Eruptívne javy v pokojnej atmosfére Slnka: príklad zjasnenia

František Tomasz, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, tomasz @astro.sk Ján Rybák, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, choc @astro.sk Aleš Kučera, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, akucera @astro.sk Werner Curdt, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau, SRN, curdt @linmpi.mpg.de Hubertus Wöhl, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg, SRN, hw @kis.uni-freiburg.de

Abstrakt

Príspevok na základe analýzy spektrálnych čiar formujúcich sa v hornej a dolnej časti prechodovej oblasti Slnka uvádza súvislosti medzi emisiami z týchto dvoch vrstiev a ich vzájomné ovplyvňovanie sa na hraniciach a vnútri supergranuly. Výsledkom analýzy je zistenie, že čím vyššiu aktivitu vykazuje daná oblasť, tým viac je ovplyvňovaná jej horná časť prechodovej vrstvy. Viackomponentné fitovanie spektrálnych čiar v oblastiach so zvýšenou aktivitou je nevyhnutné a poukazuje na to, že pozorujeme plazmu pohybujúcu sa smerom k nám a od nás. V pozorovaní časovného priebehu prechodovej oblasti vo vnútri supergranuly bol nájdený aktívny jav, ktorý sme identifikovali ako zjasnenie (blinker) a určili sme niektoré jeho parametre. Jeho priemer bol približne 11000km, doba trvania 9 minút, zvýšenie intenzity voči pokojnej oblasti bolo približne sedemnásobné.

1. ÚVOD

Problém ohrevu slnečnej koróny zamestnáva slnečných fyzikov už po desaťročia. Pochopenie tohoto fenoménu by nás posunulo o veľký kus dopredu v dobrodružstve za poznávaním najbližšej hvezdy. Ukazuje sa, že kľúčovú úlohu pri prenose energie zohráva prechodová oblasť nielen preto, že energia prúdiaca z nižších vrstiev do koróny musí prejsť cez túto oblasť, ale naviac je prechodová oblasť špecifická tým, že na relatívne malej výškovej škále

(oproti ostatným častiam atmosféry) nastáva vzostup teploty od 10^4 K na 10^6 K a prudký pokles hustoty. Presné fyzikálne mechanizmy, vďaka ktorým je teplota koróny vyššia ako teplota fotosféry, zatiaľ nepoznáme, hoci už bolo navrhnutých množstvo teórií (napr. Narain a Ulmschneider, 1990).

V prechodovej oblasti Slnka pozorujeme rôzne typy aktívnych javov. Jednými sú aj vysokorýchlostné prúdy plazmy - **eruptívne javy** (angl. explosive events), ktoré po prvýkrát pozoroval Brueckner a Bartoe (1983), a ktoré sú viditeľné v UV oblasti slnečného spektra. Tieto javy sa vyznačujú veľkým rozptylom rýchlostí, okolo 100km/s, teda plazma sa pohybuje smerom k pozorovateľovi ako aj od neho, čo spôsobí silné rozšírenie spektrálnej čiary. Zo štúdia eruptívnych javov vyplýva, ze pôvodcom tohto procesu môže byť magnetická rekonexia (napr. Innes a kol., 1997a,b).

Ďalším javom, ktorý sa pozoruje v prechodovej oblasti Slnka sú **zjasnenia** (angl. blinkers) (Harrison, 1997), ktoré boli zistené v Ďalekej UV oblasti spektra v hraniciach supergranuly pokojného Slnka. S použitím spektrometra CDS bolo pozorované zvýšenie intenzity spektrálnych čiar o 10–40%. Pomery intenzít čiar OIII, OIV a OV, v ktorých je zjasnenie najlepšie pozorovateľné, neukazujú významnú zmenu počas trvania javu. Z toho vyplýva, že vzrast intenzity nie je teplotný efekt, ale je spôsobený zvýšením hustoty plazmy.

Rozdiel medzi eruptívnym javom a zjasnením je v tom, že zatiaľ čo zjasnenie vykazuje značné zvýšenie intenzity, eruptívne javy sa prejavujú naopak v extrémnom rozšírení spektrálnej čiary. Fyzikálne parametre oboch javov sú uvedené v tabuľke 1.

Tento článok si kladie za cieľ preskúmať správanie sa pokojnej prechodovej vrstvy Slnka vo vnútri supergranuly a na ich hraniciach porovnávajúc spodnú a vrchnú časť prechodovej vrstvy. Vo vnútri supergranuly sa pokúsime nájsť aktívny jav, určiť jeho parametre, na základe ktorých potom určíme aký aktívny jav sme pozorovali.

2. ÚDAJE

Pozorovací materiál bol získaný pomocou dvojice prístrojov SUMER (Wilhelm a kol., 1995) a EIT (Delaboudiniere a kol., 1995) na družici SOHO. Spektrá pozorovanej oblasti boli nasnímané prístrojom SUMER a EIT sme využili na získanie celodiskových snímiek. Pozorovanie sa uskutočnilo 5. mája 1998 v čase od 8:25 UT do 13:15 UT. Súradnice stredu štrbiny spektrografu SUMER počas pozorovania boli -65,25" (S-J) a 223,3"-267,6" (V-Z). Rozmer štrbiny bol 0,3" × 120" (obr.1) a tak mala celková 'rastrovaná' oblasť rozmery 44,5" × 120". Snímky spektier sa robili s expozičnou dobou 14,25 s v okolí vlnovej dĺžky približne 1037 Å. Pozorovanie bolo vykonané v rámci programu JOP078 (Kučera a kol., 1999).

Zo súboru napozorovaných spektier šiestich čiar sme vybrali tri spektrálne čiary tvoriace sa v hornej a spodnej časti prechodovej oblasti. Vlnová dĺžka, oblasť a teplota formovania týchto spektrálnych čiar sú uvedené v tabuľke 2.

Spracovanie pozostávalo z redukcie údajov oboch prístrojov (EIT, SUMER). Z napozorovaných snímiek EIT sa odčítal temný tok, odstránilo sa mriežkovanie, urobila sa normalizácia filtrov a expozičného času a nakoniec korekcia odozvy pixelov. Redukcia spektier zo SUMERu pozostávala z korekcie mŕtvej doby, odstránenia 'flat-field-u', obrátenia a odstránenia deformácií (Teriaca, 2001; Rybák a kol., 1998; Rybák a kol., 2000). Po tomto spracovaní nasledovalo fitovanie troch vybraných spektrálnych čiar. Všetky čiary boli fitované súčasne, pričom každá z čiar jedným gaussovským profilom a konštantným pozadím. Na tento výpočet bol použitý program CFIT vykonávajúci minimalizáciu štvorcov odchýlok s relatívnym váhovaním údajov (Haugan, 1997). Na diagnostiku pozorovaných vrstiev a oblastí prechodovej oblasti pokojného Slnka sme použili nasledovné spektrálne

charakteristiky spektrálnych čiar:

- *I*⁰ centrálna intenzita,
- λ vlnová dĺžka,
- W gaussovská polšírka spektrálnej čiary,
- *I_c* intenzita kontinua ako aj

veličinu χ^2 , ktorá nám charakterizuje mieru presnosti fitovania spektrálnych čiar gaussovskými profilmi.

Vlnovú dĺžku λ sme pomocou známeho dopplerovského vzťahu $\Delta\lambda/\lambda = \upsilon/c$ prepočítali na dopplerovské rýchlosti υ .

3. VÝSLEDKY

Výška štrbiny nám umožnila na povrchu Slnka zaznamenať dve hranice supergranuly a jej vnútro. Počas pozorovania sa v oblasti pokojného vnútra supergranuly vyskytol mimoriadny jav (MJ), ktorý sa prejavil zmenou hodnôt všetkých spektrálnych charakteristík.

Ovplyvňovanie jednotlivých vrstiev, v ktorých sa tvoria dve čiary CII a čiara OVI sme určili zo vzájomných závislostí centrálnych intenzít. Zaujímalo nás ako vplýva plazma v jednej výškovej úrovni na inú, vyššie položenú oblasť prechodovej vrstvy. Boli zistené nasledujúce závislosti:

- Lineárna závislosť intenzít čiar CII1 a CII2 vo vnútri supergranuly, na jej hraniciach a počas MJ. Koeficient lineárnej závislosti pre jednu hranicu supergranuly bol 1,05, pre druhú hranicu 1,25, pre vnútro supergranuly bol tento koeficient 1,26 a pre MJ 0,9.
- Vývoj, ale aj veľkosť, dvoch hraníc supergranuly boli značne odlišné a analýza spektrálnych charakteristík tu odhalila vyššiu aktivitu (I_0, W) a pohyby (v dop) ako vo vnútri supergranuly. Bola pozorovaná väčšia súvislosť intenzít čiar CII a OVI na hranici supergranuly ako v jej vnútri, taktiež súvislosť intenzít čiar CII a čiary OVI počas MJ sa ukázala podstatne vyššia ako v okolitom pokojnom vnútri supergranuly. Intenzita, udávaná vo Wsr⁻¹m⁻ ²Å⁻¹, bola v čiare OVI v jednej hranici supergranuly v intervale hodnôt od 0,79 do 2,15, v čiare CII1 od 0,40 do 0,81 a v čiare CII2 od 0,45 do 0,94. V druhej hranici supergranuly boli intenzity čiar OVI, CII1 a CII2 v nasledujúcich intervaloch: 0,39 -2,00, 0,20 - 0,61, 0,23 - 0,67. Vo vnútri supergranuly boli hodnoty intenzít troch spektrálnych čiar menšie: od 0,08 do 0,68 (OVI), od 0,06 do 0,25 (CII1) a od 0,06 do 0,28 (CII2). Naopak najväčšie rozsahy intenzít boli namerané počas MJ: od 0,47 do 4,47 (OVI), od 0,22 do 0,92 (CII1) a od 0,26 do 0,93 (CII2). Aj v prípade rýchlostí sa pozorované štruktúry správali rôzne v rôznych čiarach. V jednej hranici supergranuly boli rýchlosti, merané v km/s, v čiare OVI v intervale od -17,58 do 14,95, v čiare CII1 od -16,13 do 20,00 a v čiare CII2 od -11,55 do 16,18; v druhej hranici supergranuly od -19,73 do 20,00 (OVI), od -9,76 do 20,91 (CII1) a od -10,44 do 20,00. Vo vnútri supergranuly sa ako v prípade intenzít namerali nižšie hodnoty rýchlostí: od -16,43 do 15,38 pre čiaru OVI od -5,18 do 19,44, od -8,60 do 15,71 pre čiaru CII1 a od -5,18 do 19,44 čiaru CII2. Pre oblasť MJ boli namerané takéto hodnoty rýchlostí: od -14,71 do 11,35 (OVI), od -12,27 do 1,13 (CII1) a od -9,65 do 3,35 (CII2).

Pre detailnejšiu analýzu pozorovaného mimoriadneho javu boli pripravené mapy charakteristík spektrálnej čiary OVI (I_0 , υ a W) a okrem toho i mapa χ^2 (obrázok 2). Na spektrálnych mapách charakteristík čiar vidíme trojnásobnú výraznú zmenu každého parametra približne v oblastiach s priestorovým ohraničením 63"-73" a časovým ohraničením 9.37-9.52 UT. Pre obe čiary CII1 a CII2 sú rozdielv medzi mimoriadnym javom a okolím oveľa menšie, čo je dôsledkom toho, že aktivita v oblasti, kde sa čiary CII tvoria, bola menšia. Na obrázkoch sú viditeľné tmavé a svetlé štruktúry približne na rovnakých miestach. Na mape rýchlostí sú kladné hodnoty svetlé a záporné tmavšie, na rozdiel od máp intenzity a gaussovskej polšírky, kde je to opačne, svetlejšie miesta predstavujú nižšie hodnoty, tmavšie vyššie. Prvé dve zvýšenia parametrov rýchlostí a gaussovskej polšírky sú veľmi

podobné. Tieto dve oblasti sú na mape intenzity menšie, t. j. vplyv aktívneho javu sa prejavil v prípade rýchlosti a gaussovskej polšírky vo väčšej oblasti, časová škála ostáva pri prvých dvoch zvýšeniach približne rovnaká pre všetky tri parametre. Tretie zvýšenie parametrov spektrálnych čiar je najzretelnejšie. Najprv nastáva prudké zvýšenie intenzity, rýchlosti a gaussovskej polšírky, potom tieto hodnoty pomaly klesajú a až na rýchlosť splynú s

okolím. Záverečná fáza vývoja aktívneho javu v rýchlostnej mape je odlišná. Tu rýchlosť prudko poklesne až do záporných hodnôt, čiže plazma sa začína pohybovať smerom k nám. Trvanie aktívneho javu bolo približne 9 minút, pri predpoklade, že bol sférický, mal priemer 11000km.

Trojnásobné prudké zmeny parametrov má na svedomí štrbina spektrografu, ktorá sa nachádzala nad tým istým miestom na povrchu celkovo trikrát. Keďže Slnko rotuje a naším cieľom bolo sledovať dlhodobo to isté miesto, bolo treba kompenzovať rotáciu posúvaním štrbiny, ktorá takto 'dobiehala' to isté miesto na slnečnom povrchu celkovo trikrát počas trvania MJ. Túto skutočnosť dokumentuje obrázok 3, na ktorom sú priebehy centrálnej intenzity I_0 , rýchlosti v a gaussovskej polšírky W čiary OVI v závislosti na polohe štrbiny. Vidíme, že zmena v parametroch nastala práve vtedy, keď sa štrbina posunula. Pri prvom posune štrbiny zaznamenávame najskôr zväčšenie gaussovskej polšírky a zvýšenie rýchlosti a až neskôr aj intenzity. Bezprostredne po druhom posune štrbiny registrujeme zvýšenie intenzity, rýchlosti a gaussovskej polšírky, neskôr aj s ďalším zvýšením hodnoty rýchlosti. Tesne pred tretím posunutím nastane najväčší vzostup rýchlosti a gaussovskej polšírky. Až následne po poslednom posune vidíme aj prudké zvýšenie intenzity.

Na mape χ^2 (obrázok 2 vpravo dole) vidieť detailný vývoj hodnôt tejto veličiny v čase a po výške štrbiny. Vyššie hodnoty znamenajú väčšie odchýlky trojkomponentného fitovania od pôvodného profilu, naopak nižšie hodnoty menšie odchýlky. Preto bolo potrebné pre veľké χ^2 urobiť dodatočné štvorkomponentné fitovanie.

Extrémne veľká hodnota $\chi^2 = 0.33$ vypočítaná z trojkomponentného fitu, ktorý bol nameraný počas vývoja mimoriadneho javu v oblasti 9,47 UT a 62" sa po štvorkomponentnom fite zmenšila na $\chi^2 = 0,12$, čo predstavuje pokles viac ako o 60% (obr.4). Pre tento fit vidíme, že je lepší štvorkomponentný fit ako trojkomponentný, preto pre veľké hodnoty χ^2 trojkomponentného fitovania je pre presnejší popis a výsledky vhodnejšie urobiť štvorkomponentný fit. Pri štvorkomponentnom fite bola čiara OVI fitovaná dvomi gaussovskými profilmi. Je to spôsobené pozorovaním oblasti, v ktorej sa plazma, emitujúca v čiare OVI (3×10^5 pohybuje smerom k nám aj od nás.čiary CII nebolo treba fitovať dvoma gaussovskými komponentami.

V čase približne 9,48 UT a pre polohu 68" na štrbine, je zreteľný pokles hodnoty χ^2 , t. j. menšia odchýlka fitu od nameraného profilu. Tieto profily boli fitované aj štyrmi gaussovskými profilmi, ale nedosiahla sa nijaká zmena oproti trojkomponentnému fitovaniu. štvorkomponentný a trojkomponentný fit v tomto prípade poskytol rovnakú hodnotu χ^2 - 0,01. Z toho vyplýva, že profily spektrálnych čiar trojkomponentného fitu, ktoré majú malú hodnotu χ^2 nie je potrebné fitovať štyrmi profilmi a pozorované miesto sa neprejavovalo dvojsmerovými prúdmi plazmy. Zo spektrálnej a priestorovej analýzy pozorovaného slnečného povrchu sme zistili nasledovné parametre mimoriadneho javu: doba trvania bola približne 9 minút, jeho priemer 11 000km, zvýšenie jasnosti vzhľadom na pokojnú oblasť bolo sedemnásobné v čiarre OVI a dopplerovský posun menší ako 20km/s.

4. ZÁVER

Porovnaním spektrálnych charakteristík získaných pozorovaním dvoch vrstiev prechodovej oblasti Slnka sme ukázali, že vplyv dolnej časti prechodovej vrstvy na hornú je tým väčší, čím aktívnejšie procesy prebiehajú v jednej z vrstiev. To bolo potvrdené pri hraniciach supergranuly ako aj pri pozorovaní javu, ktorý bol sprevádzaný zvýšeným uvoľnením energie. Lineárna závislosť oboch spektrálnych čiar CII v hraniciach a vo vnútri supergranuly ako aj počas MJ je spôsobená tým, že sa čiary tvoria pri rovnakej teplote a na tom istom mieste, čiže ak sa zmení spektálny profil jednej čiary, tak sa priamo úmerne zmení aj profil čiara. Ukázali sme, že trojkomponentné fitovane troch spektrálnych čiar je nedostatočné pre oblasti so zvýšenou aktivitou na povrchu Slnka. Preto je v prípade aktívnych oblastí nevyhnutné použiť štvorkomponentné fitovanie čiary OVI. Z toho vyplýva, že ak predpokladáme prostredie opticky tenké, čo je odôvoditeľné, pretože aj nafitované profily spektrálnych čiar majú gaussovský tvar, musí ísť o pozorovanie dvoch prúdov plazmy - jedného smerom k nám, druhého od nás. Z porovnania zistených vlastností skúmaného mimoriadneho javu s parametrami už napozorovaných aktívnych javov sme zistili, že nami pozorovaný jav bol zjasnenie.

POĎAKOVANIE

Práca vznikla s podporou Grantovej agentúry VEGA (grant VEGA 2/7229/20) a grantu Nemeckej vedeckej spoločnosti DFG (grant 436 SLK 113/7/01).

LITERATÚRA

Brueckner, G. E., Bartoe J.-D. E., 1983, Astrophysical Journal, 481, 500 Delaboudini?re, J.-P., Artzner, G. E., Brunaud, J. a EIT team, 1995, v The Soho Mission, ed. B. Fleck a V. Domingo, Kluwer, Dordrecht (Holandsko), 291

Fleck, B., 1999, v 'The Dynamic Sun', ed. A. Hanslmeier, M. Messerotti, A. Veronig, Kluwer, Dordrecht (Holandsko), 1

Harrison, R. A., 1997, Solar Physics 175, 467

Haugan S.V.H., 1997, CDS software note No. 47, version 1, http://solg2.bnsc.rl.ac.uk/software/notes.shtml

Innes, D. E., Brekke, P., Germerott, D., Wilhelm, K., 1997a, Solar Physics 175, 341

Innes, D. E., Inhester, B., Axford, W. I., Wilhelm, K., 1997b, Nature 386, 811

Kučera, A., Curdt, W., Fludra, A., Rybák, J., Wöhl, H.: 1999, v JOSO Annual Report 1998 ed. Antalová A., Balthasar H., Ku cera A., Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, Tatranská Lomnica, 149

Narain, U., Ulmschneider, P., 1990, Space Science Rev 54, 370 Rybák, J., Curdt, W., Kučera, A., Schüle, U., Wöhl, H., 1998, v Zborník referátov zo 14. celoštátneho slnečného seminára Stará Lesná, 1998, ed. B. Lukáč, SÚH, Hurbanovo, 84 Rybák, J., Curdt, W., Kučera, A., Schüle, U., Wöhl, H., 2000, v Zborník referátov z 15. celoštátneho slnečného seminára Stará Lesná, 2000, ed. B. Lukáč, SÚH, Hurbanovo, 68 Teriaca, L., 2001, Reduction and analysis of SUMER data,

http://www.linmpi.mpg.de/english/projekte/sumer/text/teriaca.html Wilhelm K., Curdt W., Marsch, E. a SUMER team, 1995, Solar Physics, 162, 189

Tabuľka 1. Porovnanie typických parametrov dvoch typov aktívnych javov, ktoré sú pozorované v prechodovej oblasti (Fleck, 1999).

	Zjasnenia	Eruptívne javy	
Intenzita	silné zjasnenie	malé zjasnenie	
Doba trvania	$6 - 40 \min$	$1-2\min$	
Rýchlosť tvorenia	$1.2 {\rm s}^{-1}$	$600 \mathrm{s}^{-1}$	
Dopplerov posun	$malý (\leq 20 km/s)$	veľký $(100 - 150 \text{km/s})$	
Priestorový rozmer	$6000 \ge 6000 \text{ km}$	$1500 \ge 1500 \text{ km}$	
Lokalizácia	hranice superganuly	zjasnenia na krajoch supergranuly	



Obrázok 1. Obrázok slnečného disku s vyznačením oblasti, v ktorej sa pohybovala štrbina spektrografu SUMER. Malý obrázok predstavuje výrez tejto oblasti s vyznačenou pozíciou štrbiny. Obrázok má rozmery 512 x 512 pixelov, osi x a y. Stĺpec vpravo ukazuje škálu intenzít vo W(sr $m^2 A$)⁻¹.

Tabuľka 2. Oblasti a teploty tvorenia skúmaných spektrálnych čiar. Pre skrátenie sú pri oboch čiarach CII uvedené aj skratky (CII1, CII2), ktoré sa budú používať v ďalšom texte. TR znamená prechodovú oblasť.

spektrálna čiara	vlnová dĺžka [Å]	oblasť formovania	teplota formovania
C II (CII1)	1036, 34	spodná časť TR	$3 \times 10^{4} \text{ K}$
C II (CII2)	1037,02	spodná časť TR	$3 \times 10^4 \text{ K}$
O VI	1037,61	vrchná časť TR	$3 \times 10^5 \text{ K}$



Obrázok 2. Dvojrozmerné mapy intenzít, gaussovských polšírok (ľavý stĺpec), rýchlostí a mapa veličiny χ^2 (pravý stĺpec) pre čiaru OVI počas MJ. Popis obrázka: x-ová os - výška štrbiny v oblúkových sekundách, y-ová os - čas v UT.



Obrázok 3. Zmeny charakteristík spektrálnej čiary OVI počas nami skúmaného mimoriadneho javu. Zreteľné sú tri zvýšenia spektrálnych charakteristík, ktoré boli spôsobené posunom štrbiny (okamihy posunu sú označené čiarkovanou zvislou čiarou). Štrbina sa pohybovala (skokom) vo východnom smere a vzdialenosť pozorovaného miesta od stredu disku narastala (prvý graf). Po odčítaní lineárneho trendu od 'skákania' dostávame relatívnu vzdialenosť štrbiny od žiadaného miesta (druhý graf). Od okamihu posunuti a štrbiny v čase 9,38 UT, keď nastalo prvé zjasnenie, sa štrbina posunula ešte dvakrát (o 9,43 a 9,47 UT) a bolo zaznamenané trojnásobné zjasnenie na povrchu Slnka. Popis osí: x-ová (čas v UT); y-ová, prvý graf: poloha štrbiny na disku počas MJ v oblúkových sekundách; y, druhý graf: vzdialenosť štrbiny od polohy na začiatku pozorovania; graf v strede: priebeh intenzity OVI počas MJ; druhý graf zo spodu: priebeh rýchlosti OVI počas MJ v čiare OVI; posledný graf: priebeh gaussovskej polšírky čiary OVI.



Obrázok 4. Porovnanie fitovania profilov čiar CII1, CII2 a OVI tromi (vľavo) a štyrmi (vpravo) gaussovskými profilmi. Veličina χ^2 mala v prvom prípade hodnotu 0,33 a v druhom len 0,12. Histogramom je vykreslený pôvodný fitovaný profil, plnou čiarou výsledný fit, bodkovanou čiarou vypočítané gaussovské profily a čiarkovonou čiarou rozdiel medzi pôvodným a nafitovaným profilom. Na x-ovej osi je vlnová dĺžka, na y-ovej osi intenzita.