

# Dynamika jasných bodov v G-páse

*M. Bodnárová, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, mbodnarova @astro.sk*

*J. Rybák, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica*

*D. Utz, Institute of Physics, University of Graz, Graz, Austria*

## Abstrakt:

V práci sme študovali niekoľko parametrov popisujúcich dynamiku jasných bodov v G-páse (JBGP), odvodenú na základe snímok v G-páse získaných Holandským otvoreným ďalekohľadom. Zamerali sme sa na štyri štandardné (efektívna rýchlosť, zmena efektívnej rýchlosti, zmena smerového uhla a centrifugálne zrýchlenie) a dva nami novozavedené parametre (miera pohybu a časový odstup medzi opätovným výskytom). V prípade štandardných parametrov sú naše výsledky v súlade s výsledkami iných autorov pri porovnateľnom priestorovom a časovom rozlíšení použitých dát. Nami novozavedené parametre popisujú skutočný posun medzi polohou JBGP pri jeho prvej a poslednej identifikácii (miera pohybu) a frekvenciu výskytu JBGP na tom istom mieste (časový odstup medzi opätovným výskytom).

## 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 ( $\sim 1$  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 ( $\sim 1$  kG) koncentrácií magnetického toku (Berger a Title, 2001), a preto je ich možné použiť ako nepriame indikátory magnetického poľa. JBGP sú malé magnetické elementy v slnečnej fotosfére, ktoré je dôležité študovať pre lepšie pochopenie slnečného magnetizmu. Vlastnosťami JBGP sa vo svojich prácach zaoberali už viacerí autori (Muller a kol., 1994; Berger a kol., 1998; Nisenson a kol., 2003 a ďalší). Okrem toho JBGP zohrávajú dôležitú úlohu v slnečnej fyzike, lebo ich pohyb môže generovať magnetohydrodynamické vlny, ktoré môžu prispievať k ohrevu slnečnej koróny.

V našej práci sme sa venovali štatistike dynamických parametrov (štyri klasické a dva novozavedené parametre) JBGP, ktoré boli na snímkach v G-páse identifikované plne automatickým algoritmom vyvinutým D. Utzom (Utz a kol. 2009; 2010).

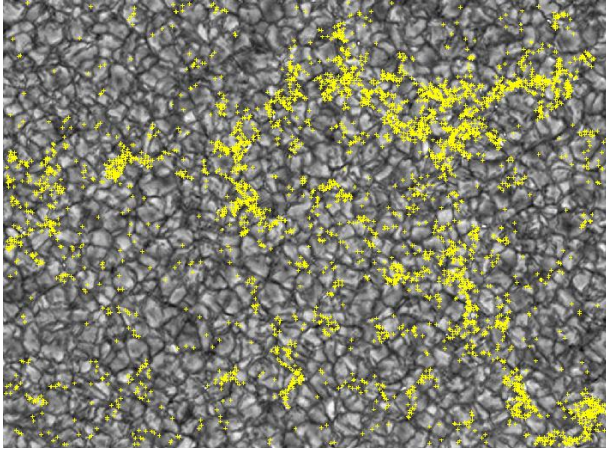
## 2. DÁTA

V práci sme použili speklované snímky (Sütterlin a kol., 2001) pokojnej slnečnej fotosféry v G-páse (430 nm), ktoré boli získané pomocou Holandského otvoreného ďalekohľadu (DOT-Dutch Open Telescope) (Rutten a kol., 2004). Súbor dát bol napozorovaný 19. októbra 2005 v čase 09:55-11:05 UT v oblasti blízko centra slnečného disku pri dobrých pozorovacích podmienkach, a pozostáva zo 142 snímok s kadenciou 30 s, pričom 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 s naznačenými polohami JBGP (poloha JBGP je definovaná na základe polohy jeho barycentra jasnosti) identifikovaných automatickým algoritmom.

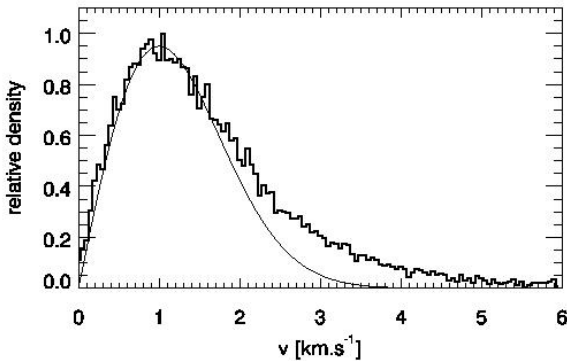
## 3. VÝSLEDKY

### 3.1. Efektívna rýchlosť

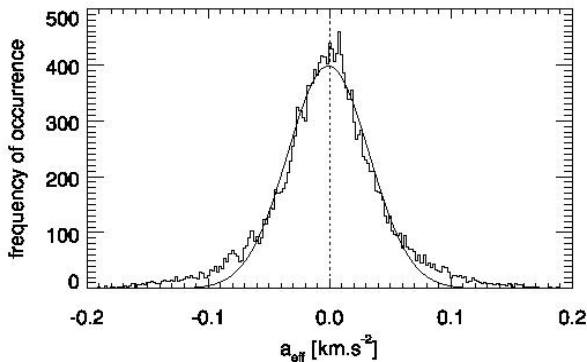
Základným parametrom pre popis dynamiky JBGP je ich efektívna rýchlosť  $v$ , definovaná podľa vzťahu 
$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$
 kde  $v_x$  a  $v_y$  sú x-ová a y-ová zložka vektora rýchlosti. Efektívna rýchlosť vytvára nesymetrické rozdelenie hodnôt, ktoré je možné aproximovať Rayleighovým rozdelením ( $\sigma = 1,0$ ) a zodpovedajúci histogram je znázornený na obr. č. 2.



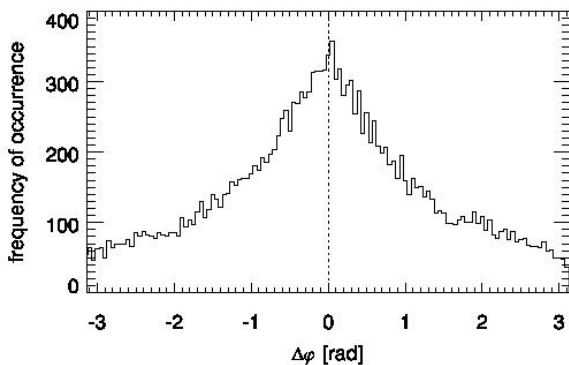
Obr. č. 1.: Snímka pokojnej slnečnej fotosféry v G-páse. Krížikmi sú naznačené polohy identifikácií JGBP.



Obr. č. 2.: Histogram efektívnych rýchlostí  $v$  s preloženým vzorovým Rayleighovým rozdelením.



Obr. č. 3.: Histogram zmien efektívnej rýchlosti  $a_{eff}$  apriximovaný Gaussovým rozdelením. Kladné hodnoty predstavujú zrýchlenie a záporné hodnoty spomalenie pohybu.



Obr. č. 4.: Histogram zmien smerového uhla  $\Delta\varphi$ .

Zistené hodnoty efektívnych rýchlostí sú v rozmedzí od 0,0 do 6,0  $\text{km s}^{-1}$ , priemerná hodnota je  $1,62 \pm 1,06 \text{ km s}^{-1}$  a najpravdepodobnejšia hodnota je  $\sim 0,9 \text{ km s}^{-1}$ . Zistený histogram efektívnych rýchlostí sa pre rýchlosti od  $\sim 2$  do  $\sim 4 \text{ km s}^{-1}$  značne odkláňa od vzorového Rayleighovho rozdelenia.

### 3.2. Zmena efektívnej rýchlosti

Skúmali sme zmenu efektívnej rýchlosti JGBP  $a_{eff} = dv/dt$  (klasické zrýchlenie). Histogram zmien efektívnej rýchlosti je možné aproximovať Gaussovým rozdelením ( $\text{FWHM} = 0,08 \text{ km s}^{-2}$  a posun voči centru je  $-0,001 \text{ km s}^{-2}$ ), ktoré je znázornené na obr. č. 3. Väčšina zistených hodnôt (77,8 %) je v rozmedzí od  $-0,05$  do  $+0,05 \text{ km s}^{-2}$ , čo indikuje zrýchlenie/spomalenie pohybu JGBP o maximálne  $1,5 \text{ km s}^{-1}$ .

### 3.3. Zmena smerového uhla

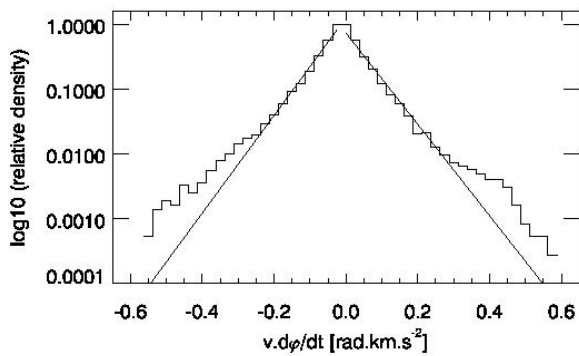
Na posúdenie zmeny smeru pohybu jednotlivých JGBP za krok v čase (30 s) sme použili zmenu smerového uhla  $\Delta\varphi$  ( $\Delta\varphi = \varphi_2(t_2) - \varphi_1(t_1)$ ) za 30 s, pričom smerový uhol sme definovali ako uhol medzi čiarou spájajúcou barycentrum jasnosti JGBP v dvoch po sebe nasledujúcich časových krokoch a referenčnou osou. Na obr. č. 4. je znázornený histogram zmien smerového uhla, ktorý má rozšírený vrchol rozdelenia okolo nulovej hodnoty. Takýto tvar rozdelenia napovedá, že smer pohybu jednotlivých JGBP sa počas 30 s mení minimálne. Pritom všetky možnosti zmeny smeru pohybu majú nenulovú pravdepodobnosť a našli sa aj prípady keď JGBP po 30 s zmenil svoj smer pohybu na opačný.

### 3.4. Centrifugálne zrýchlenie

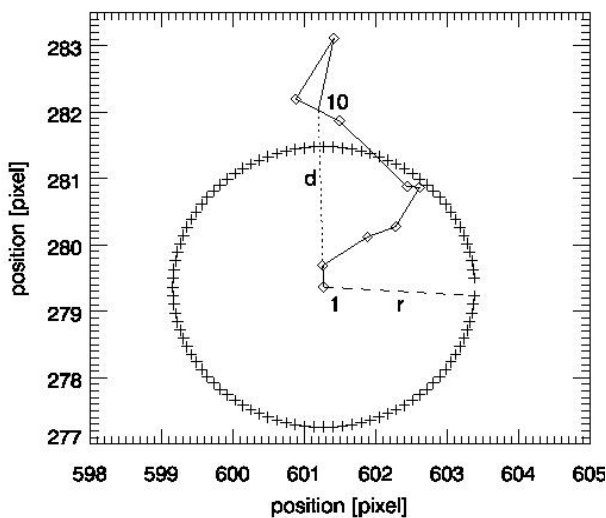
Centrifugálne zrýchlenie,  $v d\varphi/dt$  sa považuje za relevantnú veličinu pre posudzovanie transversných vln v magnetických silotrubiciach (Nisenson a kol. 2003) a má význam aj pri porovnávaní modelov vln v magnetických silotrubiciach s pozorovaniami (Möstl a kol. 2006).

Histogram centrifugálnych zrýchlení je znázornený na obr. č. 5. v logaritmickú škále, keďže zistené rozdelenie hodnôt má tvar úzkeho gausianu. Histogram je možné aproximovať za pomoci dvoch priamok (sklon napravo je 5,54 a sklon priamky naľavo je -5,48), pričom odchýlky od týchto priamok predstavujú len 0,87 % hodnôt na ľavom okraji histogramu a 0,42 % hodnôt na pravom okraji histogramu.

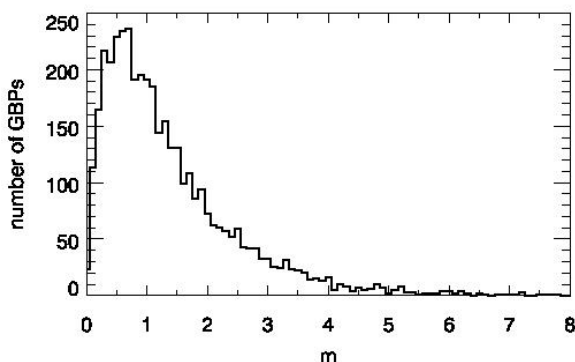
Niektoré hodnoty centrifugálneho zrýchlenia prevyšovali hodnotu gravitačného zrýchlenia na povrchu Slnka ( $274 \text{ m s}^{-2} \approx 0,27 \text{ km s}^{-2}$ ), čo naznačuje, že tieto vysoké hodnoty centrifugálneho zrýchlenia môžu mať značný vplyv na vnútornú štruktúru silotrubíc magnetického poľa (pozorovateľné v G-páse v podobe JGBP).



Obr. č. 5.: Histogram centrifugálnych zrýchlení v  $d\phi/dt$  a jeho aproximácia pomocou dvoch priamok.



Obr. č. 6.: Dráha pohybu konkrétneho JBG. Kosoštvorce označujú polohu JBG v jednotlivých časových krokoch (s odstupom 30 s), pričom 1 označuje polohu prvej identifikácie daného JBG a 10 označuje jeho poslednú identifikáciu. Prerušovaná čiara ( $r$ ) vymedzuje polomer kruhu definovaného plochou JBG pri jeho prvej identifikácii a bodkovaná čiara ( $d$ ) predstavuje vzdialenosť medzi polohami prvej a poslednej identifikácie JBG.



Obr. č. 7.: Histogram miery pohybu JBG. Na vertikálnej osi sú uvedené počty JBG s príslušnými hodnotami miery pohybu  $m$ .

### 3.5. Miera pohybu

Pohyb nami študovaných JBG sa vyznačoval veľkou premenlivosťou - JBG počas svojej existencie často menili svoj smer pohybu aj rýchlosť pohybu - ale vzdialenosť medzi polohou ich prvej a poslednej identifikácie je v porovnaní s ich plochou malá. Na orb. č. 6. je znázornená dráha pohybu typického JBG.

Pre reálnejšie posúdenie pohybu JBG počas ich existencie sme zaviedli nový parameter: mieru pohybu  $m$  jednotlivého JBG ako  $m = d/r$ , kde  $d$  je vzdialenosť medzi polohami barycentra jasnosti daného JBG pri jeho prvej a poslednej identifikácii a  $r$  je polomer kruhu, ktorého obsah je daný plochou JBG pri jeho prvej identifikácii v čase.

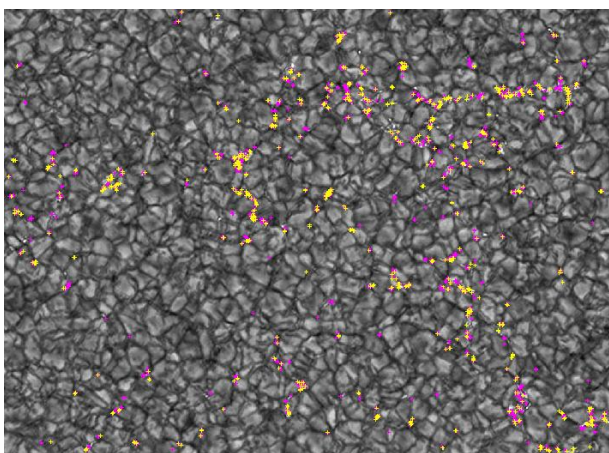
Histogram miery pohybu všetkých študovaných JBG je znázornený na obr. č. 7. Ako tomu napovedá aj uvedený histogram ~45 % študovaných JBG má  $m < 1$ , teda tieto JBG sa počas svojej existencie podstatne nevzdialili od miesta svojej prvej identifikácie (barycentrum jasnosti bolo pri ich poslednej identifikácii vo vnútri kruhu daného plochou JBG pri jeho prvej identifikácii). Napriek tomu ďalších ~55 % JBG má  $m > 1$ , teda sa na konci svojej existencie nachádzali mimo vyššie popísaného kruhu. Zo štatistického hľadiska sú zaujímavé najmä tie JBG, pre ktoré platí  $2 < m < 4$ , keďže tieto JBG vykazujú signifikantný pohyb, ktorý nie je možné zanedbať v dôsledku rôznej novej polohy barycentra jasnosti v rámci plochy daného JBG.

Ako naznačuje aj obr. č. 8., nie možné rozlišovať podľa polohy v rámci zorného poľa JBG s veľkými a malými hodnotami miery pohybu, teda na tých istých miestach sa vyskytujú tie JBG, ktoré sú stabilne a zároveň aj tie, ktoré počas svojej existencie podstatnejšie menia svoju polohu.

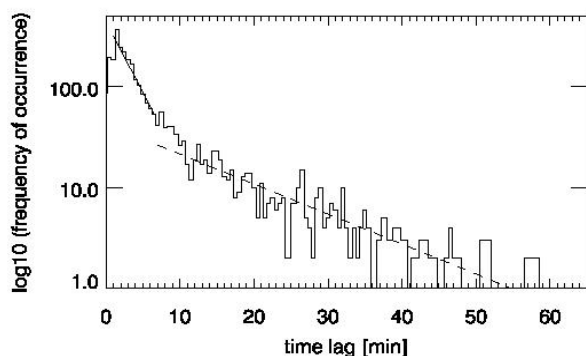
### 3.6. Časový odstup medzi znovuobjavením sa rôznych JBG na tých istých miestach

Nami študované JBG sa preferenčne vyskytovali v určitých miestach zorného poľa ďalekohľadu, najmä v oblastiach vymedzujúcich magnetickú sieť. Na týchto miestach boli pozorované rôzne JBG prakticky počas celého trvania pozorovania, preto sme sa rozhodli vyšetriť s akou frekvenciou sa objavujú JBG na tých istých miestach.

Zaviedli sme parameter s názvom časový odstup, ktorý vyjadruje časový odstup medzi zaniknutím starého JBG a objavením sa nového JBG na tom istom mieste - teda v rámci kruhu so stredom v barycentre jasnosti starého JBG a s polomerom 0,36 oblúkových sekúnd (5 pixlov na snímke). Na obr. č. 9. je znázornený získaný histogram časových odstupov v logaritmickej škále, ktorý naznačuje, že početnosť krátkych časových odstupov (do ~4 min) je podstatne väčšia ako v prípade dlhých časových odstupov. Pričom, najpočetnejšie sú odstupy v trvaní ~2 - 3 min.



Obr. č. 8.: Kompletné zorné pole ďalekohľadu s naznačenými polohami JBGP s  $m < 1$  (fialové) a s  $m > 2$  (žlté).



Obr. č. 9.: Histogram časových odstupov medzi znovuobjavením sa rôznych JBGP na tých istých miestach zorného poľa v logaritmickej škále.

#### 4. ZÁVER

V práci sme študovali šesť rôznych parametrov popisujúcich dynamiku JBGP. V prípade štyroch tradičných parametrov (efektívna rýchlosť, zmena efektívnej rýchlosti, zmena smerového uhla a centrifugálne zrýchlenie) sú naše výsledky v súlade so zisteniami iných autorov, ktorí sa zaoberali dynamikou JBGP.

Následne sme definovali dva nové parametre: na posúdenie zmeny polohy JBGP počas ich existencie (miera pohybu) a frekvencie, s ktorou sa JBGP objavujú na tých istých miestach (časový odstup).

Zistili sme, že celkový pohyb JBGP počas ich existencie sa deje v rámci malého priestoru pozdĺž medzigranulárnych priestorov, pričom stabilné aj viac pohyblivé JBGP sa pozorujú na tých istých miestach.

Početné krátke časové odstupy medzi znovuobjavením sa JBGP na tých istých miestach zorného poľa ďalekohľadu naznačujú, že JBGP majú tendenciu sa po zmiznutí znovu objaviť na tých istých miestach – teda JBGP sú krátkodobými manifestáciami dlhšie existujúcich magnetických polí.

#### PodĎakovanie

PodĎakovanie patrí Slovenskej grantovej agentúre APVV za podporu v rámci projektu 0816-11 a projektu Vega 2/0108/12.

Pozorovania boli podporované Trans-národným prístupovým programom projektu OPTICON a projektom ESMN (EU FP6).

Ďalekohľad DOT sa nachádza v Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias.

#### LITERATÚRA

Berger T. E., Löfdahl M. G., Shine R. A. and Title A. M., 1998, *Astrophysical Journal* 495, 973

Berger T. E., Shrijver C. J., Shine R. S., Tarbell T. D., Title A. M. and Scharmer, G., 1995, *Astrophysical Journal* 454, 531

Berger T. E. and Title A. M., 2001, *Astrophysical Journal* 553, 449  
Muller R., Roudier Th., Vigneau J. and Auffret H., 1994, *Astronomy and Astrophysics* 283, 232

Möstl, C., Hanslmeier, A., Sobotka, M., Puschmann and K., Muthsam, H.J., 2006, *Solar Physics* 237, 13

Nisenson P., Ballegoijen A.A., de Wijn A. G. and Sütterlin P., 2003, *Astrophysical Journal* 587, 458

Rutten R. J., Bettonvil F. C. M., Hammerschlag R. H., Jägers A. P. L., Leenaarts J., Snik F., Sütterlin P., Tziotziou K. and 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

Sütterlin P., Hammerschlag R. H., Bettonvil F. C. M., Rutten R. J., Skomorovsky V. I. and Domyshev 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., Muller R., Veronig A. and Muthsam H., 2009, *Astronomy and Astrophysics* 498, 289

Utz D., Hanslmeier A., Muller R., Veronig A., Rybák J. and Muthsam H., 2010, *Astronomy and Astrophysics* 511, A39