech nad 1", odpovídajících "preferovaným místům" výskytu umbrálních bodů a jejich seskupení (Schmidt a Balthasar, 1994). Nepřítomnost výrazných změn magnetického pole a vertikálních rychlostí v umbrálních bodech lze, podobně jako v případě temných a jasných penumbrálních vláken, vysvětlit rozdílnými výškami tvoření spojitého spektra, ve kterém pozorujeme

umbrální body, a spektrálních čar, ze kterých odvozujeme výše uvedené fyzikální charakteristiky.

## 9. FYZIKA JEMNÉ STRUKTURY

Položme si nyní otázku: Existuje nějaký obecný fyzikální vztah mezi prvky jemné struktury slunečních skvrn -- umbrálními body, penumbrálními zrny a granulemi ve světelných mostech? Shrňme poznatky o podobnostech a vzájemných vztazích mezi těmito objekty a seřaďme je tak, jak se projevují při klesající intenzitě magnetického pole ve skvrně:

1. Temná jádérka, místa s nejsilnějším magnetickým polem v umbře, téměř neobsahují umbrální body.
2. Vzdálenost mezi nejbližšími umbrálními body klesá s rostoucím jasným difúzním pozadím, tj. se zeslabováním magnetického pole.
3. Velké a dlouho žijící umbrální body se vyskytují převážně v jasnějších oblastech umbrálních jader, kde je magnetické pole slabší než v okolí.
4. Z řetízků umbrálních bodů se mohou vyvinout slabé světelné mosty.
5. Silné světelné mosty, kde je magnetické pole podstatně slabší než v okolní umbře, jsou tvořeny granulemi, které jsou podobné granulím ve fotosféře, avšak jsou menší.

V oblastech se silně skloněným, téměř horizontálním magnetickým polem, tj. v penumbře a vláknitých světelných mostech, pozorujeme, že:

6. Protáhlá zrna tvořící slabé světelné mosty s vláknitou strukturou jsou podobná morfologicky a dynamicky penumbrálním zrnům.
7. Penumbrální zrna, která projdou hranicí mezi umbrou a penumbrou, se změně v umbrální body a pokračují v pohybu ke středu skvrny.

Tato fakta ukazují, že prvky jemné struktury mají mnoho společných vlastností a že jsou pravděpodobně projevem určitého jednotného fyzikálního procesu, ovlivňovaného prostorovým rozdělením vektoru magnetického pole.

V podstatě existují dva teoretické přístupy, jak vysvětlit širokou škálu objektů jemné struktury ve skvrnách. První je založen na myšlence, že sluneční skvrna je tvořena jedinou velkou nehomogenní magnetickou silotrubicí, ve které probíhá magnetokonvekce (konvekce plazmatu v magnetickém poli). Magnetické pole ovlivňuje proudění plazmatu, ale zároveň je samo modifikováno prouděním. Podle tohoto přístupu jsou různé prvky jemné struktury projevy různých režimů magnetokonvekce (viz např. Weiss, 1997).

Druhý přístup vychází ze svazkového modelu umbry (Parker, 1979). Umbrální body a světelné mosty tak mohou být vysvětleny jako zářivé projevy sloupců

horkého plynu bez magnetického pole, které pronikají mezi jednotlivými úzkými magnetickými silotrubicemi.

Ačkoli obě výše uvedené teorie vycházejí z velmi odlišných předpokladů, jejich předpovědi pozorovatelných jevů jsou velmi podobné. Proto při současném stavu znalostí nemůžeme rozhodnout, který z obou přístupů je blíže skutečnosti.

V současné době je více rozpracována teorie magnetokonvekce. Weiss (1997) publikoval zajímavé výsledky numerických simulací trojrozměrného pohybu plazmatu v prostředí, které svými parametry (magnetické pole, teplota, hustota) odpovídá umbře. Simulace byly počítány pro různě velikou intenzitu magnetického pole.

1. V silném magnetickém poli existuje režim ustálené konvekce. Je charakterizován stabilní strukturou, tvořenou malými stoupajícími "bublinami" horkého plazmatu v souvislém prostředí klesajícího plynu. "Bubliny" se při svém vzestupu rozpadnou dříve, než mohou dosáhnout viditelného povrchu. Tento režim magnetokonvekce by mohl existovat v temných jádérkách.

2. Při mírném zeslabení magnetického pole (asi o 15 % oproti výchozímu stavu 1) se objeví prostorově modulované oscilace. Sousedící sloupce horkého plazmatu střídavě sílí a slábnou. Horké sloupce mohou být pozorovány jako umbrální body.

3. Při dalším zeslabení magnetického pole (o 30 % oproti výchozímu stavu) vzniká aperiodická konvekce. Oblasti horkého plazmatu se zvětšují a jejich pohyby se stávají výraznějšími a chaotičtějšími. Pohyb začíná převládat nad magnetickým polem a magnetické struktury ztrácejí stabilitu. Tento stav by mohl odpovídat slabým světelným mostům.

4. Ve slabém magnetickém poli (nižším o 50 % oproti výchozímu stavu), v režimu turbulentní konvekce, převládají rozměrné stoupající "bubliny" horkého plazmatu. Chladnější klesající plazma je spolu s magnetickým polem vytlačováno na hranice horkých oblastí a do uzlových bodů, kde se stýkají tři nebo čtyři horké "bubliny".

V silně skloněném magnetickém poli penumbry probíhají odlišné procesy. Schlichenmaier, Jahn a Schmidt (1998) navrhli scénář vývoje tenké magnetické silotrubice v penumbře, který částečně vysvětluje pohyb penumbrálních zrn a Evershedův jev. Velmi zjednodušeně by se dal popsat takto: Na počátku vývoje se část trubice situované na okraji penumbry ohřeje v důsledku záření okolní klidné fotosféry. Ohřátá část trubice expanduje a v důsledku vztlačové síly začne stoupat a "narovnávat" nakloněnou silotrubici. Průsečík horké části silotrubice s viditelným povrchem se pohybuje směrem ke středu skvrny a pozorujeme jej jako penumbrální zrno. Zároveň v silotrubici vzniká proudění plynu směrem ven ze skvrny. Na horní část trubice, nad průsečíkem s viditelným povrchem,

vztlačová síla již nepůsobí a tato část leží vodorovně. Díky vyzařování se ochlazuje, stává se průzračnou a jeví se jako temné vlákno. Proudění v ní pak může být příčinou Evershedova jevu.

Výše popsané teoretické modely jsou idealizovány. Jednotlivé prvky jemné struktury jsou v nich izolovány a jejich vlastnosti jsou studovány bez ohledu na složité dynamické vztahy panující v reálném prostředí sluneční skvrny. Nicméně, výsledky těchto modelů jsou již přímo srovnatelné s pozorováními. To je významný pokrok v modelování pohybů plazmatu v magnetickém poli a zároveň velká výzva pro pozorovatele, aby se snažili o stále vyšší rozlišení a kvalitu svých dat.

### Poděkování

Tato práce vznikla v rámci řešení grantového úkolu GA AV ČR č. A-3003903 a klíčového projektu AV ČR č. K1-003-601.

### LITERATURA

- Beckers, J. M., Schröter, E. H.: 1968, *Solar phys.*, 4, 303
- Beckers, J. M., Schröter, E. H.: 1969, *Solar phys.*, 10, 284
- Biermann, L.: 1941, *Vierteljahrschr. Astron. Ges.*, 76, 194
- Bray, R. J., Loughhead, R. E.: 1964, *Sunspots*, Chapman and Hall, London
- Bumba, V., Suda, J.: 1983, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 34, 29
- Chevalier, S.: 1916, *Ann. Obs. Astron. Zô-Sé*, Tome IX, B1
- Chitre, S. M., Shaviv, G.: 1967, *Solar Phys.*, 2, 150
- Collados, M., Martínez Pillet, V., Ruiz Cobo, B., del Toro Iniesta, J. C., Vázquez, M.: 1994, *Astron. Astrophys.*, 291, 622
- Cowling, T. G.: 1934, *M.N.R.A.S.*, 94, 39
- Danielson, R.: 1964, *Astrophys. J.*, 139, 45
- Evershed, J.: 1909, *Kodaikanal Obs. Bull. No. XV*, 63
- Grossmann-Doerth, U., Schmidt, W., Schröter, E. H.: 1986, *Astron. Astrophys.*, 156, 347
- Hale, G. E.: 1908, *Astrophys. J.*, 28, 315
- Hofmann, J., Deubner, F. L., Fleck, B., Schmidt, W.: 1994, *Astron. Astrophys.*, 284, 269
- Hoyle, F.: 1949, *Some Recent Researches in Solar Physics*, Cambridge Univ. Press
- Jahn, K., Schmidt, H. U.: 1994, *Astron. Astrophys.*, 290, 295
- Leka, K. D.: 1997, *Astrophys. J.*, 484, 900
- Martínez Pillet, V.: 1992, *Solar Phys.*, 140, 207
- Martínez Pillet, V.: 1997, in *Advances in the Physics of Sunspots*, ed. B. Schmieder, J. C. del Toro Iniesta, M. Vázquez, ASP Conf. Ser. Vol. 118, 212

- Martínez Pillet, V., Vázquez, M.: 1993, *Astron. Astrophys.*, 270, 494
- Muller, R.: 1973, *Solar Phys.*, 29, 55
- Parker, E. N.: 1979, *Astrophys. J.*, 234, 333
- Pizzo, J. V.: 1986, *Astrophys. J.*, 302, 785
- Rimmele, T. R.: 1997, *Astrophys. J.*, 490, 458
- Schlichenmaier, R., Jahn, K., Schmidt, H. U.: 1998, *Astron. Astrophys.*, 337, 897
- Schlüter, A., Temesváry, S.: 1958, in *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*, ed. B. Lehnert, IAU Symp. No. 6, Cambridge Univ. Press, 263
- Schmidt, W., Balthasar, H.: 1994, *Astron. Astrophys.*, 283, 241
- Shine, R. A., Title, A. M., Tarbell, T. D., Smith, K., Frank, Z. A.: 1994, *Astrophys. J.*, 430, 413
- Sobotka, M.: 1985, *Astron. Zh.*, 62, 995
- Sobotka, M., Bonet, J. A., Vázquez, M.: 1993, *Astrophys. J.*, 415, 832
- Sobotka, M., Bonet, J. A., Vázquez, M.: 1994, *Astrophys. J.*, 426, 404
- Sobotka, M., Brandt, P. N., Simon, G. W.: 1997a, *Astron. Astrophys.*, 328, 682
- Sobotka, M., Brandt, P. N., Simon, G. W.: 1997b, *Astron. Astrophys.*, 328, 689
- Sobotka, M., Brandt, P. N., Simon, G. W.: 1999, *Astron. Astrophys.*, 348, 621
- Weiss, N. O.: 1997, in *Advances in the Physics of Sunspots*, ed. B. Schmieder, J. C. del Toro Iniesta, M. Vázquez, ASP Conf. Ser. Vol. 118, 21
- Wiehr, E.: 1991, *Astron. Astrophys.*, 287, L1