

Variácie spektrálnych charakteristík čiary $H\alpha$ vo vzťahu k „bright mottle“ v slnečnej chromosfére

M. Bodnárová, *Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica,*
mbodnarova @astro.sk

D. Utz, *Centre for mathematical Plasma Astrophysics - KU Leuven, B-3001*
Leuven,

Belgium, Instituto de Astrofísica de Andalucía IAA-CSIC, Es-18008 Granada,
Spain

Abstrakt:

Skúmali sme možné spektroskopické prejavy prenosu energie do chromosféry sledovaním časových variácií rýchlosti, intenzity a dopplerovského posunu profilu spektrálnej čiary $H\alpha$. Približný profil spektrálnej čiary $H\alpha$ bol odvodený na základe pozorovaní v piatich bodoch profilu, získaných za pomoci Lyotového filtra na Holandskom otvorenom teleskope. Študovali sme súmiestne chromosférické (bright mottles) a fotosférické štruktúry (bright points), ktoré by mohli byť kauzálne spojené s pozorovanými variáciami skúmaných spektrálnych charakteristík. Prednostne sme sa zamerali na vyšetrenie periodicity zistených oscilácií a ich možného vzťahu k vývoju pozorovaných chromosférických a fotosférických štruktúr.

1. ÚVOD

Problém ohrevu slnečnej chromosféry a koróny je jedným z najviac študovaných v slnečnej fyzike. Postupne boli navrhnuté rôzne mechanizmy, ktoré by teoreticky mohli vysvetliť vysoké teploty pozorované v riedkych oblastiach slnečnej atmosféry. V súčasnosti sa za najhorúcejších kandidátov ich ohrevu považujú magnetická rekonexia (Parker, 1988; Priest a Schrijver, 1999; Fujimoto, Shinohara, a Kojima, 2011) alebo magneto-hydrodynamické vlny (Alfvén, 1947; Osterbrock, 1961; Roberts, 2000; Erdélyi a Fedun, 2007).

Magneto-hydrodynamické vlny sa delia na: rýchle a pomalé magneto-akustické vlny a na Alfvénové vlny. Pri šírení magneto-akustických vln dochádza k zmenám hustoty plazmy a k jej pohybu, čo môže spôsobiť zmeny v intenzite šírenia a dopplerovské posuny spektrálnych čiar (Mathioudakis, Jess, a Erdélyi, 2013). Alfvénové vlny sú nestlačitelné, sú schopné prechádzať slnečnou atmosférou bez rozptylu (Ofman, 2002) a pri ich prechode nedochádza k zmenám hustoty plazmy, ktoré by sa mohli prejavovať periodickými zmenami intenzity a dopplerovskej rýchlosti (Jess a kol., 2009; Mathioudakis, Jess, a Erdélyi, 2013). Alfvénové vlny šíriace sa pozdĺž naklonenej magnetickej silotrubic sa môžu prejavovať periodickými variáciami netepelného

rozšírenia spektrálnej čiary a teda by mohli byť detegovateľné v podobe oscilácií polovlny v polovlnke profilu spektrálnej čiary (Zaqarashvili, 2003).

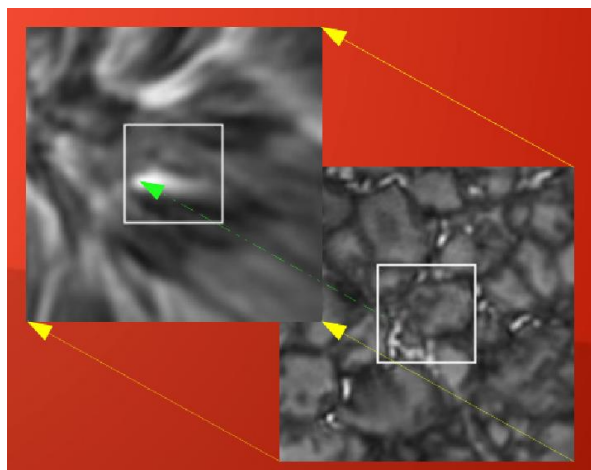
V dynamickej fotosfére môže dôjsť k vzniku magneto-hydrodynamických vln, ktoré sa potom môžu šíriť do chromosféry a koróny (Erdélyi, 2006a; Erdélyi, 2006b). Podľa Hansteena a De Pontieu (2006) formovanie výtriskov v spojitosti s dynamickými fibrilami, šmottles a spikulami môže byť vyvolané magneto-akustickými vlnami, ktoré presiakajú do chromosféry v dôsledku konvektívnych prúdov vo fotosfére a globálnych oscilácií (p-mód).

V práci sme študovali časový vývoj spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary $H\alpha$ (intenzita, rýchlosť profilu spektrálnej čiary a dopplerovská rýchlosť) vo vzťahu k dynamike štruktúr vo fotosfére (jasné body v G-páse) a v chromosfére (šbright mottles).

2. DÁTA

V práci sme použili súbory speklovaných snímkov (Sütterlin a kol., 2001) pokojnej slnečnej fotosféry v G-páse (430 nm) a chromosféry v spektrálnej čiare $H\alpha$ (jadro: $\lambda_c = 656,3$ nm; krídla: $\lambda = \lambda_c \pm 0,035$ nm a $\lambda = \lambda_c \pm 0,07$ nm) a v spektrálnej čiare Ca II H (396,9 nm), ktoré boli získané simultánne pomocou Holandského otvoreného teleskopu (DOT -Dutch Open Telescope)

(Rutten a kol., 2004). V-etyky súbory snímok boli získané 19. októbra 2005 v ase 09:55 -11:05 UT z oblasti blízko centra slne ného disku pri dobrých pozorovacích podmienkach, a pozostávajú zo 142, resp. 71 snímok, s kadenciou 30 s, resp. 60 s. Každá snímka má ve kos 1112×818 pixelov a priestorová káku 0,071 oblúkových sekúnd na pixel. Na obr. . 1. sú znázornené výseky zo snímok v G-páse v jadre spektrálnej iary H .



Obr. . 1.: H adanie vz ahov medzi trukturami vo fotosfére (G-pás; vpravo dole) a v chromosfére (H ; v avo hore).

3. SPEKTRÁLNE CHARAKTERISTIKY SPEKTRÁLNEJ IARY H

Simultánne snímky tej istej oblasti pokojného Slnka v piatich bodoch profilu spektrálnej iary H sme vyufili na dedukciu profilu (prevzorkovaného na 1400 bodov) spektrálnej iary H za pomoci algoritmu vyvinutého Kozom a kol. (2013). Tento algoritmus prekladá piatimi známymi bodmi profilu iary H polynóm 4-stup a na základe predpokladu, že priemerný profil spektrálnej iary H zodpovedá atlasovému profilu iary H .

Takto odvodený profil spektrálnej iary H sme poufili na výpo et tyroch vybraných spektrálnych charakteristík spektrálnej iary H . Prvou skúmanou spektrálnou charakteristikou bola intenzita v jadre profilu spektrálnej iary H I_c , definovaná ako minimálna intenzita v profile iary. Druhou skúmanou spektrálnou charakteristikou bola rčka profilu spektrálnej iary H w_p meraná pri intenzite I_p definovanej vz ahom

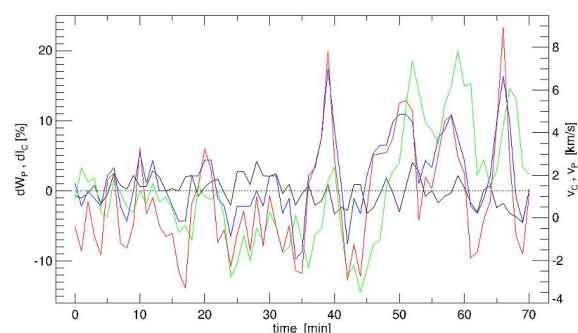
$$I_p = \frac{\langle I_{-0.7}, I_{+0.7} \rangle + I_c}{2}$$

kde $\langle I_{-0.7}, I_{+0.7} \rangle$ je priemerná intenzita na krídlach profilu spektrálnej iary H vypo ítaná z intenzít pre vlnové d flky $\lambda = \lambda_c \pm 0,07$ nm. Tre ou skúmanou spektrálnou charakteristikou bola rýchlos v_c odvodená na základe dopplerovského posunu centra profilu spektrálnej iary H . Ttvrtou skúmanou spektrálnou

charakteristikou bola rýchlos v_p odvodená z dopplerovského posunu profilu spektrálnej iary H na základe postupu popísaného v práci Scherrera a kol. (1995), kde je rýchlos v_p odvodená (pomocou kalibra nej krivky) na základe hodnoty parametra definovaného vz ahom $\beta = (F1 + F2 - F3 \text{ ó } F4)/(F1 \text{ ó } F3)$ pre $(F1 + F2 - F3 \text{ ó } F4) > 0$ a $\beta = (F1 + F2 - F3 \text{ ó } F4)/(F4 \text{ ó } F2)$ pre $(F1 + F2 - F3 \text{ ó } F4) \leq 0$, kde F_1, F_2, F_3 a F_4 sú intenzity v tyroch bodoch na krídlach profilu spektrálnej iary H (F_1 ($\lambda_c - 0,07$ nm), F_2 ($\lambda_c - 0,035$ nm), F_3 ($\lambda_c + 0,035$ nm) a F_4 ($\lambda_c + 0,07$ nm)).

4. ASOVÉ VARIÁCIE CHARAKTERISTÍK SPEKTRÁLNEJ IARY H

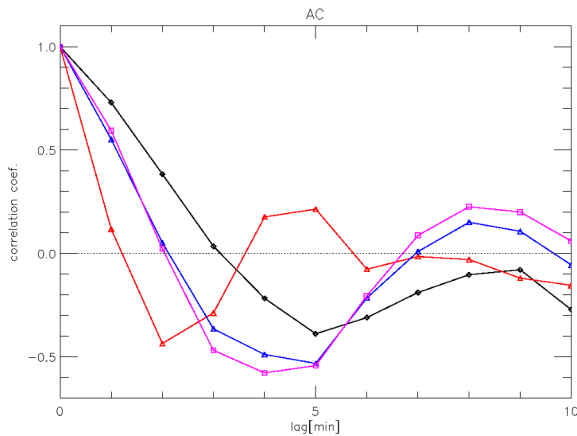
Poufity algoritmus (Koz a kol., 2013) umofi uje aproximava profil spektrálnej iary H v jednotlivých pixeloch zorného po a aj v podobe priemerného profilu z vä rch oblastí (pokrývajújúcich desiatky afl stovky jednotlivých pixelov). V práci sme sa sústredili na zaujímavú truktúru v chromosférickej sieti, ktorá môfle súvisie so skupinou jasných bodov v G-páse. Ke fle vybraná chromosférická truktúra (šbright mottle) pokrýva na snímkach v H vä iu plochu rozhodli sme sa tudova priemerný profil spektrálnej iary na ploche 21 x 21 pixelov (výber tejto ve kosti tudovanej plochy je zalofnený na výsledkoch zo skúmania oblastí rozli ných ve kostí, podrobnej-ie popísaných v práci Bodnárová a kol., 2016). Na obr. . 2. sú znázornené asové priebehy variácií spektrálnych charakteristík profilu spektrálnej iary H pre vybranú oblas s rozmermi 21 x 21 pixelov. Tieto priebehy nazna ujú zmenu vo variáciách troch zo tyroch spektrálnych charakteristík na za iatku druhej polovice pozorovania, pri om prvý výrazný pík sa objavil ~39 minút po za iatku pozorovania.



Obr. . 2.: asový priebeh spektrálnych charakteristík profilu spektrálnej iary H pre vybranú oblas ve kosti 21 x 21 pixelov: rčka profilu w_p (iernym), intenzita v jadre profilu I_c (zeleným), rýchlos v_c (erveným) a rýchlos v_p (modrým). Na horizontálnej osi je uvedený as v minútach.

Na overenie moľnej periodicity variácií intenzity I_c a rýchlostí v_c a v_p po as druhej polovice pozorovania sme poufili autokorelácie a furierov rozvoj. Obe metódy potvrdili výskyt periodicity s periódou ~8 minút u uvedených troch spektrálnych charakteristík, pri om v

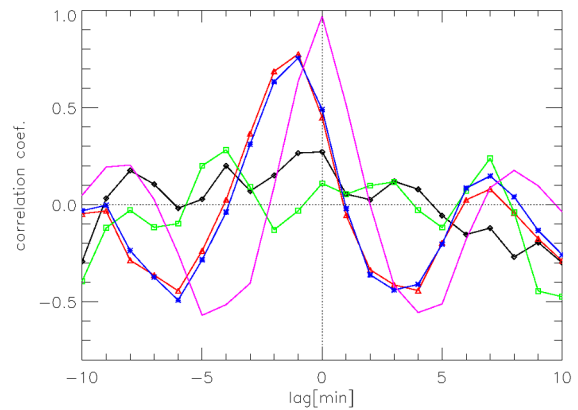
prípade úrky profilu spektrálnej iary w_p sa fliadna -tatisticky významná periodicita nena-la. Pre ilustráciu je na obr. . 3. znázornený výsledok autokorelácií jednotlivých spektrálnych charakteristík.



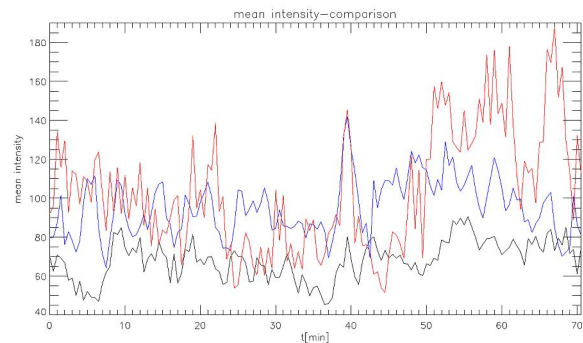
Obr. . 3.: Autokorelácie spektrálnych charakteristík profilu spektrálnej iary H pre vybranú oblasť ve kosti 21 x 21 pixelov: úrka profilu w_p (červeným), intenzita v jadre profilu I_c (iernym), rýchlosť v_c (modrým) a rýchlosť v_p (fialovým). Na horizontálnej osi je uvedený asový posun vzájomne korelovaných radov dát v minútach.

Následne sme poufili metódu kroskorelácie na posúdenie vzájomnej závislosti jednotlivých spektrálnych charakteristík profilu spektrálnej iary H (vi obr. . 4.). Aj ke dopplerovské rýchlosti v_c a v_p boli ur ené rozli ným spôsobom (v_c z aproximovaného profilu spektrálnej iary a v_p priamo zo snímok naprie profilom spektrálnej iary H) ich vzájomná korelácia nazna uje, fe popisujú tú istú fyzikálnu veli inu. Intenzita v jadre iary I_c vykazuje vysoké hodnoty vzájomnej korelácie s dopplerovskými rýchlosťami v_c a v_p , pri om dochádza k systematickému zaostávaniu variácií v intenzite vo i variáciám dopplerovských rýchlostí o ~1,5 minút. Výsledky kroskorelácií nenapovedajú o existencii -tatisticky významného vz ahu odvodenej úrky profilu w_p k ostatným trom spektrálnym charakteristikám (I_c , v_c a v_p).

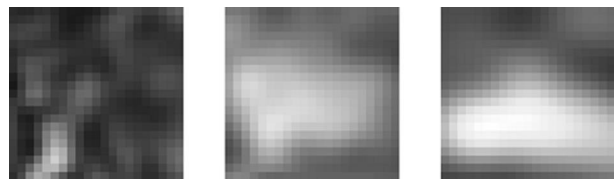
Na obr. . 5. je znázornený asový priebeh priemernej intenzity vybranej oblasti (21 x 21 pixelov) na snímkach v G-páse, Ca II H a v jadre spektrálnej iary H . V prípade Ca II H aj jadra iary H sme pozorovali výrazné krátkodobé zjasnenie ~39 minút po za iatku pozorovania. V prípade spektrálnej iary H tento pík zodpovedá prvému výraznému píku pozorovaného u spektrálnych charakteristík odvodených pre aproximovaný profil spektrálnej iary (vi obr. . 2.) a zároveň zodpovedá asu výskytu jasného šbriht mottleô vo vybranej oblasti na snímkach jadre spektrálnej iary H . Obdobný pík pozorovaný v prípade priemernej intenzity v iare Ca II H nazna uje súvislos s existenciou lokálneho magnetického po a.



Obr. . 4.: Kroskorelácie spektrálnych charakteristík profilu spektrálnej iary H pre vybranú oblasť ve kosti 21 x 21 pixelov: intenzita v jadre profilu I_c a úrka profilu w_p (iernym), intenzita I_c a rýchlosť v_c (červeným), intenzita I_c a rýchlosť v_p (modrým), rýchlosti v_c a v_p (fialovým), úrka profilu w_p a rýchlosť v_p (zeleným). Na horizontálnej osi je uvedený asový posun vzájomne korelovaných radov dát v minútach.



Obr. . 5.: Priemerná intenzita vybranej oblasti s ve kos ou 21 x 21 pixelov: v G-páse (iernym), v Ca II H (modrým) a v jadre iary H (červeným).



Obr. . 6.: Vybraná oblasť s ve kos ou 21 x 21 pixelov v asu 39,5 minút po za iatku pozorovania: 1) v G-páse (so skupinou jasných bodov), 2) v Ca II H a 3) v jadre iary H (s jasnou -truktúrou šbriht mottleô).

Obr. . 6. znázor uje vybranú oblasť (21 x 21 pixelov) na snímkach v G-páse, Ca II H a v jadre spektrálnej iary H v asu ~39,5 minút po za iatku pozorovania, s jednotlivými -truktúrami, ktoré sú zdrojom zvý-enej priemernej jasnosti danej oblasti.

4. ZÁVER

V práci sme študovali časový priebeh spektrálnych charakteristík (intenzita, šírka profilu spektrálnej čiary a dopplerovská rýchlosť) čiary H α odvodených na základe aproximovaného profilu spektrálnej čiary H α z plochy 21 x 21 pixelov na základe súčasných snímok v piatich bodoch naprieč profilom spektrálnej čiary H α (jadro: $\lambda_c = 656,3$ nm; krídla: $\lambda = \lambda_c \pm 0,035$ nm a $\lambda = \lambda_c \pm 0,07$ nm).

Na základe výsledkov autokorelácií časových radov jednotlivých spektrálnych charakteristík sme zistili štatisticky významné variácie v intenzite a dopplerovských rýchlostiach s periódou ~8 minút, ktoré môžu byť dôsledkom šírenia sa magneto-akustických vln (Mathioudakis, Jess, a Erdélyi, 2013). Vzájomne vzťah medzi spektrálnymi charakteristikami sme vyšetřovali prostredníctvom ich kroskorelácií. Tie poukazujú na vzťah medzi osciláciami v intenzite a rýchlostiach. Zároveň dochádzalo k systematickému zaostávaniu variácií v intenzite voči variáciám dopplerovských rýchlostí o ~1,5 minút, čo môže byť indikáciou šírenia sa vln a prenosu energie (Kneer a kol., 1981).

Časový priebeh priemernej intenzity vybranej oblasti (21 x 21 pixelov) na snímkach v G-páse, Ca II H a v jadre spektrálnej čiary H α naznačuje vzájomnú súvislosť javov pozorovaných na rôznych vlnových dĺžkach. Súčasné krátkodobé zjasnenie v Ca II H a jadre čiary H α poukazuje na súvis pozorovanej štruktúry (šbriht mottle) s výskytom lokálnych magnetických polí.

Porovnanie časového priebehu priemernej intenzity v jadre profilu spektrálnej čiary H α (obr. 5.) s časovým priebehom intenzity v jadre profilu spektrálnej čiary H α odvodené z aproximovaného profilu (obr. 2.) potvrdzuje vhodnosť algoritmu (Koža a kol., 2013) a veľa kostí vybranej oblasti (21 x 21 pixelov) poufňitých pri posudzovaní vplyvu šbriht mottle pokrývajúcej podstatnú časť vybranej oblasti z celkového zorného poľa.

Poďakovanie

Tento článok bol vytvorený realizáciou projektu ITMS číslo 26220120029, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Poďakovanie patrí projektu Vega 2/0004/16.

Pozorovania boli podporované Trans-národným prístupovým programom projektu OPTICON a projektom ESMN (EU FP6).

Článok bol publikovaný v Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias.

LITERATÚRA

- Alfvén, H., 1947, Montly Notices of the Royal Astronomical Society 107, 211.
- Bodnářová, M., Utz, D., Rybák, J., 2016, Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based solar observations in the space instrumentation era Proceedings of a Meeting held at the University of Coimbra, Coimbra, Portugal In 5-9 October 2015. Edited by Ivan Dorotovic, Catherine E. Fischer, and Manuela Temmer. ASP Conference Series 504, 23
- Erdélyi, R., 2006a, Royal Society of London Philosophical Transactions Series A 364, 351
- Erdélyi, R., 2006b, Proceedings of SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun, ESA Special Publication 624, 15.
- Erdélyi, R., Fedun, V., 2007, Science 318
- Fujimoto, M., Shinohara, I., Kojima, H., 2011, Space Science Reviews 160, 123
- Hansteen, V.H., De Pontieu, B., The Astrophysical Journal Letters 647, L73
- Jess, D.B., Mathioudakis, M., Erdélyi, R., Crockett, P.J., Keenan, F.P., Christian, D.J., 2009, Science 323
- Kneer, F., Mattig, W., Uexkull, M., 1981, Astronomy and Astrophysics 102, 147
- Koža, J., Sütterlin, P., Gömöry, P., Rybák, J., Kořánek, A., 2013, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso 43, 5
- Mathioudakis, M., Jess, D.B., Erdélyi, R.: 2013, Space Science Reviews 175, 1
- Ofman, L., 2002, The Astrophysical Journal Letters 568, L135
- Osterbrock, D.E., 1961, Astrophysical Journal 134, 347.
- Parker, E.N., 1988, Astrophysical Journal 330, 474
- Priest, E.R., Schrijver, C.J., 1999, Solar Physics 190, 1
- Roberts, B., 2000, Solar Physics 193, 139
- Rutten R. J., Bettonvil F. C. M., Hammerschlag R. H., Jägers A. P. L., Leenaarts J., Snik F., Sütterlin P., Tziotziou K. and de Wijn A. G., 2004, Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, IAU Symposium 223, eds. A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya and A. G. Kosovichev (Cambridge Univ. Press), 597
- Scherrer, P.H., Bogart, R.S., Bush, R.I., Hoeksema, J.T., Kosovichev, A.G., Schou, J., Rosenberg, W., Springer, L., Tarbell, T.D., Title, A., Wolfson, C.J., Zayer, I., MDI Engineering Team, 1995, Solar Physics 162, 129
- Sütterlin P., Hammerschlag R. H., Bettonvil F. C. M., Rutten R. J., Skomorovsky V. I. and Domyshev G. N., 2001, Advanced Solar Polarimetry: Theory, Observation, and Instrumentation, ASP Conf. Ser. 236, ed. Sigwarth (San Francisco: ASP), 431
- Zaqarashvili, T.V., 2003, Astronomy and Astrophysics 399, L15