

# Časový vývoj fyzikálnych parametrov v granule

*J. Koza, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, koza @astro.sk*

*L.R. Bellot Rubio, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg, SRN, lbellot @kis.uni-freiburg.de*

*A. Kučera, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, akucera @astro.sk*

*A. Hanslmeier, Institut für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie, Graz, Rakúsko, arnold.hanslmeie @kfunigraz.ac.at*

*J. Rybák, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, choc @astro.sk*

*H. Wöhl, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg, SRN, hw @kis.uni-freiburg.de*

## Abstrakt

V článku je predložený časový vývoj fyzikálnych parametrov v granule, ktorý je predstaviteľom realistickejších 1D modelov slnečnej granulácie bez priemerovania v čase, čo bolo doteraz obvyklé zjednodušenie. Granulácia je považovaná za dynamický jav a predložený model je vypočítaný pomocou inverznej metódy aplikovanej na časovú sériu spektier. Model granulácie má tvar funkčnej závislosti teploty  $T(\log\tau_5, t)$  a rýchlosti v smere zorného lúča  $v_{\text{LOS}}(\log\tau_5, t)$  na optickej hĺbke  $\tau_5$  a čase  $t$ . Pozorovaný zánik granule je sprevádzaný zmenami teploty väčšími ako  $\sim 300$  K v podfotosferických vrstvách ( $\log\tau_5 > 0$ ) a hornej fotosfére ( $\log\tau_5 < -2,5$ ). Naproti tomu vrstvy, ktorých optické hĺbky sú v rozmedzí od  $\log\tau_5 \cong -0,5$  do  $\log\tau_5 \cong -1,5$  sú stabilnejšie so zmenami teploty menšími ako  $\sim 150$  K. Zmeny rýchlosti  $v_{\text{LOS}}$  s časom majú charakter oscilácií vo vrstvách nad optickou hĺbkou  $\log\tau_5 \cong 0$ , pričom amplitúda oscilácií s výškou rastie a vo vyšších vrstvách dosahuje hodnotu  $2 \text{ km s}^{-1}$ .

## 1. ÚVOD

Hlavným fyzikálnym procesom prebiehajúcim blízko povrchu Slnka je intenzívne ochladzovanie stúpajúcej plazmy. V dôsledku toho je narušaná kompaktnosť väčších konvektívnych prúdov a ich menšie fragmenty sú pozorované ako granulácia, v ktorej zdanlivo prevláda laminárne prúdenie, no zároveň má vlastnosti naznačujúce turbulenciu (Muller, 1999). Vztlaková sila spôsobuje, že granule zotrvačnosťou prenikajú do stabilných fotosférických vrstiev narúšajúc tak ich takmer planparalelnú štruktúru a hydrostatickú rovnováhu. Tento proces je sprevádzaný premenou energie prenášanej granulou na žiarenie, oscilácie a rázové vlny. Pre lepšie pochopenie uvedenej premeny je nevyhnutné poznať časové a výškové gradienty základných fyzikálnych veličín vo vnútri granule ako aj vo vyššie položenej fotosfére a to na priestorovej škále podstatne menšej ako je rozmer granule a na časovej škále kratšej ako je životnosť granule. V súčasnosti existujú dva odlišné prístupy k tomuto problému. Počas uplynulých dvoch desaťročí dokázali hydrodynamické simulácie reprodukovat' mnohé pozorované detaily granulárnej štruktúry (Asplund a

kol., 2000a; Atroščenko a Gadun, 1994). Druhý prístup je založený na inverzii profilov fotosférických spektrálnych čiar získaných s vysokým spektrálnym, priestorovým a časovým rozlíšením. Pre tento účel a mnoho ďalších aplikácií bola vyvinutá výkonná inverzná metóda (Ruiz Cobo, 1998). V predloženej práci je inverzná metóda (Ruiz Cobo a del Toro Iniesta, 1992) použitá pre štúdium vývoja a priebehu teploty  $T$  a rýchlosti  $v_{\text{LOS}}$  v smere zorného lúča v granulárnej fotosfére.

## 2. POZOROVACIE DÁTA

Pozorovacími dátami je séria spektier získaná pomocou echelle spektrografu (Vacuum Tower Telescope, Tenerife) 1. júna 1993 v pokojnej fotosfére v strede disku. Séria obsahuje 28 dvojíc spektier okolia vlnových dĺžok 522,5nm a 557,6nm, z ktorých boli na ďalšiu analýzu vybrané profily dvoch stredne silných čiar FeI 522,5nm a FeI 557,6nm a slabej čiar FeI 557,7nm. Dvojice spektier boli exponované súčasne časom 0,2s, pričom medzi jednotlivými expozíciami bol interval 9s a celá séria zachytáva 4minúty vývoja a zániku granule. Štrbina mala šírku 150  $\mu\text{m}$  a priestorové rozlíšenie po výške štrbiny bolo 0,175"/pixel. Pri vizuálnej prehliadke jednotlivých spektier sme v

polohe 5" (pozri obr.1) identifikovali jasnú granulu, ktorá po určitom čase zanikla. Pre ďalšie štúdium boli vybrané profily FeI čiar zo stredu granule. Spektrá boli kalibrované na vlnovú dĺžku pomocou vhodných párov čiar slúžiacich ako štandarty, ktorých centrálné vlnové dĺžky boli zistené v FTS atlase (Neckel, 1999). V príslušných spektrálnych oblastiach boli vybrané páry čiar TiI 522,49 nm - FeI 522,53 nm a FeI 557,6 nm - FeI 557,7 nm.

### 3. METÓDA INVERZIE SPEKTIER

Profily vybraných FeI čiar sú vstupnými dátami pre inverzný program SIR (Stokes Inversion based on Response functions), ktorý iteratívne modifikuje štartovací fotosférický model pokiaľ nenastane prijateľná zhoda medzi syntetickými a pozorovanými profilmi. SIR v každom iteračnom kroku počíta druhú mocninu rozdielu pozorovaných a syntetických intenzít, čo poskytuje informáciu ako spätne modifikovať štartovací model, aby v nasledujúcej iterácii bol tento rozdiel minimalizovaný. Program dokáže súčasne iterovať štyri Stokesove profily, no v tejto práci sa budeme zaoberať len analýzou Stokes I profilov za predpokladu homogénnej planparalelnej atmosféry a splnenia podmienok pre LTE a hydrostatickú rovnováhu. Výsledkom inverzného procesu

je priebeh teploty, rýchlosti  $v_{LOS}$  a mikroturbulentnej rýchlosti v závislosti na optickej hĺbke  $\tau_5$  pre vlnovú dĺžku  $\lambda = 500$  nm. Výsledná makroturbulentná rýchlosť je nezávislá na  $\tau_5$ . Ak teda program SIR aplikujeme na sériu spektier, môžeme týmto spôsobom získať časovú závislosť spomenutých veličín. Parametre uvažovaných atómových hladín sú zhrnuté v tab.1. Centrálné laboratórne vlnové dĺžky čiar sú prevzaté z práce Nave a kol. (1994) s výnimkou čiary 557,7nm (pozri ďalej). Excitačný potenciál dolnej hladiny a sila oscilátora sú použité z práce Thévenin (1989). Teplotný parameter a účinný prierez potrebné pre výpočet zrážkového rozšírenia sú prevzaté z práce Barklem a kol. (2000). Pri výpočte zrážkového rozšírenia čiar FeI 522,5nm a 557,6nm bola použitá kvantovomechanická formulácia (Barklem a kol., 2000). V prípade slabšej čiary 557,7 nm je klasická Unsöldova teória pokladaná za postačujúcu pre výpočet zrážkového rozšírenia s multiplikatívnym (tzv. enhancement) faktorom rovným jednej. Hodnota použitej abundancie železa bola 7,46 dex, ktorá podľa Asplunda a kol. (2000b) a Ščukinovej a Trujilla Buena (2001) je vhodná pre výpočet v priblížení LTE. Inverzný program SIR vyžaduje okrem atómových parametrov aj zadanie štartovacieho modelu fotosféry. K tomuto účelu bol vybraný model "Harvard-Smithsonian Reference Atmosphere" (HSRA) (Gingerich a kol., 1971), v ktorom bola mikroturbulentnej rýchlosti a rýchlosti  $v_{LOS}$  priradená hodnota 0,6 km s<sup>-1</sup> vo všetkých optických hĺbkach.

Makroturbulentná rýchlosť bola 2 km s<sup>-1</sup>. Profil čiar FeI 522,5 nm bol vzorkovaný s krokom 0,35 pm/pixel a profily čiar FeI 557,6 nm a 557,7 nm s krokom 0,39 pm/pixel. Červené krídla čiar FeI 522,5nm a 557,6nm neboli použité kvôli blendom. Chýbajúce červené krídlo čiar 557,7 nm ležalo mimo plochy detektora. Z každej dvojice spektier bolo celkovo použitých 168 bodov ako vstupné dáta programu SIR.

*Tabuľka 1. Atómové parametre čiar FeI.  $\lambda_{lab}^{air}$  označuje centrálnu laboratórnu vlnovú dĺžku vo vzduchu,  $EP_{low}$  je excitačný potenciál dolnej hladiny a  $\log(gf)$  je logaritmus sily oscilátora  $f$  násobenej multiplicitou  $g$  dolnej hladiny.  $\alpha$  a  $\sigma$  sú teplotný parameter a účinný prierez, a  $a_0^2$  je Bohrov polomer.*

$\lambda_{lab}^{air}$ [nm]	$EP_{low}$ [eV]	$\log(gf)$	$\alpha$	$\sigma$ [a <sub>0</sub> <sup>2</sup> ]
522.55261	0.11	-4.74	0.253	207
557.60888	3.43	-0.73	0.232	854
557.70248	5.03	-1.53	-	-

### 4. IDENTIFIKÁCIA ČIARY 557,7 nm

Slabá čiara 557,7nm doteraz nebola pozorovaná v laboratórnych podmienkach a preto nie je uvedená v práci Nave a kol. (1994). Jej identifikácia ako čiara železa v práci Moore a kol. (1966) je založená na súhlase vlnovej dĺžky vyplývajúcej z menej presných energií dolnej a hornej hladiny s neznámou čiarou v spektre Slnka. Aby sme získali presnú vlnovú dĺžku a overili správnosť identifikácie tejto slabšej čiary, postupovali sme nasledovne. Na základe známeho čísla multipletu (Moore a kol., 1966) a jeho označenia (Moore, 1972) sme pomocou dát z práce Nave a kol. (1994) určili vlnové čísla dolnej a hornej hladiny prechodu, ktoré sú potrebné pre výpočet laboratórnej vlnovej dĺžky vo vzduchu podľa vzťahu uvedenom v Nave a kol. (1994). Pomocou tejto hodnoty, dvojkomponentného modelu slnečnej fotosféry (Borrero a Bellot Rubio, 2002) a programu SIR sme vypočítali syntetické profily čiar 557,7nm za predpokladu, že je čiarou železa. Súhlas centrálnnej vlnovej dĺžky syntetického profilu 557,70249nm s centrálnou vlnovou dĺžkou profilu v FTS atlase, ktorá je 557,70247nm, presvedčivo dokazuje správnosť identifikácie.

### 5. VÝSLEDKY INVERZNEJ METODY

Inverzia profilov vybraných FeI čiar prebiehala súčasne v troch cykloch, pričom teplota a rýchlosti  $v_{LOS}$  boli postupne priradené jeden, štyri a päť uzlov. Mikro a makroturbulentnej rýchlosti bol priradený jeden uzol. V niekoľkých prípadoch bol uspokojivý súlad medzi pozorovanými a syntetickými profilmi dosiahnutý až po použití šiestich alebo siedmich uzlov priradených teplota v poslednom cykle. Na obr.2 sú ukážky pozorovaných

profilov v čase  $t = 0$  min a syntetických profilov získaných inverziou. Všeobecne boli veľmi dobre zreprodukované jadrá čiar celej série. Odchýlky s maximálnou relatívnou chybou nepresahujúcou 4% sa občas vyskytli v modrom krídle čiary FeI 557,6nm. Na obr.3a a 3b sú inverznou metódou vypočítané modely pre čas  $t = 0$  min a  $t = 4$  min. Chyba určenia teploty bola v rámci intervalu  $\pm 60$  K pri všetkých 28 modeloch a optických hĺbkach. Štartovací model je znázornený bez intervalov chýb. Obr. 3c a 3d predstavuje evolúciu teploty a rýchlosti  $v_{LOS}$  vzhľadom k prvému modelu v čase  $t = 0$  min.

## 6. DISKUSIA

Predmetom nasledujúcej diskusie sú len vrstvy v rozmedzí od  $\log \tau_5 = 0.5$  do  $\log \tau_5 = -3.5$ , pretože teplotné "Response functions" uvedených hladín sú podstatne väčšie ako nula, čo je dôležité vzhľadom na použitú inverznú metódu (Ruiz Cobo a del Toro Iniesta, 1992). Vývoj rozloženia teploty  $T(\log \tau_5, t)$  na obr.3c naznačuje rozdielnu odozvu jednotlivých vrstiev granulárnej fotosféry na zánik jasnej granule. Kým pre subfotosférické vrstvy ( $\log \tau_5 > 0$ ) je charakteristické systematické ochladzovanie s poklesom teploty väčším ako  $\sim 300$  K, spodná a stredná fotosféra od  $\log \tau_5 = -1.5$  do  $\log \tau_5 = -2.5$  je teplotne stabilnejšia s variáciou teploty menšou ako  $\sim 150$  K. Naproti tomu, teplotné zmeny väčšie ako  $\sim 300$  K sa opäť vyskytujú v hornej fotosfére ( $\log \tau_5 < -2.5$ ) a sú pravdepodobne fázovo posunuté vzhľadom na teplotné zmeny v hlbších vrstvách. Pozoruhodný je ohrev vyšších vrstiev ( $\log \tau_5 < -1$ ) v čase od tretej do štvrtej minúty záverečného štádia vývoja granule. K podobným výsledkom vedú aj hydrodynamické simulácie relatívnych teplotných fluktuácií granulárnej fotosféry (pozri obr.5 v práci Atroščenko a Gadun (1994)). Na obr.3b sú modely rýchlosti  $v_{LOS}$  v čase  $t = 0$  min a 4 min, ktorých zvláštnosťou sú nulové body, kde rýchlosť  $v_{LOS}$  mení znamienko, čo naznačuje zmenu smeru pohybu k pozorovateľovi. Toto správanie  $v_{LOS}$  v granulárnej fotosfére potvrdzujú hydrodynamické simulácie (obr.2 v práci Atroščenko a Gadun (1994)) a zároveň aj antikorelácie medzi vertikálnou rýchlosťou a teplotnými fluktuáciami v hornej fotosfére (Atroščenko a Gadun, 1994). Vrstvy zodpovedajúce nulovým bodom je možné pokladať za istú hranicu, nad ktorou prevládajú nekonvektívne, takzvané sekundárne pohyby spolu s osciláciami (Hanslmeier a kol., 2000). Na tomto mieste je potrebné dodať, že modely rýchlosti  $v_{LOS}$  prezentované na obr.3b nemožno považovať za realistické od  $\log \tau_5 \cong 0$  nižšie. Nárast  $v_{LOS}$  ku kladným hodnotám môže byť vyvolaný umelo vlastnou inverznou metódou, pretože pozorovacie dáta nenesú informáciu o rýchlostiach v podfotosférických vrstvách, v ktorých sú rýchlostné

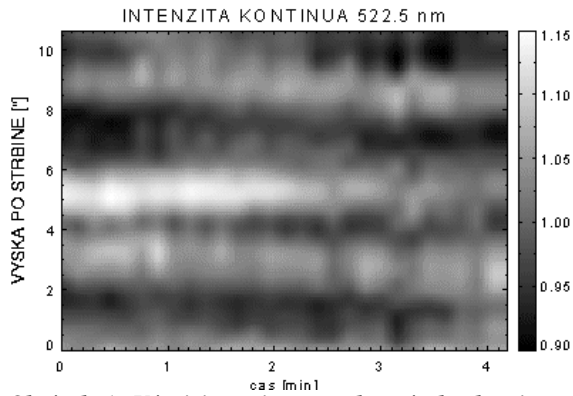
„Response functions“ blízke nule. Vo vývoji rýchlosti  $v_{LOS}$  na obr.3d sú zjavné oscilácie od  $\log \tau_5 \cong 0$  vyššie, ktorých amplitúda s výškou rastie a v hornej fotosfére dosahuje hodnotu  $\cong 2$  km s<sup>-1</sup>. Táto skutočnosť je prejavom kontaminácie pozorovacích dát 5-minútovými osciláciami. Skutočnú rýchlosť pohybu plazmy v granule neovplyvnenú osciláciami je možné určiť len zo série spektier pokrývajúcej podstatne dlhší interval ako je dĺžka série použitej v tejto práci. Potom na dostatočne dlhú sériu je možné aplikovať priestorovo-časové odfiltrovanie oscilácií metódou rýchlej fourierovej transformácie. Riešenie tejto úlohy je predmetom nášho ďalšieho snaženia.

## POĎAKOVANIE

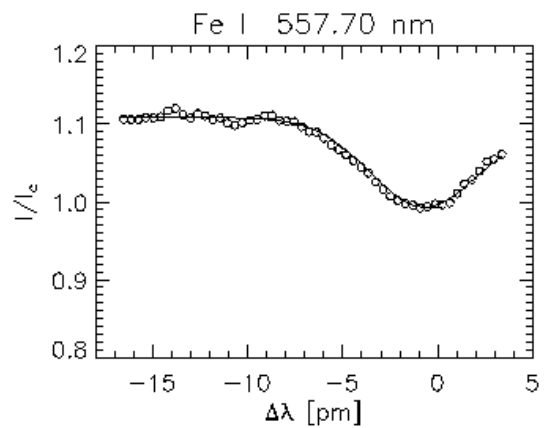
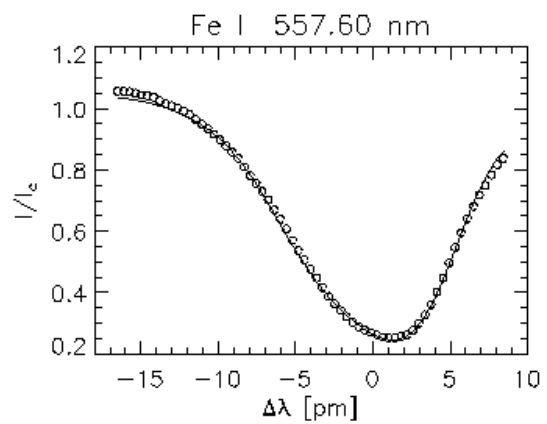
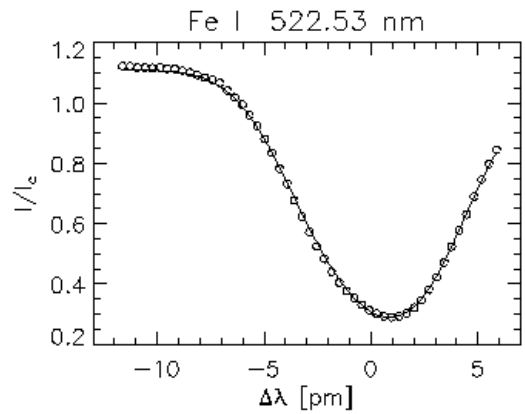
Vákuový vežový ďalekohľad (VTT, Observatório del Teide, Tenerife) prevádzkuje Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg. J.K. ďakuje Instituto de Astrofísica de Canarias za podporu a pomoc poskytnutú v lete 2001 ako aj C. Ilende Prietovi za láskavé poskytnutie IDL procedúry mideshift\_xy.pro. A.H. ďakuje 'Austrian Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung' za podporu. 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

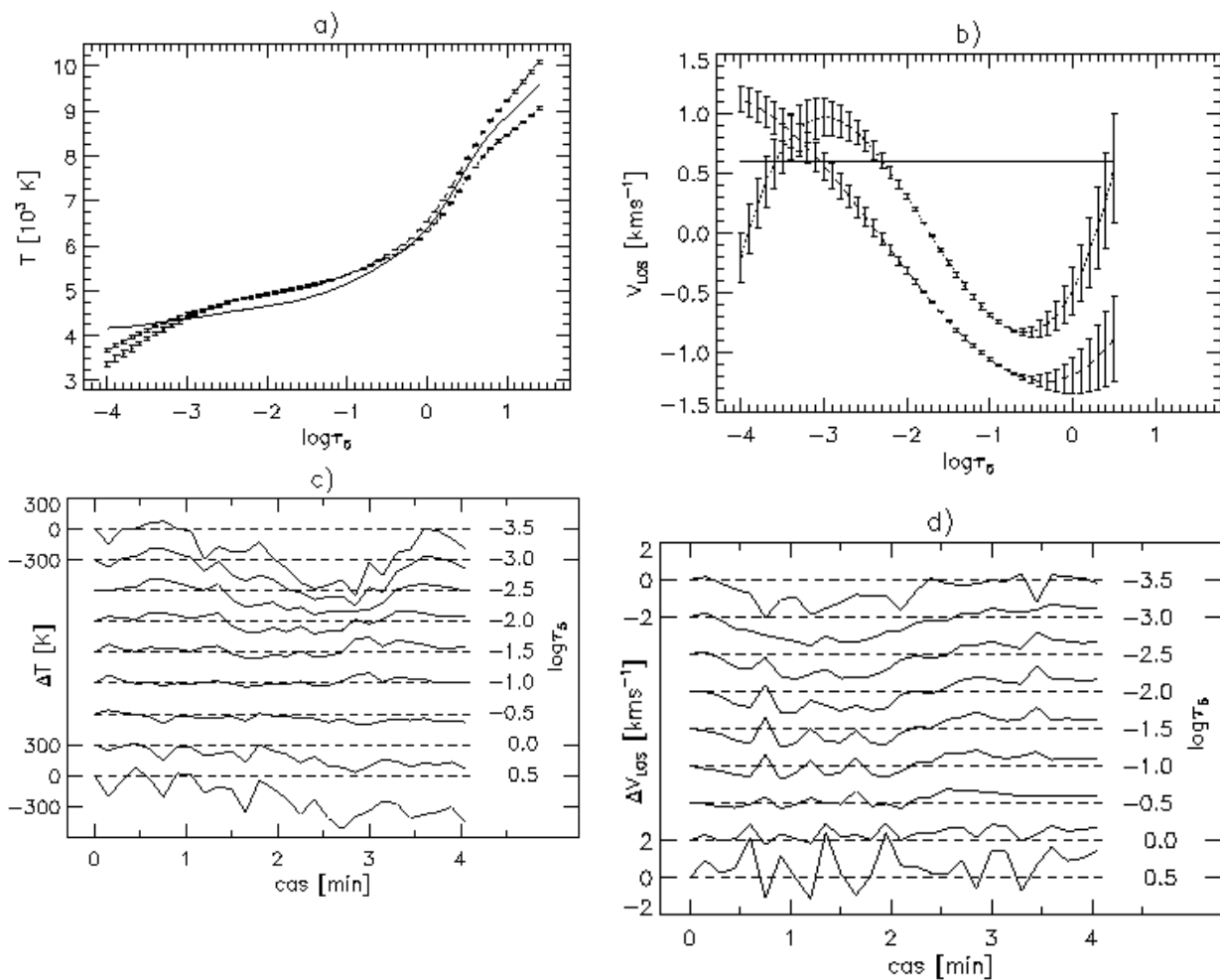
- Asplund, M., Nordlund, A., Trampedach, R., Allende Prieto, C., Stein, R.F.: 2000a, *Astronomy and Astrophysics*, 359, 729  
 Asplund, M., Nordlund, A., Trampedach, R., Stein, R.F.: 2000b, *Astronomy and Astrophysics*, 359, 743  
 Atroščenko, I.N., Gadun, A.S.: 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 635, 1994  
 Barklem, P.S., Piskunov, N., O'Mara, B.J.: 2000, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 142, 467  
 Borrero, J.M., Bellot Rubio, L.R.: 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 385, 1056  
 Gingerich, O., Noyes, R.W., Kalkofen, W., Cuny, Y.: 1971, *Solar Physics*, 18, 347  
 Hanslmeier, A., Kucera, A., Rybák, J., Neunteufel, B., Wöhl, H.: 2000, *Astronomy and Astrophysics*, 356, 308  
 Moore, C.E., Minnaert, M.G.J., Houtgast, J.: 1966, *The Solar Spectrum 2935?to 8770?*, NBS Monograph 61, Washington: USGPO  
 Moore, C.E.: 1972, *A Multiplet Table of Astrophysical Interest*, NSRDS-NBS 40, Washington  
 Muller, R.: 1999, in *Motions in the Solar Atmosphere*, eds: Hanslmeier, A., Messerotti, M., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 35 Nave, G., Johansson, S., Learner, R.C.M., Thorne, A.P., Brault, J.W.: 1994, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 94, 221  
 Neckel, H.: 1999, 184, 421 *Solar Physics*, 184, 421  
 Ruiz Cobo, B., del Toro Iniesta, J.C.: 1992, *The Astrophysical Journal*, 398, 375  
 Ruiz Cobo, B.: 1998, *Astrophysics and Space Science* 263, 331  
 Ščukina, N., Trujillo Bueno, J.: 2001, *The Astrophysical Journal*, 550, 970  
 Thévenin, F.: 1989, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 77, 137



Obrázok 1. Vývoj intenzity v malom úseku kontinua s rozsahom 7 pm a s vlnovou dĺžkou približne 522,5 nm v čase a po výške štrbiny. Skúmaná granula má polohu 5''.



Obrázok 2. Pozorované profily (krúžky) v čase  $t = 0$  min a syntetické profily (plná čiara) vypočítané inverznou metódou. Hodnota 0 pm zodpovedá centrálnej laboratórnej vlnovej dĺžke. Profily nie sú posunuté o hodnotu gravitačného červeného posunu.



Obrázok 3. Priebeh teploty (a) a rýchlosti  $v_{LOS}$  (b) v granulárnej fotosfére v čase  $t = 0$  min (čiarkované) a v čase  $t = 4$  min (bodkované). Štartovací model (plná čiara) je znázornený bez chybových intervalov. Záporná rýchlosť  $v_{LOS}$  znamená pohyb k pozorovateľovi. Rýchlosť bola opravená o gravitačný červený posun odčítaním hodnoty  $636 \text{ m s}^{-1}$ . Vývoj teploty (c) a rýchlosti  $v_{LOS}$  (d) je prezentovaný ako vývoj rozdielov (plná čiara) voči prvému modelu v čase  $t = 0$  min (horizontálna čiarkovaná čiara) vo vyznačených optických hĺbkach. Kvôli prehľadnosti sú krivky posunuté o  $\Delta T = 300 \text{ K}$  a  $\Delta v_{LOS} = 2 \text{ km s}^{-1}$ .