

Slnčná granulácia: I. Pozorovania

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

Abstrakt

Článok je venovaný výskumu slnčnej granulácie. Prvá časť je venovaná historickému prehľadu pozorovania slnčnej granulácie. V ďalšej časti uvádzame základné štatistické charakteristiky granulácie získané z analýzy dvojrozmerných obrazov časového vývoja granulácie. Taktiež je diskutovaná granulárna 'aktivita' ako je napríklad spájanie, delenie a expanzia granúl a prienik granulácie do vyšších vrstiev slnčnej atmosféry. Druhý príspevok, ktorý pripravujeme 'Slnčná granulácia: II. Teória', bude venovaný interpretácii pozorovaní a modelovaniu podpovrchovej konvekcie a granulácie.

1. ÚVOD

Slnčná granulácia je jedným z najviac skúmaných javov na Slnku. Napriek tomu, že jej výskum prebieha už viac ako 150 rokov, zostávajú stále mnohé aspekty nevyriešené. Cieľom tohoto príspevku je podať stručný historický prehľad výskumu slnčnej granulácie a poskytnúť najnovšie informácie o jej podstate, fyzikálnych vlastnostiach a časovej premennosti z pozorovateľského hľadiska. Aby sme si urobili predstavu o veľkosti granulácie, uvádzame na obr. 1a schématické znázornenie niekoľkých slnčných granúl na európskom kontinente. Zjednodušene možno povedať, že slnčná granula má priemer približne 1000 km, je horúca 6000 K, plazma v jej strede sa pohybuje smerom nahor a pri jej okrajoch steká naspäť pod slnčný povrch. Ako uvidíme neskôr, reálne existuje mnoho odchýliek od tejto zjednodušenej predstavy. V pripravovanej druhej časti 'Slnčná granulácia: II. Teória' sa budeme venovať teoretickej interpretácii pozorovaní a modelovaniu granulácie.

2. VÝSKUM SLNČNEJ GRANULÁCIE PRED R. 1900

História výskumu slnčnej granulácie siaha až do r. 1787, kedy Johan Hieronymus Schröter prvý krát spomína jav na slnčnom povrchu, ktorý v súčasnosti nazývame slnčná granulácia.

Neskôr Sir W. Herschel (1801) zaznamenal pri pozorovaní slnčných škvŕn v ich okolí štruktúry ktoré nazýva 'ryžové zrnká' (obr.1b).

V r. 1862 J. Nasmyth (1862) popisuje rovnaké štruktúry a nazýva ich 'vřbové lístky'. Kontroverznú debatu ohľadne tvarov a názvov pre danú štruktúru ukončil W.R. Dawes (1864) ktorý zaviedol názov granulácia ako najlepšie vystihujúce pomenovanie pre pozorované útvary na slnčnom povrchu. Správne popísal ich tvar a vizuálne určil ich rozmer na 1" až 1.5", čo odpovedá 760 - 1100 km.

W. Huggins (1866) akceptuje nový názov granulácia a mikrometrom potvrdzuje rozmer granúl

1" až 1.5".

A. Secchi bol prvý, kto r. 1870 prešiel od slovného popisu granulácie k realistickému zákresu a o osem rokov neskôr J. Janssen urobil prvé fotografie granulácie (viď. obr. 2), ktoré mali excelentnú kvalitu.

Na ich základe W. Huggins (1878) popísal prvýkrát abnormálne zoskupenie granúl (viď. obr. 3). Je paradoxné, že Janssen sa vo výskume sústredil na plošné difúzne javy na snímkach (dnes vieme že to boli efekty spôsobené "seingom" - chvením zemskej atmosféry) a nie na samotnú granuláciu a fotografie publikoval až v r. 1896 (J.Janssen 1896). Ukončil tak všetky kontroverzné debaty založené iba na vizuálnych pozorovaniach slnčnej granulácie.

3. VÝSKUM SLNČNEJ GRANULÁCIE V PRVEJ POLOVICI 20. STOROČIA

Na prelome storočí A. Hansky (1906) vysvetlil veľkoškálové efekty a rýchly pohyb granúl vplyvom seingu a z prvého časového radu pozorovaní odhadol životnosť individuálnej granule na 5 minút.

Zavedením časovej dimenzie do výskumu granulácie sa začala éra boja o fyzikálnu podstatu granulácie medzi konvekciou a turbulenciou.

H.H. Plasket (1935) publikoval prvú ucelenú prácu o výskume slnčnej granulácie. Uskutočnil prvú spektrálnu analýzu granúl, určil pomer intenzít granula/intergranula = 1.10 čo znamená, že granula je o 5% intenzívnejšia ako priemerná intenzita a intergranula je o 5% menej intenzívna ako priemerná intenzita. Na základe svojich výskumov podporil hypotézu konvektívnej podstaty granulácie.

O dva roky neskôr P.C. Keenan (1938) exaktne určil veľkostné rozdelenie granúl s maximom na 1.4" (viď. obr. 4) a stanovil ich vzájomnú vzdialenosť na 1500 km. Určil tiež počet granúl na Slnku na 2.58 milióna. Precíznu fotometriu granúl urobil o rok neskôr (P.C. Keenan, 1939), keď odstránil vplyv rozptýleného svetla aplikovaním rozptylovej funkcie. Dostal tak intenzitný pomer granula/intergranula = 1.15 až 1.20 a korigoval aj veľkosť granule o -0.2". Prvý krát tiež určil rozdiel teplôt granula - intergranula = 200 K. K podobným výsledkom prišli aj P.

ten Bruggencate a H. Müller (1942), ktorí určili pomer intenzít granula/intergranula = 1.18 a teplotný rozdiel granula-intergranula = 160 K.

Na konci prvej polovice 20. storočia, po rozpracovaní "mixing-length" teórie pre hviezdne konvektívne zóny, bol všeobecne prijatý názor, že slnečná granulácia reprezentuje vrcholky konvektívnych prúdov prichádzajúcich z podpovrchových vrstiev.

4. VÝSKUM SLNEČNEJ GRANULÁCIE V ROKOCH 1950 AŽ 1980

V 50-tych rokoch 20. storočia bola turbulencia populárna téma v astronómii. R.S. Richardson a M. Schwarzschild (1950) a M.S. Ueberoi (1955) uprednostňovali turbulentnú povahu granulácie a argumentovali, že v skutočnosti sú granule podstatne menšie (čo by podporovalo turbulentnú podstatu granulácie), ale že len vďaka zamývaniu obrazu zemskou atmosférou sa nám rozmer granúl javí podstatne väčší. M.S. Ueberoi (1955) a tiež A. Skumanich (1955) podporovali turbulentnú podstatu granulácie tvrdením, že reverzné snímky granulácie (pozitív a negatív) sú podobné, zatiaľ čo konvektívna koncepcia granulácie vyžaduje plošné granuly obkolesené tenkými intergranulárnymi priestormi (niečo ako granulárna sieťka). A. Skumanich (1955) dokumentoval uvedené tvrdenie vo svojej práci (viď. obr. 5), kde dokazuje podobnosť štruktúr vykreslených pre intenzity 80% a 20% priemernej intenzity. Priaznivý výsledok dostal vďaka nedostatočnému priestorovému rozlíšeniu originálnych snímok granulácie.

Ešte pred érou pozorovaní s pomocou stredne-výškových balónov (Blackwell a kol. 1957) skupiny v Pulkove a na Pic du Midi získali výborné snímky na pozemských prístrojoch.

Taktiež R.B. Leighton (1957) získal na Mt. Wilson excelentné snímky granulácie z ktorých určil pomer intenzít granula/intergranula = 1.14 a autokorelačnou metódou určil priemerný rozmer granule 1.3". Pre autokoreláciu použil dve identické fotografie (platne) granulácie, ktoré vzájomne posúval a meral prechádzajúce svetlo. Správne predpokladal, že intenzita svetla bude klesať, tak ako sa budú granule, pôvodne ležiace v oboch snímkoch nad sebou, vzájomne posúvať. Pri posune platní o celý premierný rozmer granule nastane zlom v poklese a intenzita svetla sa stane konštantnou, kopírujúc tak náhodné vzájomné zakrývanie granúl a intergranulárneho priestoru. Práve miesto zlomu poklesu svetla dáva priemerný rozmer granule. Originálne meranie je uvedené na obr. 6.

V prípade turbulentnej podstaty granulácie by malo platiť pre jej rozmerové rozdelenie tzv. Kolmogorovovo spektrum odvodené pre turbulentné štruktúry. Najšť takéto rozdelenie bol hlavný cieľ pozorovaní robených s výškovými balónmi na konci 50-tych a v 60-tych rokoch. Tri skupiny vedené Schwarzschildom, Kratom a Kiepenheuerom súperili o získanie snímok s maximálnym priestorovým

rozlíšením (0.3") nerušeným zemskou atmosférou. V tom istom čase skupina na Pic du Midi vedená Röschem posunula priestorové rozlíšenie snímok na neuveriteľných 0.25" zavedením tzv. 'burst of exposures' t.j. sériou rýchlych expozícií s výberom najlepšieho snímku (J. Rösch, 1959).

Prvé výsledky balónových experimentov sumarizované Leightonom (1963) pochovali na dlhú dobu predpoklad o turbulentnej povahe granulácie. Snímky granulácie neboli totiž reverzibilné, t.j. nebolo možné zameniť negatív a pozitív, inými slovami, tmavé okraje granúl vytvárali súvislú sieťku a granule tvorili jasne izolované centrá. To bolo v priamom rozpore s turbulentnou koncepciou granulácie.

Leighton a kol. (1962) vyvinuli metódu na určovanie rýchlostného poľa v spektroheliogramoch granulácie a analýzou časových radov objavili 5-minútové oscilácie vnútornej fotosféry s vertikálnym pohybom 0.4 km/s. Toto rýchlostné pole interpretovali ako dôsledok vystupujúcich horúcich granúl, čo tiež nasvedčovalo, že granulácia je prejavom konvektívnych podpovrchových tokov plazmy. V Dopplergramoch granulácie dokumentovali tiež prítomnosť väčších dynamických celkov - buniek, ktoré mali približný rozmer 16000 km, vzdialenosť medzi nimi bola 30000 km, plazma v nich prúdila horizontálne od centra bunky k okraju rýchlosťou 0.5 km/s a životnosť celého útvaru bola približne niekoľko hodín. Domnievali sa že tieto štruktúry sú dynamickým prejavom supergranulácie, t.j. väčších konvektívnych štruktúr.

Súhrnná monografia o slnečnej granulácii na konci 60-tych rokov (R.J. Bray a R.E. Loughhead, 1967) sumarizovala základné vedomosti o vlastnostiach a formovaní granulácie. Všeobecne bolo prijaté, že granulácia je zložená z bunkových štruktúr a predstavuje hornú časť konvektívnych tokov. A. Wittman (1979) excelentne zosumarizoval štatistické prejavy a vlastnosti granulácie získané z meraní a J.M. Beckers (1981) urobil prehľad o fyzikálnych procesoch vo fotosfére a o meracích technikách na pozorovanie granulácie.

Na konci 70-tych rokov sa zdalo, že časová škála životnosti granúl, ich veľkosť a priestorové rozdelenie sú určené s konečnou platnosťou ale podstata konvektívnych procesov a problém prenikania horúcich tokov plazmy do fotosféry neboli ešte vyriešené. Prítomnosť 5-minútových oscilácií bránila študovať čisté prenikanie granulárnych tokov do fotosféry a neexistovali efektívne techniky ako tieto oscilácie odstrániť z pozorovaní. Ani balónová éra neprinesla kvalitné 'movies' t.j. časové sekvencie dát, pretože pozorovania boli zaťažované chybami pointácie, posuvmi ohnísk a teplotnými deformáciami optiky. Tak bolo možné získať iba excelentné jednotlivé snímky bez časovej nadväznosti.

Naopak, pozemské pozorovania na Pic du Midi (J. Rösch), na Rye Canyon (H. Ramsey) a na Sacramento Peak (R.B. Dunn) produkovali dobré movies granulácie. Sklamaním pre pozorovateľov však bola prítomnosť významných rušivých 'seingových' vln, rýchlo sa šíriacich cez obrazové pole. Dôsledkom toho bolo, že sa dočasne upustilo od snahy vytvoriť kvalitné movie granulácie.

5. MODERNÝ VÝSKUM SLNEČNEJ GRANULÁCIE OD ROKU 1980

V 80-tych rokoch sa významne zlepšila kvalita pozorovacích dát slnečnej granulácie s použitím výkonných počítačov s veľkou operačnou pamäťou. Boli vyvinuté metódy na digitálnu registráciu dát a odstránenie malých chýb a fluktuácií spôsobených seingom a chybami pointácie ďalekohľadov. Metóda tzv. 'space-time filtering' umožnila odseparovať oscilácie od konvektívnych procesov a metóda 'local correlation tracking' umožnila určovať a skúmať horizontálne - povrchové toky plazmy v slnečnej granulácii.

Roudier a Muller (1987) sa ešte vrátili k detailnej analýze najlepších sólo snímok granulácie a aplikovaním nových digitálnych techník a multi-frekvenčnou filtráciou dát spresnili viaceré základné charakteristiky granulácie (viď. obr. 7,8,9). Významným výsledkom ich práce bolo, že aplikovaním fraktálovej analýzy na tvar granúl zistili, že granule menšie ako 1.37" vykazujú turbulentnú podstatu. Túto skutočnosť dokumentuje obr. 10 kde je vynesená závislosť plocha-obvod granule vyjadrená cez fraktálnu dimenziu D . Zjednodušene povedané, vzťah medzi obvodom P a plochou A má tvar $P \propto A^{D/2}$, kde D je fraktálna dimenzia. Ak je tvar granule pekne kruhový, potom $P \propto A^{1/2}$, t.j. $D=1$. Ak 'obvodová čiara' granule začína byť viac komplikovaná a odchyľuje sa od kružnice potom $P \propto A$, takže $D=2$. Na obr. 10 je zrejмый zlom v rozdelení pri veľkosti granulee 1.37". Pre granule menšie ako 1.37" je fraktálna dimenzia $D=1.25$ t.j. majú jednoduchší tvar a pre väčšie granule je $D=2.15$. Tieto granule vykazujú komplikovanejší tvar.

Z Kolmogorovovej teórie pre izotermickú homogénnu turbulenciu vyplýva pre rozdelenie energie, že $D=1.33$ pre izobary. Z podobnosti hodnôt $D=1.25$ a $D=1.33$ a faktu, že tvar granúl je úmerný tlakovým pomerom v prostredí, autori odvodili turbulentnú podstatu pre malé granule. V ďalšej práci Muller a kol (1990) dokázali, že priestorové rozdelenie veľkých a malých granúl je odlišné (obr. 11) a že granule menšie ako 1.37" sa grupujú do zhlukov s rozmerom 3" - 12" (viď. obr. 12).

V r. 1985 začal pracovať na Spacelabe 2 prístroj SOUP (Solar Optical Universal Polarimeter), ktorý poskytol čisté časové sekvencie obrázkov granulácie neovplyvnené zemskou atmosférou. Veľkým prekvapením bolo, že aj tieto movies sú postihnuté 'vlnením' známym už z pozemských movies. Hneď bolo dokázané, že je to vplyv 5-minútových oscilácií a začali byť vyvíjané techniky na odstránenie tohto vplyvu.

A.M. Title a kol. (1986) ukázali, že je možné odstrániť 5-minútové oscilácie z movies. Využili skutočnosť, že vzťah medzi priestorovými (k) a časovými (ω) frekvenciami je dobre definovaný pre akustické a povrchové vlny. Previedli pomocou Fourierovej transformácie časové sekvencie dát do tzv. Fourierovského $k-\omega$ priestoru, kde použitím

správneho frekvenčného okna (filtra) odfiltrovali frekvenciu prislúchajúcu osciláciám a spätným prevodom do priestorovo-časovej domény získali časové sekvencie bez vplyvu oscilácií. Po odfiltrovaní oscilácií sa objavili pomalé pohyby a zmeny, ktoré predtým nebolo ľudské oko schopné postihnúť, pretože pri videní preferujeme vnímanie rýchlych procesov.

A.M. Title a kol. (1989) rozvinuli tiež presnejšiu metódu určovania jednotlivých granúl používajúc tzv. 'lane-finding' a 'center-finding' metódy, t.j. raz definovali granule tak, že za granulu považovali útvar úplne obkolesený tmavým okrajom a druhý raz definovali granulu tak, že za granulu považovali útvar, ktorý má v centre maximum intenzity odkiaľ klesá do všetkých smerov. Po odfiltrovaní 5-minútových oscilácií ukázali, že životnosť granúl je dlhšia ako sa predpokladalo (viď. obr. 13), že explodujúce granule sa vyskytujú častejšie ($7.7 \times 10^{-11} \text{ km s}^{-1}$), ich rýchlosť expanzie je 1-2 km/s, že explodujúce granule sa kumulujú do zhlukov a životnosť explodujúcej granule je priemerne 600 až 900 sekúnd. Ďalej zistili, že magnetické pole mení štruktúru granúl a dokumentovali že je tam aj odlišné prúdenie (viď. obr. 14) Zistili, že rms intenzitných fluktuácií je 2x menšie v magnetickom poli väčšom ako 75 G a dokázali súvis horizontálnych tokov a divergencie materiálu s expandujúcimi granulami (viď. obr. 15).

Po uvedení SVST (Swedish Vacuum Solar Telescope) do prevádzky v r. 1987 a modernizácii pozorovaní na Pic du Midi a Sacramento Peak sa začala observačná éra výskumu časového vývoja granulácie. Boli určené teplotné variácie v granulách a pre intenzitné variácie stanovil Scharmer (1987) hodnotu rms = 10-11% na vlnovej dĺžke 469.6 nm. Zopakovalo sa určenie základných charakteristík granulácie. Priemerná veľkosť granulácie bola určená autokoreláciou na 1.4" a mezigranulárna vzdialenosť na 1.9" (1400 km). Životnosť granúl skúmaná pomocou časovej autokorelácie prekvapivo ukázala, že granule nemajú rovnaký vývoj, že sa výrazne horizontálne pohybujú a že životnosť granúl sa výrazne líši v magnetickom (5-8 minút) a nemagnetickom (7-15 minút) prostredí. Veľký priestor bol venovaný štúdiu horizontálnych tokov a väčších štruktúr tzv. mezogranulácie. Boli potvrdené 10 - 30 minútové horizontálne toky v celách 6" - 8". Ich výskyt sa vysvetľoval zákonom zachovania hmoty v spojení s vertikálnymi pohybmi vo fotosfére (November 1989).

Bola vyvinutá metóda 'korkov'. Na skúmanie horizontálnych pohybov sa do obrazov vkladali značky - korky a snímok po snímku sa ich poloha korigovala v závislosti na horizontálnej rýchlosti. Pohyb korkov potom dokumentoval horizontálne toky plazmy. Pre horizontálnu dynamiku granulácie sa zistilo, že prvých 10 minút je rýchlosť 1.6 km/s smerom k okraju granule, potom je pozorovaná rýchlosť 1.0 km/s smerom k okraju mezogranule a potom pokračuje pohyb pozdĺž okraja mezogranule rýchlosťou 0.5 km/s.

Veľa pozorovaní a spresnení bolo neskôr venovaných mezogranulácii, horizontálnym tokom, explodujúcim granulám formovaniu malých jasných bodov v granulácii a pod. (viď. napríklad Brandt a kol. 1991, Muller a Roudier 1992, Berger a kol. 1995). Je však otázne nakoľko sú horizontálne pohyby v granulácii iba superpozíciou

expandujúcich granúl a nakoľko odzrkadľujú nejaké hlbšie podpovrchové štruktúry a prúdenia. Táto problematika nie je dodnes uspokojivo vysvetlená.

V polovici 90-tych rokov sa kvalita pozorovaní jemnej štruktúry slnečnej atmosféry a granulácie výrazne zlepšila zavedením dvoch nových aktívnych techník aplikovaných na dáta už počas pozorovaní. Paxman a kol. (1996) detailne rozpracovali tzv. 'phase-diversity' techniku na reštaurovanie obrázkov granulácie získaných s veľkým priestorovým rozlíšením navrhnutú pôvodne Gonsalvesom a Chidlawom (1979) a aplikovanú prvýkrát Löfdahlom a Scharmerom (1994). Jej princíp spočíva v tom, že súčasne s ostrým obrazom sa získa aj neostrý obraz danej oblasti s presne definovaným posunom ohniska. Ostrý obraz nesie aj poruchové vplyvy - odchyľky spôsobené seingom a ďalšími efektami. Neostrý obraz je tiež ovplyvnený rovnakými odchyľkami ale je tiež ovplyvnený presne definovaným rozostrením ktoré pridáva ďalší rušivý avšak známy kvadratický člen. Zjednodušene povedané, neznáme rušivé odchyľky potom môžu byť stanovené na základe známeho kvadratického člena. Táto metóda musí byť ale aplikovaná iba na excelentné snímky pretože pri horšom rozlíšení zlyháva (viď. obr. 16).

Druhá metóda - adaptívna optika (AO) bola prvýkrát zavedená na National Solar Observatory Sacramento peak v r. 1999 a je založená na snahe aktívne korigovať front vlnoplochy rušený seingovými a inými vplyvmi. Používa sa na to segmentové zrkadlo vložené do optickej cesty prístroja, ktoré je zložené z viacerých (20-30) samostatných zrkadiel na ktoré je privádzaný on-line signál s informáciou o deformácii vlnoplochy. Jednotlivé segmenty sú potom nastavované tak, aby správne korigovali front vlnoplochy. Vzhľadom na vysoké frekvencie seingu sú vysoké nároky na mechanické a elektronické časti celého zariadenia. Výsledok použitia AO je ukázaný na obr. 17.

Zavedenie vyššie spomenutých techník bolo impulzom k detailnejšiemu výskumu maloškálovej topológie a dynamiky granulácie s veľkým nárastom publikovaných prác (viď za všetky napr. Wilken a kol. 1997, Hoekzema a kol. 1998, Hoekzema a Brandt 2000, Hirzberger a kol. 1997, 1999a, 1999b, Löfdahl a kol. 1998).

Variáciu granulácie v závislosti na polohe na disku (center to limb variations) určovali Wilken a kol. (1997). Analýzou dát z obr. 18 autori určili rms intenzity v strede disku na 13.5% s poklesom na hodnotu 8-9% na kraji disku pre $\cos \theta = 0.1$. (Pri pohľade na obr. 18) by sa dalo vysvetliť prečo v začiatkoch výskumu granulácie pri slabom priestorovom rozlíšení, autori hovorili o 'vrbových lístkoch' a 'ryžových zrnkách').

Výsledný snímok z práce, Löfdahl a kol. (1998) ktorý bol reštaurovaný použitím metódy phase-diversity je na obr. 19), kde je zrejmy už spomínaný rozdiel medzi magnetickou (dolná časť) a nemagnetickou (horná časť) granuláciou.

Jeden príklad z práce Hoekzema a Brandt (2000) je uvedený na obr. 20, kde je ukážka amplitúd 8 minútových oscilácií a divergencia (výtoky a vnory plazmy) v granulácii určená použitím metódy 'local correlation tracking'. Zjednodušene, táto metóda je založená na rozdelení celého snímku na subsegmenty, posúvaní týchto subsegmentov navzájom a ich korelovaní. Maximálna korelácia potom určuje v ktorom horizontálnom smere sa pohybovala plazma v subsegmente.

Ukážka explodujúcej granule z práce Hirzberger a kol. (1999) je na obr. 21 a 22.

Zlepšené observačné techniky umožnili získavať extrémne dlhé časové rady kvalitných pozorovaní. Tzv. 'time-slices' (časové vývojové mapy) urobené z týchto pozorovaní umožňujú sledovať vývoj, pohyb, vznik, zánik a fragmentáciu granúl na dlhom časovom úseku. Pre detailnú analýzu Müller a kol. (2001) použili neuveriteľne dlhý 8.2-hodinový rad excelentných dát z SVST z La Palmy a vytvorili z 'time-slices' tzv. 'skeletons' - kostry, v ktorých pomocou masiek a filtrácií zvýraznili medzigranulárnu štruktúru (viď obr. 23). Získali tak možnosť sledovať reťazce granulárnej aktivity a zistili, že na dlhom časovom úseku (60 - 120 minút) existujú stabilné centrá, v ktorých neustále prebieha granulárna aktivita spojená s fragmentáciou individuálnych granúl. Tieto štruktúry 110 minút trvajúce a vzdialené od seba priemerne 67000 km sú ukázané na obr. 24 vľavo a štruktúry trvajúce 60 minút a vzdialené od seba priemerne 34000 km sú ukázané na obr. 24 vpravo. Analýza takéhoto skupinového chovania granúl je dôležitá pre teoretické modely časového vývoja podpovrchovej konvekcie. Pri modelovaní bude potrebné vziať do úvahy aj najnovšie výsledky Getlinga a Brandta (2002), ktorí na základe analýzy rovnakého 8.2 hodinového časového radu našli tendenciu grupovania sa granúl do pravidelnej štruktúry v prípade, že zosumujeme dostatočne dlhý rad pozorovaní (2 - 3 hodiny) (viď obr. 25). Tu je však potrebné preveriť či sa nejedná o náhodné zoskupenia, ktoré by sme získali aj pri sumácii náhodne generovaných 'granulačných polí'.

6. ZÁVER

Pre teoretické modelovanie konvekcie a granulácie sú dôležité aj spektrálne pozorovania granulácie a spodnej fotosféry robené v mnohých čiarach a kontinuách súčasne. Taktiež globálna podpovrchová cirkulácia a globálne slnečné oscilácie sú dôležité pre konzistentné modely. Vzhľadom na limitovaný rozsah nie je možné venovať priestor tejto problematike v tomto príspevku a preto týmito pozorovaniami, teoretickou interpretáciou a modelovaním granulácie sa budeme zaoberať v príspevku 'Slnečná Granulácia II - Teória', ktorý pripravujeme do ďalšieho zborníka.

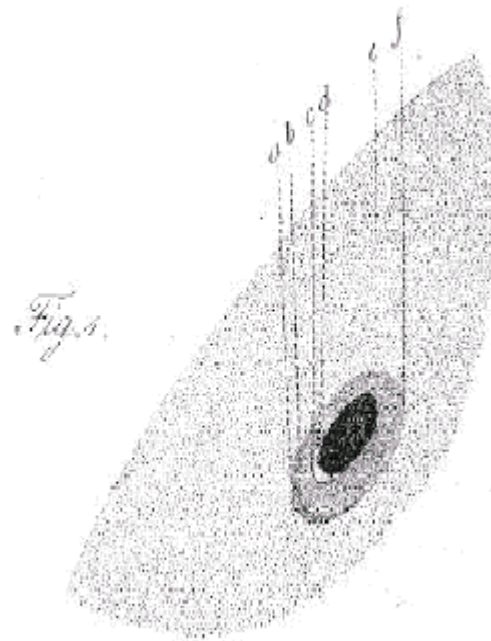
POĎAKOVANIE

Práca vznikla s podporou Grantovej agentúry VEGA (grant VEGA 2/7229/20).

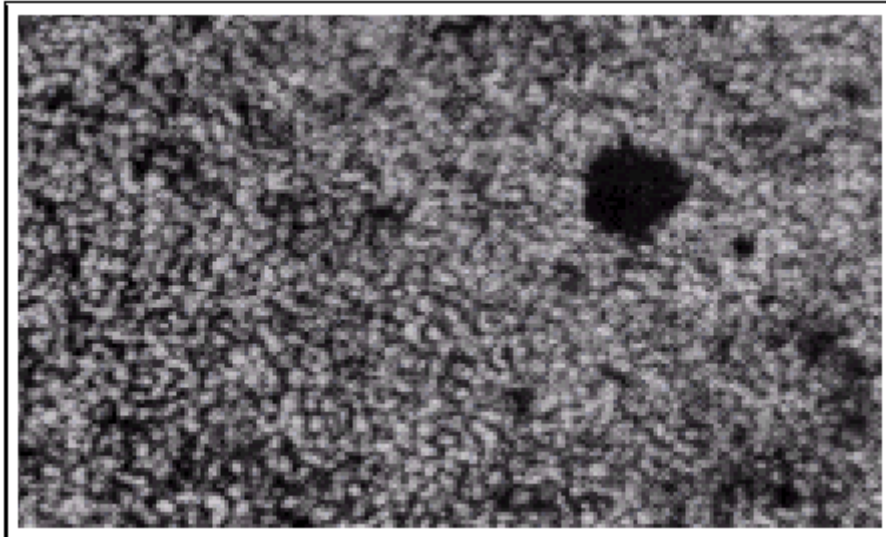
LITERATÚRA

Beckers, J.M., 1981, In: The Sun as a Star, NASA-SP-450, ed. S. Jordan, Washington DC, st. 11
 Berger, T.E., Schrijver, C.J., Shine, R.A., Tarbell, T.D., Title, A.M., Scharmer, G.B., 1995, Ap.J. 454, 531
 Blackwell, D. E. Dewhirst, D.W., Dolfus, A., 1957, Nature 180, 211
 Brandt, P.N., Ferguson, S., Scharmer, G.B., Shine, R.A., Tarbell, T.D., Title, A.M., Topka, K., 1991, Astron. Astrophys. 241, 219
 Bray, R.J., Loughhead, R.E., 1967, The Solar granulation, London, Chapman & Hall
 ten Bruggencate, P. Müller, H., 1942, Zeitschr. Für Astron. 21, 198
 Dawes, W. R., 1864, Mont. Not. Roy. Astron. Soc 24, 161
 Getling, A.V., Brandt, P.N., 2002, Astron. Astroph. 382, L5
 Gonsalves, R.A., Chidlaw, R., 1979, In: Proc. SPIE 207, 32
 Hanksy, A., 1906, Bull. Soc. Astron. Franc. 64, 178
 Herschel, W. 1801, Phil. Transact. Roy. Soc. 91, 265
 Hinzberger, J., Vazquez, M., Bonet, J.A., Hanslmeier, A., Sobotka, M., 1997, Ap.J. 480, 406
 Hinzberger, J., Bonet, J.A., Vazquez, M., Hanslmeier, A., 1999, Ap.J. 515, 441
 Hinzberger, J., Bonet, J.A., Vazquez, M., Hanslmeier, A., 1999, Ap.J. 527, 405
 Hoekzema, N.M., Brandt, P., 2000, Astron. Astroph. 353, 389
 Hoekzema, N.M., Brandt, P., Rutten, R.J., 1998, Astron. Astroph. 333, 322
 Huggins, W., 1866, Mont. Not. Roy. Astron. Soc 26, 260
 Huggins, W., 1878, Mont. Not. Roy. Astron. Soc 38, 101
 Janssen, J., 1896, Ann. Obs. Astron. Paris Meudon 1, 91
 Keenan, P.C., 1938, Ap.J. 88, 360
 Keenan, P.C., 1939, Ap.J. 89, 604
 Leighton, R.B. 1957, Pub. astron. Soc. Pacific 69, 497
 Leighton, R.B., Noyes, R.W., Simon, G.W., 1962, Ap.J. 135, 474
 Leighton, R.B., 1963, Ann. Rev. Astron Astrophys. 1, 19

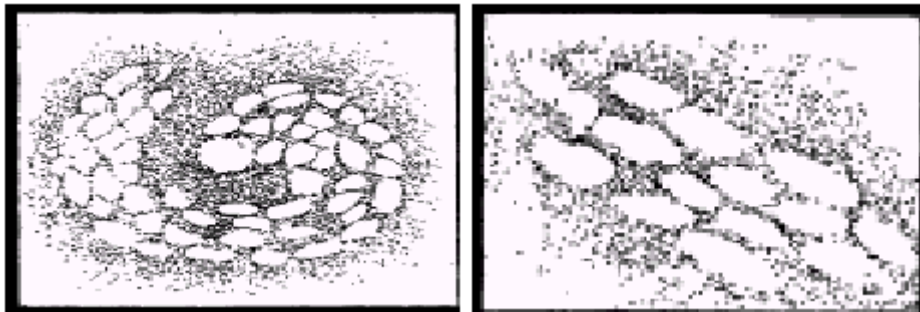
Löfdahl, M.G., Berger T.E., Shine, S., Title, A., 1998, Ap.J. 495, 965
 Löfdahl, M.G., Scharmer, G.B., 1994, A&AS 107, 243
 Muller, R., Roudier, Th., Vigenau, J., 1990, Sol. Phys. 126, 53
 Muller, R., Roudier, Th., 1992, Sol. Phys. 141, 27
 Müller, D.A.N., Steiner, O., Schlichenmaier, R., Brandt, P.N., 2001, Sol. Phys. 203, 211
 Nasmyth, J., 1862, Mem. Lit. Philos. Soc. Manchester 1, 407
 November, L., 1989, Ap.J. 344, 494
 Paxman, R.G., Seldin, J.H., Löfdahl, M.G., Scharmer, G.B., Keller, Ch., 1996, Ap.J. 466, 1087
 Plaskett, H.H., 1936, Mont. Not. Roy. Astron. Soc 96, 402
 Richardson, R.S., Schwarzschild, M., 1950, Ap. J. 111, 351
 Rösch, J., 1959, Annales d' Astrophysique 22, 584
 Roudier, Th. Muller, R., 1987, Sol. Phys. 107, 11
 Scharmer, G. B., 1987, In: The Role of fine-Scale Mag. Fields on the Structure of the Solar Atmosphere, eds: E-H. Schröter, M. Vázquez, A.A. Wyller, Camb. Univ. Press.
 Skumanich, A., 1955, Ap.J. 121, 404
 Title, A. M., Tarbell, T. D., Topka, K.P., Ferguson, S.H., Shine, R.A. and the SOUP-team, 1986, Ap.J. 336, 475
 Title, A. M., Tarbell, T. D., Simon, W.G., a SOUP-team, 1986, Adv. Space Res. 6, 253
 Uberoi, M.S., 1955, Ap.J. 122, 466
 Wilken, V., de Boer, C.R., Denker, C., Kneer, F., 1997 Astron. Astrophys. 325, 819
 Wittmann, A., 1979, In: Small-Scale Motions on the Sun, Mitt. Kiepenheuer Inst. 179, 29



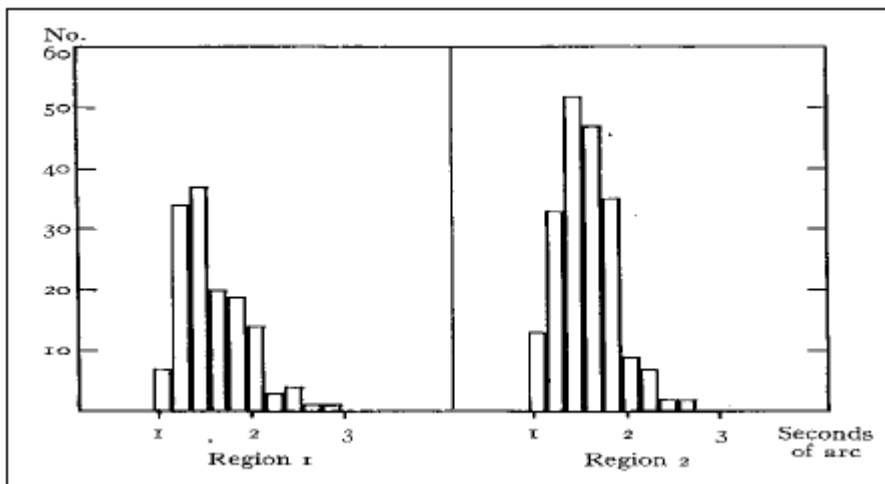
Obrázok 1. Schematické znázornenie veľkosti granulácie (vľavo). Originálny zakres granulácie v okolí slnečnej škrvny urobený Herschelom v r. 1801 (vpravo).



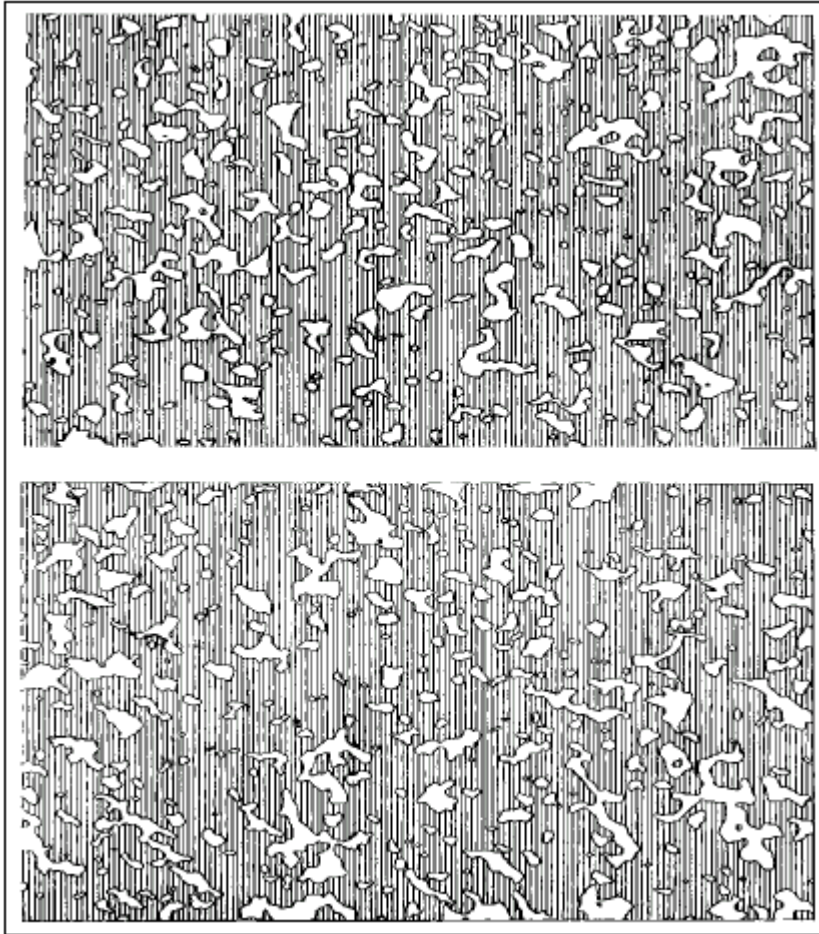
Obrázok 2. Prvá fotografia slnečnej granulácie urobená J.Janssenom v r. 1878.



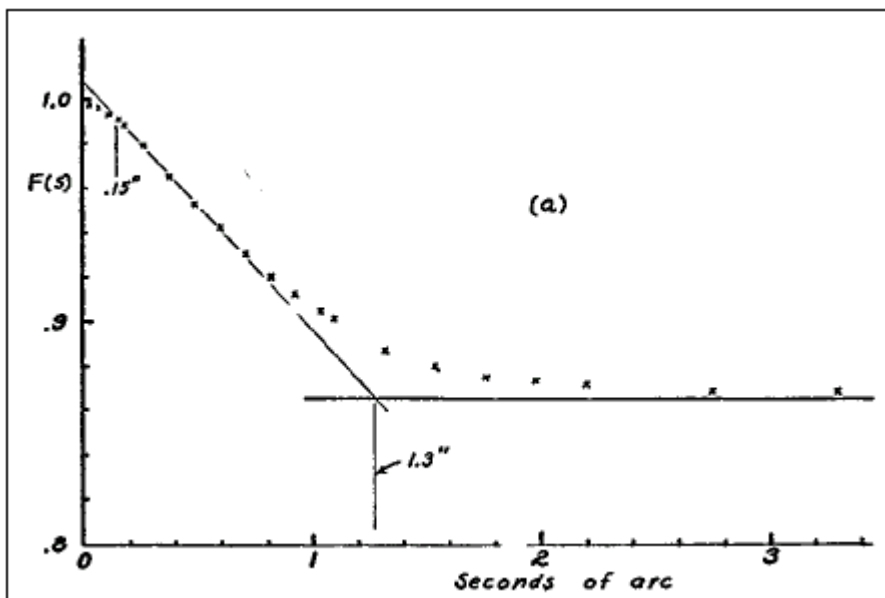
Obrázok 3. Abnormálna granulácia podľa Hugginsa zakreslená v r. 1878 na základe fotografií urobených J.Janssenom.



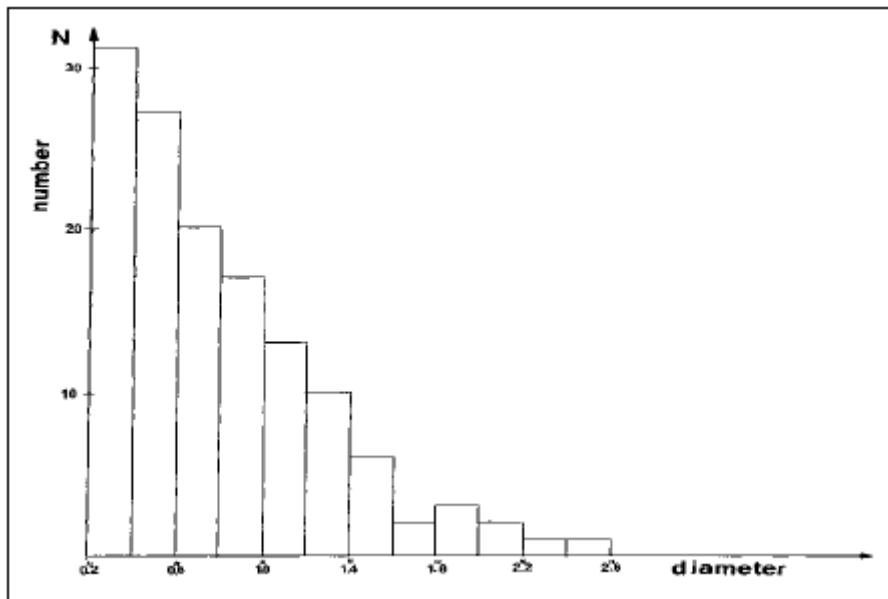
Obrázok 4. Veľkostné rozdelenie granúl pre dve vybrané oblasti urobené P.C. Keenanom v r.1938. Na osi 'x' je rozmer granule v oblúkových sekundách, na osi 'y' je početnosť.



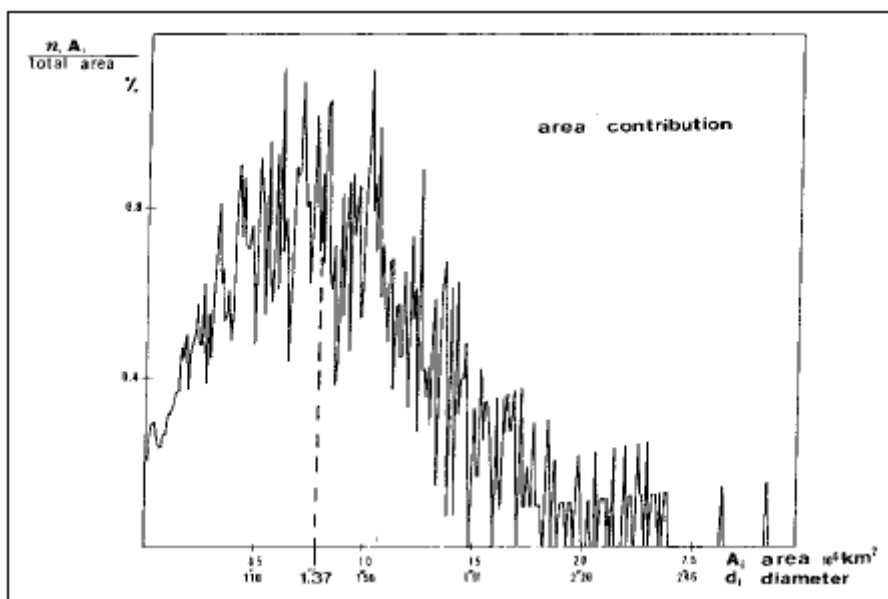
Obrázok 5. Výsledok práce A. Skumanicha. Na hornom paneli biele štruktúry odpovedajú granuliam a na dolnom paneli intergranuliam.



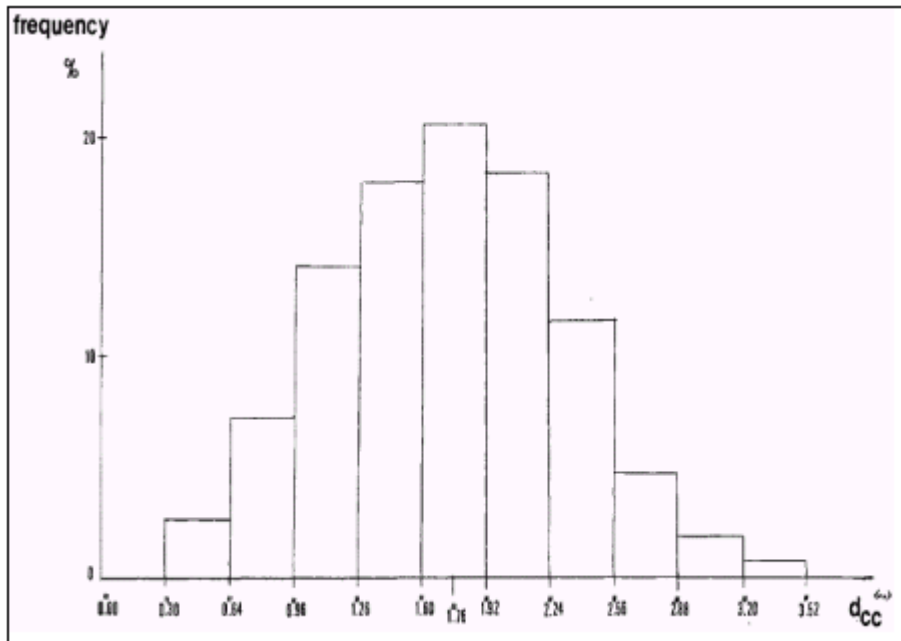
Obrázok 6. Originálne meranie rozmeru granule autokorelačnou metódou urobené R.B. Leightonom v r. 1957. Na osi 'x' je vzdialenosť posunu fotoplatní vyjadrená v oblúkových sekundách pre slnečný povrch a na osi 'y' je intenzita prechádzajúceho svetla cez fotoplatne.



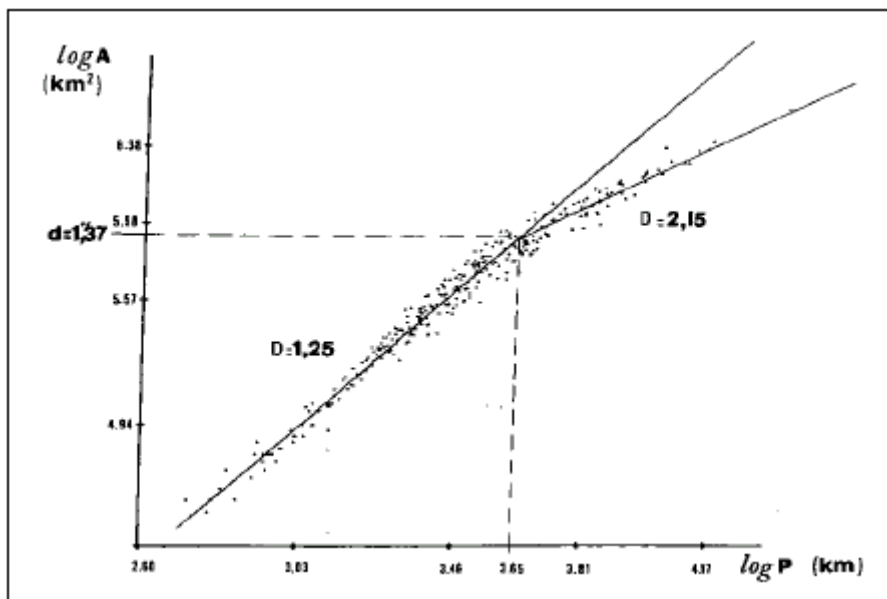
Obrázok 7. Počet granúl (os 'y') v závislosti na priemere granule (os 'x'). Počet malých granúl je najväčší. Podľa Roudier a Muller (1987).



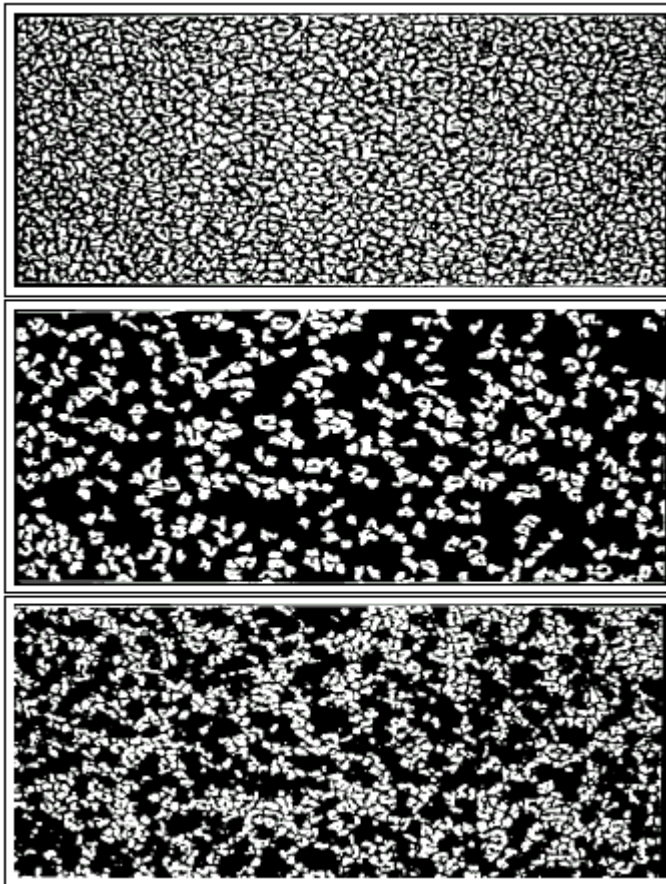
Obrázok 8. Príspevok granule daného rozmeru k celkovej ploche granúl. Najviac prispievajú k celkovej ploche granúl granule s priemerom 1.37". Podľa Roudier a Muller (1987).



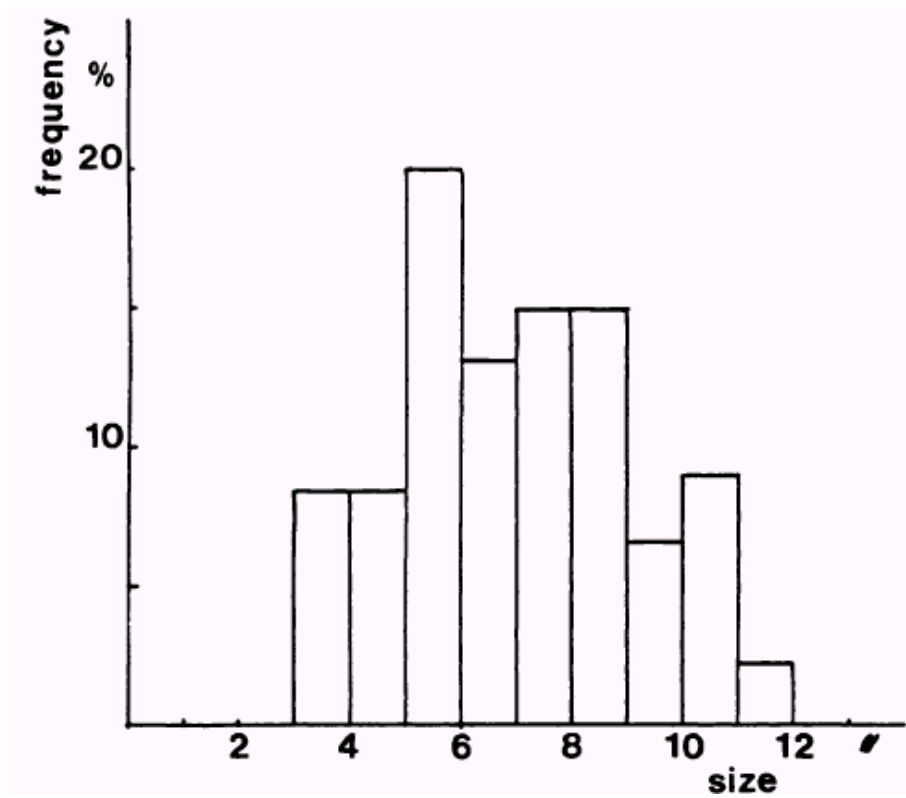
Obrázok 9. Histogram rozdelenia vzdialeností medzi granulami. Na osi 'x' je vzdialenosť centier granúl, a na osi 'y' je početnosť. Najčastejšia vzdialenosť medzi granulami je 1.76'' - maximum histogramu. Podľa Roudier a Muller (1987).



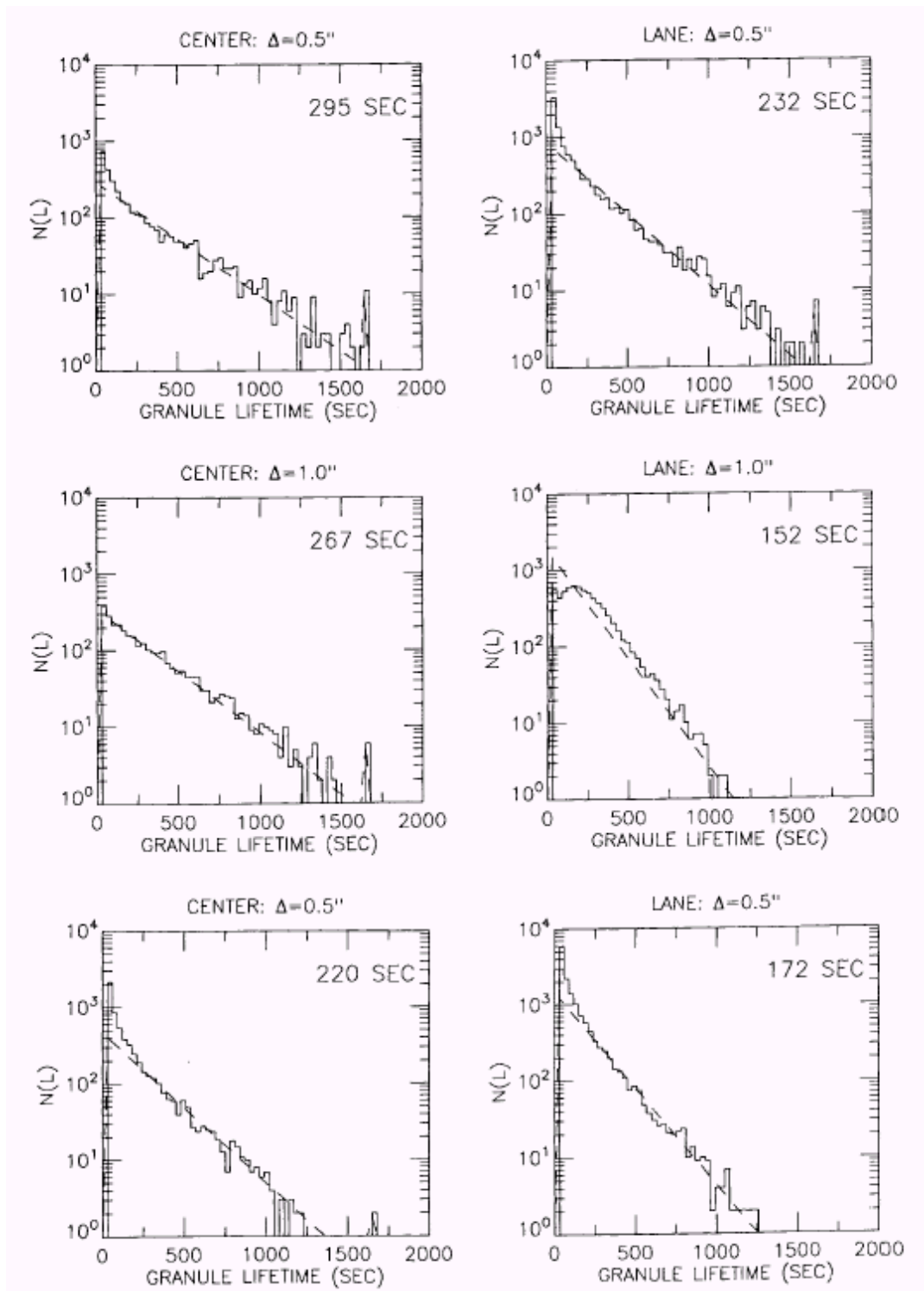
Obrázok 10. Vzťah plochy (A) a obvodu (P) granule. Pre granule menšie ako 1.37'' je fraktálna dimenzia D blízka hodnote pre turbulenciu. Podľa Roudier a Muller (1987).



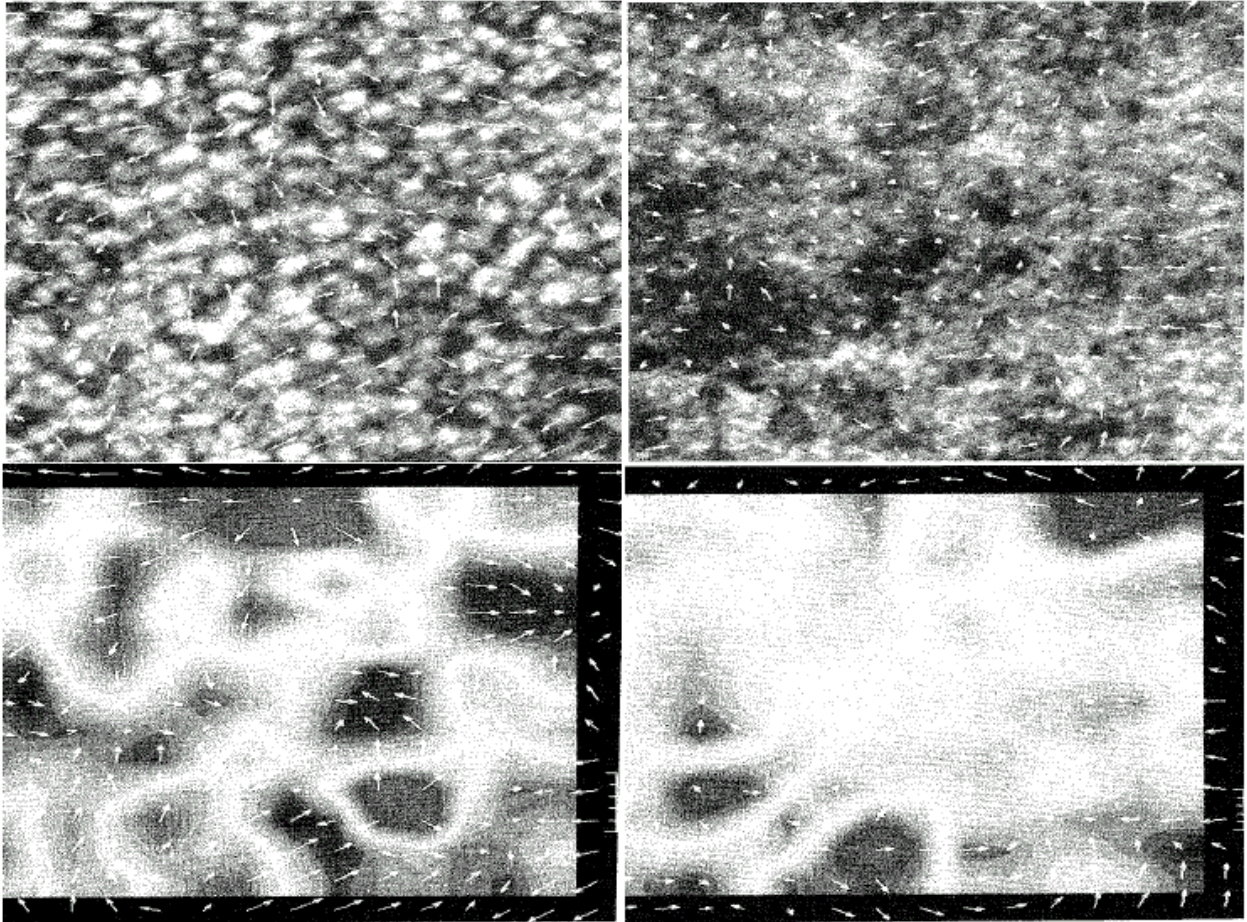
Obrázok 11. Rozdelenie malých a veľkých granúl. Na hornom paneli je obrázok so všetkými granulami, nasleduje obrázok s rozdelením veľkých granúl a obrázok s rozdelením malých granúl. Podľa Muller a kol. (1990).



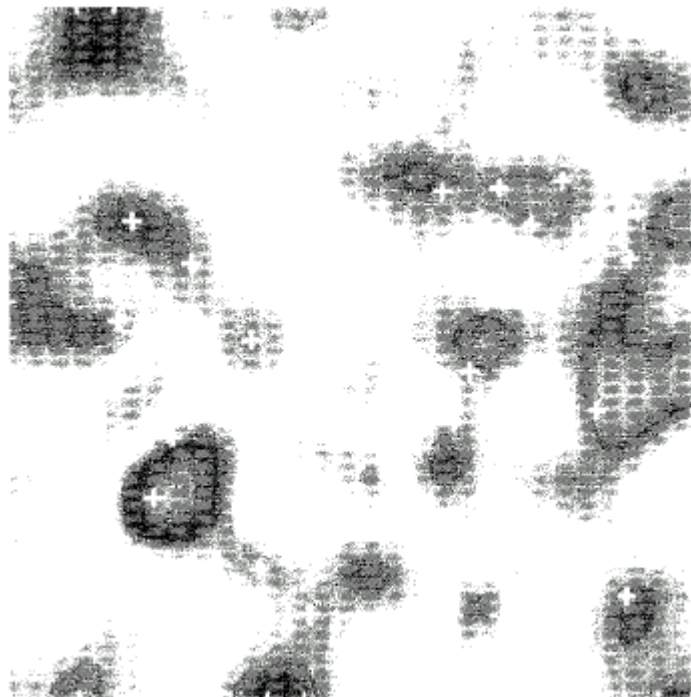
Obrázok 12.: Histogram rozdelenia rozmerov zhlukov malých granúl. Na osi 'x' je priemer zhlukov granúl, na osi 'y' je početnosť. Podľa Muller a kol. (1990).



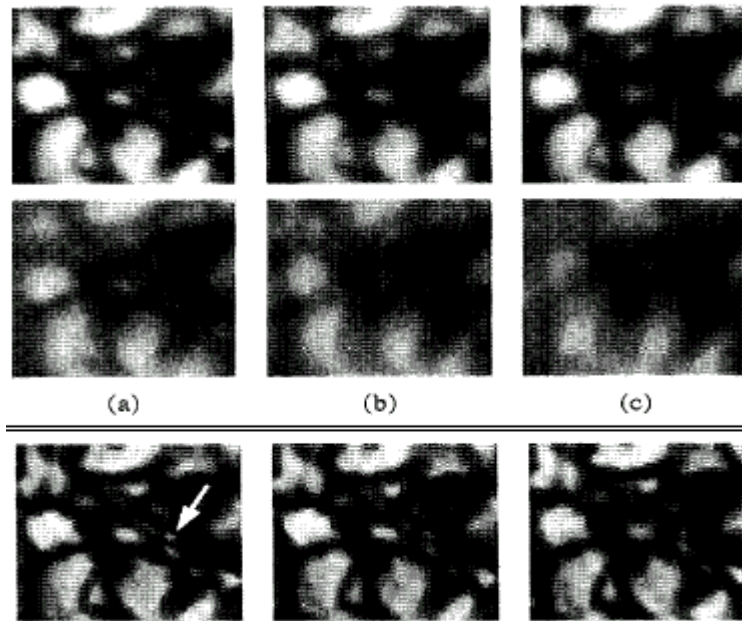
Obrázok 13. Početnosť granúl (os 'y') v závislosti na ich dobe života. (os 'x'). Horné dva panely ukazujú výsledok získaný z originálnych dát a dolné dva panely dávajú výsledok z dát po odstránení 5-minútových oscilácií. Ľavé panely sú pre granuláciu nájdenú pomocou metódy 'center-finding' s krokom 0.5'' a pravé panely sú pre granule nájdené pomocou 'lane-finding' s krokom 0.5''. Pred lženie životnosti granúl pre dáta bez oscilácií je zrejme. Podľa Title a kol. (1989).



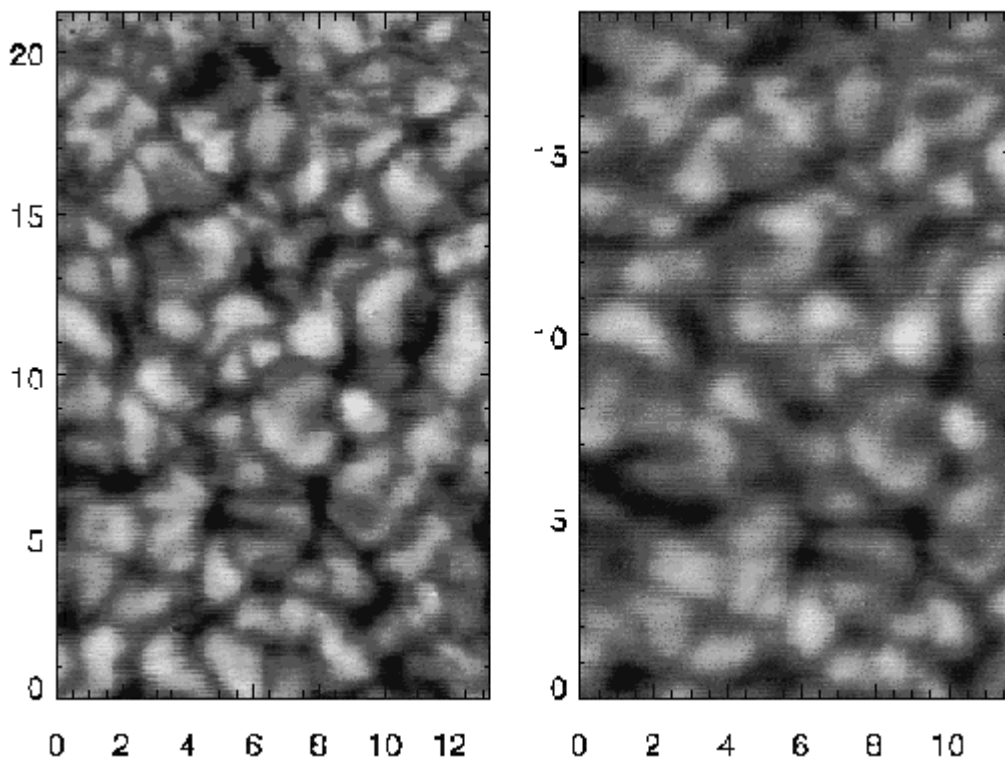
Obrázok 14. Slniečna granulácia v pokojnej 'nemagnetickej' oblasti (vľavo hore) a v aktívnej magnetickej oblasti (vpravo hore). Biele šípky ukazujú smer a veľkosť horizontálnej rýchlosti. Divergencia v nemagnetickej (vľavo dole) a magnetickej (vpravo dole) oblasti, tmavou farbou su indikované miesta výtoku hmoty. Podľa Title a kol. (1989).



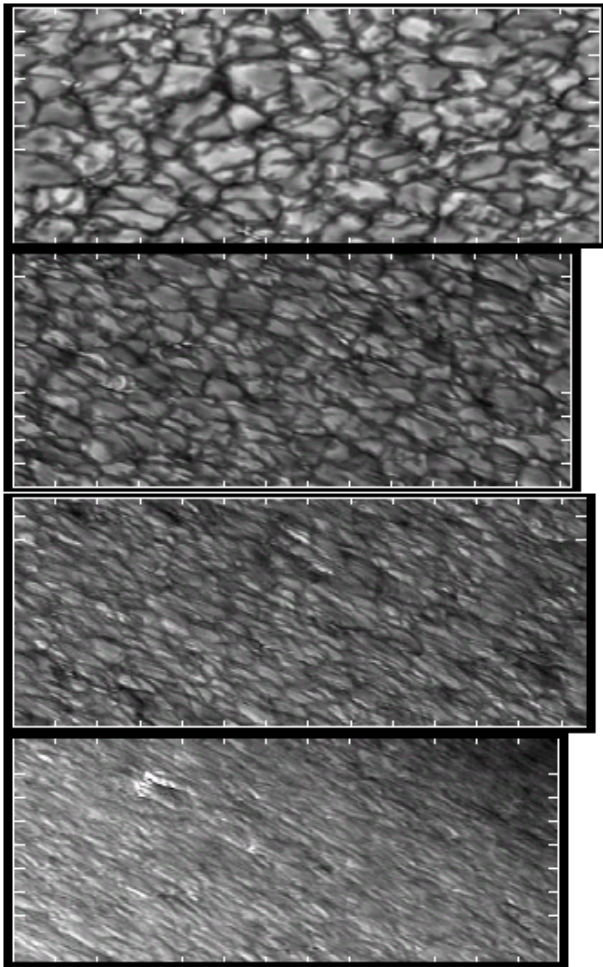
Obrázok 15. Divergencia a horizontálne toky v pokojnej oblasti s vyznačením polôh explodujúcich granúl (krížiky). Tmavou farbou su indikované miesta výtoku hmoty. Podľa Title a kol. (1989).



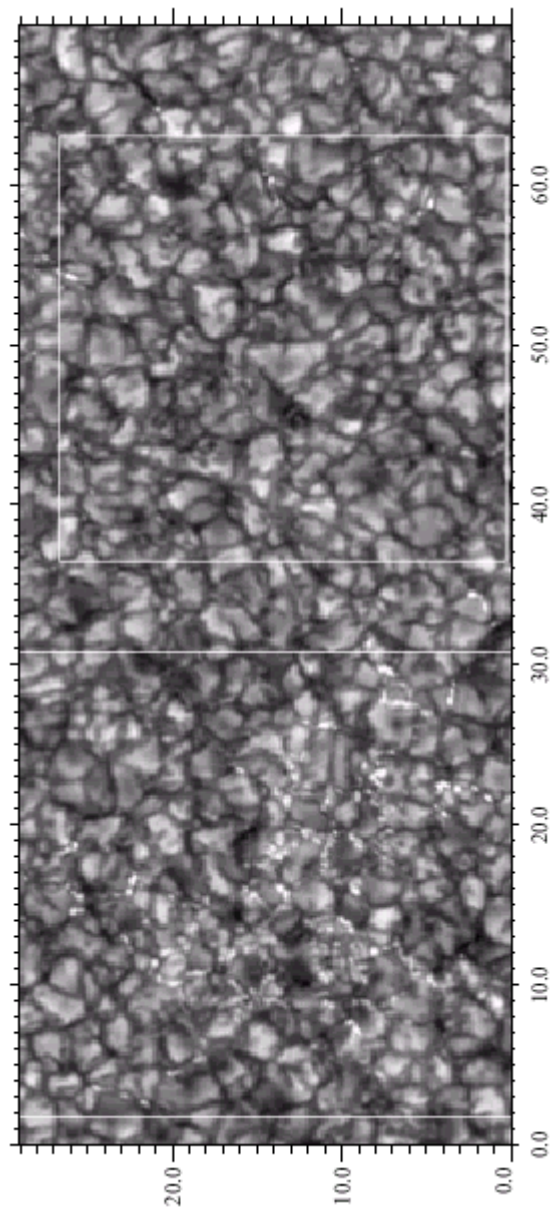
Obrázok 16.: Ukážka metódy 'phase diversity'. horný rad reprezentuje originálne ostré snímky rôznej kvality (najlepší je vľavo). Sredný rad tvoria rozostrené snímky a spodný rad tvoria rekonštruované snímky. Podľa Paxman a kol. (1996)



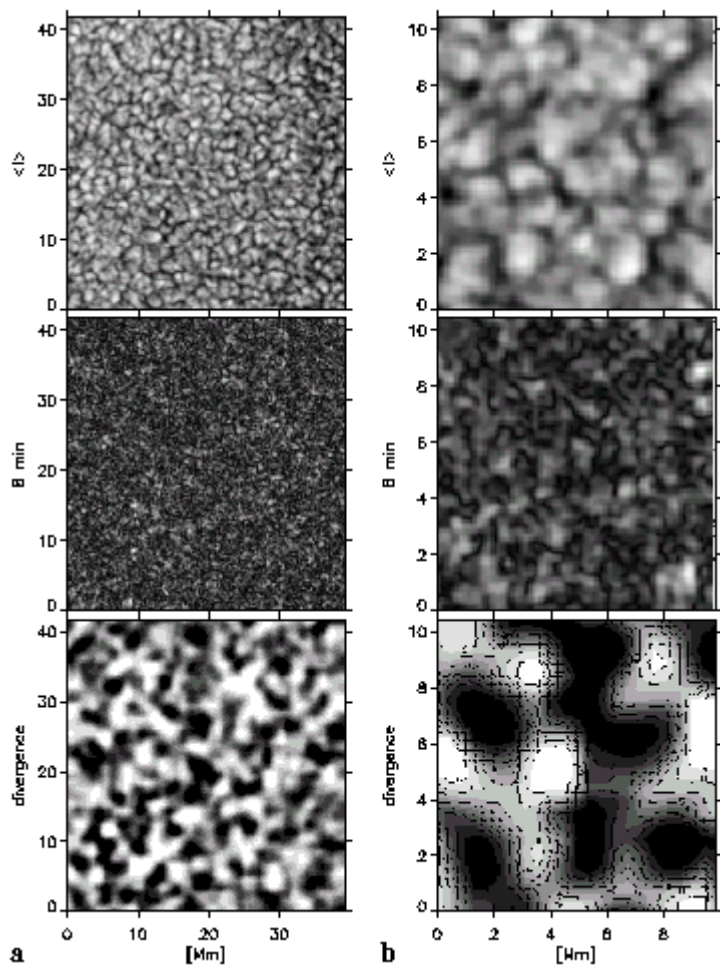
Obrázok 17. Ukážka snímok granulácie získaných v tom istom okamihu s použitím adaptívnej optiky (vľavo) a bez nej (vpravo). Podľa 'NOAO Newsletter-NSO-March-1999-Number-57'



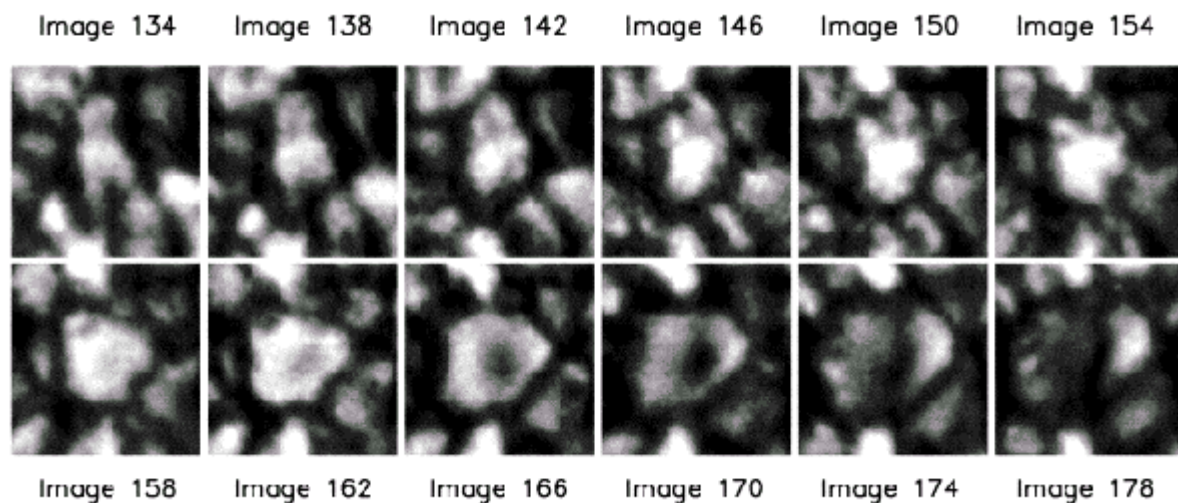
Obrázok 18. Pozorovaná zmena granulácie postupne od centra disku (hore) k limbu (dole). Podľa Wilken a kol. (1997).



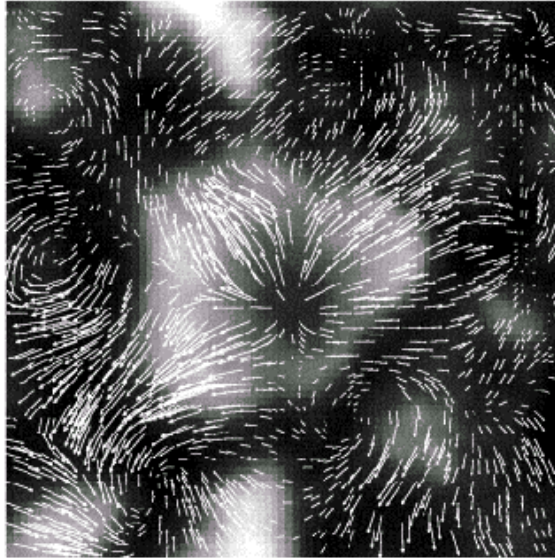
Obrázok 19. Výsledný obraz po aplikovaní metódy 'phase diversity'. Čísla sú v oblúkových sekundách. Viditeľný je rozdiel medzi magnetickou (dole) a nemagnetickou (hore) granuláciou. Podľa Löfdahl a kol. (1998)



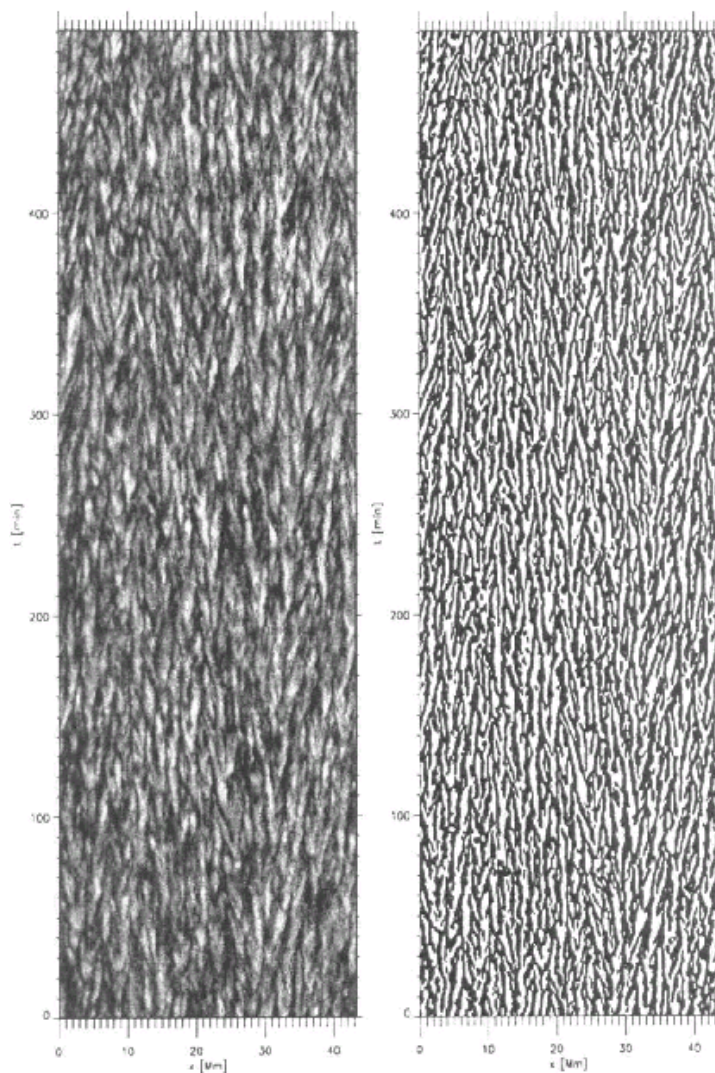
Obrázok 20. Ukážka výskumu pohybov a oscilácií v granulácii. Na hornom panely (a) je urobený priemerný obrázok granulácie získaný spriemerovaním 1-hodinového pozorovania. Stredný panel (a) znázorňuje amplitúdu oscilácií s periódou 8-minút a spodný panel (a) ukazuje divergenciu granulórneho pohybu určeného metódou 'local correlation tracking'. Panely (b) sú zväčšeninou časti obrázkov (a) zo spodného ľavého rohu. Podľa Hoekzema a Brandt (2000).



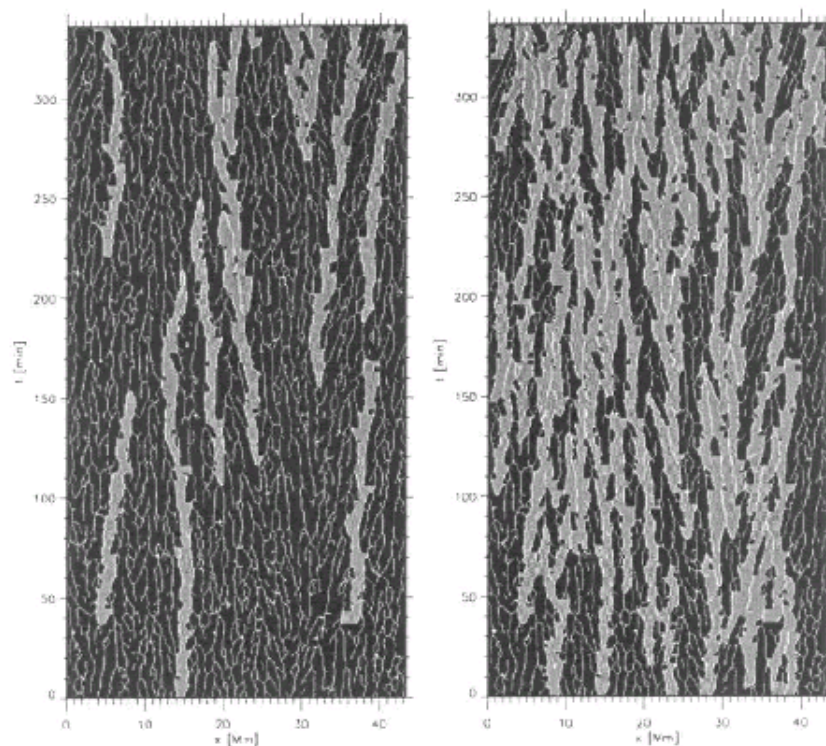
Obrázok 21. Časový vývoj explodujúcej granuly trvajúci 13.5 minúty. Veľkosť jednotlivého obrázku je 5" x 5". Podľa Hirzberger a kol. (1999).



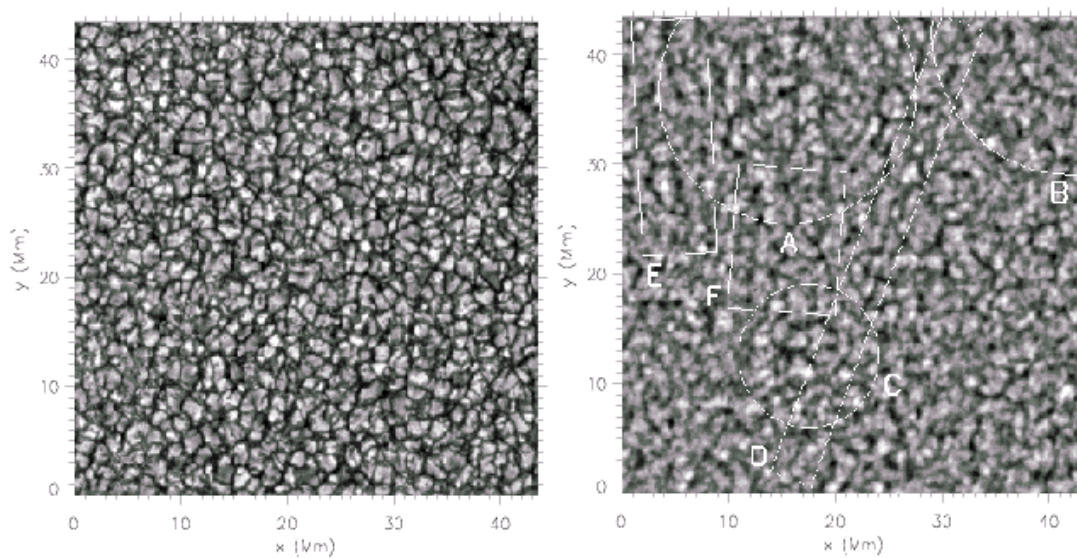
Obrázok 22. Ukážka dynamiky explodujúcej granuly. Toky v oblasti explodujúcej granuly vypočítané metódou 'local correlation tracking' sú premietnuté na snímok 166 z obr.. Dĺžka šípok znázorňuje veľkosť toku. Maximálna hodnota toku je 4.38 km/s a stredná hodnota toku je 1.17 km/s. Podľa Hürzberger a kol. (1999).



Obrázok 23. Tzv. 'time-slice' mapa zobrazujúca časový vývoj granulácie (ľavý panel). Na osi 'x' je priestorová škála v Mm a na osi 'y' je čas v minútach. Pravý panel zobrazuje 'skeleton' - kostru intergranulárneho priestoru. (tmavé miesta). Podľa Müller a kol. (2001)



Obrázok 24. 'Skeleton' - kostra pre dlhotrvajúce štruktúry 100 minút (ľavý panel) a 60 minút (pravý panel). Podľa Müller a kol. (2001)



Obrázok 25. Dlhotrvajúce zoskupenia granúl získané spriemerovaním dvojhodinového radu pozorovaní. Ľavý obrázok zodpovedá jenému snímku granulácie urobenej približne v strede dvojhodinového radu pozorovaní. Pravý obrázok ukazuje pravidelné štruktúry (kruhy, reťazce ...) vyznačené tenkými čiarami. Podľa Getling a Brandt (2002).