

Inverze Stokesových profilů ve sluneční skvrně

*J. Jurčák, Astronomický Ústav Akademie Věd České Republiky, Ondřejov
V. Martínez Pillet, Instituto de Astrofísica de Canarias, Tenerife, Spain*

Abstrakt

V příspěvku jsou zpracována data pozorovaná dne 13.5. 2000 pomocí La Palma Stokes Polarimetru umístěnému na Švédské sluneční věži. Pozorována byla nepravidelná skvrna z aktivní oblasti NOAA 8990, která se nacházela 12° N a 17° W od středu disku. Podrobněji byla studována dvě pole o rozměrech $14,8''$ krát $20''$ (185 krát 80 pixelů). Proměřeny byly všechny čtyři Stokesovy profily ve dvou blízkých čarách železa ($630,15$ nm a $630,25$ nm). Z pozorovaných Stokesových profilů jsme pomocí programu SIR (Stokes Inversion based on Response functions) určili průběh teploty, tlaku elektronů, rychlosti a vektoru magnetického pole ve sluneční skvrně.

1. ÚVOD

Již dlouhou dobu existuje snaha nalézt uspořádání magnetického pole a průběh dalších parametrů plazmy ve sluneční skvrně. Jednou z možností, jak je určit, je inverze pozorovaných dat.

V tomto příspěvku je použit inverzní kód SIR (Ruiz Cobo a del Toro Iniesta, 1992). Princip tohoto programu je shrnut v práci Kozy (2003), kde najdeme i odkazy na další literaturu týkající se problému inverze.

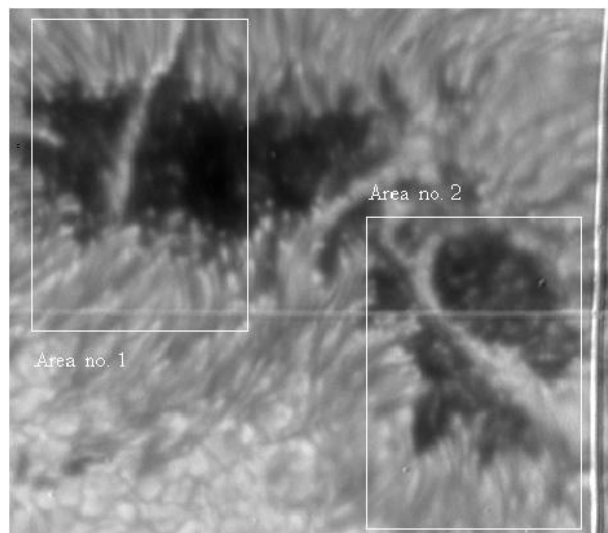
Pro určení plného vektoru magnetického pole je zapotřebí proměřit intenzity ve všech čtyřech Stokesových profilech, přičemž až do současnosti nebylo pořízeno mnoho takovýchto pozorování. V tomto článku ukážeme výsledný průběh teploty a magnetické pole v aktivní oblasti NOAA 8990. Protože se jedná o nově zpracovaná data, nebyla dosud využita pro podrobnější analýzu, jakou může být například porovnání inklinace mag. pole v tmavých a světlých filamentech punumbry.

2. POZOROVÁNÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

Dne 13. května 2000 jsme pozorovali nepravidelnou skvrnu v aktivní oblasti NOAA 8990 pomocí Stokesova polarimetru, který je umístěn na Švédské vakuové věži na La Palmě. Skvrna se nacházela 12° severně a 17° západně od středu disku, čemuž odpovídá μ rovno 0.907. Snímek oblasti v bílém světle je na obr. 1.

Při pozorování byl zároveň pořízen snímek limbu Slunce. Ten byl použit pro určení profilu rozptýleného světla, podle postupu popsaného v práci Martíneze Pilleta (1992)

Pole vyznačená na obr. 1 byla proměřena ve dvou blízkých čarách železa. Jak čára Fe I $630,15$ nm tak i čára Fe I $630,25$ nm je citlivá na přítomnost magnetického pole ($g=1,7$, resp. $2,5$), přičemž obě čáry vznikají ve vyšší části fotosféry. (Čára Fe I $630,25$ nm



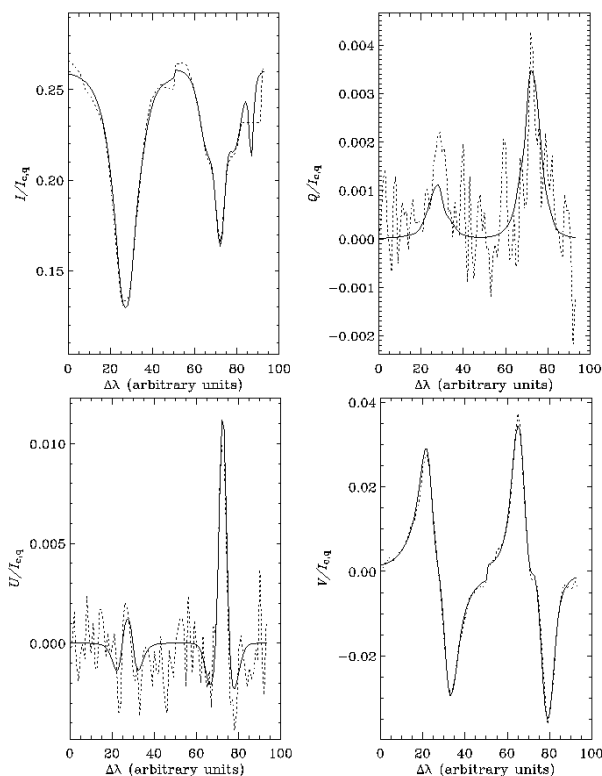
Obr. 1: Snímek oblasti NOAA 8990 v bílém světle.

se formuje níže než čára Fe I $630,15$ nm.)

Proměřené oblasti mají rozměr $14,8''$ x $20''$. Pozorovaná data upravil Martínez Pillet pro vstup do programu SIR.

3. PRINCIP INVERZNÍHO KÓDU

Inverzní kód SIR je jednodimenzionální kód fungující za předpokladu, že se plazma nachází v hydrostatické a také lokální termodynamické rovnováze. Vstupem do tohoto programu jsou pozorované profily spektrálních čar a atmosférický model. (Případně je možno použít dvoukomponentní model, kdy používáme dva atmosférické modely, jež mají rozdílné průběhy fyzikálních parametrů.) V atmosférickém modelu jsou jednotlivé parametry plazmy, které jsou třeba k vyčíslení rovnice přenosu záření, čímž získáme teoretické hodnoty intenzity pro



Obr. 2: Porovnání teoretického (plná čára) a pozorovaného (tečkovaná čára) profilu v jednom z bodů umbrý.

jednotlivé Stokesovy profily. Malé změny jednotlivých parametrů způsobují změnu intenzity (del Toro Iniesta, 2001). Postupnými iteracemi se minimalizuje rozdíl mezi pozorovanými a teoretickými profily spektrálních čar. Výstupem pak je upravený vstupní model, takže dostáváme hodnoty jednotlivých parametrů plazmy v různých optických hloubkách.

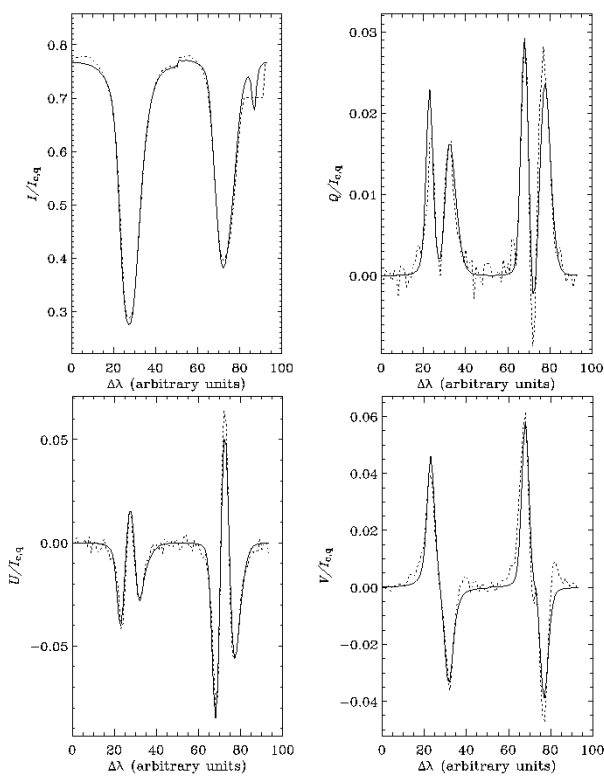
4. VÝSLEDKY INVERZE

Všechny body z pozorovaných oblastí byly invertovány se stejným vstupním modelem, který je primárně určen pro penumbru. Na obr. 2 a 3 jsou porovnány teoretické a pozorované profily v umře, resp. penumbře.

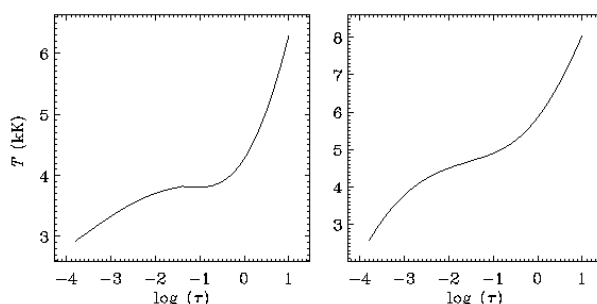
V Stokesově I profilu vidíme u teoretického profilu v červeném křídle čáry Fe I 630,25 nm silný blend, který nemá protějšek v pozorovaném profilu. Tyto body byly z pozorování vyřazeny, aby neovlivnily inverzní kód.

Na obr. 2 můžeme vidět poměrně dobrou shodu v I a V profilech. Vzhledem k nízké úrovni signálu (a tedy vysokému zašumění) v Q a U profilech je těžké zhodnotit přesnost inverze v těchto profilech.

Na obr. 3 je dosažena nejlepší shoda v I profilu. U ostatních Stokesových profilů jsou určité neshody teoretické a pozorované intenzity. Je to částečně způsobeno tím, že pro penumbru je výhodnější používat dvoukomponentní model inverze. Pro nějž je však z časových důvodů nutné omezit počet stupňů volnosti, což se řeší například zanedbáním inklinace a azimutu magnetického pole.



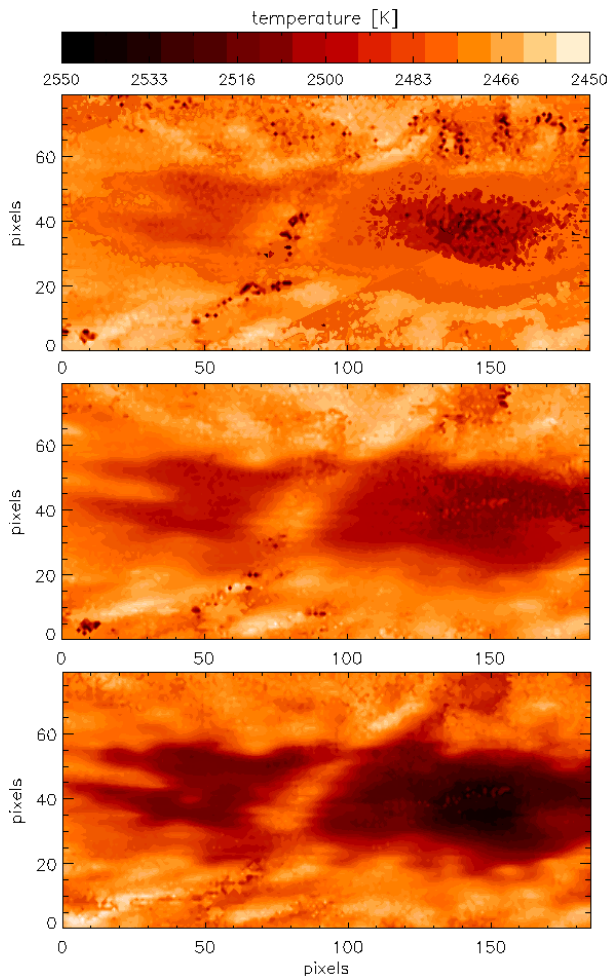
Obr. 3: Porovnání teoretického (plná čára) a pozorovaného (tečkovaná čára) profilu v jednom z bodů penumbry.



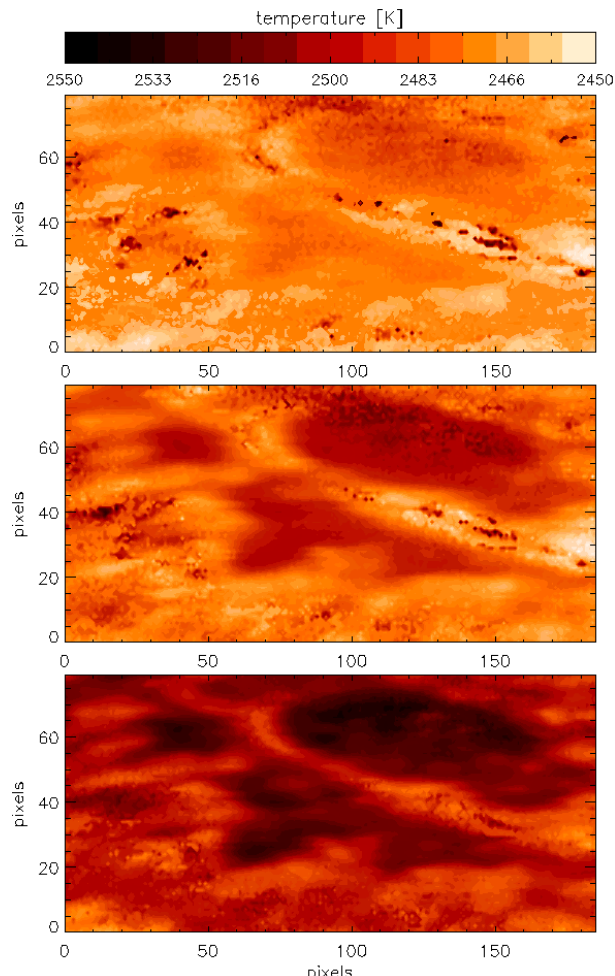
Obr. 4: Průběh teploty s hloubkou v umbrě (levý obrázek) a penumbře.

Na obr. 4 je ukázán průběh teploty s optickou hloubkou v umbrě a penumbře. Vidíme, že průběh teploty je v obou případech obdobný. Je důležité si všimnout rozdílné škály v rozsahu teplot. V grafu nejsou vyneseny chyby, rozumná přesnost je dosažena v rozmezí hodnot $\log(\tau)$ $-2,5$ až 0 . Obdobný průběh teploty je i ve všech ostatních bodech, přičemž pro krajní hodnoty hloubky se může vlivem značné chyby stát, že se obrátí průběh teplotního spádu. Výsledné mapy teploty jsou na obr. 5 a 6.

Na obou obrázcích jsou zobrazeny tři hloubky, které odpovídají $\log(\tau)$ rovno $-2,3$, $-1,3$ a $-0,3$ (dole). I z těchto map je vidět, že teplota roste s výškou. Zejména na obou nejvyšších obrázcích ($\log(\tau)=-2,3$) můžeme v penumbře vidět výrazné tmavé body, které odpovídají výše zmíněnému efektu obrácení teplotního spádu. Obdobně výrazné body se vyskytují i ve světelných mostech. Tyto body jsou však patrné i v ostatních hloubkách, takže se nabízí otázka, zda je to skutečný jev



Obr. 5: Mapa teplot první oblasti ve třech hloubkách. Nahoře je $\log(\tau) = -2.3$, uprostřed $\log(\tau) = -1.3$ a dole $\log(\tau) = -0.3$.



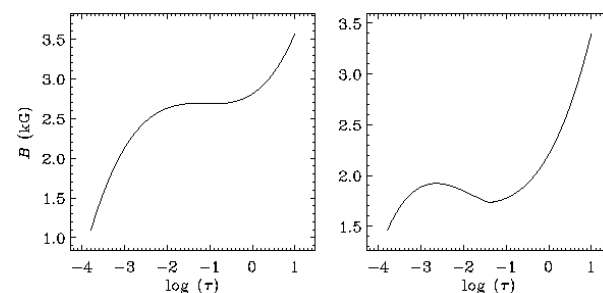
Obr. 6: Mapa teplot druhé oblasti ve třech hloubkách. Nahoře je $\log(\tau) = -2.3$, uprostřed $\log(\tau) = -1.3$ a dole $\log(\tau) = -0.3$.

(tedy, že ve světelných mostech je jiný průběh teploty), nebo jde o chybně spočítané body, které vyžadují jiný vstupní model a jiné nastavení parametrů.

Na obr. 7 je znázorněn průběh indukce magnetického pole s hloubkou v umbře a penumbře. Tvar závislosti je v obou bodech opět podobný, přičemž platí stejné připomínky jako k obr. 4 a to včetně změn v krajních hloubkách. Je otázkou, zda je takový průběh magnetického pole reálný, nebo je způsoben špatně zvoleným počtem nodů při výpočtu.

Na obr. 8 a 9 je pak znázorněna velikost a směr magnetického pole. Zobrazené hladiny jsou stejné jako u teploty, přičemž navíc je v levém horním rohu pro názornost přidán pohled ze strany, ze kterého je lépe poznat změna inklinace a velikosti magnetického pole.

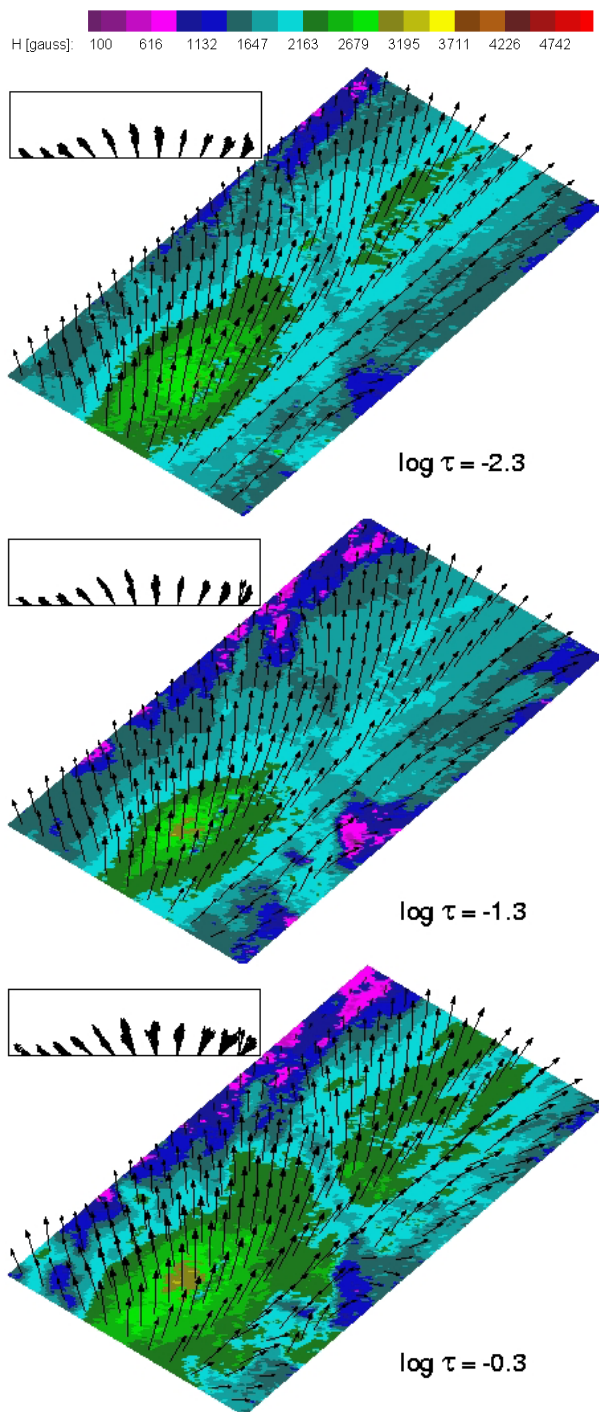
Na obr. 8, který je z první oblasti (symetrická penumbra), si můžeme všimnout, že rozložení inklinace symetrické není, ale naklání se více doleva, což odpovídá náklonu ve směru od středu disku. Tento efekt, kterého si můžeme všimnout i na obr. 9 z druhé oblasti, je způsoben tím, že SIR v současné podobě počítá pouze s $\mu=1$, což by odpovídalo pozorování ve středu slunečního disku. Takto spočtený vektor magnetického pole je tedy nutno otočit do správného směru.



Obr. 7: Průběh indukce magnetického pole s hloubkou v umbře (levý obrázek) a penumbře.

Dalším problémem inverzních kódů je neurčitost ve výpočtu azimutu o 180° . Kód SIR má navíc nulovou hodnotu azimutu závislou na otočení polarizačního filtru. Hodnoty azimutu tedy bylo nutno na závěr přepočítat do jednoho směru a otočit o určitý úhel daný právě polohou polarizačního filtru. Nakonec se tento úhel nepočítal, ale určil se tak, aby výsledný směr magnetického pole co nejlépe odpovídal směru penumbrálních filamentů.

Z obou obrázků je patrné, že se inklinace zmenšuje s výškou v atmosféře. To odpovídá přesně očekávání,

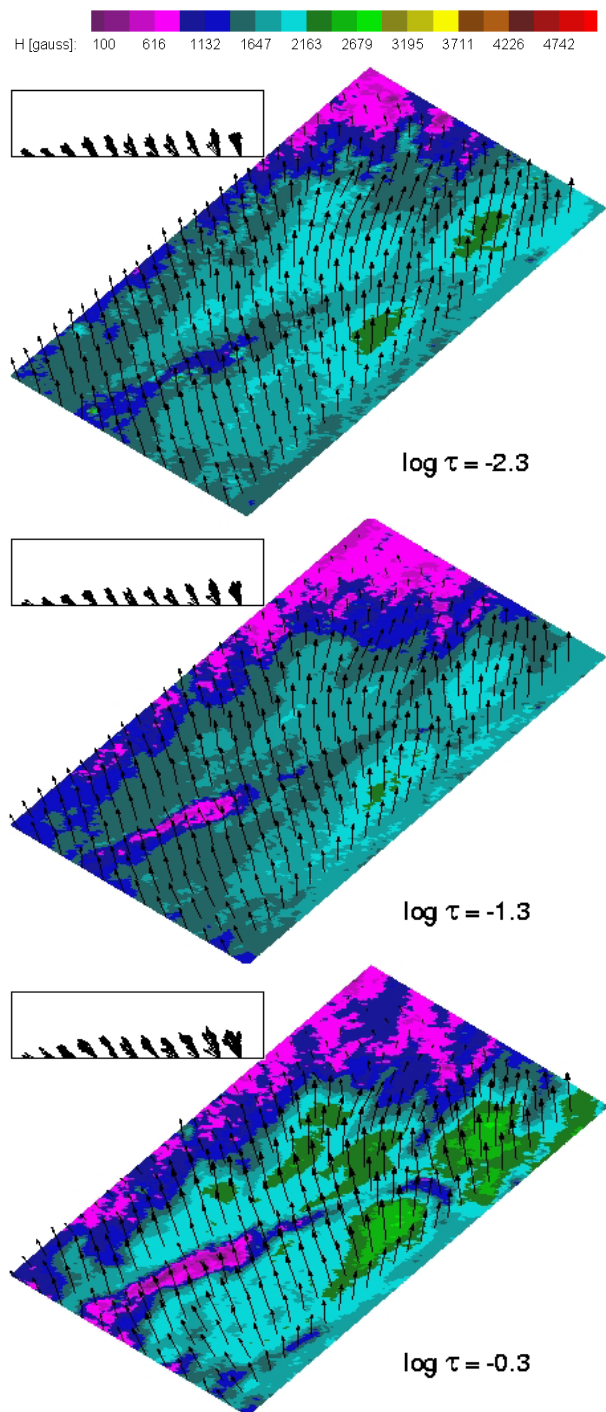


Obr. 8: Mapa velikosti a směru indukce magnetického pole v první oblasti.

protože zkoumám inklinaci nad jedním konkrétním bodem a ne inklinaci nějaké konkrétní siločáry, která se s výškou v penumbře pochopitelně zvyšuje.

5. ZÁVĚR

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že inverzí pozorovaných profilů jsme zjistily takovou konfiguraci magnetického pole a průběh teploty, které se plně shodují se současnými znalostmi.



Obr. 9: Mapa velikosti a směru indukce magnetického pole v druhé oblasti.

Tyto výsledky je ovšem nutno brát se značnou rezervou a to zejména co se týče některých jemných struktur.

LITERATURA

- Koza, J. (2003): Diplomová práce: Modelovanie časového vývoja slnečnej fotosféry
 Martínez Pillet, V. (1992): *Sol. Phys* **140**, 207
 Ruiz Cobo, B. a del Toro Iniesta, J.C. (1992): *Astrophys. J.* **398**, 375
 del Toro Iniesta, J.C. (2001): in *The dynamic sun*, eds. Hanslmeier, A., Messerotti, M., Veronig, A., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 18