

Nárazové vlny na slnečnom povrchu

RNDr. Ján Rybák, PhD.

Úvod

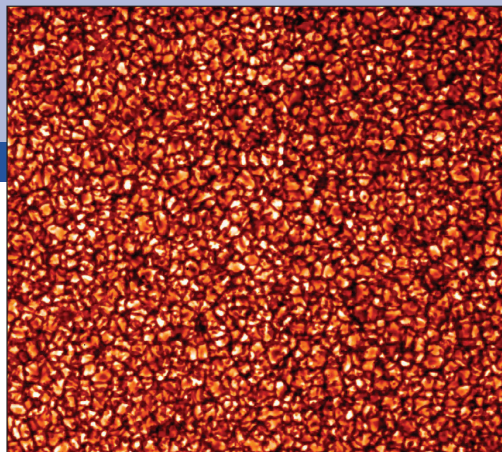
Slnko je pre hviezdárov výnimočné tým, že umožňuje pozorovať a analyzovať javy prebiehajúce v jeho atmosfére s dostatočným priestorovým a časovým rozlíšením. U ostatných hviezd to nie je možné. Porovnanie týchto pozorovaní s výsledkami modelovania fyzikálnych procesov umožňuje overovať, či správne rozumieme fyzikálnym javom prebiehajúcim v atmosférach hviezd. Niektoré z pozorovaných javov môžu byť totiž naozaj neobyčajné – napríklad nárazové vlny na povrchu Slnka.

Teoretická predpoveď

Hviezdári v minulosti najprv čosi nové na nočnej oblohe alebo na Slnku pozorovali a až po čase sa im podarilo zistené javy vysvetliť teoreticky. Opačný postup bol v histórii astronómie omnoho zriedkavejší, ale asi práve preto oveľa zaujímavejší. V prípade slnečnej astrofyziky je príkladom takéhoto opačného prístupu predpoveď a observačné potvrdenie javu nárazových vln na povrchu Slnka.

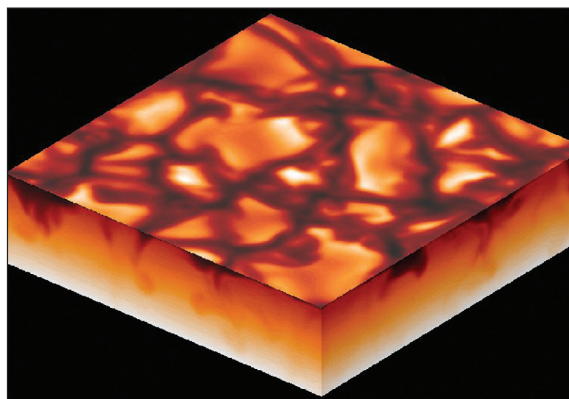
V priebehu druhej polovice minulého storočia neustále sa zlepšujúce pozorovania slnečnej fotosféry ukázali, že povrch pokojného Slnka je tvorený množstvom granúl oddelených úzkymi medzigranulárnymi priestormi (obr. 1). V granuliach vystupuje k slnečnému povrchu horúca plazma. Potom, strácajú čas svojej energie, sa pohybuje horizontálne smerom k okraju granúl. V medzigranulárných priestoroch, kde je koncentrované magnetické pole, plazma klesá dolu pod povrch Slnka. Okrem tohto hlavného dynamického javu granuly, počas svojho niekoľkominútového trvania, neustále menia svoj tvar. Je možné sledovať ich rozpad, spájanie sa či zjasnenia ich jednotlivých častí. Teplota, ktorá je uvádzaná v učebniciach ako teplota povrchu Slnka, je priemerom typických teplôt granúl a medzigranulárneho priestoru. Priepastný kvalitatívny rozdiel medzi týmito jedným číslom, uvádzaným v príručkách, a veľmi dynamickým vývojom granulárnych štruktúr na povrchu Slnka je vynikajúcim príkladom toho, prečo je dôležité pozorovať hviezdu s dostatočným rozlíšením.

Práve kvôli overeniu toho, či správne rozumieme prejavom a vývoju granulárnej štruktúry na povrchu Slnka boli v 80-tych a 90-tych rokoch minulého storočia urobené prvé pokusy modelovať správanie sa plazmy na povrchu a pod povrchom



Obr. 1. Ukážka granulácie na slnečnom povrchu v nepravých farbách. Obrázok bol získaný len nedávno ďalekohľadom SOT, umiestnenom na družici HINODE, dnes jednoznačne najlepším ďalekohľadom na pozorovanie granulácie na Slnku. Snímka bola urobená v modrej oblasti viditeľného svetla 14. apríla 2007 v rámci pozorovacieho programu pracovníkov AsÚ počas prvej spoločnej pozorovacej kampane družíc SOHO a HINODE. Obrázok zobrazuje pole s uhlovým rozmerom 90×90 oblúkových sekúnd v strede slnečného disku. Vďaka pozorovaniu z obežnej dráhy okolo Zeme kvalita obrazu nie je znížená chvením a rozptylom, ktoré vznikajú v zemskej atmosfére. Granuly sú zobrazené bielou farbou, pričom prechod farby z bielej cez oranžovú po čiernu znázorňuje pokles intenzity žiarenia plazmy v modrej vizuálnej oblasti spektra.

Slnka. Úloha, ktorú si postavilo viacero nezávislých skupín, bola zdanlivo jednoduchá: napísať rovnice, ktoré by mali opisovať všetky dôležité fyzikálne vzťahy, opisujúce správanie plazmy pri povrchu Slnka a sústavu týchto rovníc riešiť numericky tak, aby výsledkom bol časový a priestorový vývoj konvekcie plazmy a jej povrchového prejavu, ktorý nazývame granuláciou. Tieto numerické simulácie rýchlo dosiahli stav, v ktorom veľmi dobre dokázali reprodukovat to, čo pozorovatelia zaznamenávajú, pozorujúc slnečnú granuláciu. Navyše sa ukázalo, že ich výsledky „numerického“ slnečného povrchu dokážu popísať detaily na povrchu Slnka s rozlíšením až 10 km (obr. 2)! Toto je stále lepšie rozlíšenie ako to, ktoré



Obr. 2. Ilustrácia rozloženia teploty plazmy na povrchu Slnka, ktoré bolo získané trojrozmerným modelovaním konvekcie v povrchových vrstvách Slnka. Skupina S. Wedemeyera-Böhma použila výpočtový program COSBOLD, ktorým numericky simulovala správanie sa plazmy bez prítomnosti magnetického poľa. Biela farba označuje miesta s najvyššou a čierna s najnižšou teplotou.

je v súčasnosti možné dosiahnuť pri pozorovaniach i na tých najväčších slnečných ďalekohľadoch umiestnených na najlepších observatóriách. Obrovskou výhodou výsledkov numerických simulácií je i to, že informácia o hodnotách všetkých fyzikálnych parametrov je nám k dispozícii v ľubovoľnom mieste priestoru a čase simulácie. V prípade pozorovaní máme totiž k dispozícii len profily absorpčných spektrálnych čiar, ktoré vznikajú v plazme a tak odzrkadľujú fyzikálne podmienky, ktoré v plazme panujú.

Prekvapením pre všetkých bolo, keď analýza výsledkov numerických simulácií ukázala, že pohyb plazmy zo stredu k okraju granúl môže dosahovať rýchlosť až 8 – 10 km/s, a teda presahuje rýchlosť šírenia zvukových vln v tejto plazme. Navyše bolo zrejmé, že extrémne rýchly pohyb plazmy je v medzigranulárných priestoroch zabrzdený v horizontálnom smere na vzdialenostiach menších ako ~100 km (obr. 3). Keďže plazma tu mení svoju rýchlosť z nadzvukovej na podzvukovú, dochádza k nárazovým vlnám, podobne, ako je tomu u prúdových stíhačiek prekonávajúcich rýchlosť zvuku v našej atmosfére počas letu, oznamujúc to dobre známym zvukovým efektom. Otázky, ktoré sa natískali, boli nasledujúce: Sú nadzvukové rýchlosti plazmy reálne? Je pohyb plazmy naozaj zabrzdený v medzigranulárných priestoroch? Ako súvisí pohyb plazmy s vývojom granúl či koncentrovaním magnetického toku v medzigranulárných priestoroch? A nie sú tieto efekty len dôsledkom numerických či fyzikálnych zjednodušení, použitie ktorých bolo nevyhnutné pre výpočet numerických simulácií?

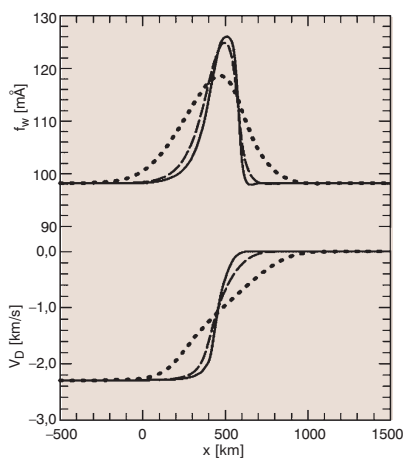
Hľadanie odpovede

K odpovediam na tieto otázky sme sa pokúsili prispieť i v Oddelení fyziky Slnka na AsÚ SAV. Problém nárazových vln na povrchu Slnka bol zaradený do výskumného smeru, zaoberajúceho sa dynamikou pokojnej atmosféry Slnka. Pripravili sme nový pozorovací program a požiadali sme o prídelenie pozorovacieho času na Vákuovom veľovom ďalekohľade VTT (Európske severné observatórium, Tenerife, Kanárske ostrovy), ktorý patrí Kiepenheuerovmu ústavu pre slnečnú fyziku (Freiburg, Nemecko). Program bol zameraný na záznam profilov spektrálnej čiary jedenkrát ionizovaného atómu železa (Fe II 645,6 nm) v miestach blízko okraju Slnka pomocou ešletového spektrografu. Program bol navrhnutý tak, že ako observačné potvrdenie existencie nadzvukového prúdu plazmy bolo vybrané výrazné rozšírenie profilu spektrálnej čiary v oblasti, kde sa premieta vďaka projekcii takýto prúd plazmy a zároveň i medzigranulárny priestor, najbližší k miestu výskytu prúdu. Tento prístup bol použitý i pri

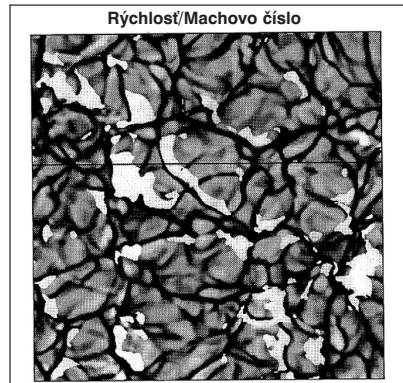
jedinej dovtedy publikovanej observačnej práci, zaoberajúcej sa nárazovými vlnami na slnečnom povrchu a v slnečnej fotosfére (Solanki a kol., A&A 308, 625; 1996). Rozšírenie spektrálnej čiary je potom spôsobené tým, že sa navzájom skladajú dva spektrálne profily tej istej čiary vznikajúce v prúde a v medzigranulárnom priestore. Keďže ich vzájomná rýchlosť je približne 10 km/s, tieto dva profily sú vďaka dobre známemu Dopplerovmu javu v slnečnom spektre posunuté o približne jednu stotinu nanometra. Tento posun je oveľa menší ako samotná šírka profilu čiary, preto nie je možné vidieť tieto dve zložky profilu navzájom oddelené. I takým kvalitným spektrografom, aký má ďalekohľad VTT (je jedným z dvoch najlepších spektrogrfov na výskum Slnka na svete), je možné zaznamenať len výrazné rozšírenie profilu čiary.

Dôkaz nárazových vln

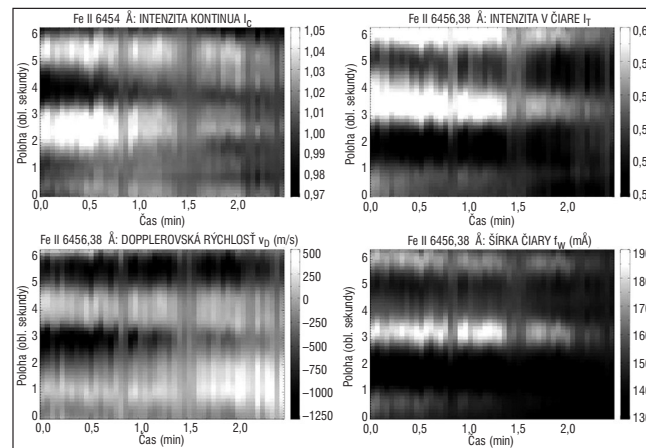
Analýzou našich prvých pozorovaní, získaných už v roku 2000, sa po prvý raz podarilo ukázať časový a súčasne priestorový priebeh zmien profilov spektrálnej čiary (Rybák a kol., A&A 420, 1141; 2004), spôsobených nadzvukovým prúdom plazmy a jeho zabrzdnením v medzigranulárnom priestore (obr. 4). Počas skoro 2 minút bol viditeľný výrazný nárast šírky pozorovanej spektrálnej čiary práve na okraji granuly, kde bol súčasne pozorovaný i najväčší rozdiel rýchlostí pohybu plazmy. Porovnanie s predpoveďou numerických simulácií ukázalo veľmi dobrú kvalitatívnu zhodu výsledkov, z čoho jednoznačne vyplýva, že predpovedaný jav nadzvukového prúdu plazmy a jeho zabrzdzenia je reálny. Kvantitatívna zhoda hodnôt



Obr. 5. Ukážka opravy výsledkov numerických simulácií so zahrnutím prístrojových efektov a vplyvu zemskej atmosféry na pozorovanie prejavov prúdu plazmy s nadzvukovou rýchlosťou. Grafy zobrazujú priebeh šírky spektrálnej čiary 645,6 nm (horný panel) a dopplerovský posun tejto čiary (dolný panel) naprieč javom. Plná čiara znázorňuje priebeh parametrov s vlastným rozlíšením simulácií (10 km), čiarkovaná čiara priebeh parametrov po zahrnutí efektu teoretického priestorového rozlíšenia ďalekohľadu (0,25 oblúkovkej sekundy) a bodkovaná čiara priebeh s efektom chvenia obrazu s typickým rozlíšením 0,5 oblúkovkej sekundy. Zahrnutie týchto efektov upravuje hodnoty relatívnej zmeny šírky čiary a zmeny rýchlosti na hodnoty zodpovedajúce pozorovaným hodnotám týchto veličín (1,3 a 1800 m/s).

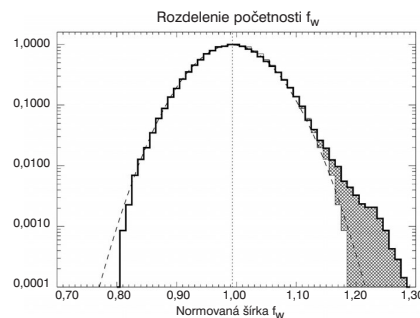


Obr. 3. Prvé publikované zobrazenie polohy miest s nadzvukovým horizontálnym pohybom plazmy, vyplývajúce z numerickej simulácie konvekcie v povrchových vrstvách Slnka (Nesis a kol., ApJ 499, 914; 1998). Biele oblasti ukazujú miesta s pohybom plazmy nadzvukovou rýchlosťou, sivé oblasti znázorňujú ostatné časti granúl a čierne oblasti medzigranulárne priestory.



Obr. 4. Panely obrázku znázorňujú časový a priestorový priebeh spektrálnych charakteristík čiary Fe II 645,6 nm počas trvania nárazovej vlny. Prítomnosť javu indikovalo výrazné zvýšenie šírky čiary (pravý dolný panel). Jav nastal v miestach na hranici medzi granulou a medzigranulárnym priestorom, ako vidieť na priebehu intenzity kontinua (ľavý horný panel), ako i reziduálnej intenzity v centre čiary – ale s opačným priebehom (pravý horný panel). Dopplerovská zložka rýchlosti (ľavý dolný panel) získaná z celkového profilu čiary tu vykazuje najvyššie hodnoty priestorového gradientu, ako i najvyššiu hodnotu rozdielu rýchlostí na krajoch javu pozdĺž priestorovej súradnice (štrbiny spektrogrfu).

Obr. 6. Graf rozdelenia početnosti normovaných hodnôt šírky spektrálnej čiary Fe II 645,6 nm. Distribúcia, zobrazená v logaritmickej škále, vykazuje celkovo veľmi symetrický tvar, ale s malým zvýšením početnosti pre hodnoty normovanej šírky čiary väčšie ako 1,2-násobok priemernej hodnoty. Plocha vyznačenej časti rozdelenia bola priradená skúmaným javom a zodpovedá len 0,4 % celkového rozsahu pozorovaní.



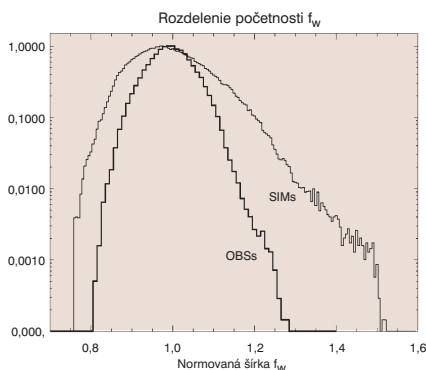
veličín získaných pozorovaniami a simuláciami nastáva len vtedy, ak do porovnania výsledkov zahrnieme nielen hodnoty pozorovaných veličín, ale i vplyv atmosféry na tieto hodnoty (obr. 5). Novým výsledkom bolo i zistenie súvisu nadzvukového prúdu plazmy s výskytom výraznej koncentrácie magnetického toku v medzigranulárnom priestore, ktorý sa nachádzal na opačnej strane tej istej granuly, v ktorej bol pozorovaný prúd plazmy.

Otázka, či aj predpovedaná pravdepodobnosť výskytu týchto javov na slnečnom povrchu zodpovedá výsledkom pozorovaní, je stále otvorená. Numerickej model, uspokojivo popisujúci konvekciu na povrchu Slnka, by mal správne predpovedať i tento parameter. Naše pozorovania, napriek ich relatívnej obmedzenosti v čase a priestore (15 minút pozorovania s výškou štrbiny spektrogrfu 100 oblúkových sekúnd), dali odpoveď i na túto otázku. Využili sme na to rozdelenie početnosti šírky pozorovanej spektrálnej čiary z celého rozsahu meraní (obr. 6). Rozdelenie naozaj vykazuje asymetrický priebeh so zvýšeným počtom vysokých hodnôt šírky čiary. Z rozdelenia sme odhadli, že prejavy nadzvukových prúdov plazmy pokrývajú 0,4 % pokojného povrchu Slnka. Numericke výsledky simulácií získané Steinom a Nordlundom (ApJ 499, 914; 1998) však ukázali 10-krát vyššiu hodnotu pokrytia. Tento rádivý rozdiel je možné aspoň čiastočne vysvetliť trojrozmernou konfiguráciou prúdov a ich orientáciou voči pozorovateľovi, ako potvrdili výsledky numerických simulácií experimentov (Solanki a kol., A&A 308, 623; 1996). Ďalším možným zdrojom rozdielu by mohol byť

i zjednodušený postup používaný na výpočet profilov spektrálnych čiar, ktoré by mali byť emitované z plazmy za fyzikálnych podmienok, vyplývajúcich z výsledkov numerických simulácií. Rozdiel medzi výsledkami pozorovaní a výsledkami numerických simulácií potvrdzuje napríklad i porovnanie rozdelenia pozorovaných širokých spektrálnych čiar, vznikajúcej vo fotosfére pokojného Slnka a rozdelenia získaného zo simulácií konvekcie vo fotosfére súčasne s chromosférou bez zahrnutia magnetických polí (obr. 7), ktoré pripravila skupina vedená S. Wedemeyerom-Böhmom pomocou programu CO5BOLD. Práve pre tento typ numerických simulácií, ktoré nemajú včlenený vplyv magnetického poľa, ale siahajú výškovo až do chromosféry, je porovnanie s výsledkami pozorovaní veľmi dôležité – vykazujú totiž veľmi veľké množstvo dynamických javov a vlnení, ktoré v týchto modeloch konvekcie zodpovedajú za ohrev plazmy v chromosfére tak, že v nej zostáva

i dostatok plazmy s nižšou teplotou. Porovnanie rozdelení ale ukazuje, že i keď zahrnieme do úvah efekty, spôsobené vplyvom pozorovacích prístrojov a zemskej atmosféry, simulácie vykazujú prebytok javov s mimoriadne rozšíreným profilom spektrálnej čiary (Rybák a kol., ASP Conf. Series, 354, 77; 2006). To vedie k domnienke, že dynamických efektov, ako sú nárazové vlny, je v simulácii bez zahrnutia magnetického poľa príliš veľa v porovnaní s pozorovaním. To preferuje výsledky, ktoré boli už dávnejšie získané sice len pri dvojrozmerných simuláciách konvekcie, ale so zahrnutím magnetického poľa.

Tento výsledok, ktorý sme dosiahli len nedávno, však trpí nateraz jedným nedostatkom. Ako rozsah pozorovaní, tak i rozsah numerických simulácií, ktoré sme mali k dispozícii, boli príliš obmedzené, takže výsledok nie je dostatočne štatisticky hodnoverný. Preto sme sa pokúsili so spolupracujúcimi kolegami z Kiepenheuerovho ústavu pre slnečnú fyziku (Freiburg, Nemecko) postúpiť v oboch smeroch: získať nové pozorovania s väčším objemom dát, ako i pripraviť numerické simulácie s väčším priestorovým a časovým rozsahom a z nich vypočítať syntetické profily tej spektrálnej čiary, ktorá bola zaznamenávaná počas nových pozorovaní. Navyše sme sa rozhodli zlepšiť metódu úpravy výsledkov numerických simulácií na úrovni rozlíšenia získaných pri pozorovaniach. Keďže na spracovaní pozorovaní sme už pracovali, ale

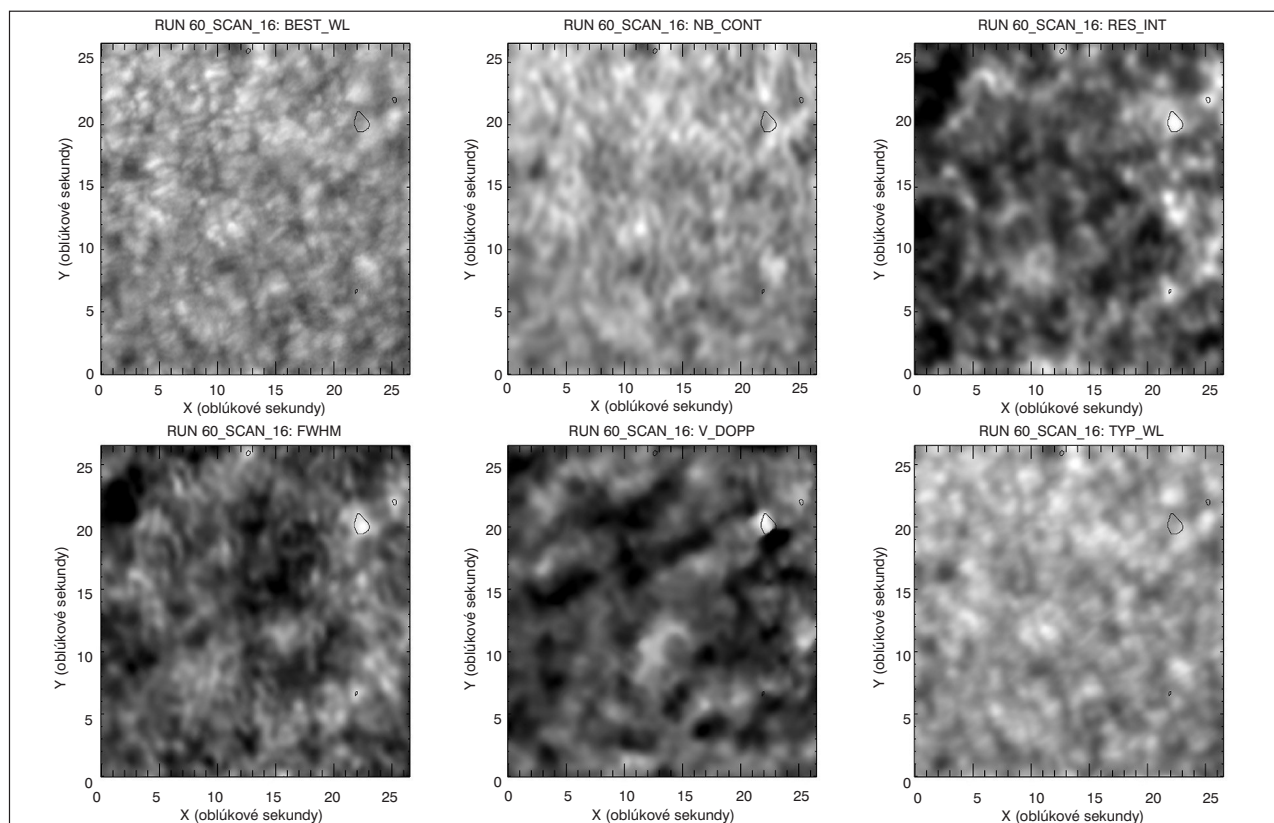


Obr. 7. Graf rozdelení normovaných hodnôt šírky fotosférickej spektrálnej čiary Fe II 645,6 nm, získaných z pozorovaní (hrubšia, vnútorná čiara) a zo simulácií bez zahrnutia vplyvu magnetického poľa, vypočítaných programom CO5BOLD, ale už po uvážení efektov konečného rozlíšenia pozorovaní a vplyvu chvenia obrazu počas pozorovaní (tenšia, vonkajšia čiara). Rozdiely medzi rozdeleniami, zobrazenými v logaritmickej škále, sú zrejme, pričom poukazujú na častejší výskyt ako veľmi úzkych, tak i veľmi širokých profilov spektrálnej čiary vo výsledkoch simulácií.

nová verzia metódy ešte nie je pripravená, ilustrujeme budúce smerovanie tohoto výskumného smeru na našom ústave len ukázkou výsledkov nových pozorovaní (obr. 8), ktoré sme získali na

tom istom ďalekohľade VTT ale s použitím iného post-fokusového zariadenia – namiesto spektrografu sme v októbri 2006 použili prístroj TESOS. Tento prístroj je založený na využití troch laditeľných Fabry-Perotových interferometrov a umožňuje získavať profily vybraných spektrálnych čiar súčasne v dvojrozmernom zornom poli s priemerom až 40 oblúkových sekúnd. Ukázalo sa, že pozorovania nielenže evidentne obsahovali observačné prejavy nárazových vln, ale najmä rozsah týchto pozorovaní bol omnoho väčší ako rozsah pôvodných meraní získaných pomocou spektrografu v roku 2000. Predpokladáme, že vyvinutie novej metódy a jej aplikovanie na porovnanie našich pozorovaní s výsledkami numerických simulácií stihneme, popri iných projektoch a povinnostiach, ešte do konca roku 2007.

Jediným, čo nám v tomto výskumnom projekte nateraz preto chýba nie sú otvorené otázky, pozorovací materiál či výsledky numerických simulácií, ale mladí študenti – budúci spolupracovníci, ktorí by mali záujem svojim zanietením, aktivitou a odbornou erudíciou rozšíriť náš výskumný tím. Pochopenie dynamických javov, ktoré prebiehajú na povrchu Slnka a hviezd, a nielen vysvetlenie hodnoty priemernej teploty povrchu hviezd, je rozhodne výzvou, ktorá stojí za vynaloženú námahu. Radosť z poznania a z úspešného prekonávania prekážok na ceste za ním je neuveriteľne opojným elixírom.



Obr. 8. Ukážka výsledkov pozorovaní pokojnej atmosféry Slnka, získaných prístrojom TESOS na ďalekohľade VTT, Tenerife, Kanárske ostrovy, ktorý je založený na sekvenčnom skenovaní profilu vybranej spektrálnej čiary. Panely obrázku zobrazujú oblasť pokojného povrchu Slnka blízko jeho okraja s rozmerom 26x26 oblúkových sekúnd. Ľavý horný, stredný horný a pravý dolný panel ukazujú intenzitu kontinua pre najkvalitnejšiu referenčnú snímku, pre kontinuum v okolí čiary a pre priemerný obraz kontinua získaný počas merania celého skenovaného profilu spektrálnej čiary. Ľavý dolný panel zobrazuje šírku pozorovanej čiary neutrálneho atómu železa Fe I 543,4 nm, kde je súvislou čiarou označený prejav nárazovej vlny s hodnotou šírky čiary presahujúcej 1,15-násobok jej priemernej hodnoty. Dolný stredný panel znázorňuje dopplerovské rýchlosti a pravý horný panel reziduálnu intenzitu tejto čiary. Prejav nárazovej vlny sa v súlade s výsledkami simulácií nachádza na okraji granuly, kde je rozdiel dopplerovských rýchlostí najväčší.