

Fotometrie umbrálních bodů

M. Sobotka, *Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, msobotka@asu.cas.cz*
A. Hanslmeier, *Institut für Geophysik, Astronomie und Meteorologie, Graz,*
arh@igam06ws.uni-graz.at

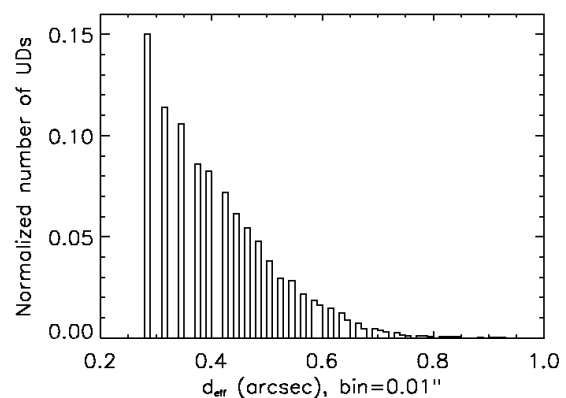
Abstrakt

Umbrální body jsou malé jasné útvary v umbře slunečních skvrn a pór, jejichž rozměry se až dosud většinou nacházely pod mezí rozlišení velkých slunečních přístrojů. V práci jsou analyzovány snímky umbry dvou slunečních skvrn a dvou pór, získané v září 2003 na novém jednometrovém Švédském slunečním dalekohledu na La Palmě, vybaveném adaptivní optikou. Širokopásmové obrazy s prostorovým rozlišením $0'',15$ (110 km na povrchu Slunce) byly pořízeny simultánně ve dvou oblastech spjitého spektra, 450 a 602 nm. Po korekcích na rozptýlené světlo a instrumentální profil dalekohledu a po přesném sesazení snímků v obou vlnových pásmech byly změřeny pozorované intenzity a velikosti umbrálních bodů a poté aplikována metoda dvojbarevné fotometrie s cílem vypočítat skutečné intenzity a rozměry. Histogramy pozorovaných velikostí mají výrazné maximum u $0'',23$, což znamená, že většina umbrálních bodů je prostorově rozlišena dalekohledem o průměru 1 m. Vypočtená „typická“ velikost je přibližně 100 km. Vypočtené intenzity ukazují na to, že asi polovina umbrálních bodů je jasnější a teplejší než klidná fotosféra.

1. ÚVOD

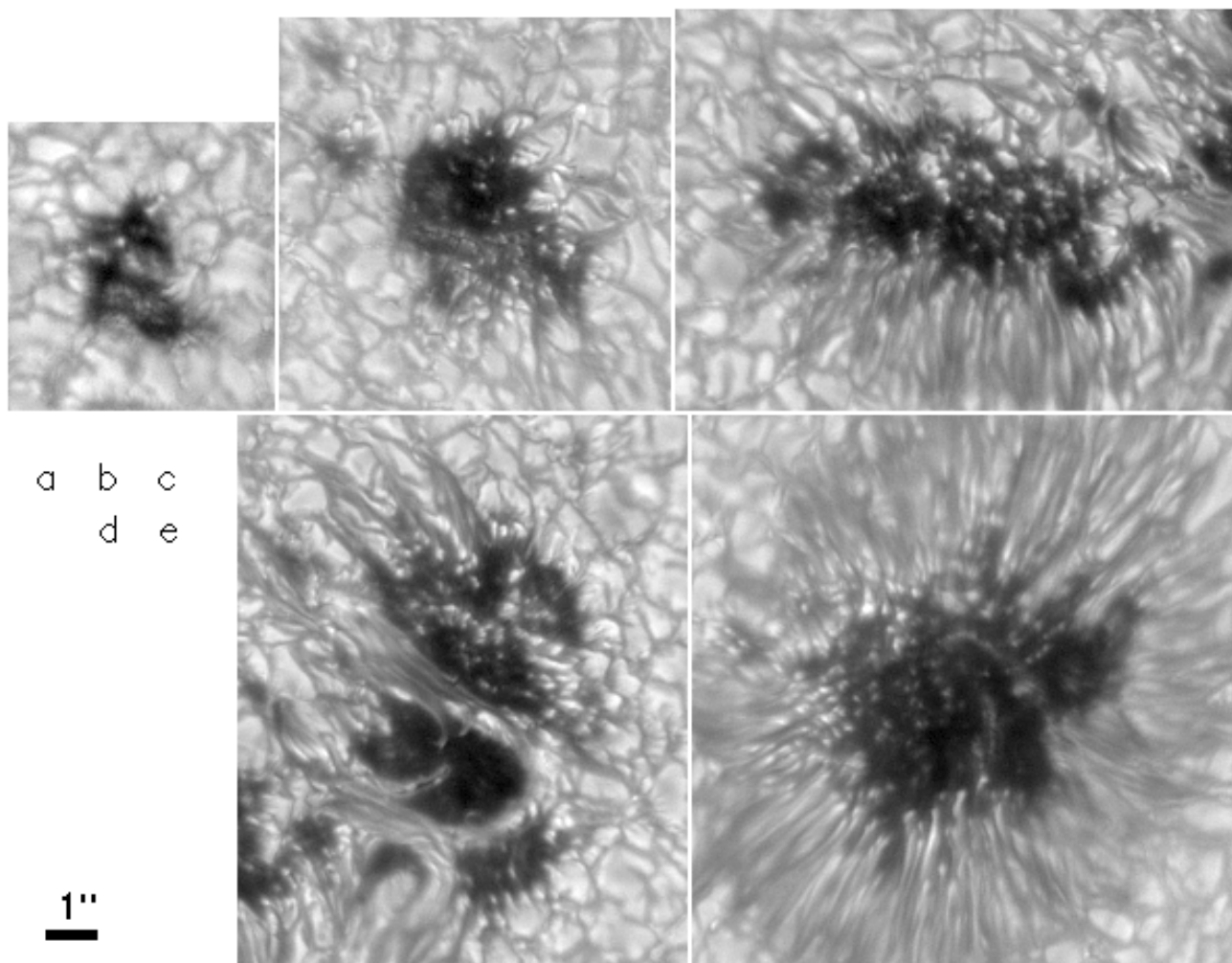
Sluneční skvrny vznikají v důsledku výrazného potlačení konvektivního přenosu tepla v silném magnetickém poli. Intenzita záření střední temné části slunečních skvrn, umbry, je asi desetkrát menší než střední intenzita granule v klidné fotosféře. Proč je však umbra tak jasná, uvážíme-li, že rozměry umbry jsou několiksetkrát větší než střední volná dráha fotonu ve fotosféře (70 – 90 km) a tedy zářivý ohřev ze stran nepřipadá v úvahu? Do umbry se musí dostávat teplo zespodu, ze žhavé konvektivní zóny, buď formou magnetokonvekce (např. Hurlburt a kol., 2000) nebo pronikáním tenkých sloupců horkého nemagnetického plazmatu (Parker, 1979). Projevy tohoto přísunu energie se pozorují ve formě tzv. světelných mostů nebo umbrálních bodů (dále UB), velmi malých jasných útvarů, objevených Danielsonem (1964) ve snímcích pořízených ze stratosférického balonu.

UB pozorujeme na samé hranici rozlišení velkých slunečních dalekohledů a pouze při velmi dobrých atmosférických podmínkách (seeingu). Z toho vyplývá, že skutečné intenzity UB jsou větší než pozorované a skutečné velikosti menší než ty, které vidíme. Poměrně nedávná pozorování (Sobotka a kol., 1997) na Švédském vakuovém slunečním dalekohledu (SVST, La Palma) o průměru 0,5 metru ukazovala na to, že pozorovaný rozměr většiny UB je menší než mez rozlišení dalekohledu (*obr. 1*). Tento výsledek byl potvrzen i na 0,7-metrovém vakuovém věžovém dalekohledu (VTT, Tenerife), kde navíc byl v pozorování opraven vliv atmosféry Země metodou fázové diversity (Tritschler a Schmidt, 2002).



Obr. 1. Histogram pozorovaných průměrů umbrálních bodů na SVST o apertuře 0,5 m. Počet objektů roste s klesajícím průměrem až po rozlišovací mez dalekohledu.

Skutečné intenzity a rozměry UB, které je nutné znát pro teoretickou interpretaci podmínek v umbře, se poprvé pokusili určit Beckers a Schröter (1968) pomocí metody dvojbarevné fotometrie. Podle jejich výsledků jsou UB jasnější než klidná fotosféra a mají průměr asi $0'',2$ (145 km). Další autoři nacházeli intenzity a rozměry UB v širokých mezích. Sobotka a kol. (1993) zjistili, že intenzita UB závisí na intenzitě okolní umbry tak, že pozorovaná intenzita je asi 1,5x a skutečná asi 3x vyšší než intenzita umbry.



Obr. 2. Pozorované póry (a,b) a sluneční skvrny (c,d,e). Pole (c) a (d) představují dvě části těžé skvrny.

V této práci se zabýváme určováním pozorovaných a skutečných intenzit a rozměrů UB na základě pozorování na novém Švédském slunečním dalekohledu o průměru jeden metr (SST, Scharmer a kol. 2003) na Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma.

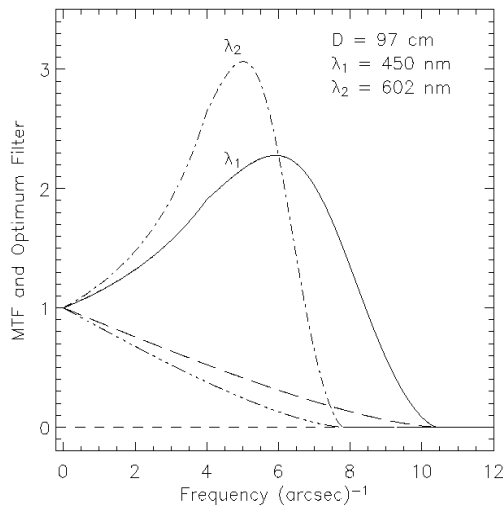
2. POZOROVÁNÍ A ANALÝZA DAT

V období 16. – 20. září byly na SST pořizovány obrazy slunečních skvrn a pór s velmi vysokým prostorovým rozlišením, simultánně ve dvou oblastech spojitého spektra: $450,75 \pm 0,45$ nm (modrá oblast) a $602,00 \pm 1,3$ nm (červená oblast). Dvě synchronizované CCD kamery pracovaly v režimu výběru obrazů v reálném čase (interval výběru 20 s). Chvění obrazu a jeho degradace, způsobené turbulencí v atmosféře Země, stejně jako optické aberace teleskopu, byly částečně kompenzovány pomocí adaptivní optiky (jedno kmitající zrcátko a jedno deformovatelné zrcátko s 37 řídicími elektrodami). Typická expoziční doba snímků byla 10 – 15 ms a měřítko $0,041/\text{pixel}$. Poměr signálu k šumu v modré oblasti byl 100 a v červené 200.

Pro stávající práci byly vybrány 2 – 4 nejlepší snímky pro každou skvrnu (póru) a spektrální oblast. Studovány byly: malá póra (NOAA 459, 16.9.2004, obr. 2a), velká póra (NOAA 462, 16.9.2004, obr. 2b), dvě umbrální jádra nepravidelné skvrny (NOAA 459, 19.9.2004, obr. 2c,d) a umbra pravidelné sluneční skvrny (NOAA 463, 20.9.2004, obr. 2e). Všechny objekty byly pozorovány v centrální zóně slunečního disku ($\mu = 0,75 - 0,92$).

Při pozorování slunečních skvrn je nutné opravit snímky o rozptýlené světlo, vznikající v atmosféře Země a v optice přístroje. Podíl rozptýleného světla v obrazech skvrn a pór byl vypočten metodou, navrženou Matínezem Pilettem (1992), z pozorování intenzity světla v blízkosti okraje slunečního disku. V modré oblasti byl tento podíl (v jednotkách průměrné intenzity klidné fotosféry) 16 % v pórách a 8 – 11 % v umbrách skvrn, v červené oblasti byly odpovídající hodnoty 12 % a 6 – 10 %. Tyto poměrně vysoké hodnoty, jen málo se měnící v závislosti na atmosférickém zákalu, nasvědčují tomu, že většina rozptýleného světla je instrumentálního původu.

Po odečtení rozptýleného světla byly snímky restaurovány vzhledem k modulační přenosové funkci



Obr. 3. Wienerův filtr pro modrou (plná čára) a červenou (čerchovaná čára) oblast, použitý k restauraci snímků. Graf je doplněn modulačními přenosovými funkcemi dalekohledu.

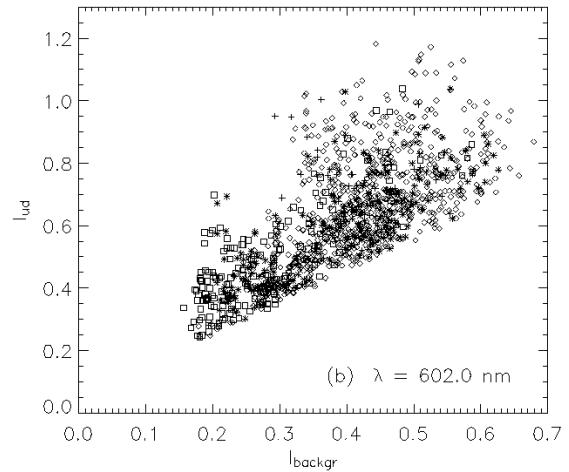
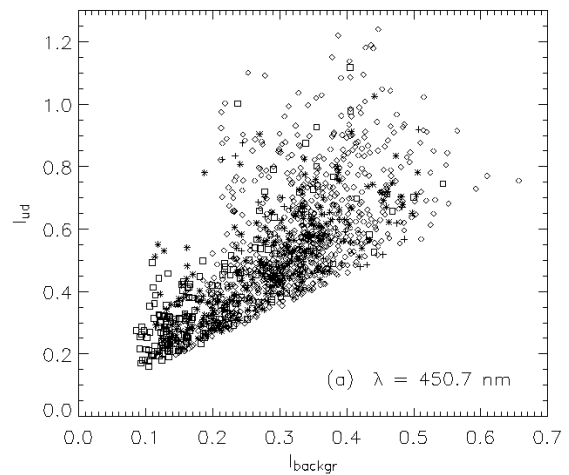
ideálního metrového dalekohledu a zároveň byl filtrován šum. K tomu byl využit Wienerův filtr (obr. 3) s takovými parametry, aby maximálně potlačil šum v modré oblasti s co nejmenší ztrátou užitečné informace. Stejně parametry byly nastaveny i pro červenou oblast. Za spolehlivou mez rozlišení našich pozorování můžeme definovat nejvyšší prostorovou frekvenci, pro kterou filtr ještě nabývá hodnoty 1. Této frekvenci odpovídá vzdálenost 0,"12 (87 km na povrchu Slunce) v modré oblasti a 0,"15 (109 km) v oblasti červené.

Dvojice modrých a červených snímků byly sesazeny s přesností na zlomky pixelu (opravy o rozdílné zvětšení, pootočení a deformaci) tak, aby všechny struktury v obou obrazech byly na totožných místech.

Prvním krokem ve fotometrii snímků byla aproximace temného umbrálního pozadí, tj. nalezení takového prostorového rozdělení intenzity v umbrě, které bychom pozorovali bez přítomnosti UB. Toho bylo dosaženo proložení sítě lokálních intenzitních minim v umbrě dvojrozměrnou splinovou plochou (*thin-plate splines*). Tento postup nám umožňuje zjistit intenzitu umbrálního pozadí I_{db} i v místech „obsazených“ UB.

Dalším krokem byla identifikace UB a měření jejich poloh x,y , intenzit I a velikostí – efektivních průměrů D . Hranice umbrálních jader byly, vzhledem k jejich značné složitosti, definovány vizuálně v „modrých“ snímcích. UB byly hledány jako vypuklé oblasti v ploše (x,y,I) podle algoritmu $I_1 + I_3 - 2I_2 < 0$, kde indexy 1,2,3 označují sousedící pixely. Do dalšího zpracování byly zahrnuty UB s plochou alespoň 9 pixelů ($D \geq 0",14$) a intenzitou $I \geq I_{db} + 0,05$ (v jednotkách průměrné intenzity klidné fotosféry), které bylo možno identifikovat v „modrých“ i „červených“ snímcích. Tato kritéria splnilo celkem 1191 UB.

Metoda dvojbarevné fotometrie (Beckers a Schröter, 1968) vychází z toho, že světelný tok $\Delta I_\lambda D_\lambda^2$, vyzařovaný z UD, není ovlivněn degradací obrazu, tedy



Obr. 4. Pozorované intenzity umbrálních bodů v závislosti na místních intenzitách umbrálního pozadí. Symboly odpovídají umbrálním jádrům z obr. 2: + - a, * - b, \diamond - c,d, \square - e.

$$\Delta I_\lambda D_\lambda^2 = \Delta J_\lambda d^2, \text{ kde}$$

$\Delta I_\lambda = I_\lambda - I_{\lambda,db}$, $\Delta J_\lambda = J_\lambda - I_{\lambda,db}$, $\lambda = 450$ nebo 602 nm. I je pozorovaná intenzita, J skutečná intenzita a d skutečný průměr UB, totožný v obou spektrálních pásmech. Poměr $c = \Delta J_{450} / \Delta J_{602}$ se nazývá barevný index a lze jej určit z pozorovaných veličin:

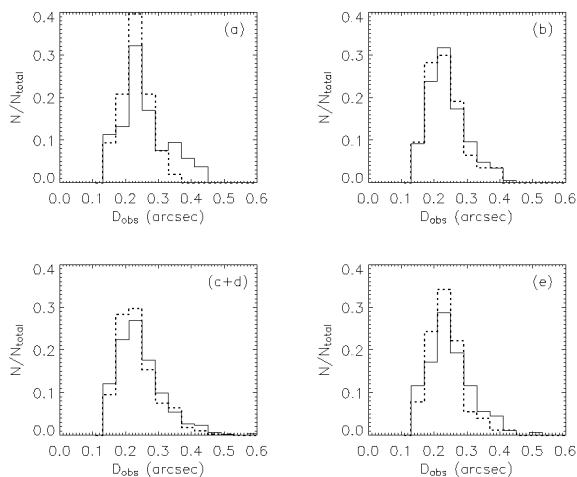
$$c = (\Delta I_{450} D_{450}^2) / (\Delta I_{602} D_{602}^2).$$

Předpokládáme, že UD vyzářuje jako černé těleso, tedy

$$J_\lambda = B_\lambda(T) / I^{\text{ph}}_\lambda(\mu), \text{ kde}$$

$B_\lambda(T)$ je Planckova funkce, T barevná teplota a $I^{\text{ph}}_\lambda(\mu)$ je průměrná intenzita klidné fotosféry v absolutních jednotkách pro danou vlnovou délku a heliocentrickou pozici μ na Slunci. Hodnoty $I^{\text{ph}}_\lambda(0)$ jsou tabelovány (Neckel a Labs, 1984) a lze je snadno přepočítat na danou pozici μ . Protože T nezávisí na λ , lze z předchozích vztahů vytvořit soustavu dvou rovnic

$$\begin{aligned} I_{450db} + c \Delta J_{602} &= B_{450}(T) / I^{\text{ph}}_{450}(\mu) \\ I_{602db} + \Delta J_{602} &= B_{602}(T) / I^{\text{ph}}_{602}(\mu) \end{aligned}$$



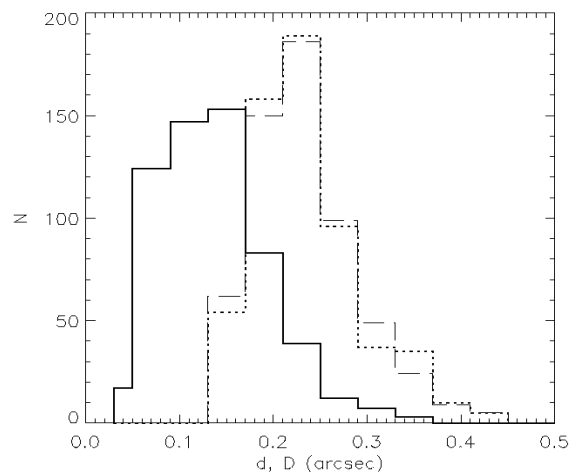
Obr. 5. Histogramy pozorovaných velikostí umbrálních bodů v umbrálních jádrech z obr. 2: a, b, c+d, e. Plná čára odpovídá měření v modré oblasti, tečkovaná v červené.

a vyřešit ji pro neznámé ΔJ_{602} a T , čímž získáme skutečné intenzity a průměry UB. Ukazuje se, že popsaná metoda je velmi citlivá na nepřesnosti (šum) měření pozorovaných intenzit UB a umbrálního pozadí a na chyby v určení pozorovaných průměrů. Přijatelné výsledky, splňující kritéria $J_\lambda \geq I_\lambda$ a $\Delta J_{602} < 2$, byly získány pro 585 UB. Tyto výsledky však nepovažujeme za příliš spolehlivé pro jednotlivé UB a diskutujeme je pouze statisticky.

3. VÝSLEDKY

Pozorované intenzity UB se pohybují v širokém rozsahu 0,16 – 1,24 (modrá oblast) a 0,24 – 1,18 (červená oblast), v jednotkách průměrné intenzity klidné fotosféry v okolí pozorovaných skvm. Jejich střední hodnoty pro celý vzorek 1191 UB jsou $0,53 \pm 0,20$ (modrá) a $0,63 \pm 0,18$ (červená). Střední kvadratické odchylky charakterizují rozptyl individuálních hodnot. Průměrné hodnoty pozorovaných intenzit v jednotlivých umbrálních jádrech závisejí na intenzitě umbrálního pozadí tak, že v temnějších umbrách jsou UB méně jasné. Porovnání pozorovaných intenzit I UB s intenzitami okolního umbrálního pozadí I_{db} je na obr. 4. Přes značný rozptyl bodů v obou diagramech je patrný určitý celkový růst I s rostoucí I_{db} . Střední hodnoty poměru I / I_{db} jsou 1,8 pro modrou oblast a 1,6 pro červenou. V důsledku vyššího rozlišení jsou větší než hodnota 1,5, uváděná Sobotkou a kol. (1993).

Pozorované velikosti (efektivní průměry) D jsou zobrazeny v histogramech na obr. 5. Tyto histogramy se podstatně liší od obr. 1, protože počet UD vykazuje jasné maximum kolem $0'',23$, odpovídající „typické“ velikosti UB a naznačující, že většina UB byla prostorově rozlišená. Tato typická velikost nezávisí vlnové délce ani na ploše a jasu umbrálního jádra, stejně jako průměrná pozorovaná velikost UB $0'',24 \pm 0'',07$ (175 ± 50 km). Dalekohled s aperturou 1 m tedy přinesl kvalitativně nový výsledek.



Obr. 6. Histogram vypočtených velikostí 585 umbrálních bodů (plná čára) spolu s histogramy jejich pozorovaných velikostí v modré (čárkovaná) a červené (tečkovaná) oblasti.

Pozorované velikosti UB nejsou závislé na pozorovaných intenzitách (korelační koeficient intenzita/velikost je 0,4).

Intenzity J , barevné teploty T a velikosti d vypočtené metodou dvojbarevné fotometrie by měly představovat skutečné parametry UB neovlivněné degradací obrazu přístrojem (konečná velikost apertury, optické aberace) a turbulencí v atmosféře Země. Jejich hodnoty pro jednotlivé UB vykazují značný rozptyl, proto se jimi budeme zabývat pouze statisticky.

Střední vypočtená intenzita J UB je $1,2 \pm 0,6$ (v modré i červené oblasti) a odpovídá jí barevná teplota 6300 ± 700 K. Mediány $J_{med} = 1,0$ a $T_{med} = 6200$ K, což znamená, že polovina z 585 studovaných UB je jasnější a teplejší než klidná fotosféra. To odpovídá výsledkům Beckerse a Schrötera (1968). Střední hodnoty poměru J / I_{db} jsou 4 ± 2 a 3 ± 1 (pro modrou a červenou oblast) a medián tohoto poměru (stejný pro obě oblasti) je roven třem, což odpovídá hodnotě J / I_{db} určené spektroskopicky Sobotkou a kol. (1993).

Vypočtený střední efektivní průměr d UB je $0'',14 \pm 0'',06$ (100 ± 40 km) a medián $d_{med} = 0'',13$ (95 km). Tyto hodnoty zhruba odpovídají střední volné dráze fotonu ve fotosféře. Histogramy vypočtených a pozorovaných velikostí d, D pro 585 studovaných UB jsou na obr. 6. Velikosti d a D jsou korelovány (korelační koeficient 0,7) a poměr $d / D = 0,6 \pm 0,2$ v modré i červené oblasti.

4. DISKUSE A ZÁVĚRY

Pravděpodobně nejdůležitějším výsledkem této práce je fakt, že většina UB je prostorově rozlišená dalekohledem o apertuře jednoho metru. Na rozdíl od předchozích pozorování, počet UB neroste monotónně s klesajícím průměrem (obr. 1) ale po dosažení maxima u $0'',23$ (167 km) klesá ve všech pozorovaných umbrách (obr. 5, 6). Toto chování není důsledkem filtrace šumu Wienerovým filtrem (obr. 3), protože k výraznému

potlačení kontrastu (hodnota filtru < 1) dochází až u prostorových frekvencí $8,3 \text{ arcsec}^{-1}$ (modrá oblast) a $6,7 \text{ arcsec}^{-1}$ (červená oblast), což odpovídá prostorovým délkám $0'',12$ a $0'',15$. Kritériem pro zařazení UB do vzorku byl minimální průměr $0'',14$. Přijmeme-li za „spolehlivé“ rozlišení délku $0'',15$, může být filtrací uměle snížen počet UB v prvním sloupci histogramů na obr. 5 a 6 ($0'',13 - 0'',17$) ale nikoli již ve druhém ($0'',17 - 0'',21$). Tato oblast prostorových frekvencí ($4,8 - 5,9 \text{ arcsec}^{-1}$) leží v oblasti maximální restaurace obrazu. Přitom počet UB s takovými průměry je zřetelně nižší než počet UB s velikostmi v rozsahu $0'',21 - 0'',25$. Můžeme tedy tvrdit, že typický pozorovaný průměr UB existuje a je kolem 170 km.

Metoda dvojbarevné fotometrie je značně citlivá i k malým nepřesnostem v měření pozorovaných intenzit a velikostí UB. Její výsledky pro jednotlivé UB vykazují značný rozptyl a pro některé UB ani nebylo možné úlohu vyřešit. Přesto nám mohou statistické hodnoty vypočtených intenzit, teplot a průměrů poskytnout určitou informaci o skutečných parametrech UB. Na jejich základě a ve shodě s předchozími pracemi (např. Beckers a Schröter, 1968; Koutchmy a Adjabshirzadeh, 1981; Sobotka a kol., 1993) předpokládáme, že UB jsou v průměru třikrát jasnější než okolní umbra a asi polovina z nich je jasnější a teplejší než klidná fotosféra. Střední skutečná velikost UB je kolem $0'',14$ (100 km). Je srovnatelná se střední volnou dráhou fotonu v umbře na úrovni fotosféry, přibližně 70 km (např. Sobotka, 2001), jenž představuje nejmenší teoreticky pozorovatelný rozměr jasného zdroje ve spojitém spektru.

Poděkování

Autoři děkují R. Keverovi a J. A. Bonetovi za pomoc při pozorování na 1-m SST. SST je provozován na ostrově La Palma Švédskou královskou akademií věd na španělském Observatorio del Roque de los Muchachos, IAC. Práce vznikla za podpory Grantové agentury AV ČR (grant IAA 3003404), klíčového projektu AV ČR K-2043105 a v rámci European Solar Magnetism Network (Contract HRPN-CT-2002-00313).

LITERATURA

- Beckers, J. M., Schröter, E. H.: 1968, *Solar Phys.*, 4, 303.
Danielson, R.: 1964, *Astrophys. J.*, 139, 45.
Hurlburt, N.E., Matthews, P.C., Rucklidge, A.M.: 2000, *Solar Phys.*, 192, 109.
Koutchmy, S., Adjabshirzadeh, A.: 1981, *Astron. Astrophys.*, 99, 111.
Martinez Pillet, V.: 1992, *Solar Phys.*, 140, 207.
Neckel, H., Labs, D.: 1984, *Solar Phys.*, 90, 205.
Parker, E. N.: 1979, *Astrophys. J.*, 234, 333.
Scharmer, G.B., Bjelksjö, K., Korhonen, T.K., Lindberg, B., Pettersson, B.: 2003, in *Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*, ed. S. Keil and S. Avakyan, *Proc. SPIE* vol. 4853, 341.
Sobotka, M., 2001, in *Solar Encounter: The first Solar Orbiter Workshop*, ESA SP-493, 361.
Sobotka, M., Bonet, J. A., Vázquez, M.: 1993, *Astrophys. J.*, 415, 832.
Sobotka, M., Brandt, P. N., Simon, G. W.: 1997, *Astron. Astrophys.*, 328, 682.
Tritschler, A., Schmidt, W.: 2002, *Astron. Astrophys.*, 388, 1048.