

# Surfařův průvodce po Slunci

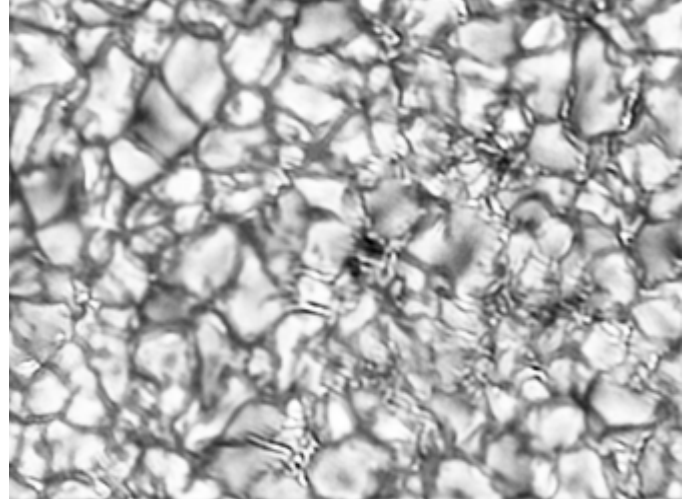
aneb

## Krátké povídání o fotosférických rychlostních polích

Michal Švanda, seminář Amatérské prohlídky oblohy, Brno 30. 11. 2002 (zkráceno)

### **Abychom si rozuměli ...**

Problematika rychlostních polí ve sluneční fotosféře je poněkud složitější a její pochopení by bylo velmi obtížné bez celkového náhledu na funkci celého systému Sluníčka tak, jak si jej dnes vysvětlujeme. Zdá se, že dominantní vliv na pohyby ve fotosféře má mohutná konvektivní vrstva začínající přibližně na 0,7 poloměru Slunce, kde značně roste neprůhlednost slunečního nitra. Přenos energie, který probíhal v celé pod touto hranicí ležící *radiativní vrstvě*, se zde stává energeticky nevýhodným a pomalým. Nastoupí tedy jiný, pro tyto účely vhodnější mechanismus – konvekce (jednoduchou představu o konvekci dá var vody v hrnci). Protože konvekce je jev chaotický, dochází během postupu hmoty výše k fragmentaci původních konvektivních buněk, což se ve výsledku projeví několika konvektivními módy, jež jsme schopni pak ve fotosféře pozorovat.



Obrázek 1: Konvektivní obraz ve fotosféře – granule

Konvektivní zóna přechází ve velmi tenkou vrstvu *fotosféru*, z níž k nám přichází převážná část elektromagnetického záření. Na horní hranici fotosféry dosahuje průběh teploty svého minima. Teplota totiž v další vrstvě -- řídké *chromosféře* -- dále roste na přibližně 10 000 °C. Pro naše účely je nezajímavá nejen chromosféra, ale i vnější atmosféra -- *koróna*.

### **Fotosféra**

Fotosféra je hraniční vrstvou slunečního tělesa a můžeme ji tedy z mnoha důvodů považovat za sluneční povrch. Jde o vrstvu v porovnání s rozměry celého Slunce velmi tenkou (cca 300 km), a přesto právě ona je předmětem slunečních pozorování od samého počátku. Pozorovatelé dlouho přicházeli na kloub jevům, jež je provázely každý den. Konvektivní vrstva se na chování fotosféry velmi podepíše. Ve viditelném světle můžeme pozorovat útvary podobné rýžovým zrnům – *granule* (viz obrázek 1) -- které jsou uvnitř světlejší (neboť zde vyvěrá vzestupný proud horkého plazmatu) a na okrajích chladnější (zde jsou místa sestupných proudů ochlazeného plazmatu). Jak jsme si již řekli, původní konvektivní buňky se cestou k povrchu štěpí na menší a menší. To, co nakonec pozorujeme v bílém světle ve fotosféře, je nejmenší (co do velikosti) konvektivní mód s rozměry buněk kolem tisíce kilometrů a životností několik minut. Měření ukazují, že se pohyby v granulích probíhají především vertikálně s amplitudou rychlosti přibližně 1 km/s. Níže v nitru dominuje střední konvektivní mód – *supergranule* – jež se projevuje samozřejmě i ve fotosféře, jen jsou jeho projevy poněkud skryté. Charakteristické rozměry supergranulárních buněk jsou 30 000 km a životnost více než jeden den. Pohyby v nich se odehrávají především horizontálně s amplitudou 500 m/s. O gigantických konvektivních buňkách, jež vznikají na samém dně konvektivní zóny, se mluví již od šedesátých let a jejich existence doposud nebyla spolehlivě a reprodukovatelně prokázána. Takové buňky by měly mít rozměry kolem 200 000 km s horizontálními pohyby s amplitudou několika desítek m/s a životností více než týden. Jejich existence je ve fotosféře ještě více skryta, než existence supergranulí.

Naštěstí nejsme odkázáni na pouhé snímkování nebo dokonce kresby fotosféry. Záření, jež vydává při svém pohybu horké plazma, podléhá *Dopplerovu jevu*, který nám dává možnost, jak stanovit rychlost pohybu ze spektra. Problém je v tom, že pomocí dopplerova posuvu vždy zjistíme jen jednu složku celého vektoru, a to složku, která míří přímo k pozorovateli.

Pro spolehlivou analýzu rychlostních polí potřebujeme získat velmi dobrá data. V současné době operuje ve světě několik projektů, které jsou schopny taková data poskytovat. Jedná se jednak o optické dalekohledy pracující na viditelných vlnových délkách nebo v blízké infračervené oblasti, které s využitím adaptivní optiky a vyspělého počítačového zpracování získaných obrazů jsou schopny získávat detailní pozorování s rozlišením až 0,1'' (což odpovídá přibližně 75 km ve fotosféře), nebo automatizované projekty *GONG* a *MDI* na družici *SoHO*, jež dodávají kvalitní pozorování s nízkým rozlišením.

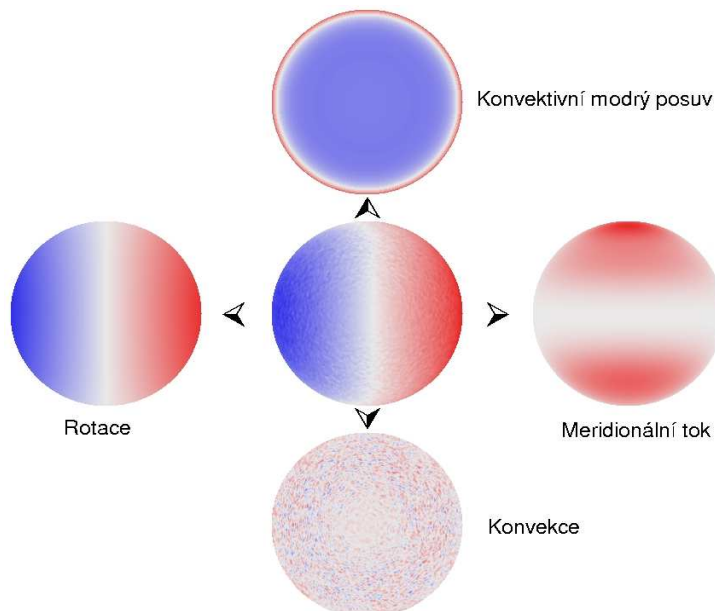
## Metody určování rychlostních polí

Jak jsme si již řekli, z jednoho pozorování nejsme schopni v principu zjistit více než jednu složku celkového vektoru rychlosti. Měření hodnot rychlostí probíhá především na základě dopplerova jevu, tedy měříme průmět celkového vektoru rychlosti do směru k pozorovateli. Proměříme-li takto celý sluneční disk, získáme zvláštní mapu, jež se nazývá *dopplergram*. V každém bodě disku se změří dopplerovských posuv sledované spektrální čáry a spočte se rychlost. S využitím moderních magnetooptických filtrů a složitých optických procesorů lze dnes pořídít dopplergram celého disku za několik sekund.

Další práce je již nemožná bez přijmutí dodatečných předpokladů.

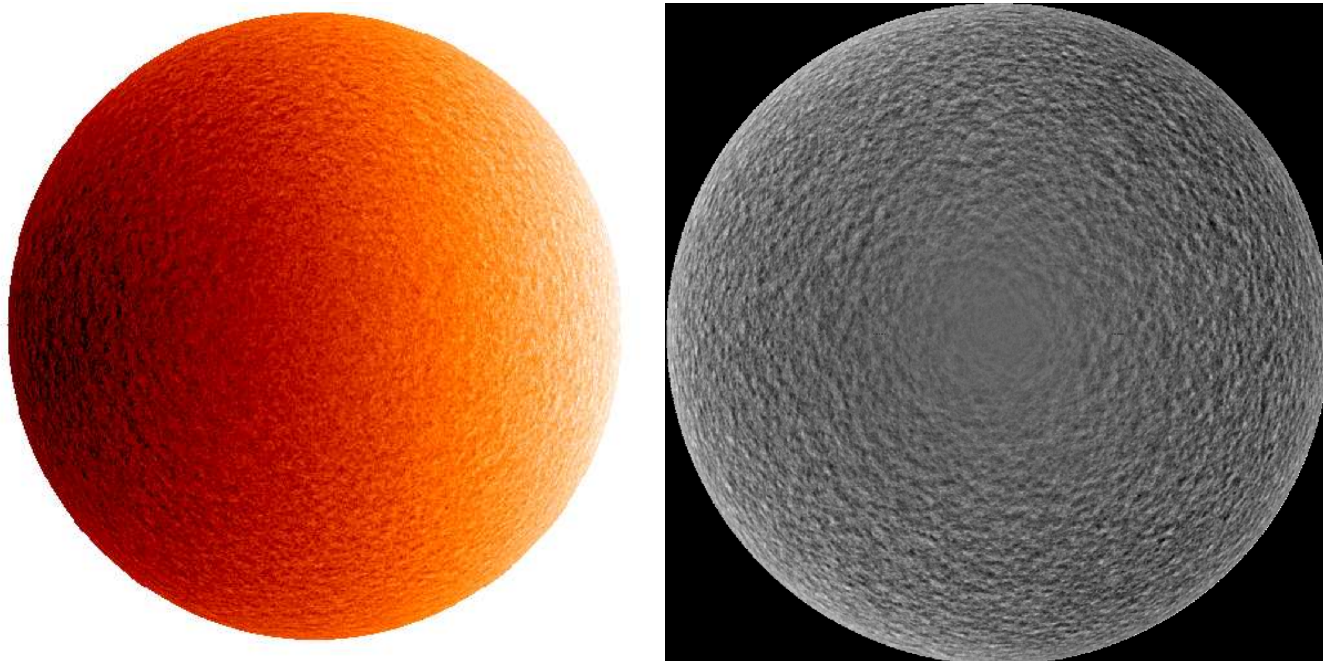
Podívejme se nejdříve, z čeho je vlastně takový typický dopplergram složen, čili jaké pohyby vlastně ve fotosféře očekáváme a co se nám projeví v každém dopplergramu (viz obrázek 2).

Dominantní projev má *sluneční rotace*. Slunce se otáčí v prvním přiblížení přibližně jednou za 27 dní, což dává amplitudu rotační rychlosti na rovníku přibližně 1800 m/s. Vektor této rychlosti bude vždy tečný k fotosféře a má jednoznačně zonální směr. Jeho průmět do směru k pozorovateli bude tedy záviset na úhlové vzdálenosti od centrálního poledníku, kde bude tento průmět nulový, zatímco maxima a minima nastávají u okrajů disku. Dopplerovský signál rotace bude z názoru antisymetrický vůči centrálnímu meridiánu.



Dalším dominantním signálem bude takzvaný *konvektivní modrý posuv*. Jak jsme si již řekli, pohyb nejmenšího konvektivního módu – granule – má složku převážně vertikální s amplitudou rychlosti kolem kilometru za sekundu. Rozlišovací schopnost přístrojů pro určování dopplergramů je obvykle nižší, než je rozměr jednotlivých granulí, a proto se nám dopplerovských signál pocházející od nich procesem měření integruje; čili vlastně rozmaže. Důsledkem toho je konvektivní modrý posuv s amplitudou kolem 300 m/s.

Pak nám tu zůstává již signál přímo konvektivních buněk, převážně supergranule. Říkali jsem si, že proudění plazmatu v supergranulích je především horizontální s amplitudou kolem 500 m/s. Z toho vyplývá, že podobně jako u rotace bude dopplerovská složka této rychlosti největší u okrajů disku, zatímco nejmenší na středu disku. Signál ale již nemá důvodu vykazovat nějakou symetrii, což také nedělá. Jako šum se zde projeví zbytek ze signálu granulí a též takzvané oscilace, jež jsou v podstatě projevy zvukových vln, u nichž byl měřením zjištěn průběh a ukazuje se, že je lze poměrně jednoduše odstranit časovou integrací.



Obrázek 3: Porovnání dvou dopplergramů: surového (vlevo) a redukováného (=časově integrovaného) (vpravo)

Nakonec byl pečlivými analýzami odhalen ještě jeden symetrický signál – pravděpodobně projev mohutného podpovrchového toku směrem od rovníku k pólu. Tento signál jeví symetrii vůči rovníku a dosahuje amplitudy přibližně 30 m/s.

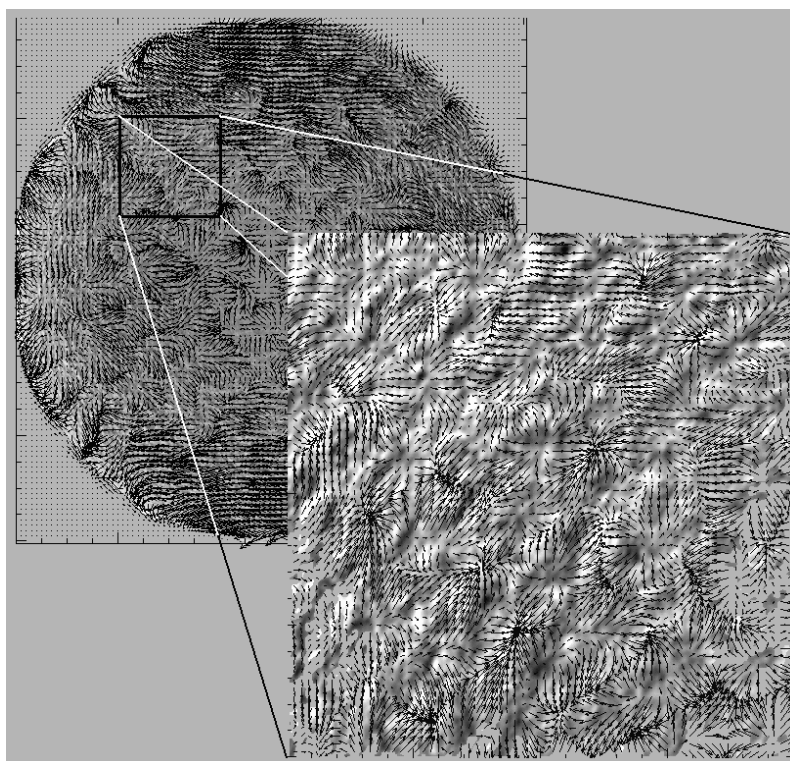
Odečtením těchto projevů jsme schopni odseparovat některé projevy, které by nám při dalším zpracování jen rušily. Po dokončení takové redukční rutiny nám zůstane fakticky jen konvektivní signál supergranulí, v němž je skryt i signál gigantických buněk (viz obrázek 3).

Řekli jsme si, že pohyby v supergranulích jsou převážně horizontální. Detailní pozorování ukazují, že vertikální složka činí jen několik m/s, což je ve srovnání se složkou horizontální s amplitudou 500 m/s zanedbatelné. Přijmeme-li předpoklad, že veškeré pohyby se konají v rovině fotosféry, můžeme k analýze přistoupit dále.

### **Local correlation tracking a feature tracking**

Obě metody jsou velmi podobné a v zásadě fungují též na podobném principu – porovnávají dva blízké obrázky (obvykle pořízené krátce za sebou) a snaží se v nich identifikovat podobné struktury.

*Local correlation tracking* funguje více dřevorubecky. Vezme z jednoho obrazu čtvereček zvolené velikosti, v druhém obrazu se umístí na stejné místo a jemnými posuvy v obou směrech se snaží najít nejlepší shodu. Možností, jak takovou shodu ohodnotit je povícero, statisticky je nejspolehlivější takzvaná *korelace*. Dlužno podotknout, že metoda LCT se prováděla již dříve za absence všech numerických výpočtů a to tak, že se na sebe



Obrázek 4: Výsledky aplikace metody LCT na supergranulární strukturu z redukovaných dopplergramů získaných přístrojem MDI družicové observatoře SoHO.

pohyby, které hledáme, nejsou charakteristické jen pro právě dva obrázky, ale že se zachovávají po delší dobu. Což je opět předpoklad dosti rozumný, používáme-li například snímky pořizované v několika desítkách sekund po sobě, zatímco životnost struktur větších rozměrů jsou reálně hodiny. Pak určíme korelační mapy pro více takových dvojic snímků a výsledek zprůměrujeme. Pakliže jsou původní data nějakým způsobem zašumněna, můžeme průměrováním dosáhnout lepších výsledků, neboť při něm stanovujeme jakousi střední hodnotu, která do jisté míry šum eliminuje.

V numerických testech bylo ukázáno, že obě metody jsou schopny rozeznat docela spolehlivě posuny až 0,01 pixelu! Nejlepší výsledky přitom dávají pro posuny 0,5 – 1,5 pixelu.

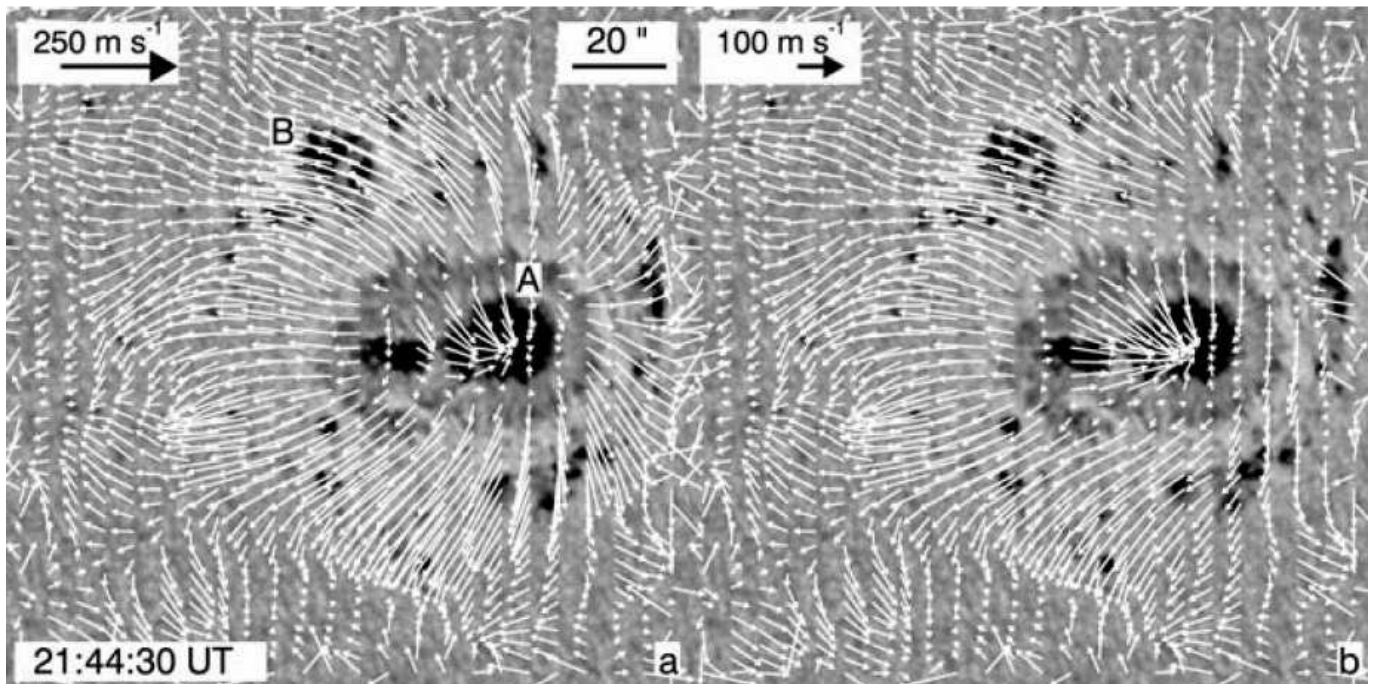
příkladaly dva negativy prosvětlované kalibrovaným zdrojem světla zvoleného průřezu a přesným fotometrem se měřilo množství světla, jež prošlo přes skřížené negativy (s nimiž se opět pohybovalo ve dvou směrech). Největší korelace (prošlo nejvíce světla) udávala hodnotu posunu negativů vůči sobě, který mohl být označen za vektor posunu daného bodu.

Takováto procedura se provede s každým pixelem obrazu, čímž získáme dvě složky rychlostí, které můžeme prohlásit za celkový vektor (vzpomeňme předpoklad o pohybu pouze v rovině fotosféry).

*Feature tracking* nepracuje tolik dřevorubecky, díky čemuž je výpočetně náročnější. Metoda totiž v okně zvolené velikosti nalezne nějakou výraznou charakteristiku a tu se snaží co nejlépe identifikovat v obrazu následujícím.

Numerické testy ukazují, že obě metody funguje velmi spolehlivě co se týče směrů vektorů, na určování amplitud už nejsou tak přesné, mají tendenci amplitudy podceňovat až o dvacet procent.

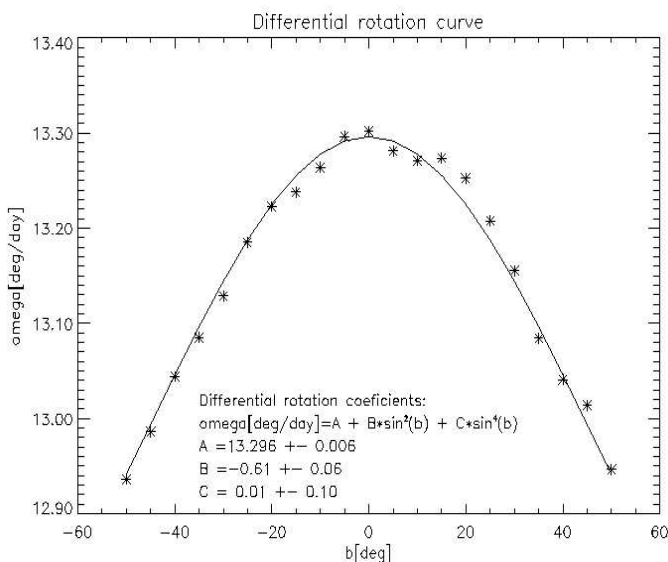
Výpočet můžeme zpřesnit dalším předpokladem. Budeme se domnívat, že



Obrázek 5: Šipečky naznačují směry rychlostí v jedné ze slunečních skvrn.

### Zajímavosti ze světa rychlostních polí

Zkoumáme-li rychlosti ve skvrnách, je dobré použít sekvenci detailních pozorování v bílém světle nebo blízké infračervené oblasti. Obě metody mají možnost se zde chytit jakýchsi struktur a výsledky jsou docela spolehlivé. Zajímají-li nás ale rychlostí pole na celém disku, zde se ukazují pozorování v bílém světle již značně nedostačující, protože s výjimkou aktivních oblastí se metody nemají čeho chytit. V důsledku toho je lepší použít jiný druh měření, jež je dobře popsán na celém disku. Jednou z možností je využít magnetické pole, jehož definice ale není opět dobrá zvláště v období minima činnosti mimo královské pásy. Protože konvekce probíhá ve všech místech fotosféry, ukazuje se zajímavé použít pro výzkumy celodiskové dopplergramy.



Obrázek 6: Integrací rychlostí získaných metodou LCT v pásech heliografické šířky můžeme získat křivku diferenciální rotace i s jejími koeficienty.

Důsledkem všech těchto pohybů jsou integrální projevy, mezi něž patří například *diferenciální rotace*. Současný názor mnoha slunečních fyziků je takový, že diferenciální rotace není spojena s fyzikální podstatou Slunce a nelze v ní hledat nic jako cylindrickou rotační symetrii nitra a podobně (jak ukázala měření provedená metodou helioseismologie). Jde prostě jen o souhrný projev lokálních pohybů ovlivněných pravděpodobně Coriolisovou silou, čímž lze vysvětlit jejich částečnou symetrii vůči rovníku.

Poměrně zajímavá jsou rychlostní pole ve skvrnách. Během utváření skvrny samotné jsou pole velmi komplikovaná a mění se každým okamžikem, výjimkou nejsou dočasné vírové pohyby. Tak je to u mladých a vznikajících skvrn. Staré stabilní skvrny mají naopak rychlostní pole zcela schodné s radiálními pohyby směrem ven. Detailní pozorování provedená s využitím adaptivní optiky ukazují, že situace je poněkud komplikovanější a výrazný tok ze skvrny se vyskytuje jen v umbře, zatímco v penumbře je část s tokem dovnitř a část s tokem ven.

Problematika fotosférických rychlostních polí je poměrně složitá a je předmětem dalšího zkoumání v mnoha ústavech. Možná se časem dočkáme odpovědi na otázky, které nás v této souvislosti zajímají – jak se vlastně pohybuje plazma? A jak ovlivňuje sluneční aktivitu? Budeme ji schopni spolehlivě předpovídat?