

# Časový vývoj a pohyby jemnej štruktúry fotosféry v okolí slnečného póru

*I. Dorotovič, Slovenská ústredná hviezdáreň Hurbanovo, dorotovic @suh.sk  
M. Sobotka, Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, msobotka @asu.cas.cz  
P.N. Brandt, Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik, D-79104 Freiburg, Germany,  
pnb @kis.uni-freiburg.de  
G.W. Simon, Air Force Research Laboratory and National Solar Observatory, Sunspot,  
NM 88349 a Emeritus Research Services, Santa Fe, NM 87507, USA, simon @nso.edu*

## Abstrakt

Príspevok predstavuje časový vývoj filamentárnej oblasti priľahlej k veľkému póru, horizontálne pohyby v okolí póru a morfológické zmeny jemnej štruktúry fotosféry v pozorovanej oblasti na základe analýzy 11 hodinovej série obrázkov veľkého póru v aktívnej oblasti NOAA 7519 (celkový počet 1782 záznamov), ktoré boli zaznamenané dňa 5. júna 1993 v bielom svetle s vysokým priestorovým rozlíšením pomocou Švédskeho vákuového slnečného ďalekohľadu, La Palma, Kanárske ostrovy. Bolo zistené, že štruktúra oblasti medzi veľkým pórom a priľahlým mikropórom nebola stále filamentárna, ale sa menila z filamentárnej na granulárnu a naopak. Táto oblasť rotovala v smere pohybu hodinových ručičiek počas celej doby pozorovania, pričom uhlová rýchlosť rotácie klesala s časom z hodnoty  $7,6^\circ \text{ h}^{-1}$  na  $2,7^\circ \text{ h}^{-1}$ . Detailne boli skúmané pohyby objektov jemnej štruktúry v okolí póru a v ňom využitím algoritmov „local correlation tracking“ a „feature tracking“. Na základe výsledkov možno skonštatovať, že analyzovaná filamentárna oblasť bola odlišná od normálnej penumbry, hoci na druhej strane mala – mnohé penumbrálne črty. Táto práca môže byť podnetom pre nové pozorovania s vysokým rozlíšením, kde by boli zaznamenané simultánne aj informácie o magnetickom poli a Dopplerových rýchlostiach v danej oblasti, čo by umožnilo komplexnejšie interpretovať získané výsledky.

## 1. ÚVOD

Slnečné škvrny, póry, objekty jemnej štruktúry slnečnej fotosféry, ako aj ich fotometrické parametre boli v posledných rokoch intenzívne skúmané z teoretického i pozorovateľského hľadiska (Sobotka 1997, 1999, 2000). Došlo k rýchlemu rozvoju pozorovaní s vysokým priestorovým rozlíšením a pripravované sú ďalšie projekty. Napr. podrobnosti projektu GREGOR sú uvedené v tomto zborníku v práci Sobotka a Klvaňa (2002).

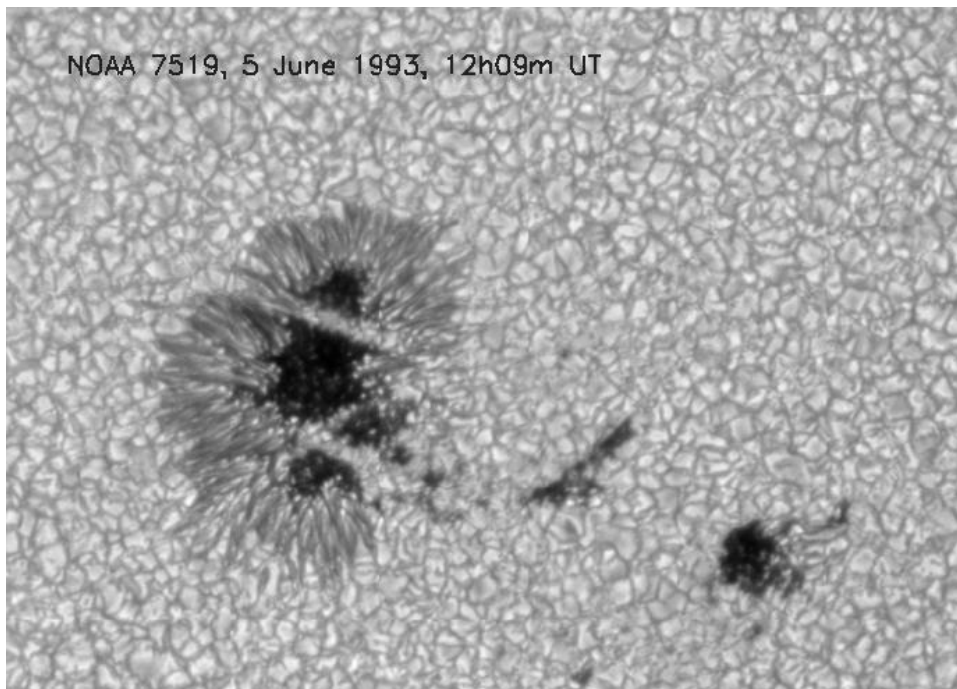
Slnečné póry sa zjavujú po vynorení takmer vertikálneho magnetického poľa. Sobotka a kol. (1999b) skúmali časový vývoj jemnej štruktúry vo vnútri a v okolí slnečných pórov, najmä interakciu pórov s okolitými konvektívnymi pohybmi. Zistili, že pohyby smerom k póru prevládajú v oblasti 1500 km okolo neho, kým vo väčších vzdialenostiach sa granule pohybujú smerom od póru. Pre pohyby penumbrálnych zón smerom k póru sú typické rýchlosti okolo  $0,4 \text{ km s}^{-1}$  a medián životnej doby 29 minút a pre pohyby smerom od póru hodnoty  $0,5 \text{ km s}^{-1}$  a 22 minút (Sobotka a kol., 1999a a citácie

v tej práci). Význanou vývojovou etapou evolúcie slnečných škvŕn je vytvorenie penumbry. Občas možno pozorovať fragmenty penumbry (dočasné penumbry) okolo pórov. Tieto fragmenty sa premenia na typickú penumbru ak sa z póru vyvinie slnečná škvrna. Vzhľadom na krátku životnosť je veľmi ťažké pozorovať takéto fragmenty, ale napr. Bray a Loughhead (1964) na základe pozorovaní v bielom svetle popísali formovanie a prechodnej penumbry s životnosťou talmer 3 h.

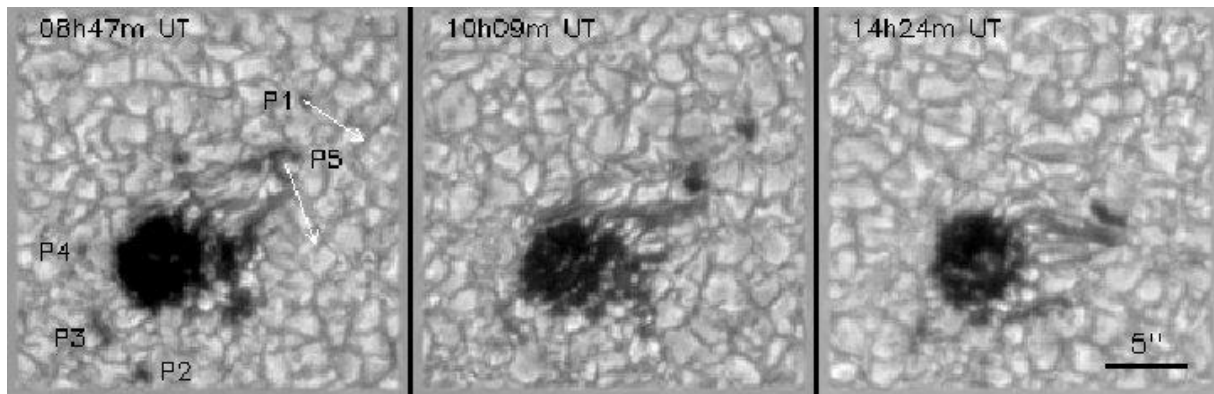
V tejto práci sme sa zamerali najmä na vývoj filamentárnej oblasti, ktorá sa nachádza medzi horným pravým kvadrantom veľkého póru a mikropóru P5 na obr. 2.

## 2. POZOROVANIE A METÓDA SPRACOVANIA

V práci boli použité obrázky z mimoriadne dlhej (11 hodín) časovej série pozorovania so stabilným a veľmi kvalitným seeingom, ktoré boli získané 5. júna 1993 medzi  $8^{\text{h}} 07^{\text{m}}$  a  $19^{\text{h}} 07^{\text{m}}$  UT Švédskym vákuovým slnečným ďalekohľadom (Swedish Vacuum Solar Telescope



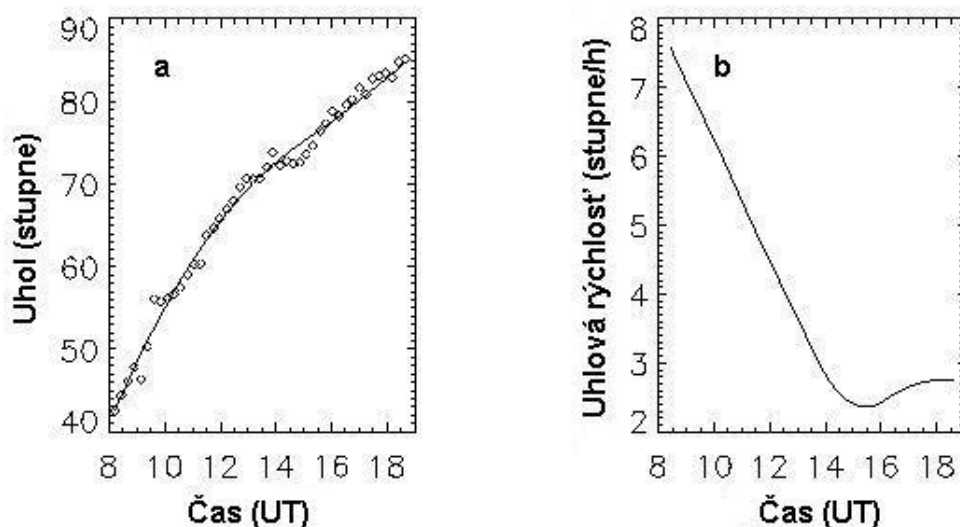
**Obr. 1.** Aktívna oblasť z jedného obrázku z 11 h pozorovania získaného na SVST, La Palma. Zobrazené zorné pole je 87,5" x 62,5"



**Obr. 2.** Veľký pór v aktívnej oblasti NOAA 7519 s príľahlou filamentárnou oblasťou. Rozloženie mikropórov (Ľavý panel); biele čiary naznačujú smery pohybu P1 a P5. Príklady granulóvej (stredný panel) a filamentárnej fázy (pravý panel). Zorné pole je 24" x 24". Mikropóry P1 - P4 boli pozorované v okolí veľkého póru v prvej polovici pozorovacej doby a to od začiatku pozorovania. Pór P5 bol na konci filamentárnej oblasti počas celej doby.

- SVST, Scharmer a kol., 1985) na Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma, Kanárske ostrovy. Bola pozorovaná aktívna oblasť NOAA 7519 s heliografickými súradnicami 5°N a 15°E. Časť typického originálneho obrázku je na obr. 1. CCD kamera s rozmermi čipu 1360 x 1036 pixelov spojená so systémom na výber snímok v reálnom čase snímala obrázky v bielom svetle ( $\lambda = 4680 \pm 50 \text{ \AA}$ ) pri rozlíšení 0,125" na pixel. Vlastnosti objektov jemnej štruktúry vnútri a v okolí vedúcej škvrny boli už skúmané v skoršej práci Sobotka a kol. (1997). V tejto práci bol skúmaný časový vývoj a pohyby jemnej štruktúry fotosféry v okolí póru, ktorý sa nachádza v pravom dolnom rohu obr. 1.

Po korekcii o temný prúd a „flat field“, korekcii rotácie obrazu a intenzitnej normalizácii bolo zorné pole obrázkov zmenšené na 256 x 256 pixelov, a po odstránení chvenia obrazu (rigid alignment) ďalej na 192 x 192 pixelov (24" x 24"), vždy so stredom poľa v strede póru. Kvalitu časovej série obrázkov charakterizuje to, že iba 65 (3,5 %) z 1868 snímok bolo treba vylúčiť kvôli slabému seeingu. Granulárny rms kontrast zvyšných 1803 snímok bol v rozmedzí 6,5 % až 10,6 %. Obrázky boli ďalej opravené o inštrumentálny profil použitím Wienerovho filtra a boli odstránené deformácie obrazu spôsobené nehomogénnym seeingom („des-tretching“). Snímky boli časovo interpolované za úče-



Obr. 4. a) Pozičné uhly rotácie filamentárnej oblasti v smere hodinových ručičiek okolo stredu veľkého póru v závislosti od času (kosoštvorce) a fitovanie údajov kubickým splinom (plná čiara). b) Uhlová rýchlosť rotácie v závislosti od času.

lom získania časového radu s konštantným časovým rozdielom 22 s medzi jednotlivými obrázkami a potom bolo odstránené ešte zvyšné chvenie obrazu spôsobené premenlivým seeingom (subsonické filtrovanie). Prvých 10 a posledných 11 snímkov v sérii bolo nepoužiteľných v dôsledku apodizácie v procese fourierovského 3-D filtrovania, takže výsledný časový rad obsahoval 1782 snímkov z doby od 8<sup>h</sup> 11<sup>m</sup> do 19<sup>h</sup> 03<sup>m</sup> UT. Podrobný popis pozorovania a redukcie údajov možno nájsť v práci Sobotka a kol. (1997).

### 3. VÝSLEDKY

#### 3.1. Vývoj pozorovanej oblasti

V časti zorného poľa ďalekohľadu, ktorú sme použili pre našu analýzu (obr. 2), sa nachádzal veľký pór, priľahlá filamentárna štruktúra a 5 mikropórov P1 – P5. Plocha veľkého póru sa postupne zmenšovala s časom počas celej pozorovacej doby rýchlosťou  $-0,23 \text{ Mm}^2 \text{ h}^{-1}$ . V tejto časti popisujeme vývoj prechodnej filamentárnej štruktúry, ktorá sa nachádzala medzi pórom a mikropórom P5.

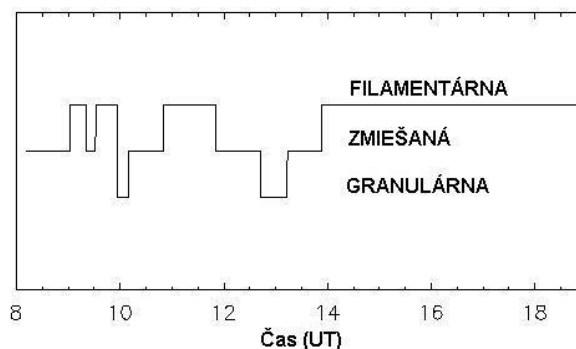
Zistili sme, že táto štruktúra nebola stále filamentárna, ale sa menila z filamentárnej na granulárnu a naopak. V istých obdobiach neprevažovala ani jedna z týchto štruktúr a bola pozorovaná zmiešaná štruktúra. Filamentárna štruktúra prevažovala počas 63 % pozorovacieho času, granulárna počas 7 % a zmiešaná počas 30 % (obr. 3).

Výrazný usmernený tok granúl v oblasti nad veľkým pórom, orientovaný smerom od hlavnej škvry s rýchlosťou  $0,6 - 0,8 \text{ km s}^{-1}$  bol zistený počas prvých dvoch hodín pozorovania. Tento usmernený tok je pravdepodobne spojený s vývojom tokových polí v celej aktívnej oblasti.

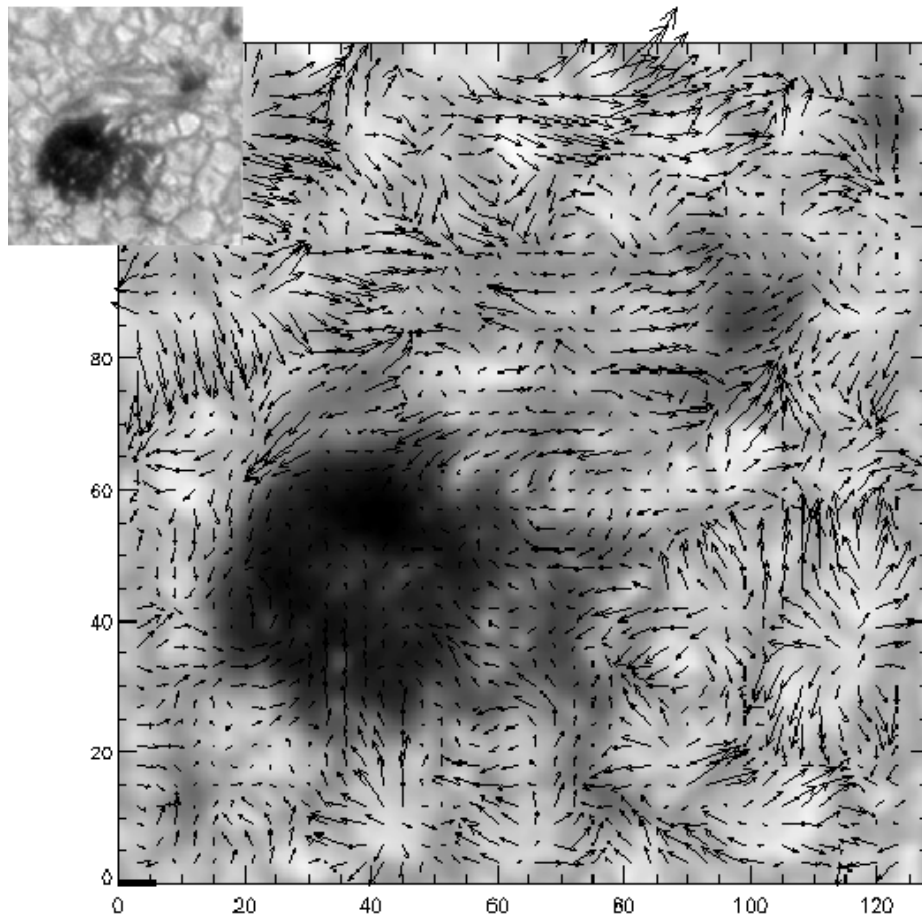
Výrazný tok granúl a fragmentov svetlých filamentov, tangenciálny k okraju póru, bol pozorovaný na okraji filamentárnej oblasti v období 9<sup>h</sup> 04<sup>m</sup> - 11<sup>h</sup> 15<sup>m</sup> UT. Rýchlosť klesala s časom z  $2 \text{ km s}^{-1}$  na  $1 \text{ km s}^{-1}$ .

Rozloženie mikropórov P1 – P5 okolo veľkého póru je ilustrované na obr. 2. Mikropóry P1 – P4 boli pozorované v prvej polovici pozorovacej doby, kým P5, ležiaci na konci filamentárnej oblasti, bol pozorovaný počas celých 11 h. Ich pohyby boli merané algoritmom sledovania objektov („feature tracking algorithm“) koreláciou susedných snímkov vzorkovacím oknom  $2,5'' \times 2,5''$ .

Rotácia filamentárnej oblasti v smere hodinových ručičiek okolo stredu veľkého póru bola pozorovaná počas celej 11-hodinovej doby. Tento efekt je jasne viditeľný na obr. 2. Rotácia zorného poľa spôsobená azimutálnou montážou ďalekohľadu bola dôsledne odstránená (napr. mikropóry P2, P3 a P4 nevykazovali výraznejší pohyb počas ich životných dôb), takže pozorované hodnoty rotácie možno považovať za spoľahlivé.



Obr. 3. Časový vývoj prevažujúcich morfológických štruktúr vo filamentárnej oblasti



**Obr. 5. Horizontálne pohyby vnútri a v okolí veľkého póru počas filamentárnej fázy  $9^h 43^m - 9^h 58^m$  UT. Škála súradníc je v pixeloch (1 pixel =  $0.125''$ ), takže veľkosť obrázku je  $16'' \times 16''$  ( $128 \times 128$  pixelov). Dĺžka čiernej čiary v ľavom dolnom rohu obrázku reprezentuje rýchlosť  $1 \text{ km s}^{-1}$ .**

Pozičné uhly filamentárnej oblasti (merané v smere hodinových ručičiek od y-ovej osi) získané z 45 vizuálnych meraní polohy mikropóru P5, ktorý bol umiestnený na konci filamentárnej oblasti, sú zobrazené na obr. 4a spolu s kubickým splinom údajov. Merania majú určitú nespoľahlivosť kvôli morfológickým zmenám P5. Časový vývoj uhlovej rýchlosti (stupeň  $\text{h}^{-1}$ ) rotácie, získaný z vyhladenej krivky na obr. 4a, je zobrazený na obr. 4b. Celkový uhol rotácie po 11 h bol  $43^\circ$  a uhlová rýchlosť rotácie klesala z hodnoty  $7,6^\circ \text{ h}^{-1}$  na začiatku pozorovania na hodnotu  $2,7^\circ \text{ h}^{-1}$  na konci pozorovania.

### 3.2. Horizontálne pohyby

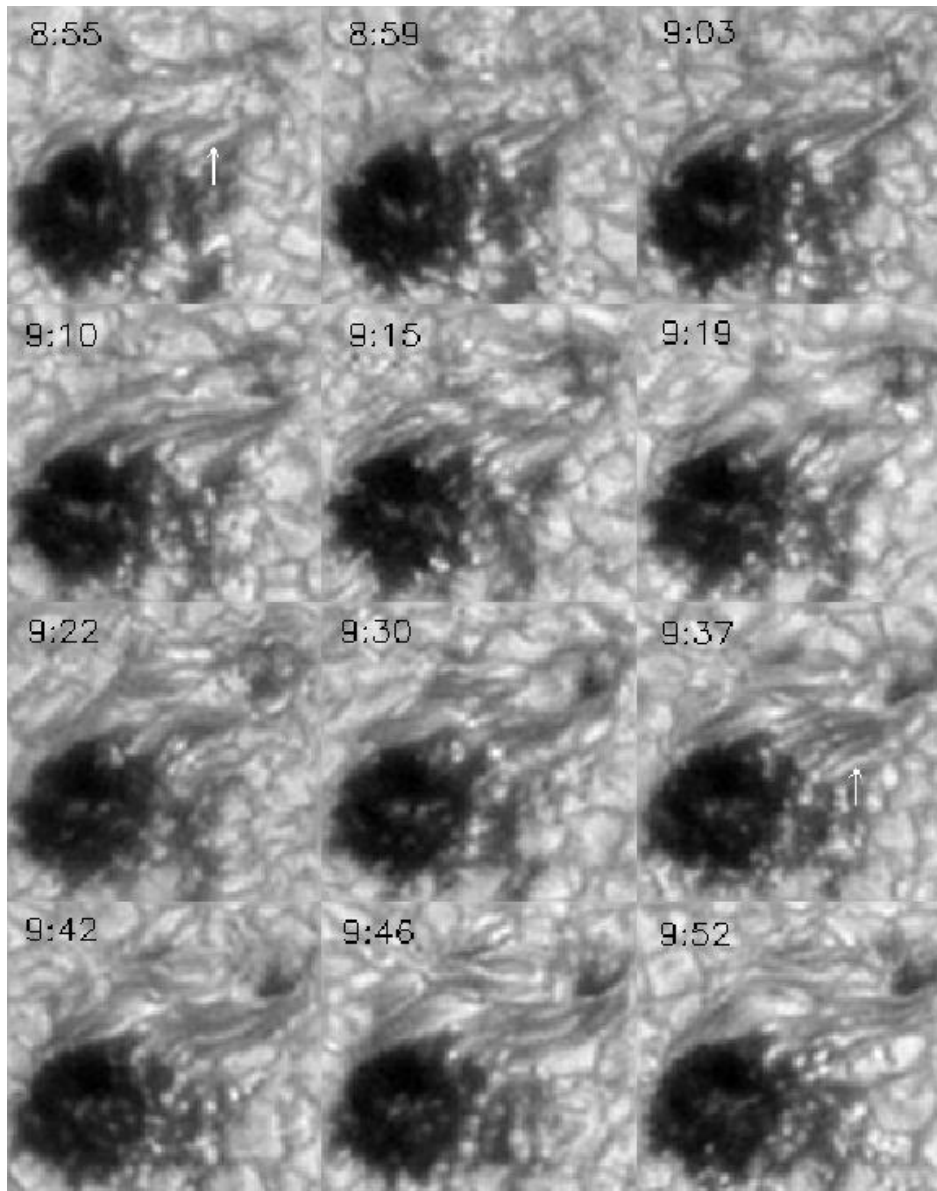
Na skúmanie horizontálnych pohybov a jemných štruktúr vo vnútri póru a v príľahlej filamentárnej štruktúre bol použitý algoritmus sledovania lokálnych korelácií (local correlation tracking – LCT; November a Simon, 1988). Pomocou tohoto algoritmu (pološírka  $0,5''$  pre gaussovské vzorkovacie okno a integračný čas 15 minút) bolo získaných 11 tokových máp pre rôzne evolučné fázy (filamentárna, granulárna, zmiešaná). Pri-

klad tokovej mapy je zobrazený na obr. 5.

Boli zistené nasledovné typy pohybov:

- Usmernené pohyby vo filamentárnej oblasti (jasné a tmavé útvary)
- Prenikanie fotosférických granúl a ich fragmentov do póru
- Tangenciálny tok granúl a filamentov pozdĺž hranice póru
- Divergentné pohyby v granulácii ďaleko od póru (expandujúce granuly, okolo  $1 \text{ km s}^{-1}$ )

Vo vnútri filamentárnej oblasti boli pozorované pohyby rôznych objektov (granule rôznych rozmerov, jasné filenty, JPÚ podobné penumbrálnym zrnám a tmavé štruktúry). Všeobecne možno povedať, že vo všetkých fázach (filamentárna, granulárna, zmiešaná) horizontálne pohyby v blízkosti póru smerovali k póru a boli v rozmedzí  $0,3 - 1,0 \text{ km s}^{-1}$ . Niektoré granule a JPÚ prenikali do póru. V strednej časti filamentárnej oblasti boli rýchlosti malé. Ďaleko od póru boli pohyby väčšinou orientované smerom od póru a boli v rozmedzí



**Obr. 6.** *Premeny jasných filamentov na granule a naopak. Čas je hh:mm UT. Biele šípky označujú objekty, ktoré podliehajú morfológickým zmenám.*

$0,5 - 1,0 \text{ km s}^{-1}$ . Tmavé štruktúry sa pohybovali smerom od póru približne rovnakými rýchlosťami ak jasné objekty. V granulárnych fázach boli pohyby smerom od póru narušované expanzívnym rozširovaním sa granúl.

### 3.3 Morfológické zmeny v jemnej štruktúre filamentárnej oblasti

Sledovali sme ďalej morfológické prechody medzi filamentami a granulami. Bolo pozorovaných niekoľko takých prechodov. Životnosti filamentov a granúl boli v rozsahu 5 až 30 minút a typické prechodové doby okolo 5 minút. Zaujímavý príklad sekvencie takých morfológických prechodov je ukázaný na obr. 6., kde sú vyznačené časy významných evolučných zmien objektov označených bielou šípkou. Jav začal o  $8^{\text{h}} 55^{\text{m}}$  vytvorením jasného filamentu. O  $8^{\text{h}} 59^{\text{m}}$  sa vytvoril

jasný pretiahnutý útvar (JPÚ) podobný penumbrálnemu zrnu, ktorý počas ďalších 11 minút expandoval najprv v dĺžke ( $9^{\text{h}} 03^{\text{m}}$ ) a potom v šírke ( $9^{\text{h}} 10^{\text{m}}$ ). O  $9^{\text{h}} 15^{\text{m}}$  sa na tom mieste vytvorila granulárna štruktúra a dosiahla maximum vývoja za 4 minúty ( $9^{\text{h}} 19^{\text{m}}$ ). O tri minúty neskôr ( $9^{\text{h}} 22^{\text{m}}$ ) sa objavili dva úzke filamente, ktoré sa rozpadli na reťazec malých granúl ( $9^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ ). Na mieste jednej granuly vznikol potom filament ( $9^{\text{h}} 37^{\text{m}}$ ) a následne sa vytvorila granula z časti filamentu. ( $9^{\text{h}} 42^{\text{m}}$ ). Jav sa skončil rozširovaním sa granule ( $9^{\text{h}} 46^{\text{m}}$ ) a jej rozpadom ( $9^{\text{h}} 52^{\text{m}}$ ), 57 minút po začiatku sekvencie.

## 4. DISKUSIA A ZÁVERY

Pozorovaná filamentárna oblasť je odlišná od typickej penumbry (alebo fragmentu penumbry). Štruktúra tejto oblasti vykazuje premeny medzi filamentárnym a

granulárnym charakterom. Možno predpokladať, že je to oblasť veľmi nakloneného magnetického poľa s premenlivou intenzitou, ktoré je ukotvené v dvoch magnetických koncentráciách (veľký pór a P5). Žiaľ, nemáme k dispozícii doplňujúce merania magnetického poľa, na základe ktorých by sme vedeli, či sú ich polarity zhodné alebo opačné. Vo filamentárnych a zmiešaných fázach vývoja skúmaná oblasť vykazovala –istú podobnosť normálnej penumbry – pohyb jasných útvarov podobných penumbrálnym zrnám smerom k póru a pohyb tmavých útvarov smerom od póru. Priemerné rýchlosti JPU, ktoré sme zmerali sú v zhode s hodnotami uvedenými v práci Sobotka a kol. (1999a). Podobnosť penumbry môže byť spôsobená kombináciou zväčša vertikálneho magnetického poľa vo veľkom póre so silne nakloneným poľom vo filamentárnej oblasti.

Oblasť prekonala niekoľko evolučných fáz s prevažne filamentárnou resp. granulárnou štruktúrou. Pozorovali sme niekoľko prechodov z jasných filamentov na granule a naopak. Tieto zmeny môžu byť odrazom zmien intenzity poľa alebo sklonu pravdepodobne takmer horizontálneho magnetického poľa. Počas prvej polovice pozorovacej doby pór a jeho okolie vykazovali zvýšenú aktivitu: rýchle zmeny medzi prevažujúcimi morfológickými štruktúrami, rýchla rotácia filamentárnej oblasti, prítomnosť mikropórov, výrazný usmernený tok nad pórom. V druhej polovici pozorovania sa filamentárna štruktúra oblasti stabilizovala, jej rotácia sa spomalila, väčšina mikropórov zanikla, plocha oblasti sa zmenšila a prevládol charakter tokov plazmy v okolí póru typický pre kľudnú fotosféru. Tieto zmeny aktivity pravdepodobne súvisia s vývojom tokového poľa celej aktívnej oblasti, v ktorej sa pór nachádzal.

Rotáciu slnečných škvŕn okolo osi kolmej na slnečný povrch bola pozorovaná už skôr. Napr. Kučera (1982) meral uhlovú rýchlosť stredne veľkej škvŕny a zistil rotácie v rozmedzí od  $+3^\circ \text{ h}^{-1}$  do  $-3^\circ \text{ h}^{-1}$  počas 2 dní a nedávno Zhao a kol. (2001) informoval o slnečnej škvŕne, ktorá rotovala o  $200^\circ$  za necelé 3 dni, čo zodpovedá priemernej uhlovej rýchlosti  $3^\circ \text{ h}^{-1}$ . Veľmi vysoká uhlová rýchlosť  $7^\circ \text{ h}^{-1}$ , pozorovaná na začiatku našej pozorovacej doby, nebola predtým uvedená a naznačuje rýchly vývoj aktívnej oblasti.

Vo všeobecnosti možno povedať, že počas 11 h obdobia pozorovaná oblasť prešla vývojom z aktívnej na stabilizovanú konfiguráciu, pričom možno predpokladať, že došlo k stabilizácii horizontálneho magnetic-

kého poľa v blízkosti veľkého póru. To je v súlade s vývojom celej aktívnej oblasti NOAA 7519, ktorá dosiahla maximálnu plochu počas dňa pozorovania. Zostáva otvorenou otázkou, či by sa filamentárna oblasť vyvinula na normálnu penumbry, keby sa aktívna oblasť ďalej zväčšovala.

Ďalšie podrobnosti tohoto výskumu možno nájsť v práci Dorotovič a kol. (2002).

## PodĎakovanie

Autori ďakujú za pomoc G. Hosinskému, R. Keverovi, G. Scharmerovi a W. Wangovi pri pozorovaní na La Palma a R. Shinovi za pomoc pri pre-redukcii údajov. Práca vznikla v rámci riešenia grantovej úlohy GA AV ČR č. A-3003903 a 205/01/0658 a kľúčového projektu AV ČR č. K-2043105. I. D. ďakuje Instituto de Astrofísica de Canarias za umožnenie krátkodobého pobytu. SVST je obsluhovaný na ostrove La Palma Švédskou kráľovskou akadémiou vied v rámci španielskeho Observatorio del Roque de los Muchachos v IAC.

## LITERATÚRA

- Bray, R. J., Loughhead, R. E.: 1964, Sunspots (Chapman & Hall)
- Dorotovič, I., Sobotka, M., Brandt, P.N., Simon, G.W.: 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 387, 665
- Kučera, A.: 1982, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 33, 345
- November, L.J., Simon, G.W., 1988, *Astrophys. J.*, 333, 427
- Scharmer, G.B., Brown, D.S., Petterson, L., Rehn, J.: 1985, *Appl. Optics*, 24, 2558
- Sobotka, M.: 1997, in 1st ASPE Conference, *Advances in the Physics of Sunspots*, eds. B. Schmieder, J. C. del Toro Iniesta & M. Vázquez, ASP Conference Series, 118, 155
- Sobotka, M.: 1999, in *Motions in the Solar Atmosphere*, eds. A. Hanslmeier & M. Messerotti, Kluwer, 71
- Sobotka, M. Klvaňa, M.: 2002, tento zborník
- Sobotka, M., Brandt, P.N., Simon, G.W.: 1997, *Astronomy and Astrophysics*, 328, 682
- Sobotka, M., Brandt, P.N., Simon, G.W.: 1999a, *Astronomy and Astrophysics*, 348, 621
- Sobotka, M., Vázquez, M., Bonet, J. A., Hanslmeier, A., Hirzberger, J.: 1999b, *Astrophys. J.*, 511, 436
- Zhao, J. a kol.: 2001, súkromná informácia, <http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/>