

Dynamická väzba medzi fotosférickou a chromosférickou plazmou v erupcii

*K. Brčková, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, brcekova @astro.sk
A. Kučera, Astronomický ústav SAV Tatranská Lomnica, akucera @astro.sk
J. Rybák, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, choc @astro.sk
A. Hanslmeier, Institut für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie, Graz, Austria, arnold.hanslmeier @uni-graz.at
H. Wöhl, Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik, Freiburg, SRN, hw @kis.uni-freiburg.de*

Abstrakt

V práci skúmame relaxačnú fázu erupcie pozorovanú v jadre chromosférickej Ca II K čiary a v dvoch fotosférických Fe I 522,5 nm a Fe I 557,6 nm čiarach. Prezентujeme časový vývoj asymetrie v Ca II K čiare a polohy stredného bisektora oboch Fe I čiar, ako aj ich vzájomné korelácie. Zistili sme, že horné vrstvy fotosféry sú ovplyvňované nadol smerujúcim prúdom plazmy z erupcie. Na konci pozorovaného úseku relaxačnej fázy sa ako odozva na impulz zhora objavuje prúd nahor smerujúcej plazmy.

1. ÚVOD

Simultánne pozorovania dejov na Slnku v správne zvolených spektrálnych oblastiach umožňujú skúmať prepojenie jednotlivých atmosférických vrstiev. Obe spektrálne čiary 2 aj Fe I 557,6 nm mapujú oblasť fotosféry vo výške okolo 370 km. Rozdiel medzi nimi je, že Fe I 557,6 nm nie je magneticky senzitívna a 2 je citlivá na prítomnosť magnetického poľa. čiara Ca II K odráža vlastnosti chromosféry vo výške okolo 1500 km. Typický profil Ca II K čiary v pokojnej oblasti tvorí absorpcia K1, na ktorú sa prekladá emisia K2 a na ňu ďalšia absorpcia K3. Toto je tzv. double reversal profil (pozri obr. 2). V aktívnych oblastiach škvrny alebo erupcie sa absorpcia K3 v profile nevyskytuje a profil je tvorený emisiou K2.

V spektre erupcie je jedným z najvhodnejších indikátorov dynamických procesov asymetria Ca II K čiary. Definície asymetrie sa líšia u rôznych autorov (porovnaj Fang a kol.1991, Fang a kol.1992, Ding a kol.1998), ale vo všeobecnosti môžeme povedať, že asymetria reprezentuje dopplerovský posun maxima K2 (v profiloch bez double reversal) alebo, v profiloch s double reversalom, sa prejaví vďaka tomu, že intenzita jedného krídla (K2 alebo K1) je vyššia ako intenzita druhého krídla. Aby sme pokryli veľkú variabilitu tvarov profilov Ca II K čiary (obr. 2), použili sme definíciu nezávislú od prítomnosti, či neprítomnosti double reversalu.

Počas počiatočných fáz erupcie v Ca II K čiare dominuje červená asymetria (Fang a kol.1991), čo je interpretované ako následok nadol sa pohybujúcej

chromosférickej kondenzácie. Toto však nemôže byť príčinou zvýšenej intenzity v krídlach K1, lebo tie sa formujú nižšie v atmosfére ako sa objavujú chromosférické kondenzácie. červená asymetria v K1 krídle môže byť interpretovaná ako nadol sa pohybujúca plazma v oblasti teplotného minima alebo aj ako plazma zmršťujúca sa k teplotnému minimu zhora aj zdola (Fang a kol.1992).

Cieľom tejto práce je analyzovať prvýkrát nielen asymetriu samotnú ale aj dynamickú väzbu chromosféry a fotosféry v erupcii s využitím vysokodisperzných spektier Ca II K čiary a Fe I čiar.

2. POZOROVANIA A REDUKCIA DÁT

Spektrá boli získané pracovníkmi AsÚ SAV 1. 6. 1993 na Vákuovom Vežovom ďalekohľade (VTT) na Observatóriu del Teide, Tenerife. Podrobné parametre pozorovaných čiar sú uvedené v práci Kučera a kol.2000. Pre tento článok sme vybrali 12 trojíc spektier z erupcie (tri spektrálne čiary), ktoré boli napozorované simultánne na jednom mieste blízko centra slnečného disku v časovom intervale od 08:12:30 UT do 08:14:46 UT. Ha obrázok pozorovanej oblasti je na obr. 1. Priestorové rozlíšenie v smere štrbiny je 0,17" na pixel. Disperzia v smere vlnových dĺžok je 3,67 mÅ/pixel pre Fe I 522,5 nm, 3,48 mÅ/pixel pre Fe I 557,6 nm a 2,58 mÅ/pixel pre Ca II K čiary. Šírka štrbiny bola 150 mm. Spektrá boli zredukované rovnakým postupom, ako bolo uvedené v práci Kučera a kol.2000.

Príklad jedného spektra Ca II K čiary v 3D reprezentácii je na obr. 2.

3. SPEKTRÁLNE CHARAKTERISTIKY A KORELÁCIE

Pre obe Fe I čiary sme z posunu stredného bisektora voči referenčnému centru vypočítali rýchlosti vo fotosfére. Poloha stredného bisektora bola určená ako stredná hodnota z polôh bisektorov v jadre čiary od minima do 75% hĺbky čiary.

Asymetria Ca II K profilu bola vypočítaná podľa:

$$A = 2 * \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_0} I_{\lambda} d\lambda - \int_{\lambda_0}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda}$$

kde $\lambda_0 = 393.3$ nm je referenčné centrum určené z flatfieldu, $\lambda_1 = 393.24$ nm a $\lambda_2 = 393.36$ nm. Definícia asymetrie je prevzatá z práce Ding a kol. 1998, kde integračné hranice boli definované polohami K_1 minim v profile. Vzhľadom na to, že tieto K_1 minimá chýbajú v mnohých profiloch nášho pozorovacieho materiálu (obmedzený rozmer CCD čipu), integrovali sme cez pevne definovaný interval $0,64 \text{ \AA}$ okolo referenčného centra.

V každom spektre bolo vybraných 250 skanov (okolie prvého jadra erupcie), pre ktoré boli určené spektrálne charakteristiky. Jadro erupcie je lokalizované v mieste medzi 170. až 210. pixelom pozdĺž štrbiny. Korelačné koeficienty boli vypočítané pre dvojice charakteristík asymetria v Ca II K - stredný bisektor v Fe I, pre obe Fe I čiary pre všetkých 12 trojíc spektier v sérii. Korelácia bola vypočítaná najskôr pre páry charakteristík z prvej trojice spektier (08:12:30 UT), kde maximálna korelácia bola zistená pri vzájomnom posune korelovaných charakteristík o 8 pixelov ($1,36''$) v smere štrbiny. S takýmto posunom boli potom charakteristiky korelované vo všetkých ďalších trojiciach spektier v pozorovanej časovej sérii.

4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na obr. 3 je na reprezentatívnej vzorke vybranej z pozorovaní zaznamenaný časový vývoj spektrálnych charakteristík. Pozorovania ukazujú, že pre atmosféru zasiahnutú erupciou je typická červená asymetria v Ca II K čiare. Definícia asymetrie, ktorá bola nezávislá od prítomnosti, či neprítomnosti double reversal, zahŕňa v sebe tak posun emisného maxima K_2 ako aj rozdielne intenzity jedného z krídiel čiary. Z obr. 3 (horný rad) je evidentné, že maximálna asymetria sa objavuje na začiatku pozorovania, kedy bola erupcia najenergetickejšia (počas pozorovania). Počas relaxačnej fázy červená asymetria klesá, ale ešte stále je rozoznateľná aj po viac ako dvoch minútach pozorovania. Táto červená asymetria môže byť spôsobená prúdom chromosférického materiálu pohybujúcim sa smerom k fotosfére a/alebo tokom energie smerom do fotosféry. Aby sme dokázali rozlíšiť, či sa jedná o prenos hmoty alebo energie, použili sme

bisektory v Fe I čiarach. Doplerovský pohyb určený z posunu stredného bisektora voči referenčnému centru naznačuje, že vo fotosfére pod erupciou je nadol sa pohybujúca plazma (pozri obr. 3, dolný panel). Celá pozorovaná oblasť fotosféry sa pohybuje smerom hore rýchlosťou okolo $0,5 \text{ km/s}$. Táto rýchlosť je pravdepodobne spôsobená 5-minútovými osciláciami, o ktoré použité spektrá neboli opravené. Na pozícii na štrbine, kde sa v chromosfére vyskytuje erupcia je vo fotosfére silný pohyb plazmy smerom nadol (pixel 170 - 190). Tento pohyb pomaly slabne s časom, no ku koncu pozorovania sa v tesnej blízkosti (190. pixel) objavuje nový pohyb smerom nahor. Tento pohyb rýchlosťou približne $-0,5 \text{ km/s}$ interpretujeme ako odozvu okolitej fotosféry, ktorá bola stlačená pohybom hmoty zhora z erupcie. Rýchlosti majú rovnaký chod aj pre magnetickú aj pre nemagnetickú Fe I čiaru pozdĺž celej štrbiny s výnimkou oblasti okolo 160. pixela, kde sa nachádzal malý pór, ktorého magnetické pole ovplyvnilo tvar profilu magneticky citlivej 2 čiary. Preto posun stredného bisektora na tomto mieste nemôžeme pripisovať skutočnému pohybu hmoty.

Korelácie Ca II K asymetrie a stredného bisektora v Fe I čiarach boli počítané s priestorovým posunom 8 pixelov ($1,36''$) pozdĺž štrbiny. Tento posun je spôsobený rozdielnou projekciou skúmaného deja z fotosféry a z chromosféry na štrbinu. Vysvetľujeme to tým, že hmota z chromosféry nebola vypudená smerom nadol kolmo k povrchu, ale s istým sklonom. Korelačné koeficienty sú na obr. 4 zakreslené ako funkcia času. Je zrejmé, že na začiatku pozorovania je antikorelácia vysoká ($\sim 60\%$), čo znamená, že pohyb hmoty vo fotosfére aj v chromosfére má, vzhľadom k definícii, rovnaký smer (v tomto prípade smerom nadol). Antikorelácia s časom klesá, čo znamená, že pohyb v jednej z vrstiev atmosféry musel ustať. Ako ukazuje obr. 3, spomalil sa pohyb v chromosfére, zatiaľ čo rýchlosť vo fotosfére ostáva po celý čas výrazná. Po približne $1,4$ minúte od začiatku pozorovania korelačný koeficient sa stáva silne pozitívny, čo môže byť spôsobené zmenou smeru pohybu vo fotosfére alebo v chromosfére. Podľa obr. 3 (spodný rad vpravo) je príčinou objavenie sa nového pohybu smerom nahor, ktorý je odozvou fotosféry na prúd hmoty z erupcie.

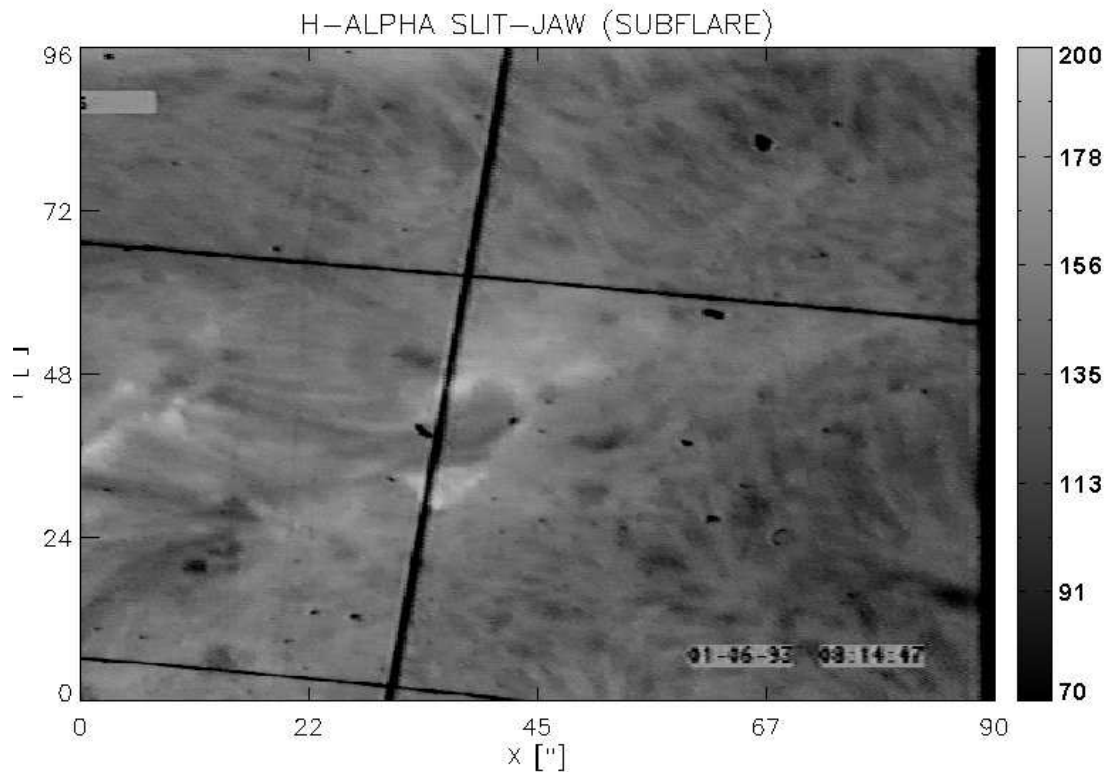
V ďalšej práci bude skúmané turbulentné správanie sa fotosféry po zásahu prúdom hmoty z erupcie.

POĎAKOVANIE

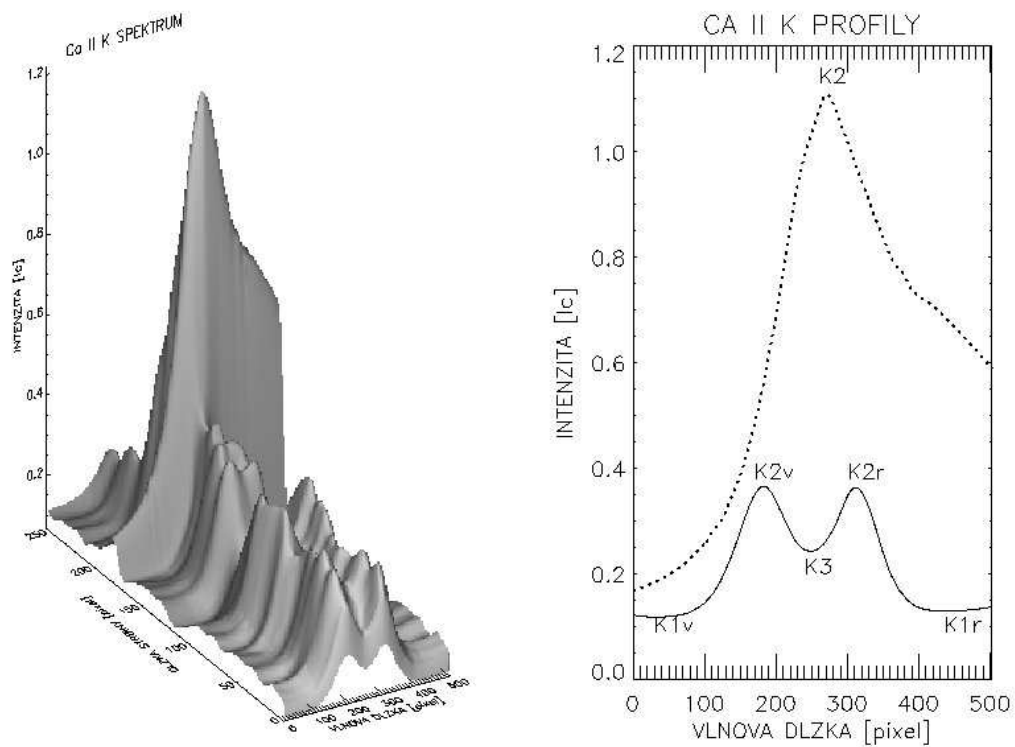
Vákuový Vežový ďalekohľad je obsluhovaný Kiepenheuerovým inštitútom pre slnečnú fyziku (Freiburg, Nemecko) na Observatório del Teide na ostrove Tenerife. Práca vznikla s podporou GA SAV (grant VEGA 2/7229/20) a s podporou medzinárodnej spolupráce medzi SAV a Rakúskou akadémiou vied.

LITERATÚRA

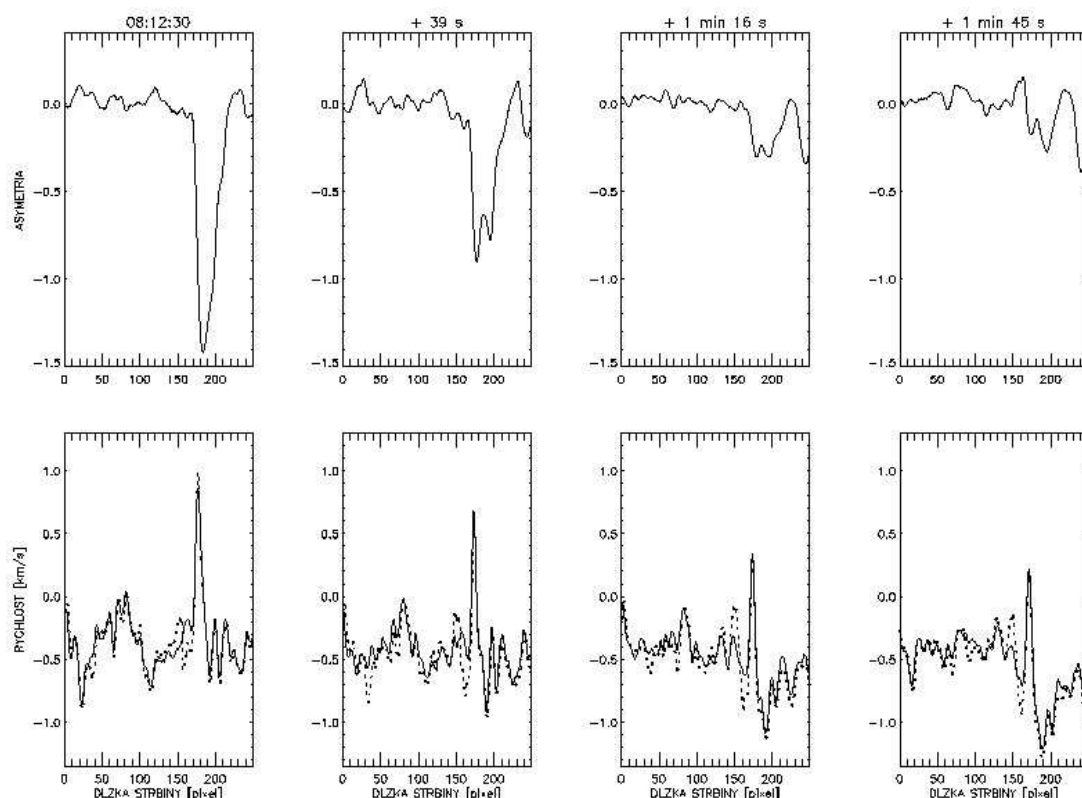
- Ding M. D., Schleicher H., 1998, *Astron. Astrophys.* 332, 767
Fang C., Hiei E., Okamoto T., 1991, *Solar Physics* 135, 89
Fang C., Hiei E., Yin S., Gan W., 1992, *Publ. Astron. Soc. Japan* 44, 63
Kučera A., Brčková K., Hanslmeier A., Rybák J., Wöhl H. 2000, in: Zborník referátov z 15. celoštátneho slnečného seminára Patince 2000, ed. B. Lukáč, SÚH, Hurbanovo, 57



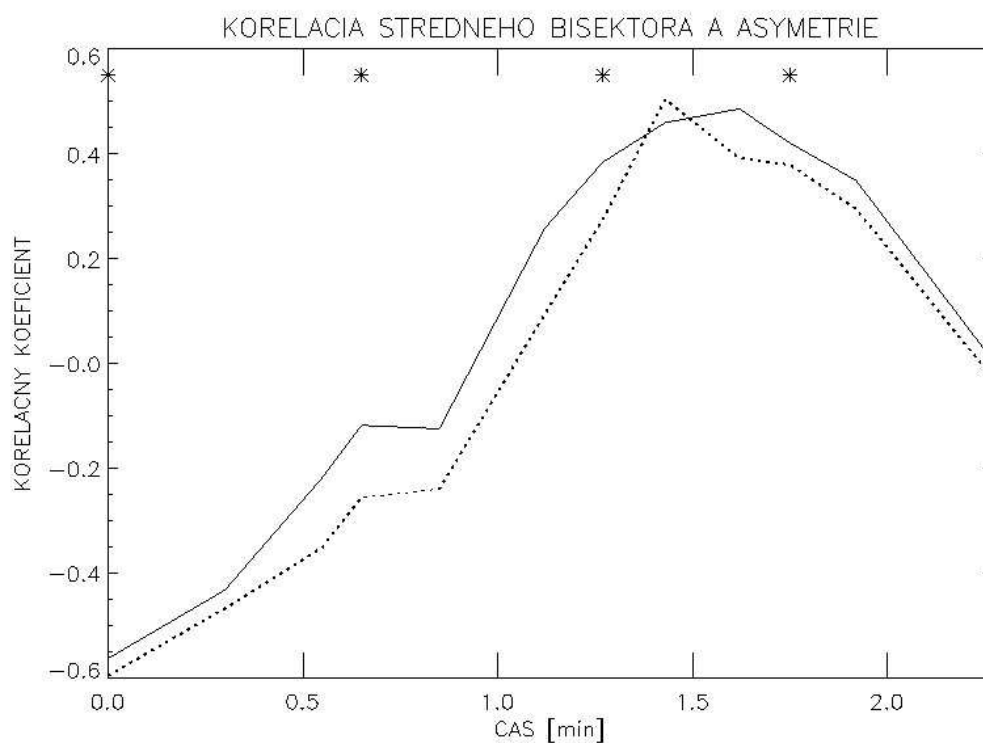
Obrázok 1: Poloha štrbiny v pozorovanej oblasti na slnečnom disku v čiare $H\alpha$. Skúmané bolo jadro erupcie medzi pozíciami 24''- 40'' v smere osi Y.



Obrázok 2: Vľavo: Ca II K spektrum na začiatku pozorovacej série. X os reprezentuje vlnovú dĺžku, Y dĺžku štrbiny a Z intenzitu. Vpravo: Dva typy profilov Ca II K čiar: profil bez double reversal (bodkovaná čiara) a double reversal (plnou čiarou).



Obrázok 3: Časový vývoj spektrálnych charakteristík pozdĺž štrbiny na štyroch vzorkách vybraných z časovej série. V hornom rade je asymetria Ca II K čiary, záporné hodnoty znamenajú červenú asymetriu. V dolnom rade sú rýchlosti určené z posunu stredného bisektora v Fe I čiarach. Plná čiara je pre Fe I 557.6 nm, bodkovaná pre 2. Pohyb smerom nadol má kladné hodnoty rýchlostí.



Obrázok 4: Korelačné koeficienty Ca II K asymetrie a stredného bisektora v Fe I čiarach pre všetkých 12 trojíc spektier v časovej sérii. Korelácia medzi asymetriou a stredným bisektorom Fe I 557.6 nm je vyznačená plnou čiarou, korelácia asymetria - Fe I 522,5 nm bodkovanou. Hviezdičkami sú vyznačené okamihy, v ktorých boli vybrané ukážky použité v obr. 3.