

Slnčná granulácia: II. Teória

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

Abstrakt:

Príspevok je venovaný výskumu granulácie s dôrazom na teoretické aspekty. V predchádzajúcom príspevku „Slnčná granulácia: I. Pozorovania“ sme zhrnuli výskum granulácie z hľadiska observačného a v tejto práci sa budeme venovať interpretácii pozorovaní a modelom podpovrchovej konvekcie a granulácie. Uvedieme historické pokusy interpretovať granuláciu na základe predstavy o turbulentnej povahe granulácie a moderný pohľad na fyzikálnu podstatu granulácie založený na interpretácii konvekcie ako základného fenoménu. Na záver budeme diskutovať najnovšie výsledky modelovania lokálneho magnetického dynama pôsobiaceho v malých intergranulárnych priestoroch.

1. ÚVOD

V príspevku „Slnčná granulácia: I. Pozorovania“ uverejnenom v minulom zborníku zo 16. celoštátneho slnečného seminára (Kučera 2002) sme sa venovali slnečnej granulácii hlavne z hľadiska pozorovateľského. Tu najprv načrtneme historický vývoj názorov na podstatu slnečnej granulácie, potom sa budeme venovať modernému prístupu pri interpretácii súčasných detailných pozorovaní slnečnej granulácie. Uvedieme základný scenár slnečnej granulácie, požiadavky na modely, základnú fyziku modelovania a prehľad niektorých vybraných výsledkov získaných v poslednom období. Budeme diskutovať aj alternatívne teórie používané pri interpretácii pozorovaní slnečnej granulácie založené na predpoklade existencie lokálneho magnetického dynama pôsobiaceho na malých priestoroch v intergranulárnych rozhraniach.

2. HISTORICKÝ PREHĽAD

Prvé pokusy „teoreticky“ vysvetliť základné vlastnosti pozorovanej slnečnej granulácie boli už v predminulom storočí, keď Scheiner (1895) vyslovil názor, že granulácia viditeľná na slnečnom povrchu reprezentuje zhľuky oblakov hromadiacich sa v kmitniach vln šíriacich sa vo fotosfére (Obr. č. 1). Je kuriózne, že Scheiner mal čiastočne pravdu, ale iba v tom, že vo fotosfére je prítomné vlnenie čo súčasná veda jednoznačne potvrdila.

K skutočnej podstate granulácie sa omnoho presnejšie priblížil Plasket (1936), ktorý interpretuje granuláciu ako pohyb plazmy v granule smerom hore a tento pohyb vysvetľuje dostatočným teplotným gradientom v podfotosférickej vrstve, ktorý podľa teórie konvekcie vedie k transportu plazmy do oblasti s nižšou teplotou, t.j. v prípade slnečného povrchu do oblastí nad slnečným povrchom.

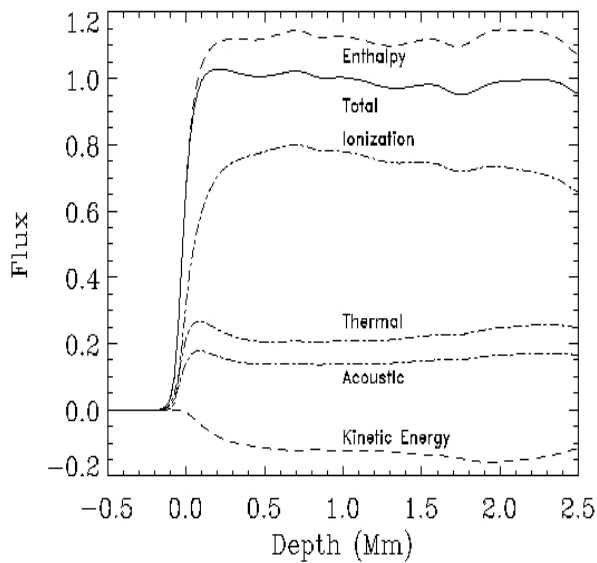
V rokoch 1940-1950 bola konvekcia už všeobecne prijatá ako základná fyzikálna koncepcia pre interpretáciu slnečnej granulácie, ale súčasne sa objavuje niekoľko prác v prospech turbulentnej podstaty granulácie (Richardson a Schwarzschild 1950, Skumanich 1955, Uberoi 1955).

Prvá etapa moderného výskumu slnečnej granulácie bola zhrnutá v monografii Bray a Loughhead, (1967), kde teoretický výklad granulácie je urobený na základe predpokladu o konvencii pôsobiacej v podpovrchových vrstvách Slnka.

Veľkým skokom dopredu v interpretácii slnečnej granulácie bola priekopnícka práca Nordlunda (1974), ktorý aplikoval tzv. „Mixing-length teóriu“ v 1D modeli slnečnej granulácie a zaviedol do výpočtov aj prienik granulácie do vyšších vrstiev fotosféry tzv. turbulentnú konvekciu. Na vysvetlenie uvedme, že model 1D (1 Dimenzia) je taký model, v ktorom sa sledované fyzikálne veličiny menia iba v jednom smere, konkrétne v závislosti na výške slnečnej atmosféry.



Obr. č. 1. Prvá „teoretická“ predstava o podstate slnečnej granulácie bola, že sú to zhľuky oblakov nad slnečným povrchom



Obr. č. 2. Ukážka zmeny niektorých fyzikálnych parametrov v granulácii na rozhraní slnečného povrchu v rozsahu výšok 3000 km (-500 km až 0 km odpovedá slnečnej fotosfére a 0 km až 2500 KM odpovedá podpovrchovým vrstvám. (Stein a Nordlund, 1998). Zjavná je prudká zmena hodnôt v rozsahu od -100 km do +100 km.

„Mixing-length teória“ je teória popisujúca premiešavanie vrstiev v slnečnom telese konvektívnymi pohybmi.

Po práci Nordlunda nasledovali v rokoch 1976 až 1978 ďalšie práce modelujúce slnečnú granuláciu v 1D modeloch, všetky bez uvažovania prenosu žiarenia v podpovrchovej vrstve, a značne sa líšiacie vo vypočítaných konvektívnych tokoch do atmosféry Slnka. (Nordlund 1976, Nelson 1978).

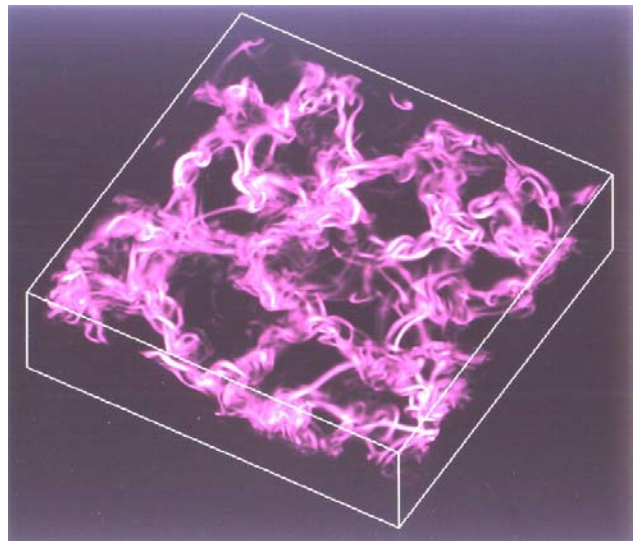
Pokrok v prístrojovej technike umožnil získavať celé časové rady kvalitných snímok granulácie na rozdiel od predchádzajúceho obdobia, keď bolo možné získať iba jednotlivé dobré snímky. Časové rady snímok tzv. „movies“ a fraktálová analýza ukázali existenciu veľkého množstva malých nepravidelných granúl, ktorých existenciu a tvar bolo možné vysvetliť iba za predpokladu zavedenia *turbulencie* pôsobiacej aspoň lokálne na malom priestore (Roudier a Muller 1986).

Prelomovým rokom v teoretickej interpretácii slnečnej granulácie bol r. 1982. Vtedy Nordlund (1982) vytvoril prvýkrát 3D modelovú časovo závislú simuláciu slnečnej granulácie bez použitia voľných parametrov, so zahrnutím prenosu žiarenia v modelovaných vrstvách avšak ešte stále za predpokladu nestlačiteľnej (non-compressible model) plazmy. Model 3D (3 Dimenzie) znamená, že fyzikálne veličiny sa v uvedenom modeli menia v závislosti na všetkých troch smeroch v slnečnej atmosfére. Základom modelu boli iba hydrodynamické rovnice a známe termodynamické parametre slnečnej plazmy, čo značne zvýšilo vierohodnosť výsledkov, pretože model nepoužíval kombinovanie voľných parametrov.

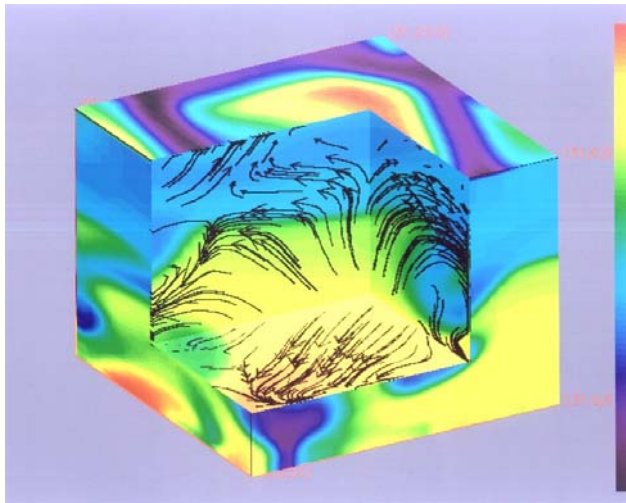
Ďalšou výzvou pre teoretickú interpretáciu slnečnej granulácie boli výsledky získané z prístroja SOUP (Solar Optical Universal Polarimeter) v r. 1985 (Title a kol. 1986). Zistila sa pomalá evolúcia granúl, expanzia granúl, fragmentácia granúl a fakt, že prítomnosť magnetického poľa významne mení štruktúru granulácie.

Dekáda rokov 1990 – 2000 bola v znamení postupného vylepšovania modelov slnečnej granulácie, závislého hlavne na možnostiach výpočtovej techniky v zmysle zvyšovania rýchlosti zložitých výpočtov a možnosti použiť detailnejšie delenie v priestorovom rozlíšení. To bolo veľmi dôležité, pretože sa dá prakticky ukázať, že pri použití správnej fyziky avšak pri nedostatočnom priestorovom rozlíšení modelovaného „bloku“ slnečnej vrstvy, získame neadekvátne výsledky. Z prác v tomto období vyplynulo, že najdôležitejšia vrstva pre modelovanie granulácie je oblasť 100 km pod slnečným povrchom, kde dochádza k prudkej zmene stratifikácie fyzikálnych parametrov (Obr. č. 2.). Vyžaduje sa aj detailné a precízne modelovanie povrchovej časti, kde zasa dochádza k prudkej zmene opacity a odtoku energie vo forme žiarenia.

V posledných rokoch 2000 - 2004 vstupujú na scénu náročnejšie 2D a 3D simulácie slnečnej granulácie, zahrnujúce rôzne efekty - žiarenie, magnetické pole, stlačiteľnosť plazmy, nehomogenity a podobne. Je snaha o väčší počet „krokov“ vo všetkých troch dimenziách t.j. zvýšenie priestorového rozlíšenia výpočtov. Modely sa tiež začínajú rozširovať v zmysle postihnúť väčšieho rozsahu výšok v slnečnej atmosfére takže zasahujú hlbšie do konvektívnej vrstvy a vyššie do chromosféry. Spomeňme niektorých hlavných protagonistov pracujúcich v danej oblasti: Asplund, Dravins, Freytag, Cattaneo, Gadun, Malagoli, Nordlund, Rast, Schüssler, Solanki, Steffen, Stein, Steiner.



Obr. č. 3. Vorticity $\omega = \nabla \times u$ t.j. lokálna komponenta rotácie v prúde plazmy. Zakrútenie reprezentuje turbulentnú povahu prúdov plazmy v intergranulárnom priestore. (Stein a Nordlund, 1998)



Obr. č. 4. Porovnanie dvoch výrazne odlišných režimov prúdenia v individuálnej granule - takmer laminárne prúdenie v centre a turbulentné na okraji. Takýto objekt nespĺňa podmienku rovnovážneho „štatistického rozdelenia turbulentných rýchlostí“. (Stein a Nordlund, 1998)

3. SCENÁR SLNEČNEJ GRANULÁCIE

Granulácia je fenomén, ktorý pozorujeme na povrchu Slnka. Vzniká pri prenikaní prúdov plazmy do stabilnej fotosféry a vykazuje dva základné režimy:

- veľkoškálové toky – zdrojom je konvekcia
- maloškálové turbulentné rýchlostné pole - zdrojom je tok v granule.

Teoretická interpretácia takéhoto javu je obtiažná, pretože v danom prostredí je veľké tzv. Reynoldsovo číslo:

$$Ry = UD/v = 10^9$$

kde, U = charakteristická rýchlosť plazmy, D = charakteristická vzdialenosť, ktorú dosahujú toky plazmy a v = kinematická viskozita. Štatistické riešenia založené na Kolmogorovovej teórii síce platia pre veľmi turbulentné prostredia (náš prípad) ale vyžaduje sa aby „štatistické rozdelenie turbulentných rýchlostí“ bolo rovnovážne (to už nie je náš prípad), pretože v inergulárnom priestore je extrémne veľká turbulencia a v granule je zanedbateľná turbulencia pretože v nej prevládajú laminárne toky (viď Obr. č. 3. a 4.).

Hlavnou príčinou disipácie najmenších turbulentných pohybov je viskozita. Viskózný koeficient je určený vzťahom:

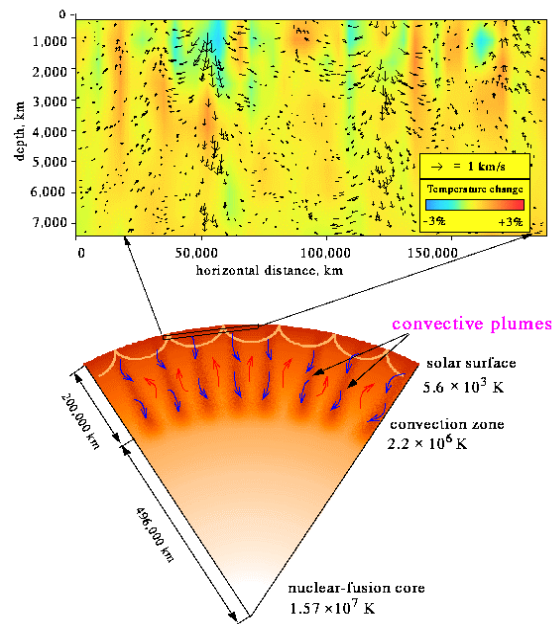
$$\eta = 2a Nmvl$$

alebo

$$\eta = K T^{1/2} / (\sigma m^{1/2})$$

kde, a , K = normovacie konštanty, Nm = je koncentrácia častíc, v = rýchlosť, l = stredná volná dráha častíc, T = teplota a σ = zrážkový prierez. Určiť viskozitu v danom prostredí je náročné vzhľadom na veľké množstvo prvkov s rôznym η a na čiastočnú ionizáciu prostredia.

Od najmenších turbulentných pohybov, ktoré sú utlmované v dôsledku viskózneho prostredia v granulácii existuje prepojenie až po globálne konvektívne pohyby na Slnku (viď Obr. č. 5). Schéma je nasledovná:

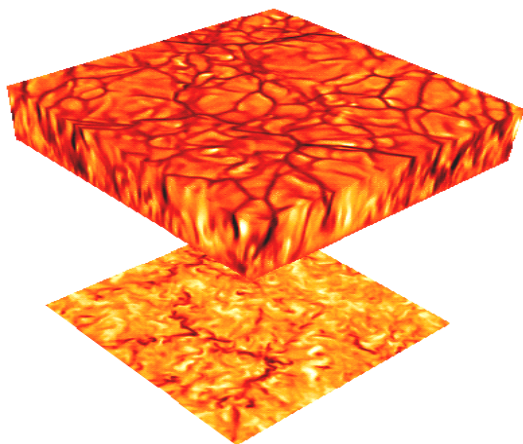


Obr. č. 5. Ukážka komplexnosti prepojenia granulácie na globálne pohyby slnečného telesa. Helioseizmologické meranie konvektívnych tokov pod slnečným povrchom na základe pozorovaní vykonaných na družici SOHO prístrojom MDI. Malá časť podpovrchovej oblasti (do hĺbky 7 km) vyznačená na dolnej časti obrázku je zväčšená v hornej časti obrázku.

a) Najmenšie turbulentné pohyby sú neustále utlmované - likvidované viskozitou a nové maloškálové turbulentné pohyby sú vytvárané kaskádnym „riedením“ kinetickej energie odoberanej z väčších turbulentných elementov. Tak ostáva „stopa“ maloškálovej turbulencie vo veľkoškálovej a na základe tzv. pseudo-viskozity (Eddyho viskozita, kde už – zjednodušene povedané – nepotrebujeme podmienku rovnovážneho štatistického rozdelenia turbulentných rýchlostí) môžeme čiastočne určiť aj podmienky maloškálovej turbulencie, priamo nedostupnej.

b) Veľkoškálová turbulencia je vytváraná „riedením“ konvektívnej kinetickej energie prinášanej z väčších hĺbok konvekciou do oblasti pod granuláciou (granulárna konvekcia), viď obr. č. 6.

c) Konvektívna kinetická energia je čerpaná z klasickej hviezdnej konvekcie, rotácie, meridiónej cirkulácie a magneto-konvekcie. Dostávame sa tak k priamemu prepojeniu najmenších pohybov na povrchu Slnka až po globálne pohyby celého slnečného telesa



Obr. č. 6. Prepojenie hornej - viditeľnej časti granulácie s hlbšími vrstvami pod povrchom. Model prúdenia plazmy v granulácii (Malagoli a Cattaneo). Tmavé miesta reprezentujú zostupné prúdy a jasné miesta výstupné prúdy plazmy. Spodná plocha ukazuje stav prúdenia v dolnej časti zobrazenej domény. „Priestorové rozlíšenie“ výpočtu bolo $192 \times 192 \times 56$ bodov.

4. POŽIADAVKY NA MODELÝ GRANULÁCIE

Realistické modelovanie slnečnej granulácie musí spĺňať viaceré základné podmienky:

a) **Hustotná stratifikácia:** Výška granule je 5-10 krát menšia ako jej horizontálny rozmer. Jedná sa teda o veľmi plytký objekt a z toho vyplýva veľmi asymetrické prúdenie plazmy v ňom. Je odlišné smerom hore, smerom do strán a smerom dole.

b) **Prenos žiarenia:** Extrémny nárast opacity s výškou spôsobuje, že výmena tepla žiarením je dominantná vo veľmi úzkej oblasti (100 km). Žiarivé straty z tejto oblasti určujú teplotný rozdiel medzi vzostupnými a zostupnými prúdmi.

c) **Opacity a stavová rovnica:** Určenie opacít a termodynamických vlastností čiastočne ionizovaného plynu musia byť blízke realite aby správne odzrkadľovali výmenu energie medzi plynom a žiarením.

d) **Priestorová geometria modelu:** Musia byť použité minimálne 2D a 3D modely, pretože reálne deje na Slnku nemajú priestorovú symetriu ani časové periodicity. To znamená, že zmeny stavových fyzikálnych veličín vypočítané v jednom smere nemôžeme aplikovať v iných smeroch a taktiež nie je možné vypočítať krátky časový vývoj granulácie

a jednoducho ho v čase opakovať. Komplexná priestorová štruktúra a chaotické chovanie je typické v danej oblasti. Modelová doména musí byť dostatočne veľká v porovnaní s rozmerom granule a priestorový krok výpočtu musí byť dostatočne malý na postihnutie maloškálových procesov.

e) **Magnetické pole:** Zahrnutie magnetického poľa do výpočtov prináša realistickejší pohľad na magneto-hydrodynamiku prúdenia plazmy a na vznik rázových vln a šokov v granulácii. Na druhej strane, zahrnutie magnetického poľa do výpočtov komplikuje výpočet a extrémne predlžuje čas výpočtu.

f) **Volné parametre:** Je potrebné používať minimum volných parametrov vstupujúcich do rovníc a minimum volných parametrov vstupujúcich do modelov. Realistickejšie sú výsledky získané na základe fyziky používajúc iba hydrodynamické rovnice a známe termodynamické parametre slnečnej plazmy.

g) **Pozorovacie dáta:** Používať pre interpretáciu najnovšie dáta získané s veľkým priestorovým, časovým a spektrálnym rozlíšením.

5. ZÁKLADNÁ FYZIKA MODELOVANIA

Modelovanie slnečnej granulácie je mimoriadne náročné z hľadiska fyzikálneho, matematického aj počítačového. Základom výpočtov je tzv. „Mixing-length theory“ a fluidná dynamika resp. magneto-hydrodynamika. Detailný popis matematických rovníc a fyziky používanej pre modelovanie slnečnej granulácie presahuje rámec tohto príspevku a preto spomenieme len základné atribúty. V rámci „Mixing-length“ teórie sa predpokladá, že konvekcia presúva elementy s prebytkom energie do fotosféry, tieto stúpajú do určitej výšky (tzv. Prandtlova mixing length) a potom elementy po odovzdaní energie okoliu, disipujú. Boli rozpracované detailnejšie scenáre premiešavania hmoty konvekciou aby vysvetlili celú cirkuláciu hmoty v premiešavacom cykle. Schéma použitia základných rovníc a zákonov fluidnej magneto-hydrodynamiky je nasledovná:

Zákony zachovania:

Hmotnosti	}	} → (Navier - Stokesova rovnica)
Momentu	}	
Energie	}	} → (Indukčná rovnica)
Magnetických tokov	}	
Fotónov	}	} → (Rovnica prenosu žiarenia)

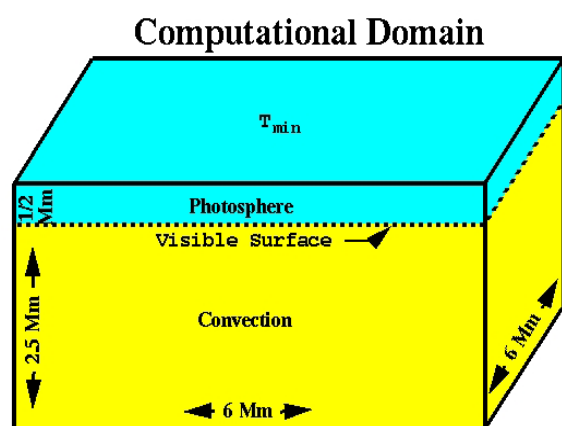
Transport energie

Pohybom prostredia	} →	{	Viskozita	
Pohybom molekúl				Difúzia
Žiarením				Kondukcia

Pre reálne výpočty modelov slnečnej granulácie na základe vyššie uvedených požiadaviek, je potrebné vždy nájsť optimálny kompromis medzi zjednodušením základných východných predpokladov, komplikovanosťou výpočtu a dobou jeho reálneho uskutočnenia.

Všetky doterajšie 3D výpočty sú napríklad robené v rámci LTE (Local Thermodynamic Equilibrium) t.j. za predpokladu lokálnej termodynamickkej rovnováhy, aj keď sa reálne prostredie od tohto stavu líši.

Dôležitú úlohu vo výpočtoch hrá aj správne stanovenie tzv. okrajových podmienok, t.j. stavu prostredia na hranici počítanej domény slnečnej granulácie a pokračujúceho okolia, kam už výpočty nezasahujú. V ďalšom si ukážeme niektoré dôležité výsledky simulácií slnečnej granulácie.



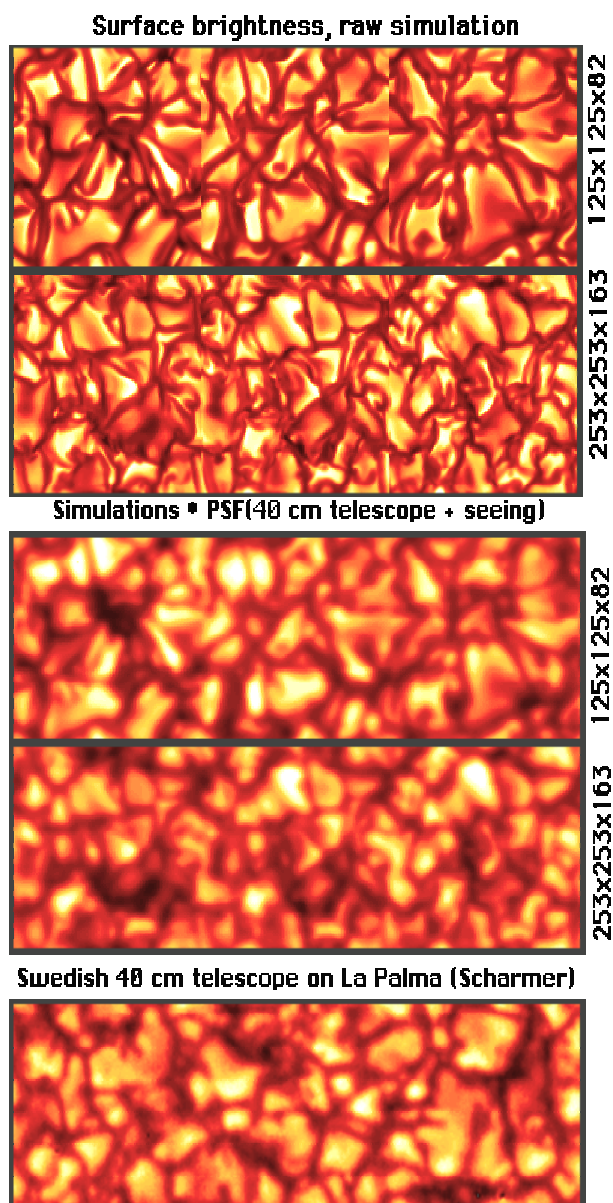
Obr. č. 7. Modelová doména použitá v práci Stein R.F., Nordlund A.(1998) pre simuláciu slnečnej granulácie. Tmavšia časť reprezentuje 500 km hrubú oblasť, nachádzajúcu sa nad viditeľným povrchom Slnka, siahajúcu do oblastí teplotného minima vo fotosfére

6. VÝSLEDKY MODELOVANIA SLNEČNEJ GRANULÁCIE

Uvedené sú len vybrané výsledky z celej škály modelovania 2D a 3D hydrodynamických modelov, semi-empirických modelov granulácie urobených na základe interpretácie pozorovaní spektrálnych čiar vo fotosfére a na záver je uvedený príklad rozpracovanej teórie lokálneho magneto-dynama pôsobiaceho priamo v inter-granulárnom priestore.

(1) Simulácia slnečnej granulácie – základné charakteristiky.

V tejto časti uvádzame výsledky práce - Stein a Nordlund (1998). Simulácia je robená pre 3D v rámci LTE, modelovaná doména má „vzorkovanie“ $125 \times 125 \times 82$, s krátkym detailnejším „vzorkovaním“ $253 \times 253 \times 163$ bodov. Tomu zodpovedá rozmer $6000 \times 6000 \times 3000$ km, pričom výškový rozmer 3000 km zasahuje 2500 km pod viditeľný povrch Slnka a 500 km do fotosféry t.j. do oblastí teplotného minima. V horizontálnom smere autori použili trojnásobné periodické opakovanie

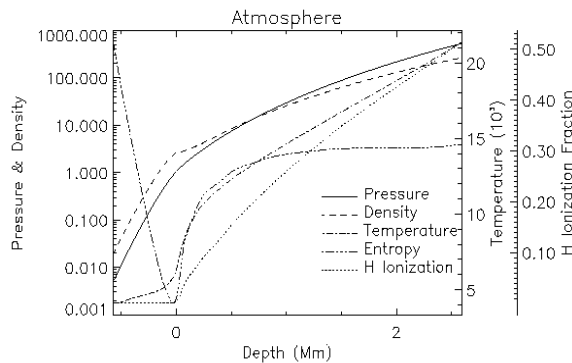


Obr. č. 8. Intenzity (svetlejšie = väčšia intenzita) vystupujúceho žiarenia v granulácii. Prvý panel zhora znázorňuje vypočítanú teoretickú intenzitu pre doménu s menším priestorovým rozlíšením, druhý panel pre väčšie priestorové rozlíšenie. Ďalšie dva panely ukazujú ako by sme mali teoretické intenzity z predchádzajúcich panelov pozorovať v reálnych podmienkach ďalekohľadom s priemerom zrkadla 40 cm, „pokazené“ seingom, t.j. turbulenciou vzduchu. Na spodnom panely sú reálne pozorovania slnečnej granulácie získané švédskym 40 cm slnečným ďalekohľadom na La Palme.

výpočtov aby znížili komplikovanosť výpočtov a daným „vzorkovaním“ detailnejšie pokryli doménu. Modelovaná doména je na Obr. č. 7. Výsledky sú uvedené na obrázkoch č. 8 – 12.

Na Obr. č. 8 je porovnaná intenzita žiarenia a tvar vypočítanej granulácie s pozorovaniami. Pre možnosť porovnania vypočítaných fluktuácií intenzity žiarenia s pozorovaním, museli byť teoretické výsledky „pokazené“ aby sa simuloval reálny vplyv seingu – turbulencie vzduchu a vplyv samotného ďalekohľadu.

Na Obr. č. 9 sú uvedené niektoré fyzikálne parametre získané z modelov, ktoré je možné následne porovnávať s pozorovaniami.

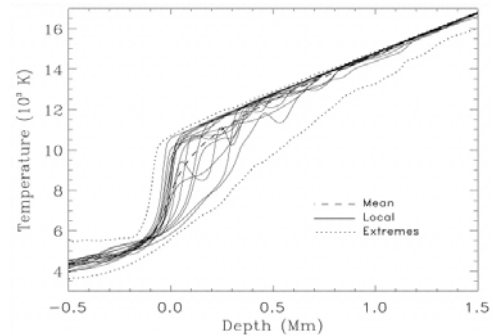


Obr. č. 9. Závislosť základných fyzikálnych veličín na výške v slnečnej granulácii vypočítaná v modeli. Na osi x je hĺbka od -2500 km pod povrchom po +500 km v atmosfére. Na osi y je na ľavej strane logaritmická škála tlaku a hustoty a na pravej strane škála teplôt a pomernej ionizácie vodíka (H). Vidíme, že tlak (pressure), hustota (density), teplota (temperature) a ionizácia vodíka klesajú smerom k povrchu Slnka a teplota dosahuje práve v +500km minimum. Entropia po poklese smerom k povrchu následne vo fotosfére prudko narastá. Reálne merania potvrdzujú takéto chovanie uvedených fyzikálnych veličín.

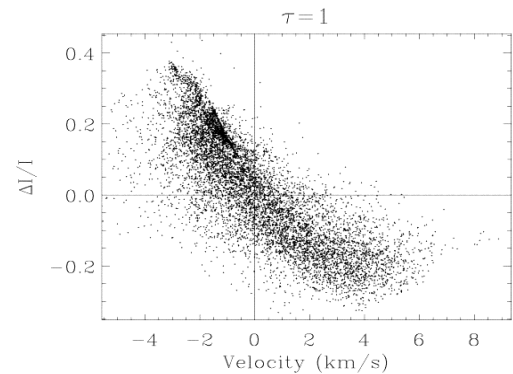
Zatiaľ čo na Obr. č. 9 je uvedený priemerný priebeh teploty z celej domény, na Obr. č. 10 je okrem neho aj detailný priebeh z jednotlivých miest a taktiež sú uvedené maximálne a minimálne priebehy teploty nájdené v niektorom mieste počítanej domény. Takéto údaje je možné porovnať z hodnotami získanými zo semiempirických modelov slnečnej granulácie urobených na základe spektrálnych pozorovaní s veľkým priestorovým rozlíšením.

Na Obr. č. 11 je vypočítaná modelová závislosť medzi fluktuáciami intenzity kontinua ($\Delta I/I$) a rýchlosťou plazmy v km/s pre jednotlivé miesta domény v oblasti optickkej hĺbky $\tau = 1$. Závislosť ukazuje, že miesta s kladnou rýchlosťou (t. j. smerom do vnútra Slnka) odpovedajú miestam, ktoré sú tmavšie (ich intenzita kontinua je menšia ako priemerná - záporné hodnoty v grafe) a miesta so zápornými rýchlosťami (t. j. smerom zo Slnka) odpovedajú miestam kde je intenzita väčšia ako priemerná. To je v súlade s všeobecnou predstavou, že horúca - jasnejšia plazma prúdi hore v centrách granúl a chladnejšia menej jasná plazma padá späť pod slnečný povrch na

okrajoch granúl v tzv. inter-granulárnom priestore. Podobná závislosť bola zistená aj v reálnych pozorovaniach, iba rozsah rýchlostí (od +1 km/s do -1 km/s) a intenzitných fluktuácií (od +0.2 $\Delta I/I$ do -0.2) $\Delta I/I$ bol nižší v dôsledku nedostatočného priestorového



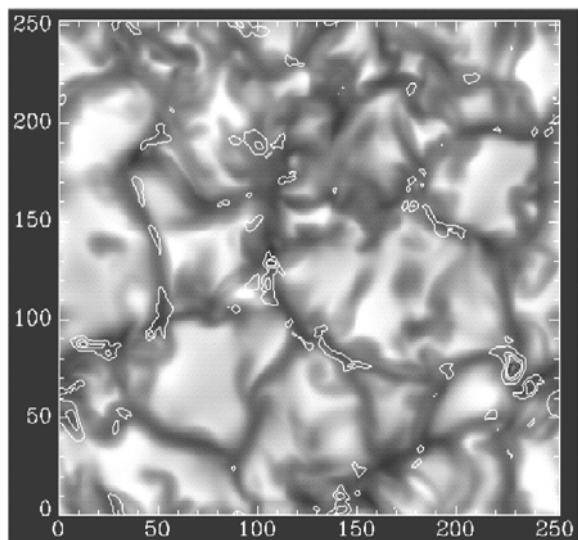
Obr. č. 10. Uvedený je priemerný priebeh teploty z celej domény (čiarkovane) totožný s priebehom na Obr. č. 9. a detailný priebeh z vybraných miest domény (plné čiary) a taktiež sú uvedené maximálne a minimálne priebehy teploty nájdené v niektorom mieste počítanej domény



Obr. č. 11. Teoretická závislosť medzi fluktuáciami intenzity kontinua ($\Delta I/I$) a rýchlosťou plazmy v km/s (čiarkovane) pre jednotlivé miesta domény v oblasti optickkej hĺbky $\tau = 1$. Škála hĺbok (os x) pokrýva rozmedzie od -1500 km pod povrchom do +500 km v atmosfére Slnka.

rozlíšenia pri pozorovaniach

Pri modelovaní chovania plazmy v intergranulárnom priestore sa zistilo, že v niektorých miestach sa vyskytujú veľmi veľké rýchlosti prúdenia plazmy smerom pod slnečný povrch. Rýchlosť prúdu plazmy je vyššia ako rýchlosť zvuku v danom prostredí, takže dochádza k rázovým vlnám – šokom, ktoré lokálne zahrejú plazmu práve v intergranulárnom priestore. Tieto miesta sú veľmi malé ale mali by byť pozorovateľné ako miesta so zvýšenou intenzitou kontinua pri dostatočne veľkom priestorovom rozlíšení. Obr. č. 12 znázorňuje uvedený modelový príklad.



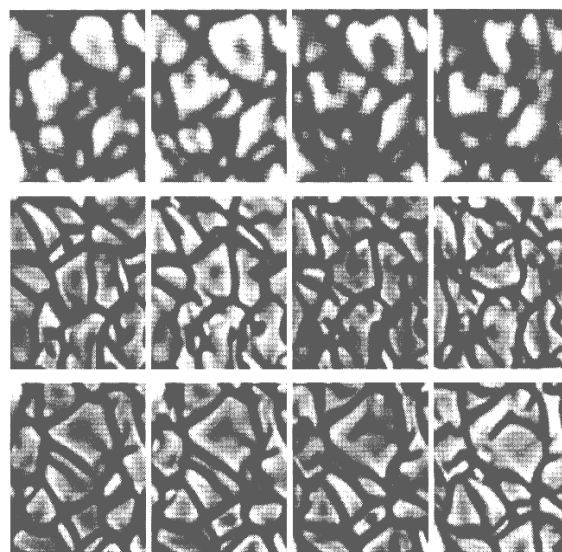
Obr. č. 12. Povrch modelovanej domény granulácie s vyznačenými miestami (svetlé kontúry), kde rýchlosť prúdenia plazmy smerom do Slnka dosahuje nadzvukové rýchlosti a môže tu dochádzať k rázovým vlnám – šokom.

(2) Simulácia expanzie granúl.

Pozorovania časových radov vývoja granúl postavili pred teoretikov nové úlohy v modelovaní „exotického“ chovania granúl ako je ich expanzia, spájanie a delenie. Tu si uvedieme príklad modelovania expanzie granúl z práce Rast (1995). Podobným spôsobom ako v predchádzajúcej práci, je modelovaná doména a úprava fyzikálnych podmienok je ovládaná hlavne volným parametrom ionizácie vodíka. Ukazuje sa, že už malá ionizácia vodíka (10 – 15 %) výrazne vplyva na veľkosť tvorených granúl čím sa dá modulovať zmena veľkosti v granule v časovom vývoji. Na Obr. č. 13. je porovnaný teoretický vývoj expandujúcej granule s reálnym pozorovaním.

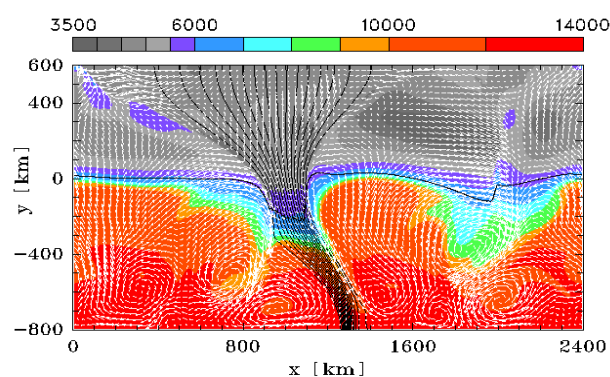
(3) Modely granulácie 2D so zahrnutím magnetického poľa

Steiner a kol. (1998) simulovali granulárnu konvekciu so zahrnutím magnetického poľa. Kompromisom bolo upustenie od plnej 3D simulácie a prechod na 2D. Napriek tomu, zahrnutie magnetického poľa prinieslo nové výsledky, hlavne predpoveď ďalších druhov rázových vln spôsobených pohybom a nestabilitou magnetických silotrubíc ukotvených v intergranulárnom priestore. Práca tiež priniesla predpovede tvaru spektrálnych čiar formujúcich sa v miestach pôsobenia rázových vln a šokov. Na Obr. č. 14 je znázornený rez granuláciou pre jeden časový okamih z numerickej simulácie 2D časového vývoja. Obrázok reprezentuje plochu širokú 2400 km (približne dve granule a jeden intergranulárny priestor) a vysokú 1400 km začínajúcu 800 km pod



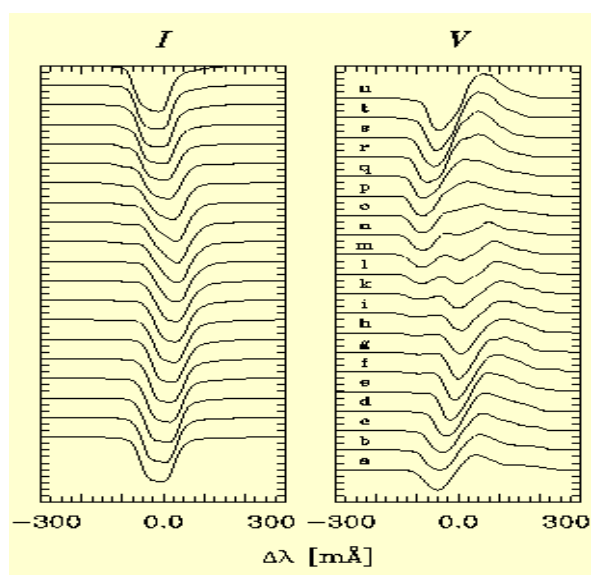
Obr. č. 13. Príklad expandujúcej granule. V hornom rade je štvorminútová časová séria pozorovaní expandujúcej granule v kontinuu, interval medzi snímkami je jedna minúta a priestorový rozmer jednotlivého políčka je 7x7 oblúkových sekúnd. Stredný a dolný rad reprezentuje výsledky numerickej simulácie. Jednotlivé políčka majú rozmer 8x8 oblúkových sekúnd a časový interval medzi nimi je 2 minúty.

slniečnym povrchom a končiacu v 600 km výške v slnečnej atmosfére. Magnetická silotrubica v intergranulárnom priestore sa pohybuje pod vplyvom pohybu plazmy prúdiacej z centra granúl a pohyb silotrubice do strán spôsobuje spätné rázové vlny a šoky. Príklad porušenia spektrálnych profilov (Stokes I a V) pre spektrálnu čiaru FeI 525.02 nm je na Obr. č.



15

Obr. č.14. Rez granuláciou pre jeden časový okamih z numerickej simulácie 2D časového vývoja. Obrázok reprezentuje plochu širokú 2400 km a vysokú 1400 km. Rôzne úrovne šedi odpovedajú rôznym teplotám a silotrubica ukotvená v intergranulárnom priestore je vyznačená plnými čiarami.



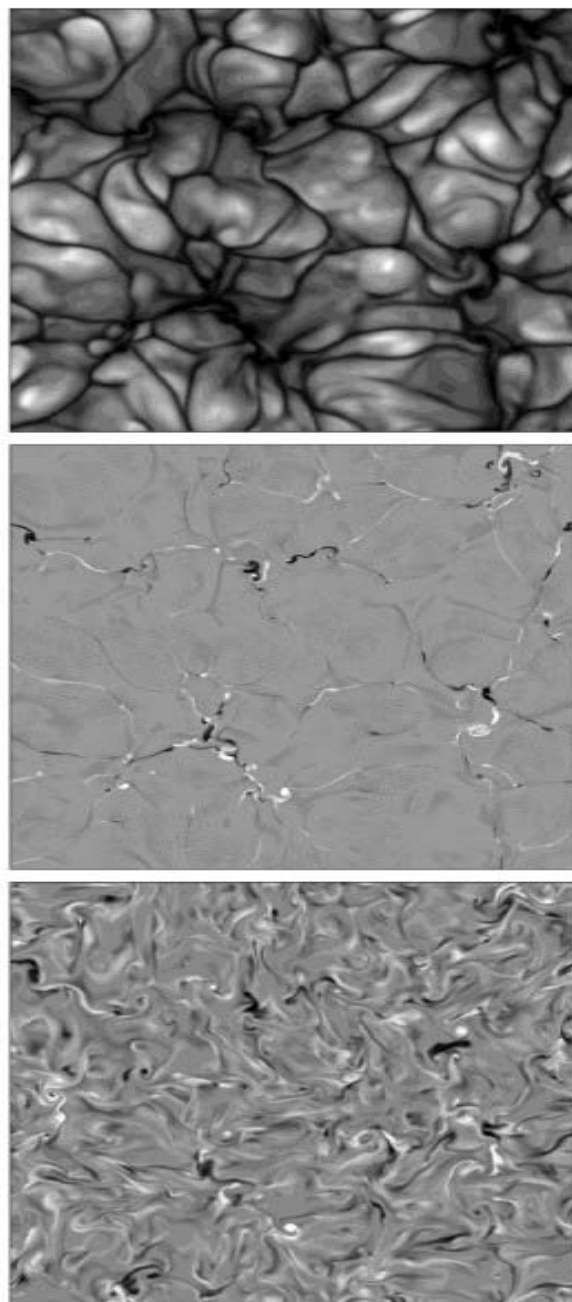
Obr. č. 15. Teoretické profily I a V spektrálnej čiary Fe I 525.02 nm. Jednotlivé písmená „a“ až „u“ odpovedajú jednotlivým časovým okamihom simulácie. Jasne je vidieť deformácia profilu spektrálnej čiary pod vplyvom šíriaceho sa šoku.

(4) Modely lokálneho intergranulárneho magnetodynamika

Posledným príkladom, ktorý uvedieme je výsledok získaný zo simulácií založených na predpoklade existencie lokálneho dynamia pôsobiaceho v intergranulárnom priestore, kde je koncentrované magnetické pole dopravené sem pohybom plazmy s centrálnych častí granúl. (Cattaneo 1999). Modelovaná doména granulácie mala rozmer 512x512x97 bodov. Výsledky modelovania sú na Obr. č. 16, kde je ukázaná intenzita a magnetické pole blízko slnečného povrchu a magnetické pole pod povrchom.

ZÁVER

Teoretická interpretácia slnečnej granulácie prešla za posledné dve storočia zložitým vývojom a dlho trvalo, kým sme porozumeli základnej fyzike tohto komplexného fenoménu. V súčasnosti sa domnievame, že už poznáme základnú fyziku slnečnej granulácie, ale modelové vysvetlenie všetkých pozorovaných vlastností granulácie ešte zďaleka nie je vyhovujúce. Najviac nám komplikuje situáciu zložitost' matematického aparátu a stále obmedzené výpočtové kapacity aj tých najvýkonnejších počítačov. Neopakovateľnosť javov v granulácii ako v čase tak aj v priestore je najväčším problémom pri snahe zjednodušiť si východzie podmienky pri výpočtoch a klásť určité obmedzenia na používanú fyziku. V príspevku neostal priestor na spomenutie všetkých, ktorí sa výskumu a problematike slnečnej granulácie



Obr. č. 16. Dvojrozmerná ukážka teplotných fluktuácií (horný panel) a fluktuácií kolmej zložky magnetického poľa (stredný panel) na povrchu granulácie ako výsledok modelovania lokálneho magnetického dynamia. Dolný panel znázorňuje fluktuácie kolmej zložky magnetického poľa vo vrstve pod slnečným povrchom. Porovnaním prvých dvoch panelov je zrejme, že miesta s väčším magnetickým poľom odpovedajú miestam s chladnejšou intergranulárnou plazmou. To že dynamo pracuje naozaj iba lokálne potvrdzuje tretí panel, kde je síce možné nájsť určitú stopu zo štruktúry povrchového magnetického poľa, ale celkový obraz je výrazne odlišný

venujú a ktorých práca prispela k dnešnému modernému pohľadu na podstatu slnečnej granulácie.

Po úspešnom uvedení pripravovaného 4-m slnečného ďalekohľadu ATST do prevádzky, ktorý odhalí ďalšie jemné detaily slnečnej granulácie, určite vyvstanú pred teoretikmi nové úlohy pri interpretácii a modelovaní jedného s najviac pozorovaných slnečných fenoménov – slnečnej granulácie.

LITERATÚRA

- Bray R.J., Loughhead L.E.: 1967, *The Solar Granulation*, London, Chapman a Hall
- Cattaneo F.: 1999, *Ap.J.* **515**, L39
- Kučera A. : 2002, Zborník referátov zo 16. Celoštátneho slnečného seminára, Turčianske Teplice, 2002, ed. I. Dorotovič, SÚH Hurbano-vo, 25
- Nelson G.D.: 1978, *Ap.J.*, **238**, 659
- Nordlund A.: 1974, *Astron. Astrophys.*, **32**, 407
- Nordlund A.: 1976, *Astron. Astrophys.*, **50**, 23
- Nordlund A.: 1982, *Astron. Astrophys.*, **107**, 1
- Plasket H.H.: 1936, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, **96**, 402
- Rast M.P.: *Ap.J.* 1995, **443**, 863
- Richardson R.S., Schwarzschild M.: 1950, *Ap.J.*, **111**, 351
- Roudier Th. Muller R.: 1986, *Sol. Phys.*, **107**, 11
- Scheiner J.: 1895, *Ap.J.* **2**, 77.
- Skumanich A.: 1955, *Ap.J.*, **121**, 404
- Stein R.F., Nordlund A.: 1998, *Ap. J.*, **499**, 914–933,
- Steiner O., Grossman-Doerth U., Knölker M., Schüssler M.: 1998, *Ap.J.*, **495**, 468
- Title A.M., Tarbel T.D., Simon G. and the SOUP Team: 1986, *Adv. Space. Res.*, **6(8)**, 55
- Uberoi M.S.: 1955, *Ap.J.*, **122**, 466