

Chromosférická odozva dynamiky fotosférických jasných bodov v G-páse

M. Bodnárová, J. Koza, J. Rybák, Astronomický ústav SAV, 059 60 Tatranská Lomnica, bodnarova @astro.sk

P. Sütterlin, Institute for Solar Physics, The Royal Swedish Academy of Sciences, Alba Nova University Center, 106 91 Stockholm, Sweden

Abstrakt:

Odozvu dynamiky fotosférických jasných bodov v G-páse (JBGP) v chromosfére vo vybraných oblastiach v sieti a mimo nej sme sledovali pomocou spektrálnych charakteristík čiary H α . Analýza časových priebehov, autokorelácií a vzájomných korelácií týchto spektrálnych charakteristík ukázala, že šírka spektrálnej čiary, centrálna intenzita a rýchlosti odvodené na základe dopplerovských posunov centra, resp. posunov jadra profilu čiary H α , v prípade chromosférickej siete vykazujú oscilácie s periódou ~8 (~13, ~16) min pričom oscilácie v centrálnej intenzite zaostávali za osciláciami v ostatných parametroch o ~1-2 min. Vo vybraných oblastiach mimo siete sa nevyskytovali žiadne štatisticky významné periódou v žiadnom zo skúmaných parametrov. V jednej z vybraných oblastí v sieti naše pozorovania umožnili sledovať i vznik spomínaných oscilácií v mieste kde sa predtým nevyskytovali. Analýza časového vývoja granulácie a JBGP vo fotosfére v tejto oblasti a ich odozvy v chromosfére ukázala, že vzniknuté oscilácie boli spôsobené spojením dvoch skupín JBGP v dôsledku zániku granuly jej ponorením sa pod fotosféru. V morfológii chromosféry sa jav prejavil ako opakujúce sa pozdĺžne zjasnenia. Nami pozorované oscilácie môžu byť prejavmi prechodu MHD vln šíriacich sa naprieč slnečnou atmosférou v mieste výskytu JBGP.

1. ÚVOD

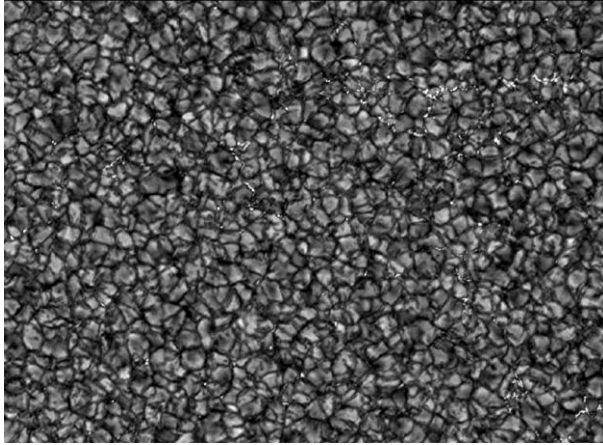
G-pás je molekulárny pás v slnečnom spektre s vlnovou dĺžkou $\sim 430,5 \pm 1$ nm, v ktorom prevládajú absorbné čiary vytvorené prechodmi elektrónov medzi jednotlivými rotačnými a vibračnými podhladinami molekuly CH. Na snímkach fotosféry získaných pomocou širokopásmového interferenčného filtra (~ 1 nm) v G-páse sa pozorujú zjasnenia s veľkým kontrastom voči ich okoliu vo vnútri a v blízkosti medzigranulárnych priestorov. Tieto zjasnenia sú spôsobené prítomnosťou silných (~ 1 kG) koncentrácií magnetického toku (Berger a Title, 2001), a preto je ich možné použiť ako nepriame indikátory magnetického poľa. JBGP zohrávajú dôležitú úlohu v slnečnej fyzike, lebo ich pohyb môže generovať magnetohydrodynamické vlny, ktoré môžu prispievať k ohrevu slnečnej koróny.

V našej práci predstavujeme štúdiu spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α vo vzťahu k dynamike JBGP, ktorej cieľom bolo hľadať fyzikálny súvis tejto dynamiky s ohrevom pokojnej slnečnej atmosféry, vrátane identifikovania fyzikálneho mechanizmu ohrevu.

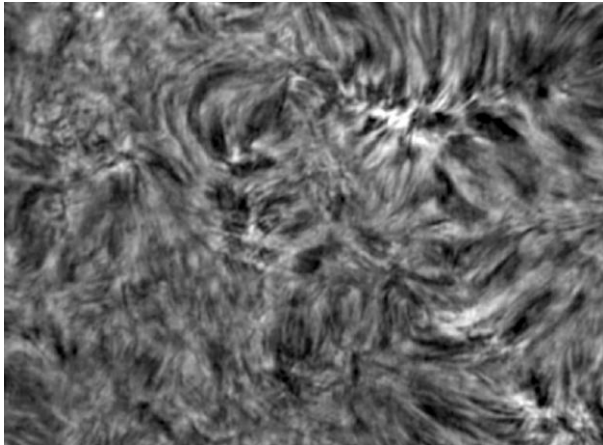
2. DÁTA

V našej práci boli použité súbory speklovaných snímkov (Sütterlin a kol., 2001) pokojnej slnečnej fotosféry v G-páse (430 nm) a chromosféry v spektrálnej čiare H α (jadro: $\lambda_c = 656,3$ nm; krídla: $\lambda = \lambda_c \pm 0,035$ nm a $\lambda = \lambda_c \pm 0,07$ nm), ktoré boli získané simultánne pomocou Holandského otvoreného ďalekohľadu (DOT-Dutch Open Telescope) (Rutten a kol., 2004). Všetky súbory snímkov boli získané 19. októbra 2005 v čase 09:55-11:05 UT z oblasti blízko centra slnečného disku pri dobrých pozorovacích podmienkach, a pozostávajú zo 142, resp. 71 snímkov, s kadenciou 30 s, resp. 60 s. Každá snímka má veľkosť 1112 \times 818 pixlov a priestorovú škálu 0,071 oblúkových sekúnd na pixel. Na obr. č. 1. je príklad snímky v G-páse a na obr. č. 2. je snímka v jadre spektrálnej čiary H α .

Na posúdenie dynamiky JBGP boli JBGP na snímkach v G-páse identifikované pomocou Utzovho automatického identifikačného algoritmu (Utz a kol., 2009 a Utz a kol., 2010).



Obr. č. 1.: Snímka pokojnej slnečnej fotosféry v G-páse.



Obr. č. 2.: Snímka pokojnej slnečnej chromosféry v jadre spektrálnej čiary H α .

3. SPEKTRÁLNE CHARAKTERISTIKY SPEKTRÁLNEJ ČIARY H α

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

Takto dedukovaný profil spektrálnej čiary H α sme použili na výpočet štyroch vybraných spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α . Prvou skúmanou spektrálnou charakteristikou bola intenzita v jadre profilu spektrálnej čiary H α I_c , definovaná ako minimálna intenzita v profile čiary. Druhou skúmanou spektrálnou charakteristikou bola šírka profilu spektrálnej čiary H α w_p meraná pri intenzite I_p definovanej vzťahom

$$I_p = \frac{\langle I_{-0,7}, I_{+0,7} \rangle + I_c}{2}$$

kde $\langle I_{-0,7}, I_{+0,7} \rangle$ je priemerná intenzita na krídlach profilu spektrálnej čiary H α vypočítaná z intenzít pre vlnové dĺžky $\lambda = \lambda_c \pm 0,07$ nm. Treťou skúmanou spektrálnou charakteristikou bola rýchlosť v_c odvodená na základe dopplerovského posunu centra profilu spektrálnej čiary H α definovaná vzťahom

$$v_c = \frac{c(x_c - x_0)\Delta\lambda}{\lambda_{cl}}$$

kde c je rýchlosť svetla, x_c je poloha (v pixloch) jadra profilu spektrálnej čiary, x_0 je poloha (v pixloch) centra priemerného profilu čiary H α zo všetkých pixlov na všetkých snímkach, $\Delta\lambda$ je krok vo vlnovej dĺžke 1×10^{-3} Å/pixel na prevzorkovanom profile čiary H α a λ_{cl} je laboratórna vlnová dĺžka centra spektrálnej čiary H α ($\lambda_{cl} = 6562,81$ Å). Štvrtou skúmanou spektrálnou charakteristikou bola rýchlosť v_p odvodená na základe dopplerovského posunu profilu spektrálnej čiary H α určená na základe postupu popísaného v práci Scherrera a kol. (1995), kde je rýchlosť v_p odvodená (pomocou kalibračnej krivky) na základe hodnoty parametra α definovaného vzťahom

$$\alpha = (F_1 + F_2 - F_3 - F_4)/(F_1 - F_3),$$

$$ak (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) > 0$$

$$\alpha = (F_1 + F_2 - F_3 - F_4)/(F_4 - F_2),$$

$$ak (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \leq 0$$

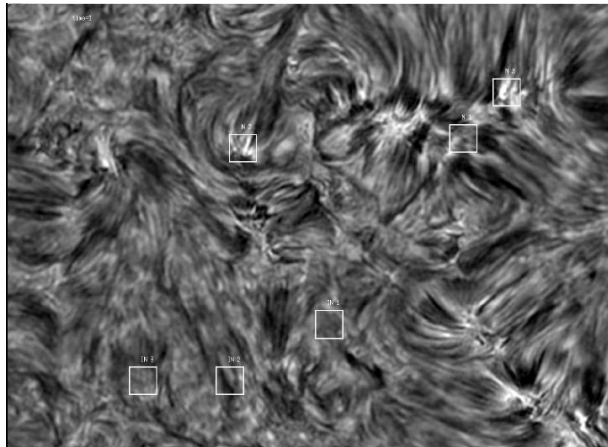
kde F_1 , F_2 , F_3 a F_4 sú intenzity v štyroch bodoch na krídlach profilu spektrálnej čiary H α (F_1 ($\lambda_c - 0,07$ nm), F_2 ($\lambda_c - 0,035$ nm), F_3 ($\lambda_c + 0,035$ nm) a F_4 ($\lambda_c + 0,07$ nm)).

4. VYBRANÉ OBLASTI

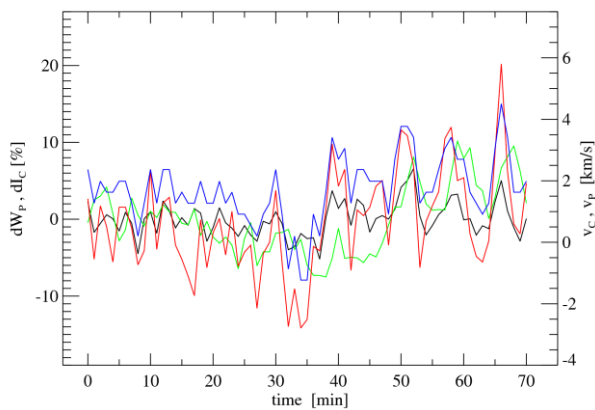
V práci sme skúmali časové priebehy spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α priemerných profilov spektrálnej čiary H α v šiestich vybraných oblastiach (50×50 pixlov) zo zorného poľa (ich polohy sú naznačené na obr. č. 3.), pričom tri oblasti sme zvolili v chromosférickej sieti (N 1, N 2 a N 3) a ďalšie tri mimo nej (IN 1, IN 2 a IN 3).

Oblasť N 1

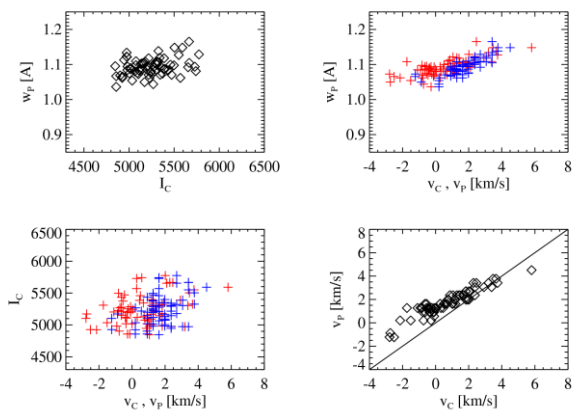
Na obr. č. 4. sú znázornené časové priebehy priemerných hodnôt spektrálnych charakteristík čiary H α pre vybranú oblasť N1. Na obr. č. 5. sú znázornené grafy vzájomných závislostí priemerných hodnôt spektrálnych charakteristík čiary H α pre vybranú oblasť N1. Tieto grafy naznačujú existenciu závislosti šírky profilu spektrálnej čiary w_p na meraných rýchlostiach v_c a v_p , ktorá naznačuje určitý nárast priemernej hodnoty šírky profilu spektrálnej čiary w_p so zvyšujúcou sa rýchlosťou v_c resp. v_p a existenciu takmer priamoúmernej závislosti medzi dvoma skúmanými rýchlosťami v_c a v_p .



Obr. č. 3.: Snímka pokojnej slnečnej chromosféry v jadre spektrálnej čiary H α s naznačenými polohami šiestich vybraných oblastí.



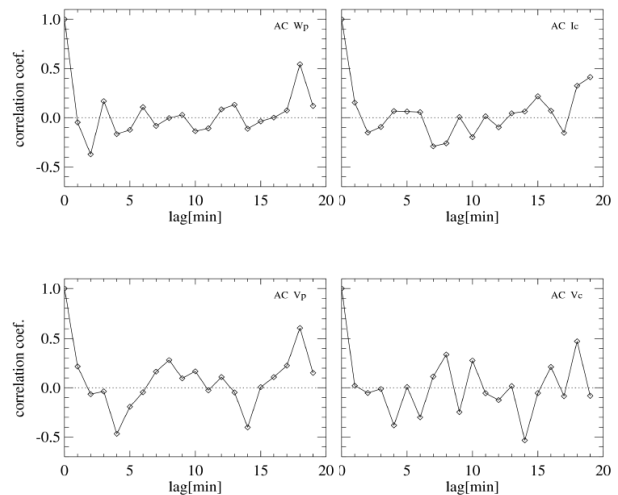
Obr. č. 4.: Časové priebehy priemerných hodnôt spektrálnych charakteristík čiary H α pre vybranú oblasť N1: zmena šírky profilu spektrálnej čiary dW_p (čierna čiara); zmena intenzity v centre spektrálnej čiary dI_c (zelená čiara); rýchlosť v_p (modrá čiara) a rýchlosť v_c (červená čiara).



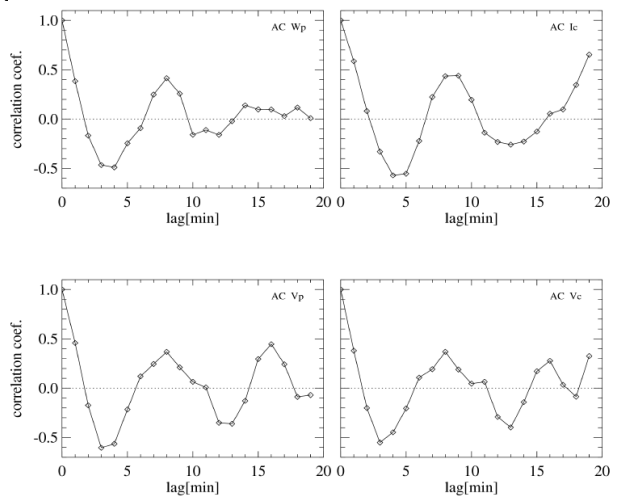
Obr. č. 5.: Vzájomné závislosti spektrálnych charakteristík čiary H α pre vybranú oblasť N1: graf závislosti šírky profilu w_p na centrálnej intenzite I_c (vľavo hore); graf závislosti šírky profilu w_p na rýchlostiach v_c a v_p (vpravo hore); graf závislosti centrálnej intenzity I_c na rýchlostiach v_c a v_p (vľavo dole); graf závislosti rýchlosti v_p na rýchlosti v_c (vpravo dole). [v_c (červená) a v_p (modrá)]

Variácie v časových priebehoch priemerných hodnôt štyroch skúmaných spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 sme študovali prostredníctvom ich autokorelácií a vzájomných korelácií, pričom sme sa rozhodli vyšetrovať prvú (0 - 35 min) a druhú (36 - 70 min) polovicu pozorovania nezávisle.

Na obr. č. 6. sú autokorelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 pre prvú polovicu pozorovania a na obr. č. 7. sú autokorelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 pre druhú polovicu pozorovania. Autokorelácie z druhej polovice pozorovania poukazujú na existenciu štatisticky významnej periódy ~ 8 min v priebehoch všetkých štyroch skúmaných spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α , pričom autokorelácie z prvej polovice pozorovania nenaznačujú existenciu akejkoľvek štatisticky významnej periodicity v priebehu žiadnej zo skúmaných spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α .

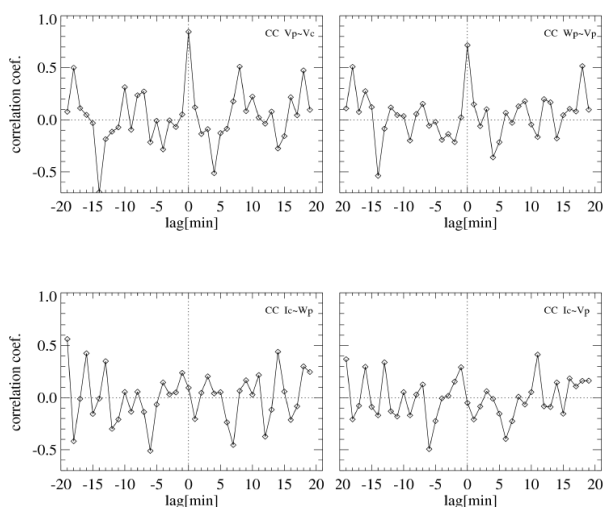


Obr. č. 6.: Autokorelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 z prvej polovice pozorovania.

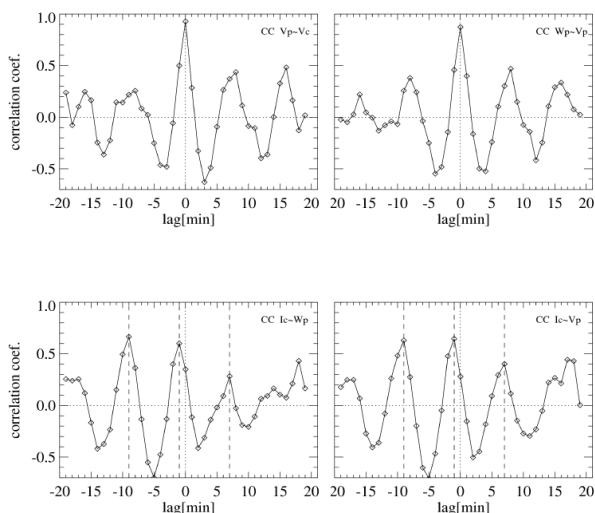


Obr. č. 7.: Autokorelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 z druhej polovice pozorovania.

Na obr. č. 8. sú vzájomné korelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 pre prvú polovicu pozorovania a na obr. č. 9. sú vzájomné korelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 pre druhú polovicu pozorovania. V druhej polovici pozorovania je prítomná štatisticky významná perióda ~ 8 min v priebehoch všetkých skúmaných spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α a zistili sme posun centrálnej intenzity I_c voči ostatným spektrálnym charakteristikám o ~ 1 min. V prvej polovici pozorovania sa nevyskytuje žiadna štatisticky významná perióda.

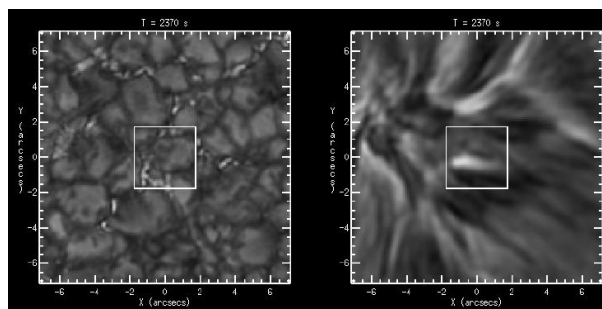


Obr. č. 8.: Vzájomné korelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 z prvej polovice pozorovania.



Obr. č. 9.: Vzájomné korelácie spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α pre vybranú oblasť N1 z druhej polovice pozorovania.

Prevedli sme vizuálnu kontrolu časového vývoja vybranej oblasti N1 na snímkach v G-páse a v centre čiary H α (ilustrované na obr. č. 10.). V G-páse sme zistili zánik granuly v ľavom dolnom rohu vybranej oblasti N1 postupným zmenšovaním sa plochy granuly pravdepodobne v dôsledku jej ponárania sa pod fotosféru (nejedná sa o zánik fragmentáciou), ku ktorému dochádzalo postupne v čase od ~ 30 do ~ 33 min po začiatku pozorovania. Vizuálnou kontrolou časového vývoja v centre čiary H α sme zistili, že vo vybranej oblasti N1 sa v druhej polovici pozorovania periodicky opakujú pozdĺžne zjasnenia vychádzajúce z miesta spojenia skupín JBGP.



Obr. č. 10.: Výsek z celého zorného poľa v G-páse (vľavo) a v čiare H α (vpravo) s naznačenou polohou vybranej oblasti N1 v čase 39,5 min po začatí pozorovania.

Oblasti N 2 a N 3

Vo vybraných oblastiach N 2 a N 3 sme podobne ako v prípade oblasti N 1 (ale bez rozdelenia pozorovania na dve polovice) analyzovali časové priebehy priemerných hodnôt spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α , ich vzájomné závislosti, autokorelácie a vzájomné korelácie. V prípade oblasti N 2 a N 3 podobne ako v prípade oblasti N 1 sme zistili existenciu štatisticky významných periód $\sim 12-14$ min a $\sim 16-17$ min, ktoré však boli menej významné ako ~ 8 min perióda zistená v prípade oblasti N 1 v druhej polovici pozorovania. V prípade oblasti N 2 a N 3 podobne zmeny v priebehu centrálnej intenzity I_c zaostávajú za zmenami v priebehu ostatných skúmaných spektrálnych charakteristík o ~ 1 až 2 min.

Oblasti IN 1, IN 2 a IN 3

Vo vybraných oblastiach IN 1, IN 2 a IN 3 sme rovnako ako v prípade oblastí N 2 a N 3 analyzovali časové priebehy priemerných hodnôt spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α , ich vzájomné závislosti, autokorelácie a vzájomné korelácie.

Na rozdiel od oblastí N 1, N 2 a N 3 (oblasti v chromosférickej sieti) sa v prípade oblastí IN 1, IN 2 a IN 3 (oblasti mimo chromosférickej siete) nevyskytovali žiadne štatisticky významné periody v žiadnom zo skúmaných spektrálnych charakteristík spektrálnej čiary H α .

5. ZÁVER

V práci sme uskutočnili analýzu spektrálnych charakteristík čiary H α vo vzťahu k dynamike JBGP pozorovanej na snímkach získaných Holandským otvoreným ďalekohľadom.

Vo vybraných oblastiach z chromosférickej siete sú v časovom priebehu všetkých skúmaných spektrálnych charakteristík čiary H α , v ich autokoreláciách ako aj v ich vzájomných koreláciách prítomne opakujúce sa zmeny s periódami ~8 min, ~12-14 min a ~16-17 min. S najväčšou štatistickou významnosťou sa prejavila perióda ~8 min vo vybranej oblasti N1 v druhej polovici pozorovania (36-70 min od začiatku pozorovania), teda počas 34 min. Navyše zo vzájomných korelácií spektrálnych charakteristík čiary H α pre všetky tri vybrane oblasti z chromosférickej siete vyplýva, že kým priebeh šírky profilu spektrálnej čiary a rýchlosti oscilujú vo fáze, intenzita v centre profilu je vzhľadom na tieto priebehy časovo posunutá - zaostáva za nimi o ~1 až 2 min.

Analýza časového vývoja granulácie a JBGP vo fotosfére vo vybranej oblasti N1 a ich odozvy v chromosfére ukázala, že vzniknuté oscilácie boli spôsobené spojením dvoch skupín JBGP v dôsledku zániku granuly jej ponorením sa pod fotosféru. V morfológii chromosféry sa jav prejavil ako opakujúce sa pozdĺžne zjasnenia (tzv. mottles).

Vo vybraných oblastiach mimo siete sa nevyskytovali žiadne štatisticky významné periódy v žiadnom zo skúmaných parametrov.

Nami zistené oscilácie v šírke profilu spektrálnej čiary H α boli na rozdiel od oscilácií v šírke profilu popísaných v práci Jessa a kol. (2009) sprevádzane analogickými osciláciami v rýchlostiach aj v centrálnej intenzite. Jednoznačne z nich vyplýva, že sme pozorovali periodické zmeny makroskopickej rýchlosti a hustoty plazmy. Teda evidentná prítomnosť variácií v centrálnej intenzite a v skúmaných rýchlostiach vylučuje interpretáciu nami zistených oscilácií prítomnosťou Alfvénových vln (ako tomu bolo v práci Jessa a kol. (2009)), lebo Alfvénové vlny sú nestlačiteľné.

Na základe našich výsledkov nevieme jednoznačne určiť druh MHD vln, ktorý vyvolal nami pozorovane oscilácie ani jednoznačne charakterizovať mechanizmus fyzikálneho procesu, ktorý ich vznik vyvolal. Na zodpovedanie týchto a ďalších otázok sú potrebné podrobné numerické MHD simulácie konvekcie vo fotosfére a v chromosfére s následnou syntézou profilu čiary H α .

Príkladom pravdepodobného scenára, ktorý by mohol byť vysvetlením nami pozorovaného procesu je magnetická rekonexia prebiehajúca na malých priestorových škálach (~100 km) sprevádzaná výronmi plazmy po nanoerupciách (nanoerupciách) v tvare prevráteného písma Y z miest ukotvenia rekonektujúcich silotrubíc magnetického poľa alebo z vyšších vrstiev chromosféry

v dôsledku prechodu pomalých magnetoakustických alebo iných MHD vln (podobne ako mechanizmus popísaný v práci Shibata a kol. (2007)).

Takáto rekonexia, vyvolaná šírením typických 5-minútových fotosférických oscilácií do slnečnej atmosféry bola skúmaná v numerických simuláciách Hegglandom a kol. (2009). Časový vývoj syntetizovaného profilu čiary Ca II pre tento jav, uvádzaný v ich práci, a časový vývoj spektrálnych charakteristík čiary H α , určený v našej práci, sú v dobrej kvalitatívnej zhode.

Pod'akovanie

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

Práca vznikla s podporou projektu VEGA 2/0108/12.

Pozorovania boli podporované transnárodným prístupovým programom projektu OPTICON a projektom ESMN (EU FP6).

Ďalekohľad DOT je majetkom Utrecht University a nachádza sa na Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias.

LITERATÚRA

- Berger T. E., Title A. M., 2001, *Astrophysical Journal* 553, 449
Heggland, L., De Pontieu, B., Hansteen, V. H., 2009, *Astrophysical Journal* 702, 1
Joss, D. B., Mathioudakis, M., Erdélyi, R., Crockett, P. J., Keenan, F. P., Christian, D. J., 2009, *Science* 323, 1582
Koza, J. a kol., 2013, *Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, v príprave
Rutten R. J., Bettonvil F. C. M., Hammerschlag R. H., Jägers A. P. L., Leenaarts J., Snik F., Sütterlin P., Tziotziou K., 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
Shibata K., Nakamura, T., Matsumoto, T., Otsuji, K., Okamoto, T. J., Nishizuka, N., Kawate, T., Watanabe, H., Nagata, S., UeNo, S., Kitai, R., Nozawa, S., Tsuneta, S., Suematsu, Y., Ichimoto, K., Shimizu, T., Katsukawa, Y., Tarbell, T. D., Berger, T. E., Lites, B. W., Shine, R. A., Title, A. M., 2007, *Science* 318, 1591
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., Domyshv G. N., 2001, *Advanced Solar Polarimetry: Theory, Observation, and Instrumentation*, ASP Conf. Ser. 236, ed. Sigwarth (San Francisco: ASP), 431
Utz D., Hanslmeier A., Möstl C., Müller R., Veronig A., Muthsam H., 2009, *Astronomy and Astrophysics* 498, 289
Utz D., Hanslmeier A., Müller R., Veronig A., Rybák J., Muthsam H., 2010, *Astronomy and Astrophysics* 511, A39