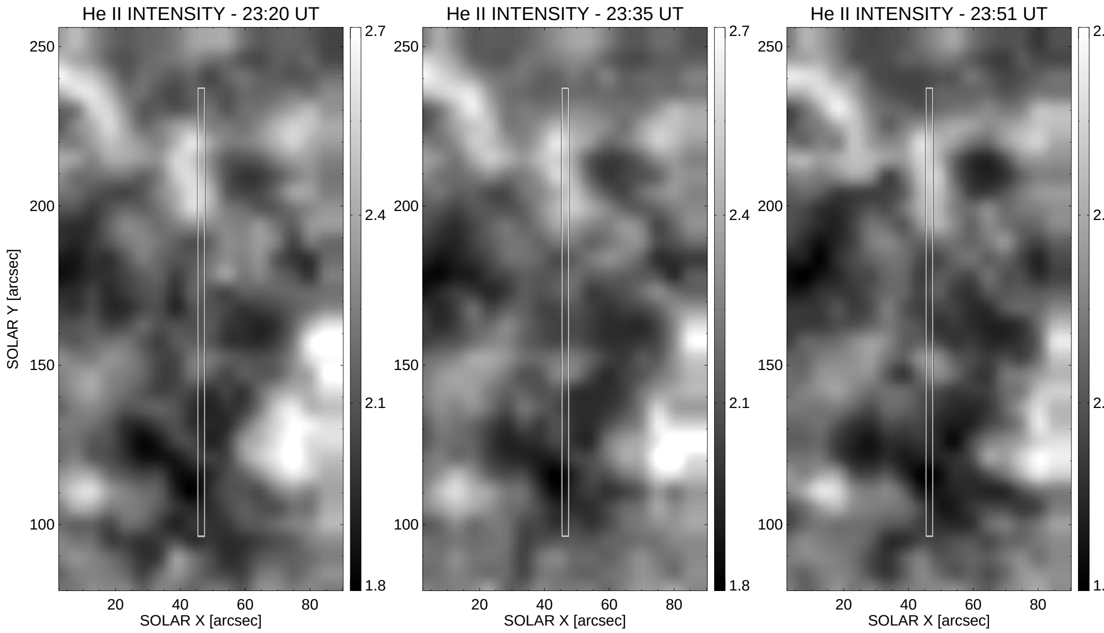
Eruptívny jav v prechodovej vrstve pozorovaný prístrojom CDS/SOHO

P. Gömöry, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, gomory@astro.sk
J. Rybák, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, choc@astro.sk
A. Kučera, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, akucera@astro.sk
W. Curdt, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau, Germany, curdt@linmpi.mpg.de
H. Wöhl, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg, Germany, hw@kis.uni-freiburg.de

Abstrakt
V tomto príspevku prezentujeme analýzu pozorovania pokojnej slnečnej atmosféry v oblasti hranice supergranuly pomocou prístroja CDS/SOHO v spektrálnych čiarach He I 584.33 Å (2,0.10^4 K; chromosféra) a O V 629.73 Å (2,5.10^5 K; prechodová vrstva). Počas pozorovania, ktorého celková dĺžka bola približne 29 min., bol zaregistrovaný eruptívny jav. Určenie fyzikálnych parametrov eruptívneho javu a jeho následná identifikácia sú hlavnými cieľmi tejto práce. Dĺžka trvania eruptívneho javu bola 1 min. a jeho prítomnosť bola zaznamenaná len v spektrálnej čiare prechodovej vrstvy. Všetky spektrálne profily čiary O V boli v čase trvania eruptívneho javu posunuté smerom do modrej oblasti spektra a maximálna hodnota dopplerovskej rýchlosti bola určená na -14.7 km s^{-1}. Počas trvania eruptívneho javu bolo zaznamenané výrazné zvýšenie intenzity spektrálnej čiary O V. Na základe určených parametrov môžeme detekovaný eruptívny jav stotožniť s explozívnym javom ("explosive event") v prechodovej vrstve, ktorého pozorovanie však bol ovplyvnené nízkou priestorovou a spektrálnou rozlišovacou schopnosťou prístroja CDS/SOHO.

1. ÚVOD

Prechodová vrstva slnečnej atmosféry, oddeľujúca chromosféru od koróny, je charakterizovaná prudkým nárastom teploty plazmy, ktorá sa v tejto oblasti mení z 25 000 K až na 10^6 K v rozmedzí len niekoľko sto kilometrov. V tejto časti slnečnej atmosféry dochádza aj k pozvoľnému poklesu koncetrácie voľných elektrónov (Mariska, 1992). Uvedené zmeny stavových veličín sú príčinou toho, že plazma prechodovej vrstvy slnečnej atmosféry žiari hlavne v ultrafialovej (UV: 1200 Å - 2000 Å) a extrémne ultrafialovej (EUV: 100 Å - 1200 Å) oblasti elektromagnetického spektra a že v tejto oblasti dominuje tlak magnetického poľa nad tlakom plazmy. Zlepšovanie predstavy o štruktúre prechodovej vrstvy preto úzko súvisí s postupne sa zdokonaľujúcim statickým modelom magnetického poľa Slnka (Gabriel, 1976; Dowdy a kol., 1986; Peter, 2001). Už prvé pozorovania Slnka v UV a EUV oblasti elektromagnetického spektra družicami Skylab, Solar Maximum Mission a prístrojom NRL High-Resolution Telescope and Spectrograph však naznačili, že v prechodovej vrstve sa vyskytuje množstvo maloškálových a krátkotrvajúcich dynamických javov. Po štarte družice Solar and Heliospheric Observatory (SOHO; Fleck a kol., 1995) boli získané nové možnosti pre štúdium týchto dynamických javov s veľkou priestorovou, časovou a spektrálnou rozlišovacou schopnosťou. Pozorovania prístrojom Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS/SOHO; Harrison a kol., 1995) odhalili existenciu zjasnení, známych ako záblesky ("blinkers"), ktorých dynamika sa najvýraznejšie prejavuje v spektrálnych čiarach tvoriacich sa pri teplotách charakteristických pre prechodovú vrstvu (Harrison, 1997). Iným typom maloškálových a krátkotrvajúcich dynamických javov v prechodovej vrstve sú explozívne javy ("explosive events"), ktoré boli objavené prístrojom NRL HRTS (Brueckner a Bartoe, 1983). Ich prítomnosť bola neskôr definitívne potvrdená (Innes a kol., 1997) pozorovaniami spektrometrom Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation (SUMER/SOHO; Wilhelm a kol., 1995). Oba typy



Obrázok 1. Znázornenie polohy štrbiny spektrometra NIS a tvaru chromosférických slnečných štruktúr v jej okolí na začiatku (ľavý obrázok), v strede (stredný obrázok) a na konci (pravý obrázok) pozorovania. Stred štrbiny je v súradniciach x = 46,4"; y = 167,1". Jednotlivé spektroheliogramy boli získane prístrojom EIT/SOHO v spektrálnej čiare He II 304 Å (T ∼ 8.10^4 K). Časy pozorovaní sú uvedené nad obrázkami. Hodnoty intenzít v jednotkách W $m^{-2}sr^{-1}Å^{-1}$ sú uvedené v logaritmickej škále. [solar x = x-ová súradnica; solar y = y-ová súradnica]

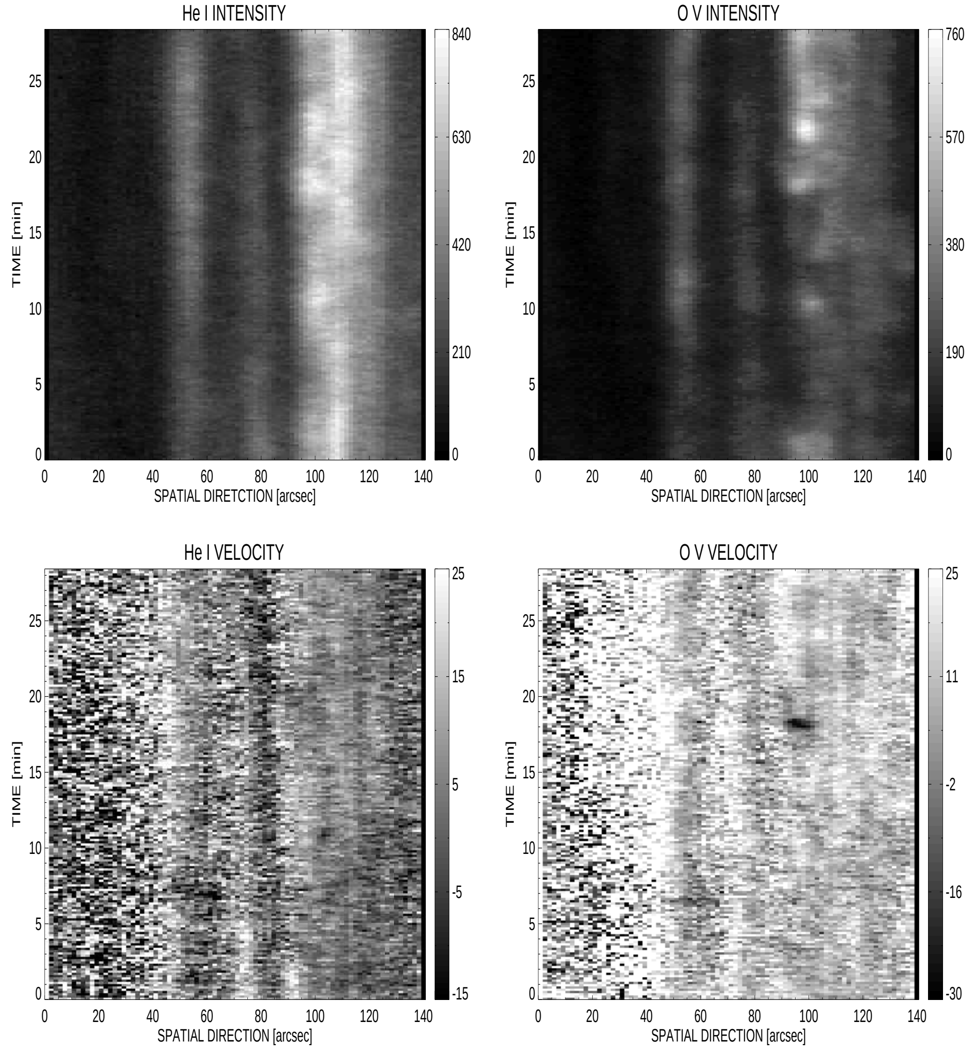
dynamických javov v prechodovej vrsve však neboli nikdy pozorované tým istým prístrojom. Tento fakt spôsobuje komplikácie pri vzájomnom porovnávaní fyzikálnych parametrov jednotlivých javov, ako aj pri určovaní ich vzájomných súvislostí. V tejto práci sa preto budeme venovať možnosti pozorovania explozívnych javov prístrojom CDS.

2. DÁTA A ICH REDUKCIA

Použitý pozorovací materiál bol získaný pomocou spektrometra CDS/NIS 14. mája 1998 v čase od 23:25 UT do 23:53 UT ako súčasť pozorovacieho programu JOP 78 (Kučera a kol., 1999). Na pozorovanie pokojnej slnečnej atmosféry v blízkosti stredu slnečného disku boli v rámci tohoto programu vybrané spektrálne čiary He I 584,33 Å ($2{,}0.10^4$ K; chromosféra) a O V 629,73 Å ($2{,}5.10^5$ K; prechodová vrstva). Použitá štrbina spektrometra mala veľkosť 2" × 240". Bola orientovaná v smere sever-juh a jej stred bol v súradniciach x = 46,4"; y = 167,1". Poloha štrbiny a tvar jednotlivých slnečných štruktúr v jej okolí na začiatku, v strede a na konci pozorovania je znázornený na obrázku 1. Celkovo bolo získaných 190 obrazov štrbiny s expozičným časom 5 s a kadenciou 9,1 s. Všetky dáta boli získané jednorozmerným sekvenčným pozorovacím módom, pri ktorom sa štrbina spektrometra udržiavala na pevných heliografických súradniciach. Takto bol získaný 1729 s dlhý časový vývoj vybraného miesta pokojnej slnečnej atmosféry. Keďže slnečná rotácia, ktorej rýchlosť je ∼ 9" za hodinu, nebola pri pozorovaní kompenzovaná, dochádalo počas pozorovania k posunu jednotlivých slnečných štruktúr pod štrbinou. Výsledná pozorovaná oblasť mala preto rozmery 141" (sever-juh) × 4,4" (východ-západ).

Získaný spektroskopický materiál bol korigovaný o všetky známe prístrojové efekty spektrometra CDS/NIS (napr. odstránenie kozmického žiarenia, rotácia a náklon spektra, CCD "flatfield", vypálenie mikrokanálovej platne, určenie šumu)[1], ktoré ovplyvňujú a znižujú kvalitu nameraných dát. Následne boli dáta prevedené do fyzikálnych jednotiek: intenzity do erg $cm^{-2}s^{-1}ster^{-1}Å^{-1}$ a rýchlosti na km s^{-1}. Po vykonaní základnej redukcie boli všetky spektrálne profily aproximované jednokomponentným gaussovským profilom (opticky tenké spektrálne čiary). Stanovenie nulového bodu dopplerovských rýchlostí bolo určené na základe laboratórnych vlnových dĺžok meraných spektrálnych čiar (Macpherson a Jordan, 1999) pričom do výpočtu bol zahrnutý aj známy, priemerný červený posun spektrálnych čiar prechodovej vrstvy (Peter a Judge, 1999). Na ďalšiu analýzu boli vybrané len spektrálne dáta, ktorým zodpovedala hodnota parametra χ^2 (vyjadruje nepresnosť aproximácie spektrálnych profilov Gaussovou funkciou) menšia ako 10 $erg^2cm^{-4}s^{-2}ster^{-2}Å^{-2}$.

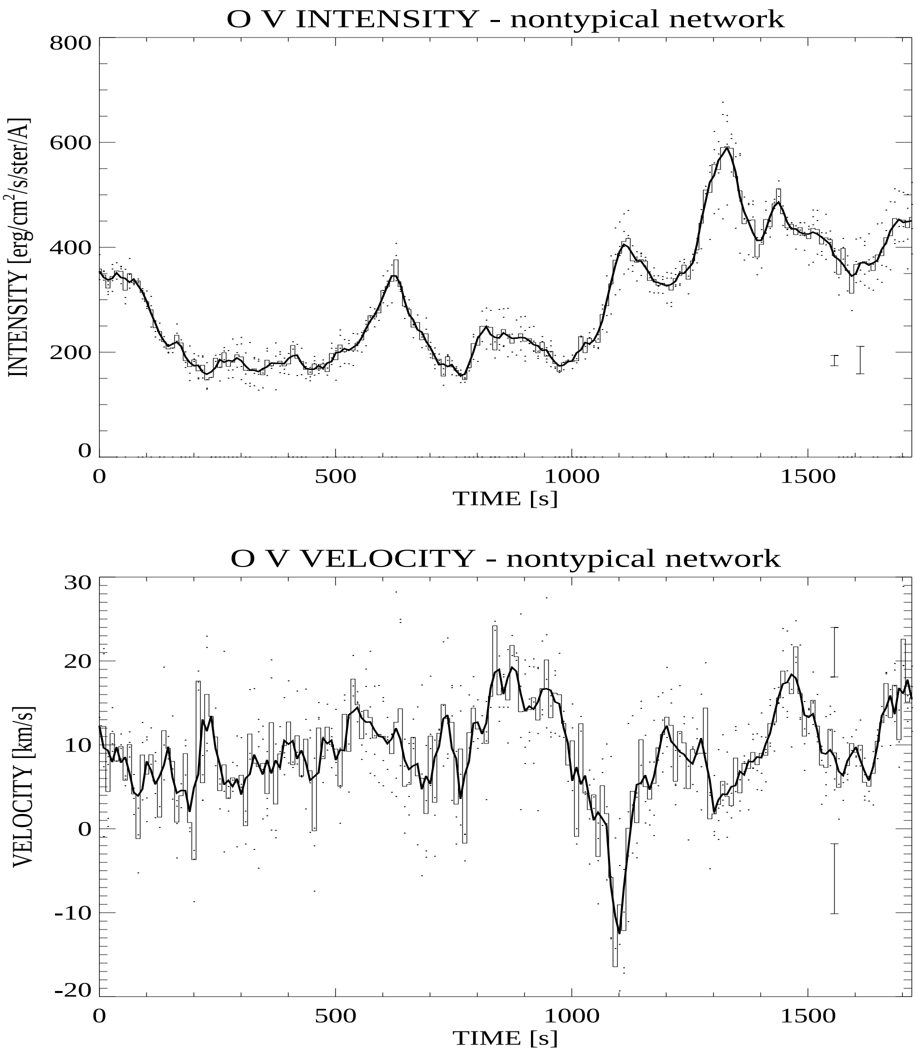
[1] Viac informácií: `http://solg2.bnsc.rl.ac.uk`



Obrázok 2. Dvojrozmerné časovo-priestorové mapy intenzít a dopplerovských rýchlostí spektrálnych čiar He I a O V. Horizontálne osi znázorňujú výšku štrbiny v oblúkových sekundách. Vertikálne osi popisujú časový vývoj pozorovaných štruktúr. Hodnoty intenzít spektrálnych čiar sú uvedené v erg $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}\mathrm{ster}^{-1}\text{Å}^{-1}$ a hodnoty dopplerovských rýchlostí v km s^{-1}. Kladné hodnoty rýchlostí odpovedajú pohybu hmoty smerom k povrchu Slnka a záporné hodnoty smerom k pozorovateľovi. [intensity - intenzita spektrálnej čiary; velocity - dopplerovská rýchlosť; spatial direction - výška štrbiny; time - čas]

3. VÝSLEDKY

Získané dvojrozmerné časovo-priestorové mapy intenzít a dopplerovských rýchlostí spektrálnych čiar He I a O V zobrazujúce emisiu a makroskopický pohyb plazmy v chromosfére a prechodovej vrstve sú znázornené na obrázku 2. Horizontálne osi všetkých máp vyjadrujú zmeny po výške štrbiny a vertikálne osi popisujú časový vývoj jednotlivých spektrálnych parametrov. Keďže slnečná rotácia nebola počas pozorovania kompenzovaná popisujú vertikálne osi aj priestorové rozloženie slnečných štruktúr počas pozorovania. Na dvojrozmernej mape dopplerovskej rýchlosti spektrálnej čiary O V (obr. 2; spodný pravý panel) je v oblasti medzi 95” a 101” (oblasť odpovedajúca 4 pixelom na detektore) po výške štrbiny v čase medzi 17,7 min až 18,9 min viditeľný výrazný pohyb hmoty smerom k pozorovateľovi, ktorý však nebol zaregistrovaný v časových vývojoch spektrálnych parametrov chromosférickej čiary He I. Časť hranice supergranuly, ktorá bola ovplyvnená týmto maloškálovým dynamickým javom, vykazuje navyše výrazné zmeny intenzity spektrálnej čiary O V. V ďalšom texte ju preto budeme označovať názvom *netypická hranica supergranuly.* Na obrázku 3 je znázornený časový vývoj intenzity (horný panel) a dopplerovskej rýchlosti (dolný panel) spektrálnej čiary O V v oblasti netypickej hranice supergranuly. Tenkými histogramami sú zobrazené priemerné časové priebehy spektrálnych parametrov. Tieto boli získané ako aritmetické priemery pôvodných hodnôt, ktoré boli zaznamenané jednotlivými riad-



Obrázok 3. Časový vývoj intenzity (hore) a dopplerovskej rýchlosti (dole) spektrálnej čiary O V v oblasti netypickej hranice supergranuly. V časoch medzi 1064 s až 1138 s je vo vývoji dopplerovskej rýchlosti zretelne viditeľný maloškálový dynamický jav. Bodkami sú znázornené pôvodné hodnoty zaznamenané jednotlivými pixelmi detektora. Histogramy znázorňujú priemerné časové vývoje, ktoré boli vyhladené kĺzavým priemerom troch bodov (hrubé čiary). Chybové intervaly znázorňujú typické nepresnosti, ktoré boli získané pri aproximácii spektrálnych profilov Gaussovou funkciou a pri priemerovaní pôvodných dát. Kladné hodnoty dopplerovskej rýchlosti zodpovedajú pohybu hmoty smerom k povrchu Slnka, záporné hodnoty popisujú pohyb smerom k pozorovateľovi. [O V INTENSITY (VELOCITY) nontypical network - časový vývoj intenzity (dopplerovskej rýchlosti) spektrálnej čiary O V v oblasti netypickej hranice supergranuly; time - čas; intensity - intenzita; velocity - dopplerovská rýchlosť]

kami detektora v rozsahu 95" až 101" (na obr. 3 znázornené bodkami). Nepresnosť pri určovaní priemerných hodnôt je na obrázku 3 znázornená druhým (v prípade rýchlosti dolným) chybovým intervalom. Prvý (respektíve horný) chybový interval na obrázku 3 znázorňuje typickú nepresnosť určenú pri aproximácii jednotlivých spektrálnych profilov Gaussovou funkciou. Priemerné vývoje spektrálnych parametrov boli navyše vyhladené kĺzavým priemerom troch bodov (obr. 3; hrubá čiara). Uvedené časové vývoje spektrálnych parametrov čiary O V boli použité na určenie základných fyzikálnych parametrov skúmaného dynamického javu. Dĺžka trvania eruptívneho javu bola 74 s ($\sim$1 min). Za túto dobu došlo k posunu slnečných štruktúr pod štrbinou spektrografu (spôsobené nekompenzovanou slnečnou rotáciou) o 0,2", čo je oveľa menej ako šírka použitej štrbiny. Základná hodnota intenzity spektrálnej čiary O V v oblasti netypickej hranice supergranuly bola $\sim$180 erg cm^{-2}s^{-1}ster^{-1}Å^{-1}. Počas počiatočnej fázy trvania eruptívneho javu bolo zaznamenané zvýšenie intenzity spektrálnej čiary O V o 120% v porovnaní so základnou hodnotou. Následne došlo k poklesu intenzity spektrálnej čiary O V na novú základnú hodnotu $\sim$320 erg cm^{-2}s^{-1}ster^{-1}Å^{-1} po ktorom boli detekované dve nové opakované zjasnenia. V týchto zjasneniach došlo k zvýšeniu intenzity spektrálnej čiary O V o 80%, respektíve 50%, v porovnaní s novou základnou hodnotou. Maximálna hodnota dopplerovskej rýchlosti dosiahnutá počas trvania eruptívneho javu bola - 14,7 km s^{-1}. V dobe existencie eruptívneho javu bol zaznamenaý výlučne pohyb hmoty smerom k pozorovateľovi. Na optimálnu aproximáciu všetkých spektrálnych profilov čiary O V, ktoré zodpovedali miestu a času trvania eruptívneho javu, bolo postačujúce použitie jednej gaussovskej funkcie. Ukázalo sa teda, že napriek vysokému pomeru signál/šum nie je spektrometer CDS schopný detekovať dvojkomponentný charakter spektrálnych čiar prechodovej vrstvy na ktorý prvý raz upozornili Kjeldseth-Moe a Nicolas (1977).

4. DISKUSIA A ZÁVER

V prechodovej vrstve pokojnej slnečnej atmosféry sa vyskytuje veľké množstvo maloškálových dynamických javov, ktoré je možné rozdeliť do dvoch hlavných skupín: explozívne javy (Brueckner a Bartoe, 1983) a záblesky (Harrison, 1997). V súčasnej dobe však stále nie je isté či, a ak áno ako, tieto javy medzi sebou súvisia. Po porovnaní dát z prístrojov SUMER, TRACE a MDI Ryutova a Tarbell (2000) zistili, že zvýšenie intenzity vyžarovania spektrálnych čiar prechodovej vrstvy počas trvania záblesku môže byť spôsobené zostupnými šokmi, kým explozívne javy môžu mať svoj pôvod v nestabilitách vznikajúcich po prechode zostupných šokov. Na základe tohoto zistenia je pravdepodobné, že záblesky a explozívne javy medzi sebou nejako súvisia, pričom ich vznik je ale spôsobený rôznymi fyzikálnymi mechanizmami. V úplnom rozpore s týmito závermi sú výsledky získané Marikom a Erdélyim (2002), ktorý na základe dvojrozmernej numerickej simulácie popísali vznik zábleskov a explozívnych javov tým istým fyzikálnym mechanizmom, magnetickou rekonexiou. To by naznačovalo, že záblesky sú v skutočnosti explozívne javy pozorované pri nízkej priestorovej a spektrálnej rozlišovacej schopnosti prístroja CDS. Mechanizmus magnetickej rekonexie použili na vysvetlenie vzniku zábleskov a explozívnych javov aj Chae a kol. (2000). V tomto prípade však rôzne typy maloškálových dynamických javov vznikajú ako dôsledok rekonexie magnetických siločiar s rôznou topológiou. Na definitívne určenie vzájomného prepojenia zábleskov a explozívnych javov je nutné pozorovať oba typy dynamických javov tým istým prístrojom.

Porovnanie charakteristických fyzikálnych vlastností zábleskov (Harrison, 1997) a explozívnych javov (Innes a kol., 1997) s parametrami nami pozorovaného eruptívneho javu ukázalo, že dĺžka trvania eruptívneho javu je typická pre explozívne javy. Detekcia opakovaných zjasnení v spektrálnej čiare prechodovej vrstvy je taktiež typická pre explozivne javy. Nízka maximálna hodnota dopplerovskej rýchlosti zaznamenaná v eruptívnom jave (- 14,7 km s^{-1}) je typická pre záblesk. Tento parameter však mohol byť ovplyvnený širokou štrbinou spektrometra (nízky faktor pokrytia) ako aj efektom projekcie rýchlosti pohybu do smeru rovnobežného so smerom zorného lúča. Pôvodná maximálna hodnota dopplerovskej rýchlosti preto mohla byť výrazne vyššia. Všetky spektrálne profily čiary O V ovplyvnené eruptívnym javom boli posunuté výlučne do modrej časti elektromagnetického spektra. Tento fakt nie je zlúčiteľný s typickými vlastnosťami explozívnych javov. Pri pozorovaní však bola štrbina spektrometra stále udržiavaná na pevných heliografických súradniciach, čo mohlo spôsobiť, že priemet druhej zložky obojsmerného prúdu plazmy sa nezobrazil na štrbinu spektrometra. Na druhej strane, priestorový rozmer ($\sim$ 7000 km) eruptívneho javu a hodnota prvotného zvýšenia intenzity vyžarovania spektrálnej čiary O V počas jeho trvania sú typické pre záblesky. Na základe týchto výsledkov môžeme stotožniť pozorovaný eruptívny jav s explozívnym javom, ktorý bol ale pozorovaný pri nízkej rozlišovacej schopnosti prístroja CDS. Rozdiely medzi parametrami pozorovaného dynamického javu a parametrami typických explozívnych javov mohli byť navyše spôsobené tým, že väčšina explozívnych javov je pozorovaná pomocou spektrálnych čiar formujúcich sa pri nižších teplotách ako spektrálna čiara O V. Detekcia explozívneho javu spektrometrom CDS teda naznačuje, že tento prístroj je vhodný pre ďalší výskum maloškalových dynamických javov v prechodovej vrstve.

POĎAKOVANIE

Práca vznikla s podporou Grantovej agentúry VEGA (grant VEGA 2/3015/23).

LITERATÚRA

Brueckner, G. E., Bartoe, J. D. F. 1983, ApJ, 272, 329
Chae, J., Wang, H., Goode, P. R., Fludra, A., Schüle, U. 2000, ApJ 528, 119
Dowdy, J. F., Rabin, D., Moore, R. L. 1986, Solar Phys., 105, 35
Fleck, B., Domingo, V., Poland, A. I. 1995, Solar Physics, 162, 1
Gabriel, A. H. 1976, Phil. Trans. Roy. Soc. London A281, 339
Harrison, R. A. a CDS kolektív 1995, Solar Physics, 162, 233
Harrison, R. A. 1997, Solar Physics, 175, 467
Innes, D. E., Brekke, P., Germerott, D., Wilhelm, K. 1997, Solar Physics, 175, 341
Kjeldseth-Moe, O., Nicolas, K. R. 1977, ApJ 211, 579
Kučera, A., Curdt, W., Fludra, A., Rybák, J., Wöhl, H. 1999, JOSO Anual Report 1998, Astronomical Institute of Slovak Academy of Sciences, Tatranská Lomnica, 149
Macpherson, K. P., Jordan, C. 1999, Mon. Not. R. Astronom. Soc. 308, 510
Marik, D., Erdélyi, R. 2002, A&A 393, 73
Mariska, J. T. 1992, in 'The Solar Transition Region', Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain
Peter, H., Judge, P. G. 1999, ApJ 522, 1148
Peter, H. 2001, A&A, 374, 1108
Ryutova, M. P., Tarbell, T. D. 2000, ApJ 541, 29
Wilhelm, K. a SUMER kolektív 1995, Solar Physics, 162, 189