

Proudění fotosférického plazmatu po slunečním povrchu

*M. Klvaňa, Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, mklvana@asu.cas.cz*

*M. Švanda, Matematicko-fyzikální fakulta University Karlovy v Praze,
Česká republika, svanda@asu.cas.cz*

*M. Sobotka, Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, msobotka@asu.cas.cz*

*V. Bumba, Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, bumba@asu.cas.cz*

Abstrakt:

Pohyby ve sluneční fotosféře byly studovány mnoha autory. Získané výsledky však dávají značný rozptýl hodnot i v případech, kde bychom očekávali větší homogenitu. Vzhledem k tomu, že spolehlivá znalost rychlostních polí může dát odpověď na mnoho důležitých otázek, budeme se této problematice hlouběji věnovat.

V této práci předkládáme rozbor vlastností různých rychlostních polí, dále popisujeme naši metodiku vyhledání fotosférických pohybů a první výsledky, odvozené z pohybu supergranulární sítě, získané měřením rychlostních polí celého slunečního disku přístrojem MDI družicové observatoře SOHO.

1. ÚVOD

V oblasti sluneční fyziky existuje celá řada otázek na které bychom rádi znali odpověď. Proč například existuje diferenciální rotace Slunce a co ji způsobuje, proč se Slunce na rovníku otáčí rychleji, než obíhají planety kolem něho a v oblasti pólů se jeho rotace zase zpomaluje? Jak rychle se pohybují skvrny vůči okolní klidné fotosféře, jak se pohybují vůči svým aktivním oblastem a jak se tyto oblasti pohybují vzhledem k okolní klidné fotosféře, nakolik tyto pohyby ovlivňují sluneční aktivitu, odkud se berou pravidelnosti v přepólování slunečního magnetického pole a co ji způsobuje? Nejsme první, kdo si tyto otázky klade a můžete namítnout, že na mnohé z nich již dnes existuje ne jedna fundovaná odpověď. Vystihují však tyto odpovědi skutečnou realitu nebo jsou jen naší snahou ujasnit si procesy, kterých jsme jako vzdálení diváci svědky?

Existuje mnoho prací, v nichž se uvádí hodnoty koeficientů, popisujících diferenciální rotaci Slunce. Přesto, že mnoho z těchto prací bylo provedeno vysoce profesionálně, mají jednu společnou vlastnost, která nám dělá pramalou radost: existuje značný rozptýl těchto koeficientů, který je závislý jak na známých, tak i neznámých vlivech. Domníváme se, že společným jmenovatelem mnoha z těchto otázek je vlastní fotosférické rychlostní pole a proto bychom se rádi

pokusili dynamiku tohoto rychlostního pole blíže prozkoumat.

2. METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH POLÍ

Ve sluneční fotosféře můžeme pozorovat pohyby dvojího druhu: Jsou to buď pohyby fotosférických objektů, odvozované ze změny jejich polohy nebo pohyb plazmatu, zjištěný z dopplerovských měření. Vzhledem k malé tloušťce fotosférické vrstvy se v prvním případě jedná většinou o horizontální pohyb hmoty po slunečním povrchu. Pokud tomu tak není a jednalo by se o pohyb vybočující mimo fotosférickou vrstvu, objekt, sledovaný ve fotosféře, prostě zmizí. Pokud přijmeme předpoklad, že viditelný globální pohyb plazmatu ve sluneční fotosféře se odehrává v tenké vrstvě sluneční fotosféry a projevuje se tím, že sebou unáší fotosférické objekty, jedná se o pohyby na kulovém povrchu, promítnuté do roviny slunečního disku.

Naopak pohyby, odvozované z dopplerovských rychlostí, mají měřenou složku vektoru rychlosti vždy a pouze v podélném směru vzhledem k zornému paprsku, tzn. úhel, který tato složka vektoru rychlosti svírá se slunečním povrchem není nulová, jako v prvním případě, ale mění se v závislosti na vzdálenosti od středu slunečního disku.

Výhodou dopplerovských měření rychlostních polí je kromě vysoké přesnosti možnost určení jak horizontální, tak i vertikální složky dopplerovské rychlosti. Tyto dvě složky však nemohou obecně popisovat celkové horizontální a vertikální rychlostní pole, protože Dopplerův princip nedovoluje měřit celkový vektor rychlosti. Komponenta celkového vektoru rychlosti v rovině kolmé k zornému paprsku je tomuto principu měření nedostupná. Dovoluje však měřit rychlostní pole uvnitř a kolem objektů, sledovaných v prvním případě. Výsledné pole je pak dáno superpozicí pohybu plazmatu v objektu a vlastního pohybu celého zkoumaného objektu.

Při studiu fotosférických rychlostních polí jsou obecně používány obě varianty rychlostních měření. Tak například při měření diferenciální rotace Slunce byly používány jak pohyby objektů (skvrn, filamentů, magnetických polí apod.), tak i dopplerovská měření pohybu plazmatu. Společným rysem těchto měření je nepřehlédnutelný rozptyl získaných výsledků. Ten je způsoben jednak metodikou a vlastnostmi zvolených objektů (např. vlastní pohyby skvrn v aktivních oblastech, vývojovými změnami topologie magnetických polí, které se nutně promítají do polí rychlostních nebo u jinak přesných dopplerovských měření neznalostí příčné komponenty rychlosti), jednak samým principem diferenciální rotace, která, jak se domníváme, vzniká integrací všesměrového pohybu hmoty v rovině slunečního povrchu.

3. PRINCIP METODY URČENÍ RYCHLOSTNÍHO POLE V TENKÉ VRSTVĚ FOTOSFÉRY

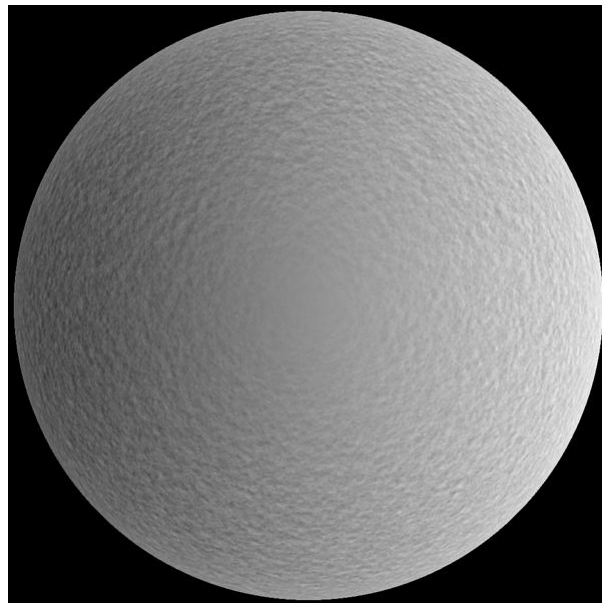
V naší práci předkládáme novou metodu pro nalezení rychlostního pole plazmatu, proudícího v tenké vrstvě sluneční fotosféry. Tato metoda využívá předností obou výše popsaných způsobů měření rychlostních polí a není zatížena jejich nedostatky.

Základním principem metody je sledování pohybů struktur supergranulární sítě, z nichž vypočteme rychlostní pole, které tuto síť unáší. Protože tato síť je rozprostřena po celém slunečním povrchu, můžeme popisovat jak magnetické, tak i nemagnetické oblasti, včetně aktivních oblastí a slunečních skvrn, které s touto sítí interagují. Supergranulární síť získáváme z dopplerovských měření, z nichž byly odstraněny složky rychlosti, související s carringtonovskou rotací Slunce a pětiminutovými oscilacemi. Životní doba jednotlivých supergranulárních cel (desítky hodin) dovoluje sledovat jejich pohyb dostatečně dlouho, takže můžeme předpokládat, že výsledné rychlostní pole určíme s dostatečně vysokou spolehlivostí.

4. POZOROVACÍ MATERIÁL

Výchozím materiálem pro naši práci jsou dopplerovská měření celého slunečního disku v absorpční čáře Ni I 676,8 nm z přístroje MDI družice

SOHO s časovým rozlišením jedné minuty. K dispozici máme dopplerovská data tří pozorovacích období: 24.05. – 24.07.1996, 14.04. – 13.07.1997 a 09.01. – 10.04.1998. Tato data, která nám laskavě poskytl J. G. Beck z university ve Stanfordu, jsou již předzpracována tak, že jednotlivé snímky 1024×1024 jsou průměrovány v intervalu 31 minut a ukládány po 15 minutách. Během jednoho dne máme tedy 96 korigovaných snímků celého slunečního disku. V této práci byla použita pozorování ze dne 26.5.1996.



Obr. 1: Dopplerovské rychlostní pole slunečního disku včetně složky, vznikající rotací Slunce kolem své osy.

5. METODIKA ZPRACOVÁNÍ DAT

5.1 Časová filtrace primárních snímků

Jednominutová kadence primárních snímků dovoluje vhodnou filtrací snížit počet snímků a současně odstranit vyšší obrazové frekvence včetně pro nás nežádoucích oscilací. Při zpracování primárních snímků byla použita filtrace váhovaným průměrem (Hathaway, 1988), vycházející z metody, použité Libbrechtem a Zirinem (1986). Pro jeden redukováný obrázek je použito 31 po sobě následujících primárních snímků. Popisovaný filtr zhruba pětisetnásobně potlačuje amplitudu 2 – 4 mHz frekvencí (oblast pětiminutových oscilací). Je to prakticky o řád více, než výsledný efekt při použití jednoduchého průměrování po dobu 60 minut.

Váhování jednotlivých snímků je dáno vztahem:

$$w(\Delta t) = e^{\frac{\Delta t^2}{2a^2}} - e^{\frac{b^2}{2a^2}} \left(1 + \frac{b^2}{2a^2} - \Delta t^2 \right) 2a^2$$

kde Δt je časový rozdíl mezi konkrétním a centrálním snímkem, $b=16$ je poloviční délka filtru a $a=8$ je pološířka časového okna v minutách. Tento časový filtr

má široký gaussovský tvar. Použití takového 31-minutového průměrování redukuje šum, způsobený především zvukovými mody oscilací, pod úroveň 1 m/s.

Nevýhodou filtru je právě jeho velká délka. Přestože více než 50% váha je na snímcích, které se nevzdalují více než 9 minut od centrálního snímku, sluneční rotace již i v takovýchto škálách může způsobit měřitelné posuvy. Proto byly tyto posuvy kompenzovány „derotací“ jednotlivých snímků do pozice snímku centrálního s využitím spektroskopického diferenciálního rotačního profilu získaného Snodgrassem a Ulrichem (1990).

5.2 Souřadnicový systém

Pro naše účely používáme Carringtonův souřadnicový systém, který sice nemůže popsat sluneční rotaci, ale vytvoříme tak model pevného, rotujícího tělesa, na jehož povrchu budeme vykreslovat reálné pohyby slunečního plazmatu.

5.3 Korekce dopplerovského rychlostního pole na rotaci

Při zpracování supergranulace se v měřené dopplerovské komponentě rychlosti rušivě projevuje rotace Slunce (obr.1). Průmět vektoru rychlosti otáčejícího se Carringtonova souřadnicového systému do směru pozorování V_c (dopplerovská komponenta vektoru) je dána výrazem:

$$V_c = -V_0 \sin \alpha \cos \delta \cos B_0$$

kde α a δ jsou heliografické souřadnice bodu na slunečním disku, odečítané od centrálního meridiánu, B_0 - sklon rotační osy Slunce a $V_0 = 1,8557$ km/sec – obvodová rychlost Slunce, vypočtená ze synodické doby rotace Slunce. Po odečtení V_c z naměřených dopplerovských dat získáme na slunečním disku homogenní prostředí, v níž převažuje supergranulární síť (obr.2).

5.4 Korekce otáčení Carringtonových souřadnic

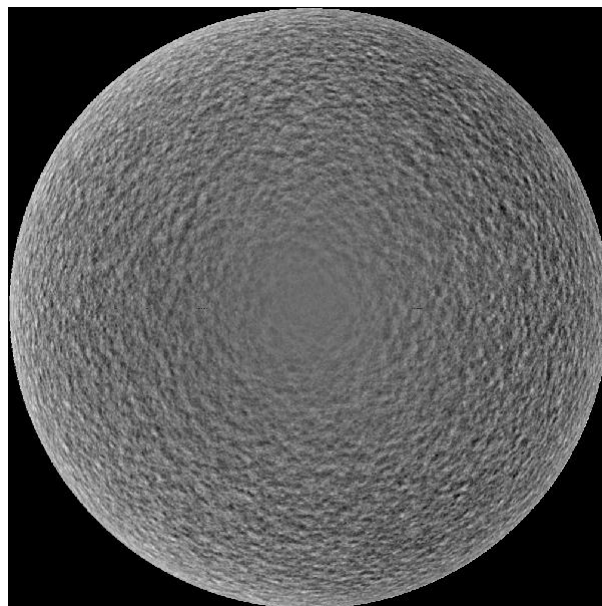
Sekvenčí rozumíme řadu N korigovaných snímků, jdoucích po sobě. Časový interval mezi jednotlivými snímky je 15 minut. Korekcí rotace rozumíme zpětné pootočení každého bodu obrazu slunečního disku o úhel pootočení Carringtonova souřadnicového systému za dobu, která uplynula mezi prostředním a korigovaným snímkem dané sekvence. Předpokládáme, že vzhledem k malým úhlům pootočení dojde pouze k posuvu jednotlivých bodů obrazu, ale ne ke změně korigovaného rychlostního pole.

U převážně horizontálního proudění, kterým supergranulární pohyby jsou, dochází při změně úhlu pohledu pouze ke změně amplitudy rychlostí, ale ne k jejich významnému geometrickému posuvu vlivem projekce. A tato změna amplitudy nehraje v následujícím zpracování roli, protože neanalyzujeme vlastní

rychlostní pole, ale posuv struktur, které toto pole vytváří.

5.5 Algoritmus pootočení

Náš algoritmus vychází z požadavku výpočtu jasových hodnot v bodech geometricky pevně stanovené fixní sítě pixlů obrazu slunečního disku. Postup je následující: pro daný bod fixní sítě (x_1, y_1) obrazu A vypočteme polohu (x_2, y_2) , do které by se dostal tento bod po uplynutí času ΔT , kdy byl pořízen otáčený obraz B a v tomto bodě provedeme interpolaci jasů mezi čtyřmi nejbližšími body obrazu B. Tuto hodnotu zapíšeme do daného bodu (x_1, y_1) fixní sítě obrazu A a postup opakujeme pro všechny body obrazu A. V obraze A budeme pak mít obraz B, otočený o úhel Carringtonova systému, odpovídající jeho pootočení za čas ΔT .



Obr. 2: Dopplerovská rychlostní pole na slunečním disku s odstraněnou složkou Carringtonovy rotace.

Souřadnice otáčeného bodu x_1, y_1 na slunečním disku (v pixelech, tzn. celočíselné) přepočítáme na heliografické souřadnice α_1, δ_1 (ve stupních) podle vzorců:

$$\sin \delta_1 = \frac{Q \sin B_0 - (R - y_1) \cos B_0}{R}$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{(R - y_1) \sin B_0 + Q \cos B_0}{(R - x_1) \sin B_0 + Q \cos B_0}$$

kde

$$Q = \sqrt{R^2 - (R - x_1)^2 - (R - y_1)^2}$$

R je zde poloměr slunečního disku a B_0 - heliografická šířka středu slunečního disku (sklon rotační osy Slunce). Protože se družice nachází v libračním bodě L_1 systému Slunce - Země, mění se její vzdálenost od Slunce jen málo a proto R můžeme považovat za konstantu.

Byl-li otáčený snímek pořízen v době T_{kor} a chceme-li znát jeho obraz v době T_0 , bude úhel otočení souřadnicového systému přímo úměrný době

$$\Delta T = T_{kor} - T_0.$$

Heliografické souřadnice α_1, δ_1 se po čase ΔT (v hodinách) změní na

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha \quad \delta_2 = \delta_1$$

kde

$$\Delta\alpha = 13.2 \frac{\Delta T}{24}$$

Pro tyto nové úhly vypočítáme nové souřadnice x_2, y_2 , které v otáčeném obraze odpovídají místu, totožnému přesně s bodem x_1, y_1 před časem ΔT .

$$x_2 = R(\cos\alpha_2 \cos\delta_2 + \sin\alpha_2 \sin\delta_2 \cos B_0)$$

$$y_2 = R(\sin\alpha_2 \cos\delta_2 + \cos\alpha_2 \sin\delta_2 \cos B_0)$$

Souřadnice x_2, y_2 již nejsou celočíselné, ale mají i desetinnou část Δx a Δy . Nyní vypočteme funkční hodnotu v bodě o souřadnicích x_2, y_2 podle následujícího interpolačního vzorce

$$F(x_2, y_2) = A + \Delta x \frac{B - A}{\Delta x} + \Delta y \frac{C - A}{\Delta y} + \Delta x \Delta y \frac{D - A - B - C}{2\Delta x \Delta y}$$

kde v otáčeném obraze odečteme hodnoty v bodech A, B, C, a D, - nejbližších bodu (x_2, y_2) :

$$A = F(\text{fix}(x_2), \text{fix}(y_2) + 1)$$

$$B = F(\text{fix}(x_2) + 1, \text{fix}(y_2) + 1)$$

$$C = F(\text{fix}(x_2), \text{fix}(y_2))$$

$$D = F(\text{fix}(x_2) + 1, \text{fix}(y_2))$$

fix označuje celou část desetinného čísla.

A	B
$F(x_2, y_2)$	
C	D

Hodnotu $F(x_2, y_2)$ zapíšeme na pozici x_1, y_1 korigovaného obrazu a postup opakujeme pro všechny body uvnitř slunečního disku.

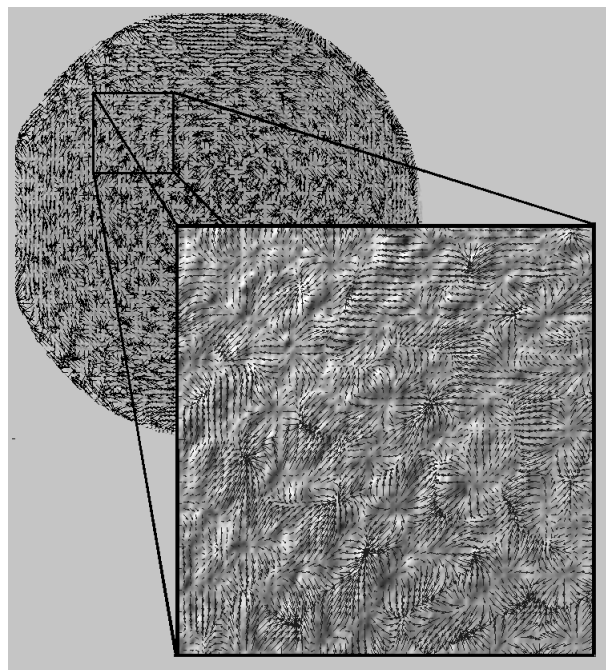
6. VÝPOČET HORIZONTÁLNÍHO RYCHLOSTNÍHO POLE Z POSUVŮ SUPERGRANULACE

Na všechny snímky sekvence, u kterých byly korigovány výše uvedené efekty, je použit algoritmus

Local Correlation Tracking pro vyhledávání posuvu struktur obrazu (November a Simon, 1988). Program pracuje tak, že v okně volitelné velikosti koreluje zpracováváný obraz s obrazem referenčním a zjišťuje subpixlový vektor posuvu okna v obou obrazech, odpovídající maximální korelaci. Tento vektor posuvu s počátkem ve středu referenčního okna přepočítáme na vektor lokální rychlosti v témže bodě. Posouváním okna po celém obraze Slunce získáme obraz vektorového rychlostního pole na slunečním disku pro jednu dvojici snímků.

Referenčním obrazem není časově následující snímek zpracováváné sekvence, ale snímek s volitelným časovým odstupem. Získáváme tak větší geometrický posuv supergranulárních struktur a tím zlepšení poměru signál-šum ve výsledném obraze.

Vektorové rychlostní pole na slunečním disku získáme zprůměrováním obrazů vektorových rychlostních polí, získaných pro všechny dvojice zpracováváného a referenčního obrazu téže sekvence. Výsledkem tohoto postupu je vektorové rychlostní pole v tenké vrstvě sluneční fotosféry, tzn. horizontální vektorové pole vzhledem ke slunečnímu povrchu (**obr.3**). Toto lokální rychlostní pole zachycuje všechny detaily pohybů po slunečním povrchu.



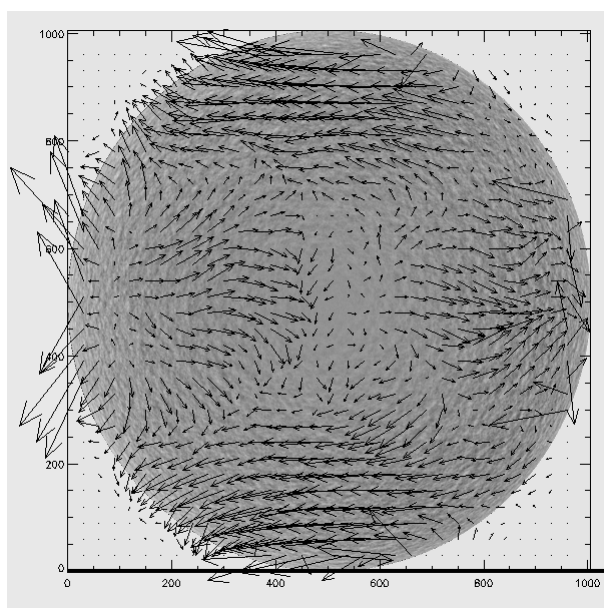
Obr. 3: Vektorové rychlostní pole pohybů hmoty v tenké vrstvě sluneční fotosféry. V popředí je zvětšený segment vektorového rychlostního pole, se superponovanou supergranulární sítí.

Abychom zvýraznili globální rychlostní pole, použili jsme filtr prostorových frekvencí. Na obr. 4 vidíme, že po filtraci se vektorové rychlostní pole uspořádalo do velkých cel, které velmi dobře korelují s našimi představami o diferenciální rotaci Slunce.

Zobrazené vektorové rychlostní pole zachycuje rozdíl mezi Carringtonovou rotací pevného tělesa a reálnou rotací sluneční plasmy. V heliografických šířkách cca 20 stupňů jsou obě úhlové rychlosti zhruba stejné, směrem k rovníku se rotace zrychluje a naopak k pólům zase zpomaluje.

7. STATICKÉ ZOBRAZENÍ POHYBU PLAZMATU

Pohyb plazmatu (pro jeden časový okamžik) můžeme znázornit proudovými čarami, znázorňujícími dráhy částic, unášených rychlostním polem, vypočteným z vektorového rychlostního pole pohybů supergranulární sítě (viz bod 6). Takto získaný obraz proudových čar se v čase nebude měnit.



Obr.4: Velkostrukturální rychlostní pole pohybující se hmoty v tenké vrstvě sluneční fotosféry, získané prostorovou filtrací rychlostního pole celého slunečního disku na obr. 3. Vektory na okraji disku jsou zatíženy značnou chybou v důsledku průměrování i mimo disk.

8. DYNAMICKÉ ZOBRAZENÍ POHYBU PLAZMATU

Pokud pro výpočet proudových čar použijeme více obrazů vektorových rychlostních polí, uspořádaných v časové posloupnosti, dostaneme časově proměnný obraz proudění plazmatu po slunečním povrchu. Při zobrazování výsledného proudění můžeme postupovat dvěma způsoby:

8.1 Zobrazení pohybu plazmatu na rotujícím Slunci

Při přímém použití obrazů, získaných podle bodu 6) dostáváme vektorové rychlostní pole na rotující kouli. Výhodou této metody je možnost časově neomezeného

sledování dějů na slunečním povrchu, nevýhodou je posuv sledované oblasti od východu na západ, stejně jako na reálném Slunci.

8.2 Zobrazení pohybu plazmatu s korekcí na rotaci

Pokud pro všechny sekvence použijeme při korekci otáčení Carringtonova souřadnicového systému tentýž referenční obraz (v období maximálně 1 – 2 dny) nebo referenční obrazy každé sekvence korigujeme na carringtonovskou rotaci podle bodu 5.4), můžeme analyzovanou oblast pozorovat stále na středu slunečního disku. Nevýhodou této metody je časově omezené sledování dějů na slunečním povrchu (období kratší než cca 7 dnů), závislost šířky pásu zobrazované oblasti kolem centrálního meridiánu na délce studovaného období a vliv geometrického zkreslení okrajových oblastí.

9. ZÁVĚR

Na základě materiálu, získaného přístrojem MDI družice SOHO se nám podařilo rozpracovat metodiku výzkumu pohybu plazmatu v tenké vrstvě sluneční fotosféry.

Vzhledem k malé tloušťce fotosférické vrstvy se při současném prostorovém rozlišení jedná převážně o horizontální pohyby, které touto metodou můžeme sledovat jak v klidné fotosféře, tak i v aktivních oblastech a pozadí magnetického poli.

Doufáme, že se nám touto cestou podaří alespoň částečně pochopit některé z mnoha tajemství, která v sobě skrývá současná sluneční fyzika.

Poděkování:

Rádi bychom poděkovali **J. G. Beckovi**, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA za laskavé poskytnutí filtrovaných dat, **AVČR a grantovým agenturám GAČR a GAAVČR** za projekty GAČR 205/01/0658, GAAVČR A3003903 a za Klíčový projekt AVČR K2043105, na jejichž základě byla tato práce realizována.

LITERATURA:

- Hathaway, D.H., 1988a, Solar Physl **117**, 1.
 Libbrecht, K. and Zirin, H.: 1986, Astrophys. J. **308**, 413
 Snodgrass, H.B. And Ulrich, R.K.: 1990, Astrophys. J. **351**, 309
 November L.J. , Simon G. W., 1988: ApJ, **333**, 427