

Pozorovanie rázových vln v slnečnej fotosfére

Ján Rybák, *Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, choc @astro.sk*
Aleš Kučera, *Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, akucera @astro.sk*
Arnold Hanslmeier, *IGAM, Graz, Rakúsko, arnold.hanslmeier @kfunigraz.ac.at*
Hubertus Wöhl, *Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg, SRN, hw @kis.uni-freiburg.de*

Abstrakt

Príspevok predkladá pozorovací dôkaz existencie rázových vln v slnečnej fotosfére, vznikajúcich na hranici granuly. Po prvýkrát je zaznamenaný časový vývoj tohoto javu a jeho súvis s koncentráciou magnetického toku v slnečnej fotosfére.

1. ÚVOD

Tradičným prístupom k výskumu slnečnej fotosféry je spektroskopický výskum pomocou veľkých slnečných ďalekohľadov so spektrografmi, ktorý je používaný už niekoľko desiatok rokov. Tento prístup sa s vylepšovaním prístrojov neustále zdokonaľuje. Už od osemdesiatych rokov minulého storočia sa rozvíja i úplne iný prístup k výskumu konvekcie v povrchových vrstvách slnečnej atmosféry. Tento prístup je založený na numerickom modelovaní konvekcie v slnečnej atmosfére výhradne pomocou riešenia sústavy rovníc opisujúcich správanie sa plazmy v podmienkach panujúcich v slnečnej fotosfére a vo vrstvách tesne pod/nad ňou.

Prvé takéto práce sa zaoberali len veľkoškálovým priebehom konvekcie a neboli schopné zahrnúť do výpočtov i veľmi veľkú viskozitu plazmy uplatňujúcu sa na malých škálach (Stein a Norlund, 1989; Steffen, Ludwig a Krüss, 1989). Neskoršie práce už tento nedostatok dokázali preklenúť a ich výsledky viedli k prekvapivej predpovedi existencie rázových vln v slnečnej fotosfére. V týchto prácach boli modelované granularne pohyby v dvoj- ale i troj-rozmernom priestore (Cattaneo, 1990; Malagoli a kol., 1990; Steffen a Freytag, 1991; Gadun a kol., 1999). Schématický obrázok (obr. 1), prevzatý z práce Nesisa a kol. (1992), ilustruje výsledok takýchto výpočtov. Modely ukázali, že plazma šíriaca sa zo stredu granuly k jej okraju môže postupne zvyšovať svoju rýchlosť až nad rýchlosť šírenia zvuku (približne 7km/s). Jej pohyb nadzvukovou rýchlosťou je však priestorovo obmedzený a po dosiahnutí hranice granuly je plazma ubrzdzená hustejšou a chladnejšou plazmou v intergranulárnom priestore.

Zahrnutie magnetického poľa do numerického modelovania konvekcie, ktoré bolo po prvýkrát publikované Steinerom a kol. (1998), ukázalo, že okrem už opísanej, tzv. Cattaneovej rázovej vlny by mali vznikáť ešte ďalšie dva typy rázových vln, generova-

né pohybom magnetických silotrubíc, ukotvených v intergranulárnych priestoroch. Prvý typ vzniká rýchlym náklonom vertikálnych silotrubíc, pričom vlna sa šíri horizontálne preč od silotrubice. Príčinou jej vzniku je pohyb silotrubice spôsobovaný konvektívnymi pohybmi plazmy v granulách. Druhý typ rázovej vlny je generovaný vo vnútri samotnej silotrubice a šíri sa vo vertikálnom smere. časový vývoj všetkých troch typov rázových vln, ako bol získaný Steinerom a kol. (1998), je ilustrovaný na obr. 2.

Napriek tomu, že tieto vlny sú vo výsledkov modelovania jasne viditeľné, ich observačné dokázanie nie je jednoduché. Hlavnou príčinou je malý rozmer týchto vln, ktorý v kombinácii s priestorovým rozlíšením súčasných pozorovaní spôsobuje, že zmeny profilu spektrálnych čiar, vznikajúcich vo fotosfére, nie sú veľmi výrazné. Jednoznačné potvrdenie, že pozorovaná zmena profilu mohla byť spôsobená len rázovou vlnou, je ešte problematickejšie. To ukázali modelovania Steffena, publikované v práci Solankiho a kol. (1996).

Výsledky modelovania, získané Gadunom (2000), nás motivovali k pokusu o dokázanie prítomnosti rázových vln v slnečnej fotosfére. Medzi dôvodmi, ktoré nás k tomu viedli, boli Gadunove zistenia, že zmeny spektrálnych profilov sú výraznejšie v čiarach jedenkrát ionizovaných iónov v porovnaní s čiarami neutrálnych atómov a že zmeny sú výraznejšie na limbe v porovnaní so stredom slnečného disku. Gadun navyše testoval výpočtom syntetických spektier v ktorej zo spektrálnych čiar FeII by mali byť prejavy rázovej vlny najvýraznejšie. V zhode s výsledkami predošlých simulácií (napr. Cattaneo, 1990; Nesis a kol., 1993; Solanki a kol., 1996) Gadun uvádza, že spektrálnou charakteristikou, ktorá by sa mala vďaka existencii rázovej vlny meniť najvýraznejšie, je polšírka profilu, odzrkadľujúca zvýšenie chaotického pohybu plazmy (makroturbulencie) vznikajúceho pri 'náraze' rázovej vlny na plazmu v priestore intergranuly. So zvýšením polšírky profilu súvisiace zvýšenie reziduálnej intenzity v centre čiary a vysoký gradient dopplerovskej rýchlosti sú ďalšími prejavmi rázovej vlny.

Na rozdiel od predošlých pokusov dokázať rázové vlny (Holweger a Kneer, 1989; Nesis a kol. 1992, 1993; Solanki a kol., 1996) našou snahou bolo pokúsiť sa o sledovanie časového priebehu rázovej vlny a jej výškovej stratifikácie vo fotosfére a o zistenie súvisu polohy rázovej vlny s rozložením magnetického poľa vo fotosfére.

2. POZOROVACÍ MATERIÁL

Pre pozorovanie na Vákuovom vežovom teleskope (VTT) na Observatóriu del Teide na ostrove Tenerife (Schröter a kol., 1985) boli z pôvodne testovaných 14 spektrálnych čiar FeII vybrané štyri čiary. Tieto čiary boli najvhodnejšie pre meranie pomocou echelle spektrografu, ktorý je k dispozícii na VTT. Počas kampane v apríli 2000 boli uskutočnené merania v dvoch čiarach FeII súčasne spolu s viacerými čiarami neutrálnych atómov v ich okolí. Súčasne so spektrami boli získavané spektroheliogramy okolia štrbiny spektrografu, snímané rýchlou digitálnou kamerou (kadencia 0.5s, integračný čas 0.05s, intenzitné rozlíšenie 14bitov) pomocou filtra prepúšťajúceho svetlo v okolí vlnovej dĺžky 430nm (G-pás). Pozorovanie pozostávalo z viacerých 15 minútových radov spektier s kadenciou 2s a integračnou dobou 1s. Počas meraní bolo chvenie obrazu, spôsobované zemskou atmosférou (seeing), kompenzované adaptívnou optikou, inštalovanou v tom čase na ďalekohľade VTT.

V tejto práci boli použité spektrá čiar FeII 645,6nm, získané 27. apríla 2000 na okraji slnečného disku ($\mu = 0,3$). Dĺžka štrbiny bola viac ako 100", priestorové rozlíšenie bolo 0,12"/pixel, úsek zaznamenaného spektra mal dĺžku približne 3A, spektrálne rozlíšenie bolo 3.1mA/pixel.

Dáta boli fotometricky spracované a pre korekciu 'flat-fieldu' v prípade spektier bola použitá metóda, ktorá rozdeľuje 'flat-fieldovú' maticu na dve komponenty: tzv. štrbinový 'flat-field' a kamerový 'flat-field' (Hansmeier a kol., 1999, Kučera a kol., 2000). Finálny pomer signálu k šumu v spektrách bol lepší ako 1000. Pre všetky spektrá sme vypočítali nasledovné spektrálne charakteristiky : I_c - intenzita kontinua, I_r - zbytková intenzita v centre čiar, v_r - dopplerovská rýchlosť v centre čiar, $fwhm$ - šírka čiar v polovičnej hĺbke depresie čiar a W_λ - ekvivalentná šírka čiar. Pre kalibráciu spektier do škály vlnových dĺžok boli použité merania získané pre vytvorenie flat-fieldu v strede slnečného disku. Spektroheliogramy v G-páse boli naviazané priestorovo a časovo na obrázky spektier.

3. VÝSLEDKY

Po prehliadke časového vývoja jednotlivých spektrálnych charakteristík čiar FeII (viď obr. 3) sme vybrali jednu z oblastí s najvýraznejšie zvýšenou polšírkou čiar $fwhm$ ako jav, ktorý je najpravdepodobnejším 'kandidátom' na prejav rázovej vlny.

Časovo-priestorový priebeh všetkých vypočítaných spektrálnych charakteristík čiar FeII v okolí tohoto javu je dokumentovaný na obr. 4 spolu s pomocným grafom, umožňujúcim eliminovať tie expozície spektier, ktoré boli získané pri horšej kvalite obrazu. Z časového vývoja a priestorového rozloženia spektrálnych charakteristík je vidieť že :

- všetky parametre sa menia v čase plynule na škále desiatok sekúnd až minúty, rýchlejšie zmeny (i napriek použitiu adaptívnej optiky) môžeme interpretovať len ako variácie spôsobené zmenou kvality obrazu, resp. zmenou polohy štrbiny kvôli chveniu obrazu,
- jav je v polšírke čiar $fwhm$ lokalizovaný do miesta užšieho ako 0,5" a trval aspoň 2 minúty (keďže je pravdepodobné, že začiatok javu sme nepozorovali),
- jav sa nachádzal na hranici granula/intergranula (poloha 3.3"),
- zbytková intenzita čiar I_r je zvýšená počas javu ale je priestorovo širšia ako zvýšenie polšírky čiar $fwhm$,
- priebeh maxima polšírky čiar $fwhm$ počas javu zodpovedá miestam s vysokým gradientom dopplerovskej rýchlosti v_r so zmenou rýchlosti o viac ako 1km/s na vzdialenosti menšej ako 1",
- časový priebeh javu v ekvivalentnej šírke čiar W_λ je zhodný s priebehom javu v polšírke čiar $fwhm$.

Všetky zistené zmeny a priestorové súvislosti spektrálnych charakteristík vybraného javu sú v kvalitatívnom súhlase s výsledkami modelovania, urobeného Gadunom (2000), ako i výsledkami modelovania, ktoré uverejnili Solanki a kol. (1996). Menšie rozdiely medzi hodnotami spektrálnych charakteristík v jave a mimo neho sú vysvetliteľné vplyvom rozptylu svetla v zemskej atmosfére. Na základe uvedeného môžeme tvrdiť, že pozorovaný jav je prejavom rázovej vlny v slnečnej fotosfére.

Okrem vypočítaných spektrálnych charakteristík čiar FeII sme sledovali i zmeny samotného profilu čiar. Porovnávali sme profil zaznamenaný počas javu a priemerný profil, získaný po skončení javu ale v tej istej polohe na slnečnom disku, aby sme nevniesli do porovnávania zmeny profilu čiar spôsobované zmenou polohy na disku. Počas celého javu bol nielen profil čiar FeII 645.638nm ale i profily blízkych čiar neutrálnych atómov vápnika a kobaltu silne asymetrické so zvýšenou absorpciou s modrom krídlom čiar a so zvýšenou zbytkovou intenzitou v centre čiar. Ukážka tvaru profilov týchto čiar počas javu i tvar týchto profilov po skončení javu (referenčný tvar) je uvedená na obr.5. Pozorovaná asymetria čiar je v zhode s tvarom syntetických profilov čiar vypočítaných Steinerom a kol. (1998) pre miesta 'Cattaneovej' rázovej vlny alebo v miestach prvého typu rázovej vlny mimo magnetickej silotrubice.

Napriek tomu, že počas pozorovania neboli získané priame merania magnetického poľa vo fotosfére, pre identifikáciu magnetických polí sa dá využiť spektroheliogram, získaný v G-páse slnečného spektra. Práce viacerých autorov, uvedené v prehľade Ruttena (1999), ukázali, že s dostatočným rozlíšením je možné pozorovať na slnečnom povrchu v G-páse nielen granuláciu ale že v medzigranulárnom priestore existujú i fotosférické jasné body ('bright points'), ktorý kontrast je v G-páse vyšší ako kontrast granulácie. Teoretické práce ukázali, že toho zvýšenie intenzity je spôsobené redukciou obsahu molekuly CN, ktorá disociuje v hlbších vrstvách v intergranulárnych prestoroch a tým umožňuje prenos vyššieho toku žiarenia kontinua z podfotosférických vrstiev (viď napr. Steiner a kol., 2001; Sanchez Almeida a kol., 2001; Rutten a kol., 2001). Redukcia obsahu molekuly CN je spôsobená poklesom teploty v intergranulárnom priestore, ktorý je vyvolaný prítomnosťou magnetického toku. Zjasnenie zaznamenané vo vzdialenosti 1" od skúmaného javu (obr. 6) je práve takýmto jasným bodom, ktorý nám lokalizuje voči skúmanému javu výraznú koncentráciu magnetického toku, ktorý by mal prevyšovať tok modelovaný v simuláciách Steinera a kol. (1998).

4. ZÁVER

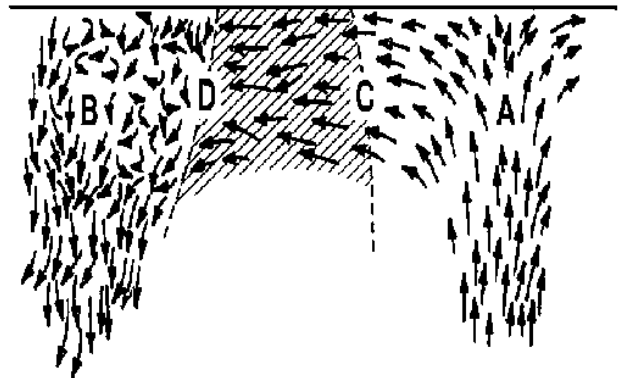
Porovnaním spektrálnych charakteristík a spektrálnych profilov, získaným z pozorovaní vybraného javu, a syntetických spektier, vypočítaných z modelovania rázových vln, sme dokázali, že nami skúmaný jav je jednoznačne spôsobený rázovou vlnou v slnečnej fotosfére. Na základe vzájomnej polohy skúmaného javu a jasného bodu v G-páse potom môžeme jednoznačne vylúčiť z našich úvah druhý typ rázovej vlny (vo vnútri silotrubice) podľa Steinera a kol. (1998). Rozlíšiť či nami pozorovaná rázová vlna bola spôsobená prvým typom, opísaným Steinerom a kol. (1998), teda vlna spôsobená pohybom silotrubice, alebo je to 'Cattaneo' vlna, generovaná výtokom hmoty z granuly do intergranulárneho priestoru nie je z pozorovacieho materiálu, ktorý sme mali k dispozícii, možné. Môžeme sa len domnievať, že vďaka výraznosti jasného bodu, by to mohla byť skôr rázová vlna spôsobená pohybom silotrubíc magnetického poľa. K tomuto nás vedie fakt, že na vznik 'Cattaneo' vlny nie je v simuláciách magnetické pole potrebné, a že v prípade našich pozorovaní sme zaznamenali jasný bod v tesnej blízkosti javu.

POĎAKOVANIE

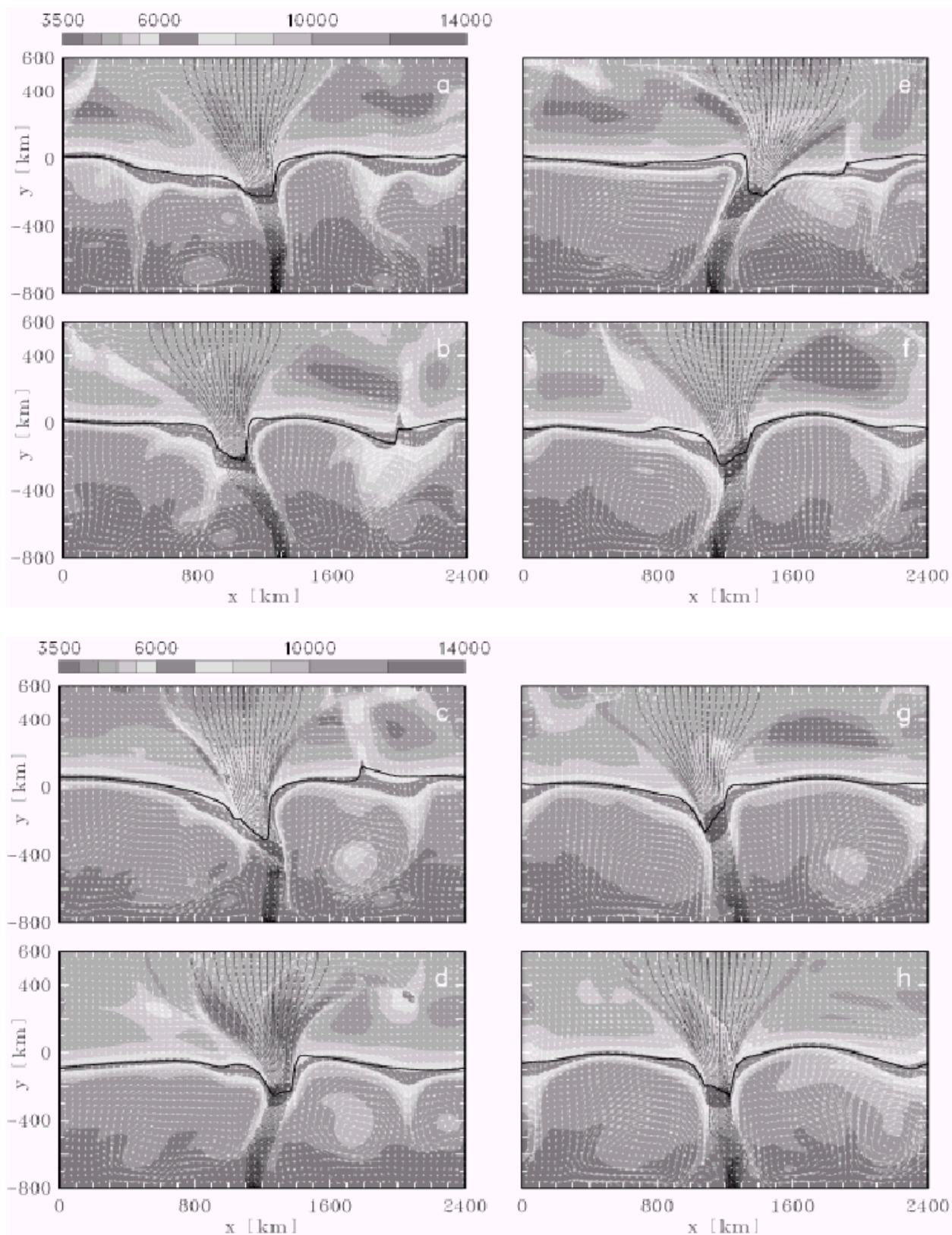
Práca vznikla s podporou Grantovej agentúry VEGA (grant VEGA 2/7229/20), grantu Nemeckej vedeckej spoločnosti DFG (grant 436 SLK 113/7/01) a za podpory medziakademickej dohody SAV a Rakúskej akadémie vied.

LITERATÚRA

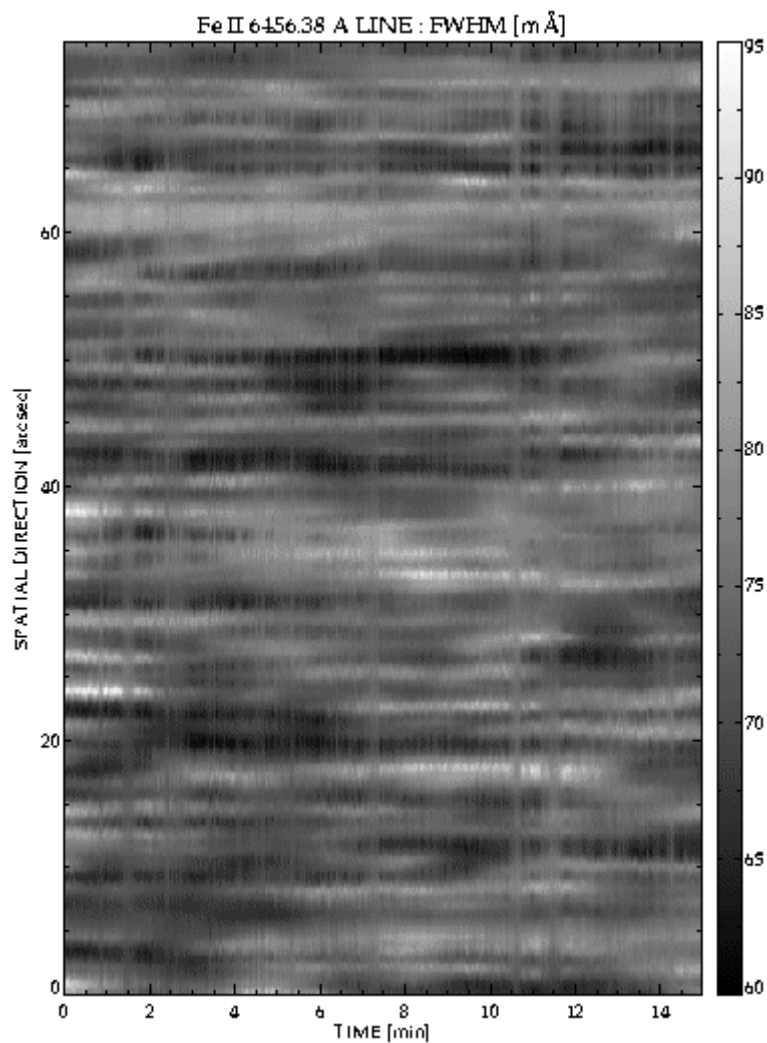
- Cattaneo, F., Hulburt, N.E., Toorme, J., 1990, *Astrophysical Journal*, 349, L63
 Gadun, A., 2000, osobná konzultácia
 Gadun, A. S., Solanki, S.K., Johannesson, A., 1999, *Astronomy and Astrophysics*, 350, 1018
 Hanslmeier, A., Kučera, A., Rybák, J., Wöhl, H., 1999, in Zborník referátov zo 14. celoštátneho slnečného seminára Teplý vrch, 1998, ed. B. Lukáč, SÚH, Hurbanovo, 79
 Holweger, H., Kneer, F., 1989, in 'Stellar and Solar Granulation', ed. R.J.Rutten a G.Severino, Kluwer, Dordrecht (Holandsko), 173
 Kučera, A., Hanslmeier, A., Rybák, J., Wöhl, H., 2002, *Astronomy and Astrophysics*, v tlači
 Malagoli, A., Cattaneo, F., Brummell, N.H., 1990, *Astrophysical Journal*, 361, L33
 Nesis, A., Bogdan, T.J., Cattaneo, F., Hanslmeier, A., Knölker, M., Malagoli, A., 1992, *Astrophysical Journal*, 399, L99
 Nesis, A., Hanslmeier, A., Hammer, D., Mattig, W., Staiger, J., 1993, *Astronomy and Astrophysics*, 279, 599
 Rutten, R.J., 1999, in 'Magnetic Fields and Oscillations', eds. B.Schmieder, A.Hoffman, J.Staude, ASP Conf. Ser. 184, San Francisco (USA), 181
 Rutten, R.J., Kiselman, D., Rouppe van den Voort, L., Plez, B., 2001, in 'Advanced Solar Polarimetry', ed. M. Siegwarth, ASP Conf. Ser., San Francisco (USA), v tlači
 Sánchez Almeida, J., Asensio Ramoz, A. Trujillo Bueno, J., Cernicharo, J., 2001, *Astrophysical Journal*, v tlači
 Schröter, E.H., Soltau, D., Wiehr, E., 1985, *Vistas Astronomy*, 28, 519
 Solanki, S. K., Rüedi, I., Bianda, M., Steffen, M., 1996, *Astronomy and Astrophysics*, 308, 623
 Steffen, M., Freytag, B., 1991, *Reviews of Modern Astronomy*, 4, 43
 Steffen, M., Ludwig, H.-G., & Krüss, A., 1989, *Astronomy and Astrophysics*, 213, 371
 Stein, R.F., Norlund, A., 1989, *Astrophysical Journal*, 342, L95
 Steiner, O., Grossman-Doerth, U., Knölker, M., & Schüssler, M., 1998, *Astrophysical Journal*, 495, 468
 Steiner, O., Hauschildt, P.H., Bruls, J., 2001 *Astronomy and Astrophysics*, 372, L13



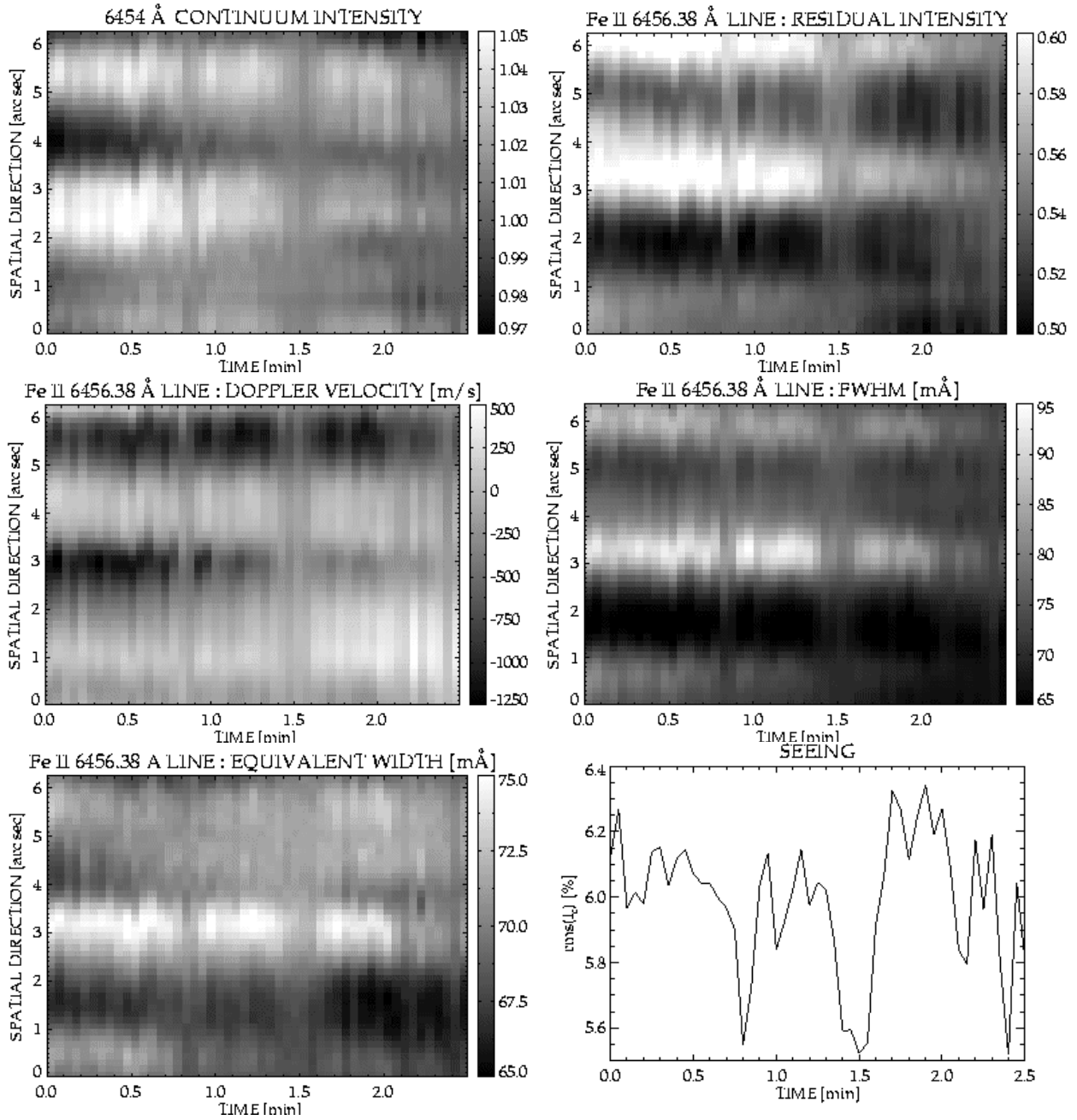
Obrázok 1. Schématické znázornenie rázovej vlny v slnečnej fotosfére, prevzaté z práce Nesis a kol. (1992). Plazma zo stredu granuly (A) sa pohybuje k jej okraju (D) pričom postupne zvyšuje svoju rýchlosť nad rýchlosť šírenia zvuku (C). Po dosiahnutí hranice granuly (D) sa plazma pohybuje v úseku (C-D) nadzvukovou rýchlosťou a je neskôr zabrzdená na plazme v intergranulárnom priestore (B). V týchto miestach je preto zvýšená turbulencia plazmy, reprezentovaná na schéme chaotickjším smerovaním šípiek v porovnaní s prevažne laminárnym prúdením v granule (A).



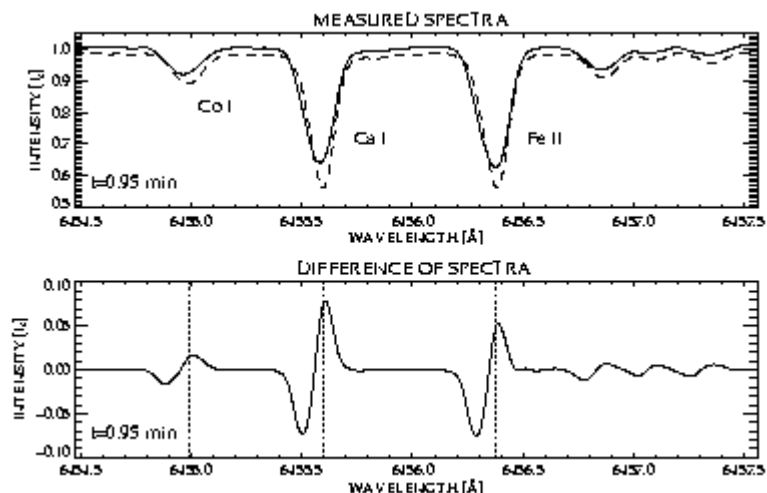
Obrázok 2. Osem momentov vývoja simulovanej konvekcie v slnečnej fotosfére s časovým odstupom 100s (Steiner a kol., 1998). Panely znázorňujú rozloženie teploty rôznymi úrovňami šede, rozloženie rýchlosti bielymi šípkami, magnetické siločiar-y tmavými tenkými súvislými čiarami a úroveň zodpovedajúcu optickej hĺbke rovnej jednej hrubou súvislou čiarou. časový vývoj je v paneloch vyjadrený po stĺpcoch smerom zhora nadol, t.j. panely a) až d) v ľavom stĺpci a panely e) až h) v pravom stĺpci. 'Cattaneo' vlna je viditeľná na panele b) vpravo v polohe 2000 km alebo na panele e) v polohe 1900 km ako oblasť so zvýšenou teplotou. Druhý typ vlny je ilustrovaný na panele f) v polohe 500 km a rázová vlna vo vnútri silotrubice je prítomná napríklad v paneloch d) a h).



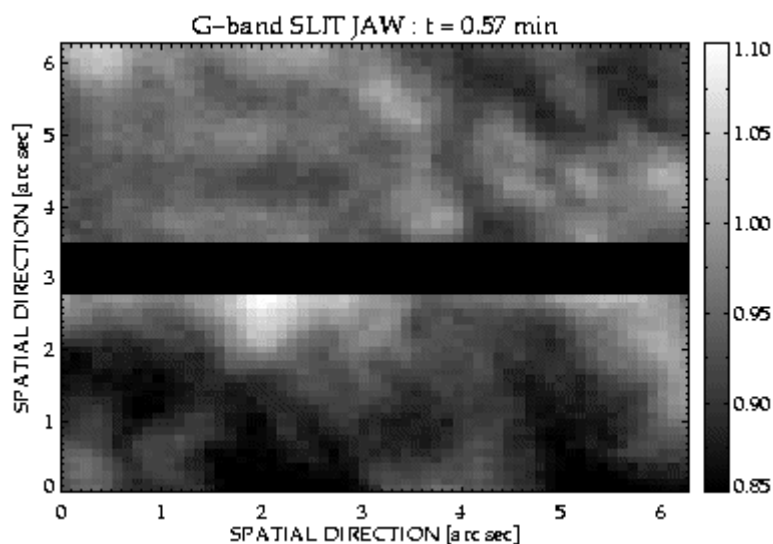
Obrázok 3. Časovo-priestorový priebeh polšírky fwhm spektrálnej čiary Fe II 645,6 nm. Vybraný jav sa nachádza na polohe 23'' po výške štrbiny a trvá od začiatku meraní po dobu približne 2 minút. Polšírka čiary počas javu prevyšuje priemer tejto veličiny o viac ako 20%. (Titulok : FeII 6456.28 Å line : FWHM [mÅ] - polšírka čiary FeII 645,628 nm [mÅ], X-os : Time [min] - čas [minúty], Y-os : Spatial direction [arc sec] - priestorová súradnica [oblúkové sekundy]).



Obrázok 4. Časovo-priestorové priebehy spektrálnych parametrov I_c , I_r , v , $fwhm$ a W_λ spektrálnej čiary Fe II 645,6 nm počas vybraného javu. Pravý dolný panel reprezentuje kvalitu obrazu spektra a tak umožňuje dedukovať, ktoré zo zmien spektrálnych parametrov sú spôsobené zmenami kvality obrazu a ktoré majú slnečný pôvod. (Titulky : 6456 Å Continuum Intensity - Intenzita kontinua pri 645nm, FeII 6456.28 Å line: residual intenzity - zvyšková intenzita, Doppler velocity - dopplerovská rýchlosť, FWHM [m Å] - polšírka čiary, equivalent width - ekvivalentná šírka; Seeing - nekvalita obrazu, X-os : Time [min] - čas [minúty], Y-osi : Spatial direction [arc sec] - priestorová súradnica [oblúkové sekundy], rms(I_c) [%] - stredná kvadratická odchylka intenzity kontinua [%]).



Obrázok 5. Spektrálny profil čiar FeII 645.638nm a spektrálne profily blízkych čiar CaI a CoI (horný panel), získané počas skúmaného javu (plná čiara) a referenčné profily týchto čiar, zaznamenané na tom istom mieste po skončení javu (prerušovaná čiara). Dolný panel znázorňuje rozdiel týchto spektier, ktorý vykazuje exces v centre čiar okolo 4% a depresiu v modrom krídle čiar približne 8%. (Titulky : Measured spectra - merané spektrá, Difference of spectra - rozdiel spektier, X-os : wavelength [Å] - vlnová dĺžka [Å], Y-os : Intensity [I] - intenzita [intenzita kontinua]).



Obrázok 6. Spektroheliogram slnečného povrchu, získaný v okolí skúmaného javu počas jeho trvania. Široký tmavý horizontálny pás znázorňuje polohu štrbiny spektrografu a stred obrázku zodpovedá polohe, kde sa nachádzalo maximum zvýšenia polšírky čiar fwhm (poloha 3,3" na obr. 4). Maximum emisie v G-páse je posunuté voči javu o viac ako 1" a tento rozdiel pretrvával počas celého trvania javu. (Titulok : G-band SLIT JAW t=0.57 min - Spektroheliogram G-pás : čas = 0.57 minúty, X- a Y-os : Spatial direction [arc sec] - priestorová súradnica [oblúkové sekundy]).